UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN ESTOCÁSTICA DE HUECOS
DE TENSIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS:
ESTUDIO DE SENSIBILIDAD, ESTIMACIÓN DE ÍNDICES Y
LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES.**

AUTOR: Renán Xavier Zambrano Aragundy
Máster en Ingeniería Eléctrica

DIRECTORA: Araceli Hernández Bayo
Doctora Ingeniera Industrial

Febrero 2016

*“Aquel que dice que puede,
como aquel que dice que no,
ambos tienen razón”.*

Confucio, 551 a. C. - 479 a. C.

Agradecimiento

Un especial agradecimiento a mi directora de tesis, la Dra. Araceli Hernández Bayo, quien ha sido un baluarte fundamental para el desarrollo de la presente tesis doctoral.

Su generosidad y ejemplo serán siempre recordados con profunda admiración.

A mis padres, Laura y José, que son los ángeles que Dios me dio y a los que debo todas las bendiciones y logros recibidos. A mi hermana Silvia, por su compañía y apoyo. A mi tíos Zaida y Salomón, a los cuales considero figuras paternas y que siempre me respaldaron para obtener esta meta.

A los profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica, por el esmero y gentileza de las clases impartidas. En especial para Rosa y Mohamed por ser parte del equipo de investigación.

Al Gobierno del Ecuador que mediante la beca de la Secretaría Nacional de Educación Superior (SENESCYT) me financió el desarrollo del programa de doctoral. A los directivos de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC-EP, en especial a la unidad de negocio TRANSELECTRIC por todo el respaldo brindado.

Índice general

Índice de figuras	5
Índice de tablas	10
Acrónimos	14
1. Planteamiento y estructura de la tesis	17
1.1. Planteamiento de la tesis	17
1.2. Objetivos de la tesis	18
1.3. Estructura de la tesis	19
2. Fundamentos y trabajos previos	21
2.1. Introducción	21
2.2. Estructura	21
2.3. Fundamentos de los huecos de tensión	22
2.3.1. Definición	22
2.3.2. Caracterización	24
2.3.3. Origen	25
2.3.4. Efectos	25
2.3.5. Mitigación	28
2.3.6. Monitorización de los huecos de tensión	28
2.4. Índices para evaluar la severidad de los huecos de tensión	30
2.4.1. Tipos de índices	30
2.4.2. Índices de evento	30
2.4.3. Índices de sitio	31
2.4.4. Índices de sistema	35
2.5. Estimación de huecos de tensión en ausencia de medidores	36
2.5.1. Método de distancias críticas	37
2.5.2. Método de posiciones de fallo	37
2.5.3. Método de función de densidad de probabilidad	39
2.5.4. Método de Monte Carlo	40
2.6. Estimación de huecos de tensión a partir de medidas previas	43
2.6.1. Estimación de huecos considerando mediciones de una red radial	43
2.6.2. Estimación de huecos considerando datos estadísticos y mediciones	44
2.6.3. Estimación de estado de huecos de tensión	45
2.7. Localización óptima de medidores de huecos de tensión.	46
2.7.1. Localización óptima de medidores considerando fallos equilibra- dos en nudos.	47

2.7.2. Localización óptima de medidores considerando fallos equilibrados y desequilibrados en nudos y líneas.	48
3. Predicción de huecos de tensión en ausencia de medidas y estudio de sensibilidad	51
3.1. Introducción y estructura del capítulo	51
3.1.1. Introducción	51
3.1.2. Estructura del capítulo	52
3.2. Algoritmo de predicción de huecos de tensión	52
3.2.1. Antecedentes	53
3.2.2. Método de Monte Carlo	53
3.2.3. Parametrización de las variables de entrada del PEHT	55
3.2.4. Modelo analítico del PEHT	64
3.2.5. Parametrización estocástica de las variables de salida	66
3.2.6. Implementación del algoritmo	66
3.3. Análisis de sensibilidad de los huecos de tensión	67
3.3.1. Antecedentes	67
3.3.2. Fundamentos del análisis de sensibilidad	68
3.3.3. Planteamiento del análisis de sensibilidad en el estudio de los huecos de tensión	71
3.3.4. Formulación del análisis de sensibilidad en el estudio de los huecos de tensión	72
3.4. Resultados	77
3.4.1. Aplicación del PEHT en el diagnóstico de severidad de los huecos de tensión	78
3.4.2. Análisis de sensibilidad aplicado al estudio de la severidad de los huecos de tensión	83
3.5. Conclusiones del capítulo	96
4. Estimación de huecos de tensión a partir de un conjunto limitado de mediciones	99
4.1. Introducción y estructura del capítulo	99
4.1.1. Introducción	99
4.1.2. Estructura	100
4.2. Visión general del método propuesto de estimación de huecos de tensión	100
4.3. Correlación de medidas de huecos de tensión en los sistemas eléctricos .	101
4.3.1. Aplicación del coeficiente de correlación a medidas de huecos de tensión	103
4.4. Estimación probabilística de huecos de tensión mediante el filtrado Bayesiano	109
4.4.1. Probabilidad condicional	109
4.4.2. Filtrado Bayesiano	111
4.5. Casos de estudio	116
4.5.1. Caso 1: Influencia del área de correlación en la estimación del PEHT+MP	117
4.5.2. Caso 2: Influencia del número de medidores en la estimación del PEHT+MP	123
4.5.3. Caso 3: Efecto del nivel de carga de la red en la estimación del PEHT+MP	130

4.5.4. Caso 4: Estimación del PEHT+MP bajo condiciones severas de fallos en un elemento del sistema	131
4.6. Conclusiones	136
5. Localización óptima de medidores de huecos de tensión	139
5.1. Introducción y estructura del capítulo	139
5.1.1. Introducción	139
5.1.2. Estructura	140
5.2. Planteamiento general de los métodos propuestos de localización óptima de medidores	140
5.3. Localización óptima de medidores mediante el criterio de observabilidad	141
5.3.1. Antecedentes	141
5.3.2. Aspectos generales del método de localización óptima mediante el criterio de observabilidad	143
5.3.3. Bootstrap	144
5.3.4. Matriz de huecos de tensión de la red	146
5.3.5. Función objetivo del criterio de observabilidad	148
5.3.6. Probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores	149
5.3.7. Implementación y validación del algoritmo LOM+OBS	150
5.4. Localización óptima de medidores mediante el criterio del área de correlación	152
5.4.1. Función objetivo del criterio del área de correlación	152
5.4.2. Desarrollo del algoritmo LOM+COR	155
5.5. Resultados	157
5.5.1. Evaluación del método LOM+OBS	158
5.5.2. Evaluación del método LOM+COR	161
5.5.3. Comparación de los métodos propuestos	163
5.6. Conclusiones	164
6. Conclusiones y trabajos futuros	167
6.1. Conclusiones	167
6.2. Trabajos futuros	170
Bibliografía	173
Apéndice	179
A. Apéndice del capítulo 2	181
A.1. Ecuaciones para el análisis de cortocircuitos	181
A.2. Datos de las redes de prueba	183
A.2.1. Red IEEE-24	183
A.2.2. Red IEEE-118	187
A.2.3. Red EC-357	198
A.2.4. Índices de sitio de la red IEEE-118	199
A.2.5. Índices de sitio de la red EC-357	200
A.3. Implementación del programa de estimación de huecos de tensión (PEHT)	202
A.4. Ecuaciones para el cálculo del ANOVA	207

B. Apéndice del capítulo 3	211
B.1. Análisis de sensibilidad	211
B.1.1. Gráficas del análisis de sensibilidad aplicado a la red IEEE-118 .	211
B.1.2. Gráficas del análisis de sensibilidad aplicado a la red EC-357 . .	217
C. Apéndice del capítulo 4	223
C.1. Correlación de medidas de huecos de tensión	223
C.1.1. Coeficiente de correlación de Spearman	223
C.2. Área de correlación de la red IEEE-118	225
C.2.1. Correlación del índice SARFI-90	225
C.2.2. Correlación del índice SARFI-70	225
C.3. Área de correlación de la red EC-357	226
C.3.1. Correlación del índice SARFI-90	226
C.3.2. Correlación del índice SARFI-70	227
D. Apéndice del capítulo 5	229
D.1. Localización óptima de medidores de huecos de tensión	229
D.1.1. Respuestas obtenidas por el algoritmo LOM+OBS (criterio de observabilidad)	229

Índice de figuras

2.1. Definición de hueco de tensión según CEI 61000-2-8.	23
2.2. Definición de hueco de tensión según IEEE-1159.	23
2.3. Caracterización tensión-duración de los huecos de tensión.	25
2.4. Curva de compatibilidad ITIC.	26
2.5. Curvas de compatibilidad CEI 61000-4-11 (clase 2 y 3).	27
2.6. Curva de compatibilidad SEMI-F47.	28
2.7. Simulación de un registro típico de hueco de tensión producto de un fallo monofásico.	29
2.8. Descripción alternativa de un hueco de tensión.	31
2.9. Método de distancias críticas: modelo de red radial.	37
2.10. Método de posición de fallos: línea con 5 posiciones de fallo.	39
2.11. Modelo esquemático del método de Monte Carlo.	41
2.12. Red tipo radial.	44
2.13. Perfil de tensiones.	44
2.14. Perfil normalizado de tensiones.	44
2.15. Área de alcance de una red mallada.	45
3.1. Esquema genérico de la técnica de Monte Carlo.	54
3.2. Generación aleatoria de C_f con una tasa de fallo 1.5 fallos/año durante un periodo de 200 años.	57
3.3. Generación aleatoria de 200 observaciones de la variable Z_f	60
3.4. Diagrama esquemático de la variable localización del fallo.	61
3.5. Modelo esquemático del tiempo despeje del sistema de protecciones.	63
3.6. Ejemplo de generación aleatoria de 200 observaciones del tiempo de despeje en barras que operan a 132 kV.	63
3.7. Circuito esquemático.	65
3.8. Procedimiento esquemático del análisis de sensibilidad aplicado al estudio de los huecos de tensión.	68
3.9. Modelado genérico de un diseño de experimentos de dos factores.	69
3.10. Modelo esquemático del análisis de sensibilidad aplicado a huecos de tensión.	72
3.11. Generación de 1000 años de muestra de la variable C_f ante diversos escenarios de tasa de fallo.	73
3.12. Niveles de incertidumbre de la variable C_f	74
3.13. Generación de 1000 años de muestra de la variable C_f bajo tres niveles de incertidumbre.	75
3.14. Generación de 1000 años de muestra de la variable Z_f en tres escenarios de diferente valor medio.	76

3.15. Generación de 1000 años de muestra de la variable Z_f bajo tres niveles de incertidumbre.	76
3.16. Índices de sitio SARFI-X de la red IEEE-24.	78
3.17. Índices de sitio SARFI-Curve de la red IEEE-24.	79
3.18. Diagramas de caja del índice de sitio SARFI-X de la red IEEE-24.	79
3.19. Índices de sitio SARFI-X de la red IEEE-118.	80
3.20. Índices de sitio SARFI-Curve de la red IEEE-118.	80
3.21. Índices de sitio SARFI-X de la red EC-357.	81
3.22. Índices de sitio SARFI-Curve de la red EC-357.	82
3.23. Evaluación de la precisión de la variable C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.	84
3.24. Evaluación de la precisión de la variable C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de la red IEEE-24.	85
3.25. Evaluación del efecto del valor medio de la variable Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.	86
3.26. Evaluación del efecto del valor medio de la variable Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.	86
3.27. Evaluación del efecto de la dispersión de la variable Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de la red IEEE-24.	87
3.28. Evaluación del efecto de la dispersión de la variable Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.	88
3.29. Modelo esquemático del algoritmo para el análisis de sensibilidad.	89
3.30. Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.	91
3.31. Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.	91
3.32. Estudio del efecto del parámetro media de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.	93
3.33. Estudio del efecto del parámetro media de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.	94
3.34. Estudio del efecto del parámetro dispersión de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.	95
3.35. Estudio del efecto del parámetro dispersión de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.	96
4.1. Diagrama esquemático de la metodología de estimación.	101
4.2. Sistema eléctrico simplificado.	101
4.3. Diagrama unifilar de la red IEEE-24.	102
4.4. Coeficiente de correlación de Pearson de diversas muestras.	103
4.5. Diagrama de caja de la pseudo-monitorización del índice SARFI-90.	108
4.6. Efecto característico del filtrado Bayesiano en la estimación de medidas de huecos de tensión.	113

4.7. Hipótesis a priori del índice SARFI-90 para el nudo 1 de la red IEEE-24 (estimación sin considerar medidas).	114
4.8. Estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 a partir de las medidas del nudo 2 de la red IEEE-24 (estimado mediante un medidor con correlación fuerte).	114
4.9. Estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 a partir de las medidas del nudo 22 de la red IEEE-24 (estimación mediante un medidor con correlación débil).	115
4.10. Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo con elevada área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 11). . . .	118
4.11. Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo con baja área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 7).	118
4.12. Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo de alta área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 5).	119
4.13. Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo de baja área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 46).	119
4.14. Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con alta área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 11).	121
4.15. Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con baja área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 7).	121
4.16. Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con alta área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 5).	122
4.17. Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con baja área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 46).	122
4.18. Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de dos medidores de huecos de la red IEEE-24 (nudos: 2 y 23).	123
4.19. Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de tres medidores de huecos de la red IEEE-24 (nudos: 2, 12 y 23).	124
4.20. Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de huecos de la red IEEE-24 (nudos: 2, 7, 12 y 23).	124
4.21. Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de huecos en el lado de 138 kV de la red IEEE-24 (nudos: 1, 2, 6 y 7).	125
4.22. Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de seis medidores de huecos en el lado de 230 kV de la red IEEE-24 (nudos: 19, 20, 21, 22, 23 y 24).	125
4.23. Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de la red IEEE-118 (nudos: 10, 25, 80 y 110).	126
4.24. Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de cuatro medidores de la red IEEE-24 (nudos 2, 7, 12 y 23).	127
4.25. Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de cinco medidores de la red IEEE-24 (nudos 2, 7, 12, 17 y 23).	128
4.26. Estimación ideal del índice SARFI-70 mediante la información de seis medidores de la red IEEE-24 (nudos 2, 6, 7, 12, 21 y 23).	128

4.27. Línea de transmisión N° 24 de la red IEEE-24.	132
4.28. Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de dos medidores seleccionados al azar de la red IEEE-24 (nodos 2 y 22).	133
4.29. Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de tres medidores seleccionados al azar de la red IEEE-24 (nodos 2, 10 y 22).	133
4.30. Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de la red IEEE-24 (nodos 2, 6, 10 y 22).	134
4.31. Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de tres medidores seleccionados al azar de la red IEEE-118 (nodos 10, 55 y 110). . .	135
4.32. Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores seleccionados al azar de la red IEEE-118 (nodos 10, 55, 70 y 110).	136
5.1. Modelo esquemático de los métodos de emplazamiento óptimo de medidores de huecos de tensión.	141
5.2. Antecedente de los principales métodos de emplazamiento óptimo de medidores de huecos de tensión.	142
5.3. Método de localización óptima de medidores de huecos de tensión basado en el criterio de observabilidad (LOM+OBS).	143
5.4. Esquema del método de muestreo Bootstrap.	145
5.5. Estructura del algoritmo del método LOM+OBS.	151
5.6. Estructura del algoritmo de localización óptima de medidores LOM+COR.	157
5.7. Localización óptima de medidores de huecos de tensión para la red IEEE-24 según el método LOM+COR.	162
A.1. Circuito esquemático	182
A.2. Diagrama unifilar de la red de prueba IEEE-24	186
A.3. Diagrama unifilar de la red de prueba IEEE-118	197
A.4. Diagrama unifilar de la red EC-357	198
A.5. Estimación del índice SARFI-X de la red IEEE-118.	199
A.6. Estimación del índice SARFI-X de la red EC-357.	200
A.7. Estimación del índice SARFI-X de la red EC-357.	201
A.8. Flujograma del módulo “lectura de datos”.	202
A.9. Esquemático del módulo “datos de red estimados”.	204
A.10. Esquemático del módulo “variables aleatorias de entrada”.	204
A.11. Esquemático del módulo “cálculo de tensiones”.	206
A.12. Curva de Fisher para el contraste de hipótesis	208
A.13. Hipótesis del error del modelo para el Análisis de Varianza	208
A.14. Prueba de normalidad - gráfico Q-Q	209
A.15. Pruebas de contraste de hipótesis - normalidad	209
A.16. Gráfica de residuos	210
B.1. Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.	211
B.2. Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.	212
B.3. Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.	213

B.4. Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.	214
B.5. Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.	215
B.6. Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.	216
B.7. Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.	217
B.8. Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.	218
B.9. Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.	219
B.10. Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.	220
B.11. Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.	221
B.12. Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.	222
C.1. Análisis comparativo de correlación de muestras.	223

Índice de tablas

2.1. Algoritmo para calcular el índice SARFI-ITIC.	32
2.2. Algoritmo para calcular el índice SARFI-IEC clase 2.	33
2.3. Algoritmo para calcular el índice SARFI-IEC clase 3.	33
2.4. Tabla de huecos de tensión acorde a UNIDPE.	33
2.5. Tabla de huecos de tensión acorde a CEI 61000-2-8.	34
2.6. Caracterización del coeficiente de fallo en artículos recientes.	42
2.7. Caracterización de la impedancia de fallo en artículos recientes.	43
3.1. Intervalo de confianza para la media.	54
3.2. Intervalo de confianza para la desviación típica.	55
3.3. Parametrización de la variable tasa de fallo λ	57
3.4. Estimación de resistencia de arco en líneas aéreas R_{arc}	58
3.5. Registros de impedancia de fallo en sistemas eléctricos reales.	59
3.6. Probabilidades del tipo de fallo implementadas.	60
3.7. Tiempos de despeje en barras.	62
3.8. Tiempos de despeje en líneas.	63
3.9. Parametrización estocástica de las variables de entrada del PEHT.	64
3.10. Parametrización de las variables C_f y Z_f en bibliografía.	68
3.11. Resumen de los casos a evaluar en el análisis de sensibilidad.	73
3.12. Parametrización de los casos de estudio del análisis de sensibilidad.	83
3.13. Características de la muestra de nudos estudiados en la red IEEE-24.	83
3.14. Análisis de sensibilidad del caso N° 1.	90
3.15. Porcentaje de nudos del sistema que son influenciados de forma significativa por la precisión de la variable de entrada C_f (caso de estudio N° 1).	90
3.16. Análisis de sensibilidad del caso N° 2.	92
3.17. Porcentaje de nudos del sistema que son influenciados por el factor media de Z_f (caso de estudio N° 2).	93
3.18. Diseño de experimentos a desarrollar en el caso de estudio N° 3.	94
3.19. Porcentaje de nudos del sistema que son influenciados por el factor desviación típica de Z_f (caso de estudio N° 3).	95
4.1. Número medio estimado de huecos de tensión de la red IEEE-24.	102
4.2. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.	104
4.3. Matriz de correlación múltiple de Pearson del índice SARFI-90 de la red IEEE-24.	105
4.4. Número de nudos con correlación muy fuerte del índice SARFI-90 de la red IEEE-24.	105
4.5. Área de correlación del índice SARFI-90 $A_{R_{90}}$ de la red IEEE-24.	106

4.6. Matriz de correlación múltiple de Pearson del índice SARFI-70 $A_{R_{70}}$ de la red IEEE-24.	107
4.7. Área de correlación SARFI-70 $A_{R_{70}}$ de la red IEEE-24.	107
4.8. Análisis probabilístico de huecos de tensión de una pareja de nudos de alta correlación de la red IEEE-24 (nudos 1 y 2).	110
4.9. Análisis probabilístico de huecos de tensión de una pareja de nudos de baja correlación de la red IEEE-24 (nudos 1 y 22).	110
4.10. Estimación del índice SARFI-90 aplicado a las redes IEEE-118 y EC-357.	126
4.11. Estimación del índice SARFI-70 aplicado a las redes IEEE-118 y EC-357.	129
4.12. Porcentaje de años con una estimación ideal de los índices SARFI-90 y SARFI-70 a partir de un conjunto de 1000 años de pruebas de las redes IEEE-118 y EC-357.	129
4.13. Distribución de probabilidad del nivel de carga de la red EC-357.	131
4.14. Estimación de los índices SARFI-90 y SARFI-70 considerando el efecto del nivel de carga de la red EC-357.	131
4.15. Características de los tres fallos aleatorios registrados en la línea N° 26 de la red IEEE-24.	132
4.16. Características de los doce fallos registrados en la línea N° 90 de la red IEEE-118.	135
5.1. Estructura de la matriz de huecos de tensión M^t	147
5.2. Ejemplo simplificado del cálculo del vector $X_{LOM+OBS}$	149
5.3. Ejemplo del cálculo de la probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores del método LOM+OBS.	150
5.4. Matriz binaria de correlación ($R_{i,j} \geq 0.80$) de eventos SARFI-90 de la red IEEE-24.	154
5.5. Matriz binaria de correlación ($R_{i,j} \geq 0.80$) de eventos SARFI-70 de la red IEEE-24.	154
5.6. Ejemplo de matriz de correlación de huecos de tensión de una red genérica de 5 nudos.	156
5.7. Descripción de los casos de estudio del método LOM+OBS.	158
5.8. Localización óptima de medidores de la red IEEE-24 para un umbral de tensión $t < 0.9$ pu con el método LOM+OBS.	158
5.9. Localización óptima de medidores de la red IEEE-24 para un umbral de tensión $t < 0.7$ pu con el método LOM+OBS.	159
5.10. Número óptimo de medidores según el método LOM+OBS.	159
5.11. Localización óptima de medidores de huecos de tensión de la red IEEE-24.	161
5.12. Localización óptima de medidores de huecos de tensión de la red IEEE-118 según el método LOM+COR.	162
5.13. Localización óptima de medidores de huecos de tensión de la red EC-357 según el método LOM+COR.	163
A.7. Parámetros típicos de una línea.	203
A.8. Ejemplo de estimación de la tasa media de fallo de los elementos.	203
A.9. Estimadores del modelo.	207
A.10. Tabla de análisis de la varianza (ANOVA).	207
C.1. Matriz de correlación múltiple de Spearman del índice SARFI-90 de la red IEEE-24.	224

C.2. Matriz de correlación múltiple de Spearman del índice SARFI-70 de la red IEEE-24.	224
C.3. Área de correlación del índice SARFI-90 de la red IEEE-118	225
C.4. Área de correlación del índice SARFI-70 de la red IEEE-118	225
C.5. Área de correlación del índice SARFI-90 de la red EC-357	226
C.6. Área de correlación del índice SARFI-70 de la red EC-357	227
D.1. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red IEEE-118.	229
D.2. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red IEEE-118.	230
D.3. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red IEEE-118.	230
D.4. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red IEEE-118.	231
D.5. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red EC-357.	232
D.6. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red EC-357.	233
D.7. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red EC-357.	234
D.8. Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red EC-357.	235

Acrónimos

ANOVA:	Analysis of Variance (Análisis de la varianza).
CBMA:	Computer and Business Equipment Manufacturers Association's (Asociación de fabricantes de equipos de computación y negocios).
CEI:	Comisión Electrotécnica Internacional (equivalente a IEC, International Electrotechnical Commission).
CIGRÉ:	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas).
DoE:	Design of Experiments (Diseño de experimentos).
EC-357:	Red de transporte de 357 nudos de la República del Ecuador.
EPRI:	Electric Power Research Institute (Instituto de Investigación de Energía Eléctrica).
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
IEEE-24:	Sistema eléctrico de prueba de 24 nudos de la IEEE.
IEEE-118:	Sistema eléctrico de prueba de 118 nudos de la IEEE.
ITIC:	Information Technology Industry Council (Consejo de Industria de Tecnología de Información).
LOM+OBS:	Localización óptima de medidores de huecos de tensión según el criterio de observabilidad.
LOM+COR:	Localización óptima de medidores de huecos de tensión según el criterio del área de correlación.
PEHT:	Programa de estimación de huecos de tensión.
PEHT+MP:	Programa de estimación de huecos de tensión a partir de medidas previas.
SARFI:	System Average RMS Variation Frequency Index (frecuencia o tasa de variación de la tensión eficaz de corta duración).
SEI:	Sag Energy Index (índice de energía del hueco).
SEMI F47:	Semiconductor Industry Standard for Voltage Sag Immunity (estándar de la industria de semiconductores para la inmunidad de huecos de tensión).

PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

1.1. Planteamiento de la tesis

Entre los diversos tipos de perturbaciones eléctricas, los huecos de tensión son considerados el problema de calidad de suministro más frecuente en los sistemas eléctricos [Bollen, 2000; Beaulieu y otros, 2002]. Este fenómeno es originado por un aumento significativo de la corriente en el sistema, causado principalmente por cortocircuitos o maniobras inadecuadas en la red [IEC 61000-2-8, 2002; IEEE Std. 1159, 2009; IEEE Std. 1668, 2014].

Para un usuario final, el efecto más relevante de un hueco de tensión es la interrupción o alteración de la operación de sus equipos, siendo los dispositivos de naturaleza electrónica los principalmente afectados (p. ej. ordenador, variador de velocidad, autómatas programables, relés, etc.). Debido al auge tecnológico de las últimas décadas y a la búsqueda constante de automatizar los procesos productivos, el uso de componentes electrónicos resulta indispensable en la actualidad. Este hecho, lleva a que los efectos de los huecos de tensión sean más evidentes para el usuario final, provocando que su nivel de exigencia de la calidad de energía suministrada sea cada vez mayor.

Como una breve referencia de la frecuencia de los huecos de tensión en una red de potencia, se tiene el estudio de EPRI realizado en 300 puntos de suministro, a través de 24 distribuidores de energía eléctrica [Barss, 2001]. En dicho estudio, se registraron más de seis millones de eventos (huecos de tensión e interrupciones) durante dos años de estudio, clasificando un 92 % de estos eventos como huecos de tensión ($V < 0.9$ p.u), y un 26 % como huecos profundos ($V < 0.7$ pu). Adicionalmente, el citado informe técnico indica que un usuario industrial típico tiene un promedio de 46 huecos de tensión por año.

Desde un punto de vista económico, la presencia de los huecos de tensión puede llegar a ser una importante fuente de pérdidas. A manera de ejemplo, del estudio de una fábrica de semiconductores y una planta industrial automotriz, se estimó que el coste de cada hueco de tensión que origina la parada o alteración del proceso productivo es de 3.8 millones de euros y 10 millones de dólares, respectivamente [Baggini y otros, 2008].

El estudio de los huecos de tensión, como cualquier otro problema de calidad de

suministro, debe ser abordado desde una perspectiva de compatibilidad entre los niveles de inmunidad de las cargas conectadas y los niveles de emisión del sistema. De esta forma, desde el punto de vista de la carga, se requiere conocer las características de sensibilidad de los equipos para modelar su respuesta ante variaciones súbitas de la tensión del suministro eléctrico. Desde la perspectiva de la red, se persigue estimar u obtener información adecuada que permita caracterizar su comportamiento en términos de huecos de tensión. En esta tesis, el trabajo realizado se encuadra en este segundo aspecto, es decir, en el modelado y estimación de la respuesta de un sistema eléctrico ante los huecos de tensión.

Dado que los huecos de tensión son el resultado de eventos fortuitos (p. ej. cortocircuitos en el sistema) su naturaleza es aleatoria. Por ello, las metodologías de estimación más utilizadas plantean modelar la variabilidad de este fenómeno a través de:

- Métodos deterministas que representan las variables involucradas en la caracterización de los huecos de tensión a partir de principios de la teoría de probabilidades.
- Metodologías probabilísticas que modelan los eventos de huecos de tensión mediante la representación estocástica de las variables involucradas y la aplicación de principios de la teoría de muestreo para estimar a largo plazo la severidad de los huecos de tensión en la red estudiada.

Los métodos estocásticos, por sus características, presentan un modelado más realista de las variables que caracterizan los huecos de tensión, por ende, una estimación más fiable de sus predicciones.

Al respecto, este trabajo busca dar un paso adicional, proponiendo metodologías de predicción y optimización que, contemplando la naturaleza aleatoria de los huecos de tensión, permitan alcanzar los objetivos que se indican en el apartado siguiente.

1.2. Objetivos de la tesis

Los objetivos que se persiguen en este trabajo son los siguientes:

- Representar de forma realista las variables que afectan a la generación de los huecos, esto es, representar de forma verosímil su cuantificación y aleatoriedad en el tiempo mediante distribuciones de probabilidad paramétricas. A partir de ello, se persigue implementar una herramienta informática que permita estimar la severidad de los huecos de tensión en un sistema eléctrico genérico.
- Una vez modeladas las variables que afectan a la generación de los huecos, se persigue conocer su influencia en la estimación de los mismos realizando un análisis de sensibilidad. Para ello, se utilizarán avaladas técnicas estadísticas como el Diseño de Experimentos y el Análisis de la Varianza que se aplicarán a aquellas variables para las cuales existe una mayor divergencia en su caracterización en las propuestas existentes.
- Un objetivo adicional de la presente tesis es predecir el número de huecos de tensión en los nudos de una zona sin monitorización a través de la información de un conjunto limitado de medidas de huecos de tensión. Para ello, se aplicarán los

principios de la estadística Bayesiana, estimando el número de huecos de tensión más probable de un emplazamiento tomando como dato los registros de huecos de otros nudos de la red.

- Por último, se persigue también plantear una estrategia para optimizar la monitorización de los huecos de tensión en un sistema eléctrico. Es decir, se persigue garantizar una supervisión completa del sistema a través de un número de medidores menor que el número de nudos de la red. Para ello, se partirá del criterio utilizado hasta ahora en la bibliografía proponiendo mejoras al mismo y, además, se desarrollará un criterio nuevo de optimización.

En general, para un análisis amplio y generalizable de los métodos propuestos, los estudios han sido desarrollados en tres sistemas eléctricos de tamaños y características diversas: dos redes de prueba de la IEEE de 24 y 118 nudos (IEEE-24, IEEE-118), y la red nacional de transporte del Ecuador con 357 nudos (EC-357).

1.3. Estructura de la tesis

Para plantear las propuestas anteriormente indicadas, el presente trabajo se ha estructurado en seis capítulos. A continuación, se describen brevemente los mismos.

En el capítulo 2, se presenta una breve descripción de los fundamentos y conceptos generales de los huecos de tensión. A través de este capítulo, se busca proporcionar al lector de una mejor comprensión de los términos e indicadores más empleados en el análisis de severidad de los huecos de tensión en las redes eléctricas. Asimismo, a manera de antecedente, se presenta un resumen de las principales características de las técnicas o métodos existentes aplicados en la predicción y monitorización óptima de los huecos de tensión.

En el capítulo 3, se describe la metodología empleada para determinar la importancia o influencia de las variables que caracterizan la frecuencia o severidad de los huecos de tensión. Para ello, se ha implementado una herramienta de estimación de huecos de tensión que, a través de un conjunto predeterminado de experimentos mediante la técnica denominada Diseño de experimentos, analiza la importancia de la parametrización de las variables de entrada del modelo. Su análisis, se realiza mediante la técnica de análisis de la varianza (ANOVA), la cual permite establecer con rigor matemático si la caracterización de una determinada variable afecta o no a la respuesta del sistema en términos de huecos de tensión.

En el capítulo 4, se propone y desarrolla un método que permite predecir la severidad de los huecos de tensión de todo el sistema a partir de los registros de huecos de un conjunto reducido de nudos de dicha red. Para ello, se emplea el teorema de probabilidad condicional de Bayes, el cual calcula las medidas más probables de todo el sistema a partir de la información proporcionada por los medidores de huecos instalados. Asimismo, en este capítulo se revela una importante propiedad de los huecos de tensión, como es la correlación del número de eventos de huecos de tensión en diversas zonas de las redes eléctricas.

En el capítulo 5, se desarrollan dos métodos de localización óptima de medidores de huecos de tensión. El primero de ellos es una evolución del criterio de observabilidad, es decir, del criterio basado en que cualquier evento (habitualmente una falta) que dé lugar a algún hueco en el sistema, debe hacer actuar al menos un medidor de huecos.

Como una propuesta alternativa, se emplea la propiedad de correlación de los eventos de huecos de tensión de una red para plantear un segundo método que permita establecer la severidad de los huecos de todo el sistema a partir de una monitorización parcial de dicha red.

Finalmente, en el capítulo 6, se realiza una breve descripción de las principales aportaciones de los estudios realizados en esta tesis. Adicionalmente, se describen diversos aspectos a desarrollar en futuros trabajos.

FUNDAMENTOS Y TRABAJOS PREVIOS

2.1. Introducción

Los huecos de tensión son fenómenos que afectan la compatibilidad electromagnética entre la carga y la red, ya que su presencia puede alterar o interrumpir la operación de los equipos conectados al suministro eléctrico. Su estudio depende principalmente de la perspectiva de interés, es decir, de si se busca conocer el comportamiento del sistema eléctrico, o de si lo que se plantea es evaluar la respuesta de operación de los diversos equipos que podría tener un usuario final. En este trabajo, los fundamentos y generalidades a detallar de los huecos de tensión están orientados desde la primera perspectiva, esto es, a la evaluación del comportamiento de la red, tanto de forma particular en cada uno de sus nudos, como del sistema en su conjunto.

Esta descripción del estado de la técnica persigue proporcionar una visión general, tanto de los fundamentos de los huecos de tensión, como de las metodologías más influyentes para estimar la severidad de los huecos y localizar de forma óptima los medidores de huecos en la red.

2.2. Estructura

El presente capítulo está estructurado en cuatro secciones, tal como se indica a continuación:

- Fundamentos y generalidades de los huecos de tensión.
- Los índices más utilizados para el análisis de la severidad de los huecos de tensión en redes de potencia.
- Los métodos más extendidos en la predicción de los huecos de tensión en los sistemas de potencia.
- Una descripción de los métodos de localización óptima de medidores de huecos de tensión más utilizados.

En el primer apartado, se describe y analiza la definición de los huecos de tensión en base a lo indicado por las normativas más extendidas a nivel mundial (CEI¹ e IEEE²). Además, se detallan generalidades de los huecos como el origen, efectos, mitigación y monitorización.

A continuación, en el segundo apartado, se describen los índices de huecos de tensión más empleados para el diagnóstico de las redes. Los indicadores de severidad de huecos son recopilados de las conocidas normativas CEI e IEEE, además de considerar las recomendaciones prácticas de instituciones como CIGRÉ y EPRI.

En el tercer apartado, a manera de antecedente del método propuesto en este trabajo, se exponen las metodologías de estimación de huecos de tensión más relevantes. Es decir, se realiza una breve descripción del alcance y limitaciones de los procedimientos propuestos en la bibliografía.

Finalmente, se realiza una reseña de los métodos orientados a la localización óptima de medidores de huecos de tensión los sistemas eléctricos. De forma similar al apartado anterior, en esta sección se busca describir y analizar los procedimientos propuestos en la bibliografía, además de exponer los posibles puntos a mejorar en futuros trabajos.

2.3. Fundamentos de los huecos de tensión

2.3.1. Definición

En el presente apartado, se detalla y analiza la definición de los huecos de tensión propuesta por CEI e IEEE. A continuación su descripción:

2.3.1.1. Normativa CEI 61000-2-8

Según la norma CEI 61000-2-8, se considera hueco de tensión a la reducción súbita de la tensión en un punto particular de la red eléctrica por debajo de un valor límite determinado, durante un breve intervalo de tiempo. Este tipo de perturbaciones electromagnéticas son comúnmente relacionadas con cortocircuitos u otros eventos que generen un incremento extremo de la corriente en el sistema [IEC 61000-2-8, 2002].

Los parámetros para caracterizar los huecos de tensión en la norma CEI 61000-2-8 están basados principalmente en el valor eficaz de la tensión residual durante el hueco y la duración del mismo. Se entiende por tensión residual al mínimo valor eficaz (rms) de tensión registrado, ya sea entre fases o fase-neutro; en el caso de la duración, es el tiempo que transcurre mientras la tensión residual cae por debajo de un valor límite de referencia hasta que la misma vuelve a superar el indicado umbral. Típicamente, este valor límite se encuentra entre un 0.85 pu y 0.95 pu hasta un 1 % de la tensión nominal del punto de suministro, tal como se ilustra en la Fig. 2.1.

El valor del parámetro duración está directamente relacionado con la rapidez de operación del sistema de protecciones, dado que se corresponde con el tiempo que las protecciones tardan en despejar la sobrecorriente que origina el hueco. Es común que los huecos tengan una duración entre 100 a 500 ms. Los tiempos de despeje más rápidos son alcanzados en la red de transporte, mientras que los eventos en la red de distribución pueden ser considerablemente más lentos. De forma general, aunque no

¹CEI: Comisión Electrotécnica Internacional.)

²IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Figura 2.1 – Definición de hueco de tensión según CEI 61000-2-8.

esté indicado de forma directa en la normativa, se consideran huecos de tensión a los eventos que no exceden los 60 segundos.

2.3.1.2. Norma IEEE N° 1159

Como se muestra en la Fig. 2.2, la norma americana IEEE N° 1159 define los huecos de tensión como una reducción de la tensión eficaz en un rango de 0.1 a 0.9 pu con una duración ente 0.5 ciclos a 1 minuto. Los huecos están caracterizados por la tensión residual y, en ausencia de especificaciones, este término se supone como tensión fase-fase. A manera de ejemplo, al referir un hueco del 75 %, este implicaría una tensión residual de 0.75 pu [IEEE Std. 1159, 2009].

Figura 2.2 – Definición de hueco de tensión según IEEE-1159.

Los huecos de tensión están asociados con fallos en el sistema pero también pueden ser causados por maniobras de cargas de alto consumo o arranques de grandes motores. Típicamente los huecos pueden ser asociados a fallos monofásicos y su tiempo de despeje varía entre 3 a 30 ciclos, dependiendo de la corriente de fallo y el sistema de protección

utilizado. Para la norma IEEE N° 1159, la duración de los huecos de tensión está subdividida en dos categorías: momentáneo y temporal (ver Fig. 2.2).

2.3.1.3. Comparación entre de normativas

Los puntos en común entre ambas normativas son esencialmente los parámetros utilizados para evaluar los huecos de tensión, estos son: (i) tensión residual y (ii) duración, tal como se muestran en las Figs. 2.1-2.2. A continuación se describen las observaciones más relevantes:

- Las normativas CEI 61000-2-8 y CEI 61000-4-30 no especifican con exactitud el valor del umbral de tensión que identifica a una caída de tensión como hueco de tensión. Sin embargo, se recomienda la clasificación de los registros en un rango de tensión residual entre 0.01-0.9 pu, y de forma práctica, da ejemplos del uso del parámetro duración en un rango de 10 ms a 60 s [IEC 61000-2-8, 2002]³.
- La norma IEEE-1159 considera como huecos de tensión a los eventos que registran una tensión dentro del rango 0.1-0.9 pu, y que tienen una duración entre 0.5 ciclos a 60 segundos [IEEE Std. 1159, 2009]. En este caso, los parámetros de tensión residual y duración son claramente definidos.

Para este trabajo, considerando lo expuesto por CEI e IEEE, se considera como hueco de tensión al evento con tensión residual por debajo del 90 % de la tensión nominal, y como límite inferior un valor del 1 % de la tensión de referencia, tal como recomienda CEI 61000-2-8 [IEC 61000-2-8, 2002].

2.3.2. Caracterización

Entre las principales propuestas para caracterizar los eventos de huecos de tensión se tienen:

- Caracterización tensión-duración [IEC 61000-2-8, 2002; IEEE Std C37.48.1, 2012].
- Caracterización por la energía que se deja de suministrar durante el hueco [Bollen y otros, 2003].
- Caracterización ABC (fasorial) [Bollen y otros, 2003].
- Caracterización por componentes simétricas [Bollen y otros, 2003].
- Caracterización por índice de severidad-duración, enfocado en la duración [Chan y Milanovic, 2007].

En la práctica, la caracterización más ampliamente utilizada es la denominada “tensión-duración”. Esta caracterización se centra en la magnitud de la tensión residual y la duración del evento, de donde se derivan tres tipos:

- Huecos de tensión con una amplitud constante en las tres fases, caracterizados por una tensión residual y duración tal como se ilustra en la Fig. 2.3.a.

³Véase la página 24 de la normativa IEC 61000-2-8, tablas 3-8, como modelo de registro de eventos para el presente trabajo.

- Huecos de tensión de amplitud variable en el tiempo en las tres fases, caracterizados por dos o más escalones de caída de tensión, tal como se muestra en la Fig. 2.3.b.
- Cuando la tensión residual y la duración son distintas en cada fase (fallos asimétricos), se considera la tensión residual de menor valor y la duración del hueco se contabiliza hasta que la tensión de todas las fases supere el valor umbral (típicamente el 90 % de la tensión de referencia).

Figura 2.3 – Caracterización tensión-duración de los huecos de tensión.

2.3.3. Origen

Los eventos de huecos de tensión son originados por sobrecorrientes en el sistema, causadas principalmente por:

- Cortocircuitos o fallos en la red debidos a: condiciones meteorológicas complicadas, defectos en el aislamiento, proximidad del arbolado, incendios forestales, actuación por contacto de animales, etc.
- Maniobras en el sistema, por ejemplo: arranque de motores grandes, energización de transformadores de potencia, conexión/desconexión de condensadores, modificaciones de la topología de la red, realimentación de grandes cargas después de una interrupción del servicio, etc.

De las causas mencionadas, se considera que la primera (cortocircuitos) es la causa principal para la aparición de los huecos de tensión en una red, tanto por la dificultad de mitigar los factores exógenos que provocan los fallos, como por la magnitud de sobrecorriente que pueden llegar a generar en el sistema.

2.3.4. Efectos

Los huecos de tensión son un fenómeno de compatibilidad electromagnética que afecta al usuario final con la posible degradación del rendimiento de los equipos, es decir, que provoca que los dispositivos conectados al suministro eléctrico puedan actuar de una forma distinta a lo previsto [IEC 61000-4-30, 2003].

Cuando ocurre un hueco de tensión, la principal relación entre el punto de suministro del sistema y el equipo conectado es la reducción de la energía entregada. Esta súbita disminución de la energía del suministro eléctrico puede afectar de forma diferente dependiendo del equipo. Esto es, el evento de hueco de tensión podría ser tolerado, o en su defecto, alterar de forma significativa el proceso que realizaba el equipo.

Para caracterizar el efecto de los huecos de tensión se han desarrollado diversas “curvas de compatibilidad” que tienen como parámetros principales la tensión residual y la duración del evento. De estas curvas se obtienen dos clasificaciones posibles para los eventos: hueco tolerable o hueco no tolerable para la carga alimentada.

Entre las referencias de compatibilidad más conocidas se tienen: ITIC, CEI 61000-4-11 y SEMI-F47 [ITIC, 1998; IEC 61000-4-11, 1994; Standard, SEMI, 2000]. Cada una de estas curvas muestran diversos niveles de tolerancia de la carga para definir un evento, y se recomienda que se aplique una u otra dependiendo de las características de los equipos que estén conectados.

2.3.4.1. Curvas de Compatibilidad

El concepto de curva de compatibilidad de tensión para equipos electrónicos fue introducida por [Key, 1979] ante la necesidad de evaluar la tolerancia de los ordenadores ante el suministro eléctrico. En lo posterior, la terminología se extendió por el uso de los miembros de una asociación de fabricantes de ordenadores denominada CBEMA⁴, y como consecuencia, la normativa IEEE-446 la adoptó posteriormente como referencia de compatibilidad entre los equipos y los huecos de tensión [IEEE Std 446, 1996].

Seguido del uso de esta curva CBEMA, se presentó la curva ITIC⁵ como la versión revisada, y en lo posterior, considerada como su sucesora. Esta curva representa de forma genérica la tolerancia de los equipos de un usuario final ante los huecos de tensión. En la Fig. 2.4 se ilustra la forma de la curva ITIC⁶ [ITIC, 1998].

Figura 2.4 – Curva de compatibilidad ITIC.

⁴CBEMA: Computer Business Equipment Manufacturers.

⁵ITIC: Information Technology Industry Council.

⁶La curva ITIC original contiene además datos de tolerancia para las sobretensiones, pero para resumir su aplicación se muestra una versión enfocada a los huecos de tensión.

En la parte superior de la curva se observa la zona inmune a los efectos de los huecos. Es decir, si los parámetros del evento (tensión residual y duración) se encuentran por encima de la curva, se consideraría al evento como “hueco tolerable”. De forma análoga, en caso de que los parámetros del hueco estén por debajo de la curva, esta perturbación se consideraría como “hueco no tolerable” y estaría en la zona de interrupción de la carga.

La aplicación de otras curvas de compatibilidad se realiza de forma similar a la curva ITIC, teniendo entre las más conocidas las curvas CEI 61000-4-11 y la curva SEMI-F47, fijando en estas unos límites diferentes de tensión residual y duración.

En la Fig. 2.5, se observan dos de las tres curvas de compatibilidad propuestas por CEI 61000-4-11 [IEC 61000-4-11, 1994]. En la parte superior se ilustra la curva clase 2, la cual es recomendada para equipos conectados de forma directa o indirecta a la red pública. En la parte inferior, se define la curva de compatibilidad clase 3, que es de uso referencial u optativo para el usuario final. En el caso de la curva clase 1, esta normativa está orientada para casos específicos de inmunidad de un equipo o exigencias concretas de tolerancia de un usuario final.

Figura 2.5 – Curvas de compatibilidad CEI 61000-4-11 (clase 2 y 3).

En la Fig. 2.6, se ilustra la curva SEMI-F47 recomendada por los fabricantes de equipos compuestos por semiconductores [Standard, SEMI, 2000]. Esta curva resulta similar a su análoga ITIC, con la diferencia de que presenta mayor exigencia a la tolerancia de tensión del equipo al tener un escalón adicional (50 %, 20-200 ms).

Como se indicó inicialmente, la curva de compatibilidad adoptada no es genérica y es utilizada especialmente por el usuario final para conocer las posibles interrupciones que sus equipos podrían sufrir. Es decir, su uso es aplicable tanto para evaluar la calidad del suministro eléctrico, como para caracterizar la sensibilidad de los equipos que el usuario final desee adquirir. A manera de ejemplo, en un proceso crítico o de alta importancia para el usuario final, puede resultar necesario o deseable el solicitar al fabricante que el equipo supere las pruebas de una determinada curva de compatibilidad.

Como referencias adicionales de curvas de compatibilidad, se tiene un conjunto de 12 curvas propuestas por CIGRÉ [Bollen y otros, 2008], la curva NRS 048 de la normativa de Sudáfrica [ESCOM, 1996], etc.

Figura 2.6 – Curva de compatibilidad SEMI-F47.

2.3.5. Mitigación

Al ser los huecos de tensión fenómenos fortuitos originados principalmente por cortocircuitos, la reducción del número de fallos es una primera forma de mitigación. Este objetivo se puede alcanzar mediante las siguientes pautas:

- La ejecución periódica del mantenimiento preventivo en los elementos de la red (p. ej. limpieza de aisladores, desbroce de arbolado en líneas, colocar boyas de señalización en líneas, inspección física de líneas y transformadores, etc.).
- Un control predictivo adecuado de los elementos de la red (líneas y subestaciones), a través de análisis tales como: aislamiento de transformadores, medición de puestas a tierra, termografía, etc.
- Si los cortocircuitos fueran mayoritariamente producto de factores exógenos (ej. condiciones climáticas, ubicación geográfica, etc.), se tendrían que plantear propuestas de mayor inversión económica, tales como: reemplazo de líneas aéreas por cables subterráneos, el aumento de la inmunidad de los equipos del usuario final, etc.

Adicionalmente, cuando los eventos son mayoritariamente severos (p. ej. registros clasificados como “no tolerables” en las curvas de compatibilidad), complejos de mitigar por parte del operador de la red, o críticos para el usuario final, existen vías adicionales para controlar estas perturbaciones a través de dispositivos externos, tales como: fuentes de alimentación ininterrumpida (*UPS*), compensadores estáticos (*StatCom*), restauradores dinámicos de tensión (*DVR*), almacenamiento de energía magnética por superconducción (*SMES*), aumento de la inercia de máquinas rotatorias, instalación de generadores de energía cercanos a la zona de conflicto, etc.

2.3.6. Monitorización de los huecos de tensión

Los valores de tensión relacionados a los huecos son principalmente valores eficaces (rms) registrados sobre un mínimo de un ciclo y actualizados cada medio ciclo del

periodo de tensión de suministro. Es decir, para una frecuencia de 50 Hz y 60 Hz, se considerará como medio ciclo 10 ms y $8\frac{1}{3}$ ms respectivamente [IEC 61000-4-30, 2003].

Los principales parámetros de los huecos de tensión son la tensión residual y la duración, por ende, la monitorización de esta perturbación comprende el registro de ambos valores. En el caso de sistemas trifásicos, se considera hueco cuando cualquiera de las tres fases cae por debajo de un valor umbral (típicamente 90 %), y su duración se determina hasta que todas las fases hayan superado este valor límite. Para la monitorización de sistemas o equipos trifásicos, deben medirse las tres fases para obtener una información completa del evento; estas mediciones pueden ser las tres tensiones fase-neutro o las tres tensiones fase-fase.

Según lo indicado por CIGRÉ [Bollen y otros, 2008], para la caracterización de cara a la evaluación de la calidad de energía del usuario final, en media o alta tensión, resulta más apropiado la medición de las tensiones fase-fase. Se recomienda que los registros de los huecos de tensión en alta y muy alta tensión sean fase-fase, ya que estos brindan una imagen más cercana de lo que perciben los equipos del usuario final [Beaulieu y otros, 2002]. Para registros en baja tensión, en sistemas conectados sólidamente a tierra, se recomienda registrar las tensiones fase-neutro o fase-tierra, a menos que la mayoría de equipos estén conectados fase-fase.

Figura 2.7 – Simulación de un registro típico de hueco de tensión producto de un fallo monofásico.

En la Fig. 2.7, se ilustra un típico hueco de tensión producto de un cortocircuito monofásico en una red trifásica. Las tres formas de onda de tensión registradas corresponden a las tres tensiones instantáneas fase-fase de un usuario final conectado a 13.8 kV. Para este ejemplo, la tensión registra una caída en dos de los tres canales. En la parte superior se observa el registro de la tensión eficaz, y en su parte inferior la forma de onda instantánea de las tensiones. Sobre la duración del evento, se puede apreciar que fue de un tiempo aproximado de 200 ms.

2.4. Índices para evaluar la severidad de los huecos de tensión

Como se ha indicado en el apartado anterior, los parámetros más utilizados para caracterizar los registros de huecos de tensión son la tensión residual y la duración. Por ello, la mayoría de índices para evaluar la calidad del suministro eléctrico comprenden al menos una de estas variables para cuantificar la severidad de los huecos de tensión.

A continuación, se describen los índices más utilizados para evaluar los huecos de tensión para una red en su conjunto o en un punto cualquiera de la misma.

2.4.1. Tipos de índices

Según lo propuesto por [Bollen y otros, 2003], los índices de huecos de tensión pueden ser clasificados dentro de las siguientes categorías:

- Índices de evento (*event indexes*). Estos indicadores buscan describir la severidad de un evento único.
- Índices de sitio (*site indexes*). En este caso, los indicadores cuantifican la severidad de los problemas de calidad de energía para un punto particular de la red (nudo).
- Índices de sistema (*system indexes*). Esta medida busca cuantificar la severidad de los problemas de calidad de energía de una zona de la red o del sistema en su conjunto.

2.4.2. Índices de evento

Los índices de evento son una forma de conocer la severidad o características de un registro de hueco de tensión en particular. Si el evento tiene forma rectangular, su análisis resulta más sencillo ya que se basaría en registrar la tensión eficaz más baja y la duración del mismo. Esta metodología es la más utilizada para representar la mayoría de los eventos (ver Fig. 2.3.a).

Los casos minoritarios son los eventos no rectangulares que representan aproximadamente un 10 % de los registros [Polycarpou, 2011]. Su caracterización resulta más compleja, y para una adecuada evaluación se vuelve necesario el registro instantáneo de todas las fases (ver Fig. 2.3.b). De las referencias analizadas, se recomienda para su análisis el “método de segmentos” propuesto por CIGRÉ.

2.4.2.1. Método de Segmentos

Este método propone la caracterización del evento en cinco segmentos, los mismos que son denominados: pre-evento, transición, duración del evento, transición, recuperación de la tensión (post-evento). En la Fig. 2.8 se ilustra la clasificación de los segmentos de un evento [Bollen y otros, 2008].

Figura 2.8 – Descripción alternativa de un hueco de tensión.

Fuente: CIGRÉ [Bollen y otros, 2008].

No todos los huecos de tensión tendrán estos 5 segmentos, sin embargo, su caracterización se basa especialmente en el número de segmentos que tenga el hueco, el tiempo que ha transcurrido entre los segmentos de transición, y las características de cada segmento.

2.4.3. Índices de sitio

Los índices de sitio son una medida del grado de exposición que ha tenido un punto cualquiera de la red (especialmente los nudos tipo carga) a los huecos de tensión. Entre los índices de sitio más referenciados, se tienen los denominados: SARFI-X, SARFI-Curve, tabla tensión-duración, etc.

Existen otros indicadores que, aunque menos citados, son de utilidad para cuantificar la severidad de los huecos en relación a la energía no suministrada y el coste económico de los eventos en un emplazamiento. Entre los índices más conocidos se tienen los denominados: SEI, ASEI, ASTC, ASTC, ACSC, etc.

2.4.3.1. SARFI-X

El índice SARFI-X que proviene del acrónimo *System Average RMS Variation Frequency Index*, es el índice más sencillo y de mayor uso para cuantificar los efectos de los huecos de tensión en un punto cualquiera de la red [EPRI, 1999].

Este índice fue definido para evaluar las variaciones de la tensión eficaz de corta duración, lo cual implica eventos por debajo de los 60 segundos, y se define como el número de veces que se produce una reducción de la tensión eficaz por debajo de un valor X durante un periodo de tiempo determinado (típicamente anual). Cabe indicar

que el concepto de SARFI-X es la base de la mayoría de indicadores de sitio [Brooks y otros, 1998; EPRI, 1999; Bollen y otros, 2003; IEEE Std. 1668, 2014].

A continuación se concreta su valor para dos casos específicos:

- SARFI-90, cuenta el número de huecos de tensión por debajo del 90 % del valor de referencia durante un periodo de tiempo determinado; este suele ser el umbral más utilizado.
- SARFI-50, cuenta el número de huecos de tensión por debajo del 50 % del valor de referencia durante un periodo de tiempo determinado.

Visto el índice SARFI-X como tasa, su expresión analítica es definida a continuación:

$$\text{SARFI-X} = \frac{1}{N_t} \cdot \sum_1^{N_t} N_e \quad (2.1)$$

donde,

- X : Tensión eficaz predeterminada porcentualmente de la tensión de referencia. Los valores comunes incluyen: 10 %, 20 %, ..., 80 %, 90 %.
- N_e : Número de eventos con tensión residual por debajo del umbral de tensión X % durante un periodo de tiempo (típicamente anual).
- N_t : Número total de periodos de tiempo de monitorización del sitio.

2.4.3.2. SARFI-Curve

Este índice considera tanto la tensión residual como la duración para caracterizar los huecos de tensión y está basado en las curvas de compatibilidad de los equipos. Entre las curvas más conocidas se tienen: ITIC, CEI 61000-4-11, y SEMI-F47 [IEC 61000-4-11, 1994; ITIC, 1998; Standard, SEMI, 2000; Bollen y otros, 2003].

La curva ITIC, parametrizada en la tabla 2.1 para los huecos de tensión, muestra dos escenarios posibles en un evento: hueco tolerable o no tolerable para el usuario final. Si el evento es registrado por debajo de la mencionada curva, se contabiliza al evento dentro del índice SARFI-ITIC, y por ende, como un hueco no tolerable.

Tabla 2.1 – Algoritmo para calcular el índice SARFI-ITIC.

Tensión residual U_r (pu)	Duración d (ms)
0.0	$0 < d \leq 20$
$U_r < 0.7$	$20 < d \leq 500$
$U_r < 0.8$	$500 < d \leq 10000$
$U_r < 0.9$	$10000 < d \leq 60000$

Los algoritmos de las curvas CEI 61000 clase 2 y 3 se detallan en las tablas 2.2 y 2.3. De forma análoga a la curva ITIC, si el registro de hueco de tensión está por

debajo de la curva de compatibilidad, se considera a este evento como un hueco no tolerable para el usuario final, por lo que es contabilizado dentro del respectivo índice SARFI-IEC (SARFI-IEC.C2 o SARFI-IEC.C3).

Tabla 2.2 – Algoritmo para calcular el índice SARFI-IEC clase 2.

Tensión residual U_r (pu)	Duración d (ms)
0.0	$0 < d \leq 20$
$U_r < 0.7$	$20 < d \leq 500$
$U_r < 0.9$	$500 < d \leq 60000$

Tabla 2.3 – Algoritmo para calcular el índice SARFI-IEC clase 3.

Tensión residual U_r (pu)	Duración d (ms)
0.0	$0 < d \leq 20$
$U_r < 0.4$	$20 < d \leq 200$
$U_r < 0.7$	$200 < d \leq 500$
$U_r < 0.8$	$500 < d \leq 5000$
$U_r < 0.9$	$5000 < d \leq 60000$

2.4.3.3. Tabla de huecos de tensión

Entre los formatos más utilizados para mostrar el registro de huecos de tensión de un sitio se destaca el esquema de la “tabla de huecos de tensión”. Diversos autores proponen varias configuraciones de la tabla, de las cuales, las más referenciadas son: UNIDPE y la CEI 61000-2-8 [Davenport, 1990; IEC 61000-2-8, 2002]. En las tablas 2.4-2.5 se detallan sus principales características.

Tabla 2.4 – Tabla de huecos de tensión acorde a UNIDPE.

Tensión	Duración del hueco de tensión (s)							
	<0.02	0.02-0.1	0.1-0.5	0.5 - 1	1-3	3-20	20-60	60-180
85-90 %								
70-85 %								
40-70 %								
10-40 %								
<10 %								

Las principales diferencias entre las tablas UNIDPE y CEI 61000-2-8, radican en la mayor resolución de las tensiones residuales registradas para la CEI, y un mayor detalle de los eventos de duración por debajo de los 100 ms para la UNIDPE. En las tablas 2.4 y 2.5 se observa lo anteriormente indicado.

Tabla 2.5 – Tabla de huecos de tensión acorde a CEI 61000-2-8.

Tensión	Duración (s)							
	<0.1	0.1-0.25	0.25-0.5	0.5-1	1-3	3-20	20-60	60-180
80-90 %								
70-80 %								
60-70 %								
50-60 %								
40-50 %								
30-40 %								
20-30 %								
10-20 %								
<10 %								

2.4.3.4. Índices de energía

La energía de un hueco de tensión es definida mediante la siguiente expresión analítica siguiente [Bollen y otros, 2003]:

$$E_{vs(i)} = (1 - (\frac{U}{U_{ref}})^2) \cdot d \cdot 100 \quad (2.2)$$

donde, $E_{vs(i)}$ expresado en unidad de tiempo, se interpreta como la energía perdida del hueco, U es la tensión residual registrada, U_{ref} la tensión de referencia, y d la duración del hueco.

La expresión anterior se toma como base para plantear la mayoría de los índices de energía de huecos de tensión, teniendo entre los principales índices los siguientes:

- Índice de energía del hueco SEI (*Sag Energy Index*), representa la suma de la energía de los eventos registrados de un sitio durante un tiempo determinado (típicamente mensual o anual) [Bollen y otros, 2003]. Este índice se representa analíticamente como:

$$SEI = \sum_{i=1}^n E_{vs(i)} \quad (2.3)$$

donde, i es el evento observado, y n es el número total de huecos durante un periodo y sitio determinado.

- Índice de la energía promedio del hueco ASEI (*Average Sag Energy Index*), representa el promedio de la energía de todos los eventos registrados durante un tiempo y sitio determinado [Bollen y otros, 2003]. Su expresión analítica está representada a continuación:

$$ASEI = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_{vs(i)} \quad (2.4)$$

2.4.3.5. Índice de coste económico

El índice de pérdida económica promedio del consumidor ACSC (*Average loss of voltage sag events of customer*), planteado por [Xiangning y otros, 2007], relaciona los

costes económicos que acarrean los eventos de huecos de tensión al usuario final. A continuación su formulación:

$$ACSC = \frac{1}{N_E} \cdot \sum_{k=1}^{N_E} \sum_{i=1}^{STC_K} (CS_i)_k \quad (2.5)$$

donde CS_{ik} es la pérdida económica de un cliente debido a un evento de hueco de tensión, N_E el número de clientes afectados por el hueco, y STC_K (en inglés *sag event times of customer*) es el número anual de eventos de huecos de tensión que tiene un usuario final.

2.4.4. Índices de sistema

Este tipo de índices busca cuantificar la severidad de los huecos de tensión de todo un sistema en su conjunto (ej. la red eléctrica de un país, ciudad, región, etc.). Su uso no es generalizado, sobre todo por las dificultades de contar con registros adecuados de todo un sistema⁷.

Los índices de sistema se calculan de forma similar a los índices de sitio, y generalmente se obtienen de las siguientes formas:

- Definidos como un promedio de los índices de sitio.
- Calculados como un promedio ponderado de los índices de sitio. Especialmente usados ante la carencia de registros de todo el sistema.
- Calculados a partir del percentil 95 de los índices de sitio. Se entiende por percentil 95 al valor debajo del cual se encuentran el 95 % de las observaciones.

2.4.4.1. SARFI_{System}

El índice SARFI_{System} se calcula a partir del promedio de los índices SARFI-X o SARFI-Curve de los sitios o nudos que conforman un sistema, y proporciona una medida de la calidad de tensión de toda la red [Bollen y otros, 2003; IEEE Std. 1668, 2014]. Es frecuente que no todos los sitios de un sistema puedan ser monitorizados, además de que no todos los sitios son equiparables dado que no tienen un número similar de usuarios conectados; en ocasiones se propone una ponderación para promediarlas adecuadamente. Su expresión ponderada es la siguiente:

$$SARFI_{System} = \frac{1}{N_T} \cdot \sum_{j=1}^{N_{nc}} N_j \cdot SARFI_j \quad (2.6)$$

donde, N_{nc} representa el número de nudos de carga en el sistema, N_j es el número de usuarios alimentados del nudo j , $SARFI_j$ es el valor del índice para el nudo j , y N_T es el número total de usuarios monitorizados en todos los nudos⁸ [EPRI, 1999].

⁷Se entiende por “registros adecuados” a una monitorización bajo ciertas condiciones mínimas de: tasa de muestreo, resolución, periodo de tiempo, etc.

⁸Hasta el momento, la definición de los “pesos” y la definición analítica del índice SARFI-System se mantiene en discusión.

Si se desea calcular el índice $SARFI_{System}$ sin ponderar, la expresión se simplificaría en la ecuación (2.7), donde $SARFI_i$ es el índice SARFI del nudo i , y donde N es el número de nudos monitorizados del sistema.

$$SARFI_{System} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N SARFI_i \quad (2.7)$$

2.4.4.2. Índice de energía de sistema

Este índice se obtiene básicamente del promedio del índice SEI de todos los sitios monitorizados del sistema [Bollen y otros, 2003]. El índice SEI_{System} se calcula de la división entre la suma de toda la energía de los huecos de los sitios i evaluados SEI_i y el número total de sitios N . A continuación se detalla su expresión analítica:

$$SEI_{System} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N SEI_i \quad (2.8)$$

2.4.4.3. Índice de coste económico de sistema

Debido a la falta de uso o proliferación de los índices de sistema, es escasa la referencia práctica de este tipo de índice, de forma teórica, se tiene el índice ACSS (*Average loss of voltage sag events of system*), propuesto por [Xiangning y otros, 2007], que lo define como el coste económico promedio debido a los eventos registrados del sistema, y es calculado de forma similar al índice de sitio ACSC. Su expresión se define con la ecuación (2.9), donde N es el número total de usuarios finales conectados al sistema; las demás variables están expresadas en la ecuación (2.5).

$$ACSS = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N_E} \sum_{i=1}^{STCK} (CS_i)_k \quad (2.9)$$

Debido al extendido uso del índice de sitio SARFI-X o SARFI-Curve, y por la dificultad de aplicación práctica de diversos índices de sistema, el índice más empleado para evaluar de forma general la severidad de los huecos de tensión de una red es el índice $SARFI_{System}$; especialmente el índice $SARFI_{System}$ sin ponderación.

2.5. Estimación de huecos de tensión en ausencia de medidores

La estimación de los huecos de tensión en un sistema eléctrico puede realizarse principalmente a través de dos tipos de métodos: ya sea por un modelo determinista (donde se consideran variables fijas), o que su desarrollo sea realizado a través de un procedimiento estocástico (donde se consideran variables con incertidumbre).

Un modelo determinista es aquel en el que, bajo determinadas condiciones iniciales, siempre ocurre el mismo resultado. A manera de ejemplo, se tiene la ley de Kirchhoff que indica que: “la corriente que entra por un nudo es igual a la corriente que sale del mismo”. Si se probara esta ley en laboratorio, lo único que podría variar el resultado es un error en la medición. Muchos fenómenos físicos y químicos están dentro de esta categoría.

En el ámbito de la estimación determinista de los huecos de tensión, los métodos denominados: “Distancias Críticas”, “Posiciones de Fallo” y “Función de Probabilidad de Densidad” son los más conocidos y aplicados [Qader y otros, 1999; Bollen, 2000; Lim y Strbac, 2002].

En el caso de los métodos estocásticos, las variables consideradas no son constantes de un evento a otro, conllevando el que su análisis no sea viable mediante métodos tradicionales o deterministas. Entre los métodos que se ajustan a esta característica, la técnica de Monte Carlo es la más utilizada para la predicción estocástica de los huecos de tensión [Martínez y Martín-Arnedo, 2004; Olguin y otros, 2005].

A continuación, se detalla una breve descripción de los citados métodos de predicción de huecos de tensión.

2.5.1. Método de distancias críticas

El método de distancias críticas se utiliza básicamente para redes de tipo radial y está basado analíticamente en la teoría del divisor de tensión (ver Fig. 2.9). Su objetivo es determinar la distancia entre el punto de conexión común PCC (típicamente un nudo tipo carga) y la localización del cortocircuito, tal que se registre una tensión de magnitud determinada V [Bollen, 2000]. Su expresión analítica se detalla a continuación:

$$L_{crit} = \frac{Z_s}{z} \cdot \frac{V}{1 - V} \quad (2.10)$$

donde,

- L_{crit} : Distancia entre el punto de conexión común y el cortocircuito.
- Z_s : Impedancia de la fuente.
- z : Impedancia de la línea por unidad de longitud.
- V : Tensión residual en PCC debido al fallo.

Figura 2.9 – Método de distancias críticas: modelo de red radial.

Este planteamiento solo es válido para redes radiales, no obstante, se han presentado algunas extensiones para aplicar el método a redes malladas sencillas o con geometrías no completamente radiales [Bollen, 1998a, 1999; Li y otros, 2004].

2.5.2. Método de posiciones de fallo

El método de posiciones de fallo (MPF) es el procedimiento más ampliamente utilizado para la estimación de los huecos de tensión. La versatilidad en su uso, tanto para redes radiales o malladas, y la posibilidad de calcular cualquier tipo de cortocircuito (equilibrado o desequilibrado), permite caracterizar el comportamiento del sistema en

términos de huecos de tensión. El MPF está basado en simular un conjunto de cortocircuitos en un número de posiciones predeterminadas a lo largo de las líneas y los nudos del sistema. Para un nudo cualquiera de la red, el número de huecos de tensión se cuantifica a través de la probabilidad de fallo de los puntos preestablecidos y el respectivo cálculo de la tensión residual del cortocircuito [Qader y otros, 1999; Olguin y otros, 2005].

En el escenario más sencillo del MPF, únicamente se considera un posible tipo de fallo en la estimación (típicamente monofásico o trifásico), y suponiendo una probabilidad de fallo uniforme a lo largo de las líneas, la clasificación de los eventos es realizada mediante:

$$N_k(V_k < V_{lim}) = \sum_1^P \lambda_f \quad (2.11)$$

donde,

- V_k : Tensión residual en el nudo k .
- V_{lim} : Umbral de tensión. Valores comunes: 90 %, 80 %, ..., 20 %, 10 % de la tensión nominal.
- N_k : Número de eventos de huecos de tensión en el nudo de interés k con tensión inferior a V_{lim} .
- λ_f : Frecuencia de fallo en la posición P .
- P : Número total de posiciones P a lo largo de las líneas del sistema.

Para aclarar la metodología, se ilustra en la Fig. 2.10 una línea de transporte entre los nudos k y j con 5 posiciones predeterminadas para efectuar los fallos. Suponiendo que en esta línea se tiene una tasa de 2.1 fallos al año, y que la probabilidad de fallo es uniforme a lo largo de la línea, la probabilidad asociada a cada posición es de $\frac{2.1}{5} = 0.42$ fallos/año. De forma resumida, a continuación se describen los pasos para el desarrollo del MPF:

1. Se calcula la matriz de admitancias del sistema.
2. Se definen las características de los cortocircuitos a aplicar, es decir, el tipo de fallo y la impedancia de fallo.
3. Se selecciona arbitrariamente el número de posiciones de fallo en cada línea.
4. Se simulan los cortocircuitos con las características indicadas en el paso 2 en cada posición determinada en el paso 3 y, mediante el método clásico de cálculo de cortocircuitos (ecuación A.1 del anexo), se calculan las tensiones residuales del sitio de interés (nudo k).
5. Teniendo en cuenta la probabilidad de fallo de cada posición y su respectiva tensión residual, se clasifican los eventos por intervalos de tensiones (ver ecuación (2.11)).
6. Se repiten los pasos 3 y 4 para todas las líneas del sistema, donde las estimaciones de cada línea son registrados de forma acumulada para el nudo de interés.

Figura 2.10 – Método de posición de fallos: línea con 5 posiciones de fallo.

2.5.3. Método de función de densidad de probabilidad

Otra opción metodológica para la estimación de los huecos de tensión es el método de función de densidad de probabilidad propuesto por Lim y Strbac en [Lim y Strbac, 2002]. Este método expresa la posición del fallo mediante un parámetro Ψ que toma un valor en el rango de 0 a 1, representando la localización del fallo a lo largo de una línea del sistema de forma porcentual. Es decir, un valor de 0 para el extremo inicial de la línea y 1 para el extremo final.

De esta forma, a diferencia del método de posiciones de falta, las posiciones de los fallos no están concentradas en un número de puntos discretos previamente definidos de la línea sino que vienen caracterizadas por un valor continuo del parámetro Ψ . Como el parámetro Ψ es una variable aleatoria, se le asocia una función de densidad de probabilidad $g(\Psi)$.

En el caso de la tensión residual registrada en el nudo m de interés del sistema, la profundidad de la tensión residual guarda relación directa con la localización del fallo a lo largo de la línea, por ello, es una función que depende del parámetro Ψ . Esto es:

$$U_m = \mathbb{U}_m(\Psi) \quad (2.12)$$

Debido a la naturaleza aleatoria de U_m , expresada en 2.12, la tensión residual del nudo m también tendrá asociada una función de densidad de probabilidad $f(U_i)$. La función $f(U_m)$ está relacionada con la función de densidad de probabilidad de faltas de la línea $g(\Psi)$ mediante la siguiente ecuación [Walpole y otros, 1993]:

$$f(U_m) = g(\Psi) \cdot \left| \frac{d\Psi}{dU_m} \right| \quad (2.13)$$

En base a la expresión anterior, una vez que se conoce la expresión que relaciona la tensión residual U_m con la posición de fallo Ψ , y conociendo también la distribución de probabilidad de los fallos a lo largo de la línea $g(\Psi)$, es factible determinar la distribución de valores de tensión $f(U_m)$ en el nudo m .

A partir de la función de densidad de probabilidad de la tensión $f(U_m)$, se puede calcular la probabilidad de que un hueco de tensión tenga una magnitud dentro de un rango determinado. Su expresión analítica es definida a continuación:

$$P(U_{lim\ inf} \leq U_m \leq U_{lim\ sup}) = \int_{U_{lim\ inf}}^{U_{lim\ sup}} f(U_m) dU_m \quad (2.14)$$

siendo,

$P(U_{lim\ inf} \leq U_m \leq U_{lim\ sup})$:	Probabilidad de que la tensión residual U_m esté dentro del rango $[U_{lim\ inf}, U_{lim\ sup}]$.
$U_{lim\ inf}$:	Límite inferior del intervalo de tensión de interés.
$U_{lim\ sup}$:	Límite superior del intervalo de tensión de interés.

Finalmente, para calcular el número de eventos de huecos de tensión al año en el nudo m de interés se emplea la siguiente expresión:

$$N(U_{lim\ inf} \leq U_m \leq U_{lim\ sup}) = \lambda \cdot P(U_{lim\ inf} \leq U_m \leq U_{lim\ sup}) \quad (2.15)$$

donde,

- $N(U_{lim\ inf} \leq U_m \leq U_{lim\ sup})$: Número de eventos de huecos de tensión al año en el nudo m de interés con una tensión residual U_m dentro del rango $[U_{lim\ inf}, U_{lim\ sup}]$.
- λ : Número de fallos al año esperado en la línea considerada; este parámetro también es conocido como tasa de fallo.

De forma general, el método de función de densidad de probabilidad resulta una aportación muy interesante en la estimación de la severidad de los huecos de tensión en sistemas eléctricos. Entre los puntos a destacar es la posibilidad de ser aplicado a redes radiales y malladas, permite considerar el parámetro tasa de fallo de las líneas de la red, además de relacionar de forma continua la medición de la tensión residual de un nudo y la ubicación del fallo a lo largo de las líneas del sistema. Entre sus debilidades, el método propuesto en [Lim y Strbac, 2002] solo considera fallos trifásicos para la estimación de los huecos de tensión, omite el efecto de la impedancia de fallo, y no permite considerar la incertidumbre de las variables involucradas en la caracterización de los huecos de tensión.

2.5.4. Método de Monte Carlo

La base de un método probabilístico es contemplar la existencia del azar y la incertidumbre en las variables de entrada del modelo. Por la naturaleza aleatoria de los huecos de tensión y de las causas que lo determinan, las técnicas estocásticas resultan procedimientos ideales para caracterizar y evaluar los huecos de tensión en los sistemas eléctricos.

Al respecto, el método de Monte Carlo se muestra como la técnica de muestreo más empleada para la predicción de los huecos de tensión [Martínez y Martín-Arnedo, 2004; Olguin y otros, 2005]. Esta herramienta estadística especialmente utilizada en modelos con variables de alta incertidumbre, está ligada al uso intensivo del ordenador. Básicamente, como muestra la Fig. 2.11, este método de muestreo se fundamenta en calcular una cantidad n de veces un modelo analítico determinado con variables de entrada que toman n valores de entrada diferentes, hasta obtener una cantidad n de respuestas.

Aplicado a la predicción de los huecos de tensión, el método de Monte Carlo se desarrolla analíticamente mediante un simulador de cortocircuitos que genera de forma aleatoria faltas en un sistema que da a lugar a los huecos de tensión durante un periodo representativo de pseudo-monitorización. Entre las variables de entrada para caracterizar los huecos de tensión se tienen aquellas que caracterizan a los cortocircuitos que los producen, tales como: coeficiente de fallo⁹, impedancia de fallo, tipo de cortocircuito¹⁰, ubicación de la falta y duración.

⁹La variable aleatoria coeficiente de fallo representa el número de fallos que tiene un elemento del sistema en los n años de simulación del Monte Carlo.

¹⁰Los tipo de cortocircuitos son: monofásico, bifásico, bifásico a tierra y trifásico.

Figura 2.11 – Modelo esquemático del método de Monte Carlo.

Los pseudo-registros de huecos de tensión obtenidos del Monte Carlo carecen de información relevante de forma individual, sin embargo, en su conjunto, pueden ser evaluados estadísticamente para predecir propiedades valiosas de la población tales como: media, desviación típica, mediana, rangos intercuartílicos, etc.

De forma general, el método de Monte Carlo aplicado a la estimación de los huecos de tensión consta de los siguientes pasos:

1. Variables de entrada. Para la generación aleatoria de los cortocircuitos usualmente se modelan algunas de las siguientes variables: coeficiente de fallo, impedancia de fallo, tipo de fallo, localización del fallo y duración del hueco. Su representación matemática se realiza mediante conocidas distribuciones de probabilidad, tales como: Poisson, uniforme, normal o Gaussiana, etc. Asimismo, cuando se tiene los datos históricos de alguna variable, su caracterización se realiza a través de una distribución no-paramétrica (ej. la variable tipo de fallo).
2. Modelo analítico. Para el cálculo de las tensiones residuales de los huecos de tensión simulados, se emplea la teoría clásica de análisis de cortocircuitos [Grainger y Stevenson, 1994].
3. Registro de los eventos. Para la cuantificación o clasificación de los huecos de tensión usualmente se utiliza el índice SARFI-X, que como se dijo anteriormente, representa el número anual de huecos de tensión por debajo de un umbral de tensión $X\%$ determinado. Los umbrales de tensión más utilizados son el 90 %, 80 % y 70 %. Con menor frecuencia, se emplean también índices como el SARFI-Curve para la evaluación de la severidad de los huecos de tensión.
4. Tratamiento estadístico de los pseudo-registros. El parámetro estadístico típico en este tipo de estudios es la media del índice SARFI-X. Esta, representa el valor esperado del índice SARFI-X para un emplazamiento en particular o el sistema en su conjunto en una monitorización a largo plazo.

Como se ha indicado anteriormente, los métodos de muestreo están asociados al uso intensivo del ordenador y esto se debe a que la precisión de las estimaciones tiene relación directa con el número n de veces que se evalúa el modelo. En el caso del método de Monte Carlo, el error absoluto de la estimación decrece en relación $1/\sqrt{n}$ [Navidi, 2008].

2.5.4.1. Análisis de antecedentes

De forma general, la técnica de Monte Carlo resulta un procedimiento versátil y potente para la predicción de los huecos de tensión de una red. Su base analítica, que en este caso es la avalada teoría de cortocircuitos, le da alta fiabilidad a los cálculos realizados. No obstante, las predicciones obtenidas podrían ser cuestionables debido al modelado empleado en las variables involucradas en la generación de los cortocircuitos.

Del estudio de diversas referencias, se observa que el coeficiente de fallo e impedancia de fallo son las variables con una mayor heterogeneidad en su modelado. Por el contrario, la caracterización de variables como el tipo de fallo, la localización del fallo y la duración son definidas con considerable similitud entre las referencias.

Como se detalla en la tabla 2.6, la tendencia principal para representar el coeficiente de fallo de los elementos está en considerar un valor fijo para todo el sistema dado que no suele disponerse de datos más precisos. Con menor frecuencia, la caracterización del coeficiente de fallo se ajusta de acuerdo al nivel de tensión con que opera el elemento. Como propuesta a resaltar, es la de utilizar una distribución de Poisson para la generación del número de fallos de los elementos del sistema [Oliveira y otros, 2009]. Esta propuesta permite modelar la incertidumbre interanual característica en el número de fallos de los elementos de la red.

Tabla 2.6 – Caracterización del coeficiente de fallo en artículos recientes.

Autor	Coeficiente de fallo
[Qader y otros, 1999; Olguin y Bollen, 2003b; Martínez y Martín-Arnedo, 2004; Milanovic y otros, 2005; Espinosa y Hernández, 2007]	Fijo para el sistema.
[Moschakis y Hatziargyriou, 2006; Aung y Milanovic, 2006; Naidu y otros, 2011; Goswami y otros, 2012]	Fijo en cada nivel de tensión.
[Oliveira y otros, 2009]	Distribución tipo Poisson para cada nivel de tensión.

Por otra parte, en la tabla 2.7 se resumen los enfoques adoptados en la bibliografía respecto a la parametrización de la variable impedancia de fallo. En esta tabla, se observa que la tendencia predominante es considerar un cortocircuito franco (0Ω) en la caracterización de los huecos de tensión. Adicionalmente, otros autores proponen utilizar una distribución Gaussiana con media inferior a 10Ω o valores discretos.

La impedancia de fallo es una variable muy relevante en el cálculo de las tensiones residuales de los eventos de huecos de tensión. Una parametrización inadecuada de la misma alteraría de forma significativa el cálculo de la tensión residual, y por ende, las predicciones obtenidas.

Modelar la impedancia de fallo es un asunto complejo, ya que hasta el momento no se tienen datos precisos de monitorizaciones de esta variable. No obstante, simular la impedancia de fallo con un valor constante o nulo para generar los huecos de tensión resulta cuestionable. De la misma forma, el considerar una distribución normal para el modelado de la impedancia de fallo implicaría que existe una tendencia natural a un valor medio de esta variable, situación que resulta poco probable por la característica fortuita de los fallos.

Tabla 2.7 – Caracterización de la impedancia de fallo en artículos recientes.

Referencias	Impedancia de fallo (Ω)
[Qader y otros, 1999; Bollen, 1998b; Olguin y Bollen, 2003b; Milanovic y otros, 2005; Moschakis y Hatziargyriou, 2006; Aung y Milanovic, 2006; Espinosa y Hernández, 2007; Goswami y otros, 2012]	0
[Martínez y Martín-Arnedo, 2004; Faried y otros, 2005; Naidu y otros, 2011]	$N(5, 1)$; $N(10, 1)$
[Oliveira y otros, 2009]	$\{0, 5, 25, 40\}$

En base a los antecedentes indicados, se plantea el primer objetivo de la presente tesis, que es evaluar la importancia o influencia de la parametrización de las variables coeficiente de fallo e impedancia de fallo en la estimación de los huecos de tensión en redes de potencia. Su estudio y análisis, es tratado de forma pormenorizada en el siguiente capítulo.

2.6. Estimación de huecos de tensión a partir de medidas previas

La predicción de los huecos de tensión en una red de potencia puede ser planteada bajo dos escenarios: carencia total o parcial de medidores de huecos. En el apartado anterior, la ausencia total de medidas de huecos de tensión fue la hipótesis base. En este apartado, se describen los métodos basados en aprovechar los datos de una sección monitorizada del sistema, para una predicción más precisa de la severidad de los huecos en un nudo no monitorizado o en la red en su conjunto.

En este ámbito, autores como [Wang y otros, 2005; Olguin, 2005; Espinosa y Hernández, 2007; Hernández y otros, 2013] plantean diversas metodologías para utilizar la información previa de los monitores de huecos de tensión en las predicciones. A continuación se describen brevemente las citadas propuestas.

2.6.1. Estimación de huecos considerando mediciones de una red radial

El método de estimación propuesto por Wang [Wang y otros, 2005] es aplicable exclusivamente a redes de tipo radial, tal como se muestra en Fig. 2.12. Su formulación se basa en el principio del divisor de tensión y, a través de una linealización de las medidas de la red, en extrapolar el perfil de tensión y predecir la tensión de un emplazamiento no monitorizado (ver Figs 2.13-2.14).

A manera de ejemplo, en la red ilustrada en la Fig. 2.12 se suponen monitorizados todos los nudos excepto el nudo 1. En la Fig. 2.13 se muestran las tensiones registradas por los medidores, y, aplicando una regresión lineal de las medidas, se obtienen las rectas normalizadas que permiten estimar la medida del nudo 1 (ver Fig. 2.14).

Figura 2.12 – Red tipo radial.

Figura 2.13 – Perfil de tensiones.

Figura 2.14 – Perfil normalizado de tensiones.

El método de Wang es un procedimiento que no es aplicable a redes malladas y, por sus características deterministas, se omite el efecto de diversas variables involucradas en la generación de los huecos de tensión. Cabe indicar que este método constituye una de las primeras aproximaciones para tratar de estimar la severidad de los huecos de tensión a partir de una monitorización parcial del sistema.

2.6.2. Estimación de huecos considerando datos estadísticos y mediciones

Como un paso adicional en la estimación de huecos de tensión considerando medidas previas se tiene la aportación de Olguin [Olguin, 2005], el cual presenta un procedimiento aplicable a redes malladas, además de considerar la frecuencia de fallo de los elementos del sistema a través de principios de la teoría de probabilidad.

Como muestra la Fig. 2.15, la metodología consiste en determinar el área de alcance del medidor para un nivel determinado de tensión. En el nudo genérico k se tiene un monitor M_k , cuya área de alcance del umbral de tensión v se ha determinado mediante una circunferencia. Es decir, si se produce una falta dentro del área de la circunferencia, la tensión en el nudo k es igual o menor que v , y, por lo tanto, el medidor M_k detectará el evento de hueco de tensión.

Figura 2.15 – Área de alcance de una red mallada.

En el ejemplo ilustrado en la Fig. 2.15 se observa que el área de alcance del medidor M_k se encontrarían seis posiciones de fallo definidas como $p_1, p_2, \dots, p_6$ y tres nudos (N_1, N_2 y k) en los que un cortocircuito da lugar a un hueco en el nudo k . De forma análoga al método de posiciones de fallo, cada una de estas nueve posiciones tiene asignado un valor de fallos al año, los cuales son obtenidos de datos estadísticos del sistema.

De forma similar al método de posiciones de falta, esta metodología supone un fallo en el centro de cada línea y en los nudos de la red. Es decir, el procedimiento consiste en calcular las tensiones residuales producidas en el nudo k por cada una de las nueve posibles posiciones de falta. A partir de la medida del monitor M_k , se considera "posición real" a la posición de fallo que genere la tensión residual en el nudo k más cercano a lo registrado por M_k . Determinada la posición real de la falta, se podrán hacer estimaciones de los huecos esperados en los emplazamientos no monitorizados.

Entre sus principales características, esta metodología de predicción es determinista, por lo que no considera la naturaleza aleatoria de las variables que generan los huecos de tensión, en especial de la impedancia de fallo o el tipo de cortocircuito. Adicionalmente, el cálculo de la "posición real" resulta complejo, ya que pueden existir diversas ubicaciones en la red que cumplan el condicionamiento analítico. Finalmente, la localización de las faltas simuladas estaría limitada a una posición discreta, situación que es poco probable en la realidad.

2.6.3. Estimación de estado de huecos de tensión

En las propuestas de [Espinosa y Hernández, 2007; Hernández y otros, 2013] se presenta un método para estimar los huecos de tensión de una red a partir de los datos de un conjunto reducido de nudos con medidor. Este método se basa en plantear un sistemas de ecuaciones de la forma:

$$H = M \cdot X \quad (2.16)$$

donde,

- H : Vector de mediciones en el que cada elemento representa el número de huecos medido en un nudo monitorizado.
- M : Matriz binaria que relaciona faltas con huecos de tensión en los nudos monitorizados.
- X : Vector de variables a ser determinadas. Representa el número de faltas que ocurren en cada una de las posiciones [Hernández y otros, 2013] o segmentos de la línea [Espinosa y Hernández, 2007] consideradas.

El sistema representado en la ecuación (2.16) tiene un número de ecuaciones m , siendo m el número de nudos medidores disponibles.

El número de incógnitas n , es el número de posiciones de falta [Hernández y otros, 2013] o de zonas de la línea [Espinosa y Hernández, 2007] en las que debe determinarse el valor de la variable X .

En la práctica $n > m$, es decir, el número de incógnitas es mucho mayor que el número de ecuaciones, a diferencia de lo que ocurre en la estimación de estado convencional aplicada en los sistemas eléctricos. Por ello, el sistema de ecuaciones planteado es indeterminado y tiene infinitas soluciones.

Para seleccionar la solución válida, en [Espinosa y Hernández, 2007] se aplican técnicas de optimización lineal y entera. En [Hernández y otros, 2013] se busca la solución de norma mínima mediante el método de descomposición en valores singulares.

Una vez obtenida la solución y determinado el vector X , puede obtenerse el número de huecos previsto en todos los nudos de la red mediante un sistema de ecuaciones análogo a (2.16) pero aplicado en este caso a los nudos en los que no se dispone medidor:

$$H_{nm} = M_{nm} \cdot X \quad (2.17)$$

donde,

- H_{nm} : Número de huecos estimado en los nudos en los que no se dispone de medidor.
- M_{nm} : Es una matriz que, de forma análoga a M , relaciona faltas con huecos en este caso en nudos sin monitorización.

El procedimiento indicado puede ser realizado para evaluar mediciones de huecos de varios rangos de tensión, es aplicable a redes tanto radiales como malladas, y considera la frecuencia de fallo de los elementos del sistema para calcular el número de huecos de tensión en los nudos de la red. No obstante, no considera la aleatoriedad característica de las variables que generan los huecos de tensión. Asimismo, no se modela el efecto de la impedancia de fallo, además de que la aleatoriedad de la localización de la falta está limitada al grado de discretización que se haya determinado previamente en las líneas.

2.7. Localización óptima de medidores de huecos de tensión.

Muy frecuentemente, la base para considerar como óptimo un procedimiento o decisión es el criterio técnico-económico. Es decir, se busca determinar la solución más económica sin dejar de cumplir las exigencias técnicas del problema planteado.

Este criterio de optimización se aplica también a la monitorización de los huecos de tensión en redes eléctricas, persiguiendo el objetivo de reducir el número de medidores de huecos sin menoscabar la calidad de la monitorización. Si se colocara un medidor

de huecos por cada nudo del sistema, se garantizaría el 100 % de observabilidad de los huecos en la red. No obstante, no siempre es posible cumplir este criterio, ya sea por limitaciones económicas, restricciones de operación, o simplemente el operador de la red busca plantear una solución técnico-económica aceptable para la monitorización de los huecos de tensión.

Cabe destacar que en la actualidad el coste de los medidores de huecos de tensión ha descendido de forma considerable, no obstante, su valor económico varía de acuerdo al grado de precisión o confiabilidad de sus medidas. Por ello, el localizar de forma estratégica un conjunto de medidores de altas prestaciones podría aportar otro enfoque de interés por parte del operador de la red. Adicionalmente, un sistema de monitorización de los huecos de tensión de menor tamaño permitiría una simplificación del volumen de la información registrada, por ende, se facilitaría el análisis y el estudio de la severidad de los huecos de tensión en el sistema eléctrico.

De acuerdo con los requerimientos indicados, autores como [Olguin y Bollen, 2003a; Olguin y otros, 2006; Espinosa y otros, 2009] plantean diversos procedimientos para la localización óptima de medidores de huecos de tensión.

Para determinar la localización óptima de los medidores, se busca garantizar analíticamente la observabilidad de todos los cortocircuitos que dan lugar a huecos en el sistema por al menos un medidor, y a partir de esta restricción, se calcula el número mínimo y la ubicación de los medidores de huecos de tensión de la red.

De forma general, los métodos propuestos se muestran como una evolución metodológica, que inicialmente solo consideraba los fallos equilibrados en los nudos del sistema para emular los posibles huecos de la red [Olguin y Bollen, 2003a; Olguin y otros, 2006]. En lo posterior, para incrementar el realismo de las estimaciones, se extiende la metodología a todos los tipos de faltas (equilibradas y desequilibradas) tanto en nudos como en líneas del sistema [Espinosa y otros, 2009].

2.7.1. Localización óptima de medidores considerando fallos equilibrados en nudos.

La formulación analítica de los métodos de optimización considerando el caso más sencillo, solo fallos en el nudos del sistema, se define como [Olguin y Bollen, 2003a; Olguin y otros, 2006]:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N y^N(i), \quad \text{sueto a :} \\ \min \sum_{i=1}^N m_N^t(i, j) \cdot y^N(i) \geq 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \\ y^N(i) \text{ binario } \forall i \end{aligned} \tag{2.18}$$

donde $y^N(i)$ es un elemento del vector Y^N de dimensión igual al número de nudos N , y su valor indica el requerimiento de un medidor en dicho emplazamiento de acuerdo con el criterio siguiente:

$$y^N(i) = \begin{cases} 1, & \text{sí se requiere medidor en nudo } i \\ 0, & \text{no se requiere medidor en nudo } i \end{cases}, \quad \forall i \tag{2.19}$$

En el caso de $m_N^t(i, j)$, representa un elemento de la matriz de alcance $M_N^t(i, j)$ y su valor también es binario. Esto es, $M_N^t(i, j)$ es una matriz de orden $N \times N$, de la siguiente forma:

$$M_N^t(i, j) = \begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & . & . & . & m_{1,N} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & . & . & . & . \\ . & . & m_{3,3} & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ m_{N,1} & . & . & . & . & m_{N,N} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

donde, para un umbral de tensión determinado t , y una pseudo-medida de tensión residual u , el valor del elemento $m_N^t(i, j)$ es definido como:

$$m_N^t(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } m_N^t(i, j) \leq t \\ 0, & \text{si } m_N^t(i, j) > t \end{cases}, \forall i, j \quad (2.21)$$

Las celdas no nulas de una columna j de $M_N^t(i, j)$ representan los nudos en los que se origina un hueco cuando ocurre un fallo en el nudo j . Considerando el criterio de optimización indicado en (2.18), de todos los nudos que perciben el hueco originado por una falta, al menos uno de ellos debe tener instalado un monitor.

La ecuación (2.18) se resuelve empleando programación lineal entera, empleando el método de Ramificación y Acotación (*Branch and Bound*) [Castillo y otros, 2002].

Este método de localización óptima de medidores de huecos de tensión es uno de los pioneros en tratar el problema. No obstante, limitaciones como la omisión de diversas variables en la simulación de los huecos de tensión, no considerar los fallos en líneas del sistema, u omitir la aleatoriedad de las variables que causan los huecos de tensión, resultan puntos muy relevantes a mejorar para una estimación más realista del conjunto de medidores óptimos.

2.7.2. Localización óptima de medidores considerando fallos equilibrados y desequilibrados en nudos y líneas.

Para incrementar el realismo del método de localización óptima de medidores, se consideran los registros de huecos de tensión causados por cortocircuitos ideales en las líneas del sistema. La localización de los fallos en las líneas del sistema está asociada a un modelo analítico que calcula la ubicación exacta del fallo (denominado “segmento de línea”), de tal forma que se registre un evento de hueco de tensión en los nudos terminales por debajo un umbral predeterminado de tensión; típicamente el 90 %, 80 % y 70 % de la tensión nominal de los nudos terminales de la línea. Adicionalmente, el efecto de los fallos desequilibrados es planteado en el algoritmo propuesto por [Espinosa y otros, 2009]. La formulación de la metodología es similar a (2.18), no obstante, para considerar los fallos en los segmentos de las líneas del sistema se redefine la expresión de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^N y^N(i), \quad \text{sujeto a :} \\
 & \min \sum_{i=1}^N m^t(i, j) \cdot y^N(i) \geq 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, S \\
 & y^N(i) \text{ binario } \forall i
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

donde, $m^t(i, j)$ es el elemento i, j de la matriz M^t , la cual es denominada “matriz de alcance” con dimensiones $N \times S$, siendo $S = \sum_{i=1}^L S_i$, L las líneas del sistema y S_i el número de segmentos establecidos en cada una de las L línea de la red. La matriz de alcance M^t se construye de la forma siguiente:

$$M^t = (M_1 \quad M_2 \quad \dots \quad M_L) \tag{2.23}$$

$$m^t(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } m^t(i, j) \leq t \\ 0, & \text{si } m^t(i, j) > t \end{cases}, \quad \forall i, j \tag{2.24}$$

En base a lo indicado en la expresión (2.23), cada fila i de la matriz de alcance M^t está asociada a un nudo i del sistema eléctrico, e indica los segmentos de línea en los que al producirse un cortocircuito franco, se registre un hueco de tensión residual menor que t en el nudo i . Esto es, cada fila de la matriz muestra el área de alcance que tendría un medidor ubicado en el nudo i .

Para considerar todos los tipos de fallos, el procedimiento es similar al planteado en (2.22). Es decir, se desarrolla el problema de optimización para los cuatro tipos de falta: monofásico, bifásico, bifásico a tierra y trifásico, y se resuelve el problema de optimización considerando los cuatro escenarios de tipo de faltas (trifásico $3f$, monofásico ft , bifásico ff y bifásico a tierra fft) en la nueva matriz de alcance $M_{OP}^t = (M_{3f}^t \quad M_{ft}^t \quad M_{ff}^t \quad M_{fft}^t)$. De esta forma, el problema de optimización se formula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^N y^N(i), \quad \text{sujeto a :} \\
 & \min \sum_{i=1}^N m_{OP}^t(i, j) \cdot y^N(i) \geq 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, S_{OP} \\
 & y^N(i) \text{ binario } \forall i
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

donde, $m_{OP}^t(i, j)$ es el elemento i, j de la matriz de alcance M_{OP}^t y $S_{OP} = S_{3f} + S_{ft} + S_{ff} + S_{fft}$.

Los pasos para desarrollar el algoritmo de emplazamiento óptimo de monitores de huecos de tensión es el siguiente:

1. Se realiza la lectura de los datos de parámetros eléctricos del sistema.
2. Se indica el umbral de tensión y el tipo o tipos de falta considerados en el emplazamiento. Así también, de existir, los criterios adicionales de optimización como

el nivel de redundancia de los medidores, preselección de nudos, etc.

3. Para cada tipo de falta se realiza lo siguiente:

- Para cada nudo del sistema se analiza la evolución de la tensión residual en cada fase originada por las faltas en las líneas de la red, y se determina la tensión residual equivalente.
- Se obtienen los segmentos en que se divide cada línea de acuerdo al umbral de tensión determinado y la tensiones residuales calculadas en el paso anterior.
- Una vez que se han encontrado los segmentos para cada línea, se obtiene la matriz de alcance M^t para el tipo de falta considerado.

4. Determinada la matriz de alcance para cada tipo de falta, se formula el problema de programación lineal entero. En el mismo, se incluyen las restricciones a considerar (redundancia, ubicación del medidor, etc.).

5. Finalmente, se resuelve el problema de programación lineal mediante un programa de optimización (*Branch and Bound*), obteniéndose así la localización óptima de los medidores de huecos de tensión.

Esta metodología resuelve en gran parte las limitaciones presentadas por el método de localización óptima de medidores de [Olguin y Bollen, 2003a; Olguin y otros, 2006]. Entre sus fortalezas están la versatilidad de aplicación a redes radiales o malladas, el considerar los fallos en nudos o líneas del sistema, considerar la influencia de los tipos de fallo, etc. No obstante, su planteamiento omite variables relevantes en la caracterización de la severidad de los huecos de tensión, como es el caso de la impedancia de fallo, la variabilidad interanual de los fallos de un elemento del sistema, la duración de los eventos, etc.

Adicionalmente, la formulación del problema de localización óptima de medidores está estrechamente ligado a la variable impedancia de fallo, ya que la profundidad de los huecos de tensión registrados mediante el método de segmentos de línea depende, entre otros, de la impedancia del segmento de la línea y de la impedancia de contacto en el cortocircuito. Caracterizar todos los fallos con una impedancia nula es poco realista, y de considerar en el modelo valores distintos de cero en la impedancia de fallo, se alterarían todas las localizaciones de los segmentos de línea, y por ende, se afectaría la formulación del problema de optimización y las respuestas obtenidas de localización óptima del sistema de monitorización de huecos de tensión.

PREDICCIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN EN AUSENCIA DE MEDIDAS Y ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

3.1. Introducción y estructura del capítulo

3.1.1. Introducción

Un parámetro crítico en la monitorización de los huecos de tensión en los sistemas eléctricos es la duración de dicha monitorización para que los registros realizados sean estadísticamente representativos del comportamiento del sistema a largo plazo. A manera de ejemplo, si los huecos de tensión en un nudo suceden con una frecuencia media de un hueco a la semana, se requeriría de aproximadamente 7 años de monitorización para estimar la media (huecos/año) con una precisión del $\pm 10\%$ en dicho emplazamiento. Si la frecuencia media de los huecos fuera quincenal, tener una precisión del $\pm 10\%$ en el valor de la media anual de huecos tomaría no menos de 16 años de monitorización¹ [Qader y otros, 1999].

Esto supone un serio condicionamiento para la monitorización in situ que, aunque valiosa para el estudio de eventos particulares, podría requerir de un periodo de medición muy extenso para la caracterización adecuada del sistema a largo plazo. Si esta situación se extiende a la diversidad de escenarios que tendría un sistema eléctrico (p. ej. la red eléctrica de un país), da como resultado que, hasta la actualidad, sea poco habitual contar con datos representativos de monitorización para diagnosticar adecuadamente la severidad de los huecos de tensión en una red o poder estudiar con mayor profundidad este tipo de perturbación eléctrica.

Por ello, es de interés tanto de la industria (compañías eléctricas, grandes usuarios, etc.) como de la academia el desarrollo de algoritmos que emulen y estimen de forma realista una monitorización a largo plazo de los huecos de tensión.

Como se indicó en el capítulo 2, en el ámbito de la estimación de huecos de tensión

¹Se supone una distribución tipo Poisson en los registros para el cálculo del periodo de monitorización de los huecos de tensión.

para redes eléctricas existen diversas propuestas de índole analítico y estocástico, teniendo entre las aportaciones más referenciadas: el método de posiciones de falta y la técnica de Monte Carlo [Qader y otros, 1999; Martínez y Martín-Arnedo, 2004; Olguin y otros, 2005]. En este capítulo, se pretende dar un paso adicional en el realismo y fiabilidad en la estimación de los huecos de tensión de los métodos existentes en la bibliografía, incluyendo aportaciones propias tanto en el modelado estocástico de las variables de entrada, como la inclusión de los índices de huecos más utilizados de las normativas como variables de salida.

Adicionalmente, a partir de las pseudo-medidas generadas, el presente capítulo estudia la influencia o sensibilidad de la parametrización de las variables del modelo en la estimación de los huecos de tensión, siendo de especial interés las variables omitidas o de mayor divergencia de caracterización entre las propuestas realizadas por diferentes autores. Para ello, se desarrolla un apartado de análisis de sensibilidad aplicado a la estimación de los huecos de tensión. Este procedimiento, basado en métodos clásicos de estadística inferencial, permitirá profundizar en la relación causa-efecto de las variables del modelo; es decir, establecer con rigor matemático la influencia o el efecto de la parametrización de ciertas variables en la estimación de los huecos.

3.1.2. Estructura del capítulo

En el presente capítulo se abordan dos aspectos principales:

- El desarrollo de un algoritmo para generar y estimar pseudo-medidas de huecos de tensión a largo plazo.
- Un análisis de sensibilidad que permita identificar la influencia de la parametrización de las variables de entrada en la estimación de los huecos de tensión; especialmente de las variables que presentan una caracterización heterogénea entre las diversas referencias bibliográficas.

A continuación se describe el primero de estos aspectos.

3.2. Algoritmo de predicción de huecos de tensión

Los algoritmos de estimación de severidad de huecos de tensión son de especial utilidad para los siguientes escenarios:

- Cuando existe una carencia total de medidas previas de huecos de tensión en el sistema eléctrico.
- Cuando se dispone de medidas pero tomadas en un periodo de monitorización no representativo de la red de interés.
- Cuando se busca analizar la severidad de los huecos de tensión de una red en fase de diseño.
- Para profundizar en el estudio de este tipo de perturbación eléctrica. En particular, en la relación entre las variables de entrada y el número de huecos (variable de salida) de los emplazamientos de un sistema eléctrico.

3.2.1. Antecedentes

En el capítulo anterior se describieron los principales métodos desarrollados para la estimación de huecos de tensión. Estos métodos se caracterizaban por un enfoque determinista, o bien, estocástico o probabilístico. El método de Monte Carlo, aplicado en este trabajo, se encuentra en ese segundo grupo y, respecto a otros métodos de predicción, presenta las siguientes ventajas:

- Permite considerar múltiples variables aleatorias en el modelado de los huecos de tensión. Esto aporta realismo a la simulación, lo que incrementa la fiabilidad de las predicciones obtenidas.
- Permite controlar y acotar la precisión de las estimaciones (índices de huecos) mediante la relación inversamente proporcional que mantiene dicha estimación con el tamaño de la muestra simulada. Esta característica implica un uso intensivo de recursos computacionales [Peña, 2001; Navidi, 2008].
- Es posible obtener diversas propiedades de la población. Es decir, a partir del tratamiento estadístico de la muestra de pseudo-medidas de tensiones residuales, se pueden estimar los parámetros: media, mediana, desviación típica, rangos intercuartílicos, etc. del modelo estudiado.
- Es un método conocido y muy bien establecido teóricamente en estadística. En ingeniería es ampliamente utilizado, especialmente para resolver funciones matemáticas muy complejas o cuando el modelo involucra múltiples variables de naturaleza estocástica.

Teniendo en cuenta las características señaladas, el Programa de Estimación de Huecos de Tensión desarrollado (en adelante PEHT) basa el algoritmo implementado en la técnica de Monte Carlo.

3.2.2. Método de Monte Carlo

Tal y como se describió en el capítulo anterior, la técnica de Monte Carlo es un método estocástico especialmente empleado para resolver modelos analíticos muy complejos o inviables de resolver mediante matemática tradicional. Como se muestra en la Fig. 3.1, la aplicación del método consta de cuatro etapas:

- Generación estocástica de variables de entrada de acuerdo a la distribución de probabilidad considerada.
- Aplicación del modelo analítico a las entradas generadas.
- Obtención de la muestra de salida.
- Cálculo de los estimadores mediante el tratamiento estadístico de la muestra.

En el presente trabajo, los parámetros o estimadores calculados de la muestra de registros de huecos de tensión son la media $\hat{x}$ y la desviación típica $\hat{s}$. Estos dos parámetros nos permiten conocer, con una precisión controlada, características fiables y con rigor matemático de una pseudo-monitorización de huecos a largo plazo.

(i) Variables de entrada

Figura 3.1 – Esquema genérico de la técnica de Monte Carlo.

3.2.2.1. Precisión del Monte Carlo

Para determinar la precisión de las estimaciones obtenidas a través del método de Monte Carlo, se aplica el intervalo de confianza para la media μ de la expresión (3.1), y, en el caso de la desviación típica σ , lo indicado en la ecuación (3.2) [Navidi, 2008; Ushakov, 2012].

$$\hat{x} - t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \hat{x} + t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

$$\frac{n \cdot \hat{s}^2}{\chi_{n-1, \frac{\alpha}{2}}^2} \geq \sigma^2 \geq \frac{n \cdot \hat{s}^2}{\chi_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2} \quad (3.2)$$

donde:

- $\hat{x}$: Media estimada a través de la muestra generada.
- $\hat{s}$: Desviación típica estimada de la muestra generada.
- n : Número de años de la muestra.
- $t_{m, \alpha}$: Distribución t-student con m grados de libertad y nivel de confianza α .
- $\chi_{m, \alpha}$: Distribución chi-cuadrado con m grados de libertad y nivel de confianza α .

Tabla 3.1 – Intervalo de confianza para la media.

Años de simulación	Intervalo de confianza
50	$\pm 0.28 \cdot \hat{s}$
100	$\pm 0.20 \cdot \hat{s}$
1000	$\pm 0.06 \cdot \hat{s}$
2000	$\pm 0.044 \cdot \hat{s}$
5000	$\pm 0.028 \cdot \hat{s}$

*Se considera un nivel de confianza del 95 %.

De forma resumida, en las tablas 3.1 y 3.2 se muestra la precisión que tendría el estimador de la media y desviación típica para diferentes escenarios de tamaño n de

Tabla 3.2 – Intervalo de confianza para la desviación típica.

Años de simulación	Intervalo de confianza	
	Cota mínima	Cota máxima
50	$0.84 \cdot \hat{s}$	$1.25 \cdot \hat{s}$
100	$0.88 \cdot \hat{s}$	$1.16 \cdot \hat{s}$
1000	$0.96 \cdot \hat{s}$	$1.05 \cdot \hat{s}$
2000	$0.97 \cdot \hat{s}$	$1.03 \cdot \hat{s}$
5000	$0.98 \cdot \hat{s}$	$1.02 \cdot \hat{s}$

*Se considera un nivel de confianza del 95 %.

muestra (para un nivel de confianza del 95 %). De las mismas, se puede observar la fuerte relación que tiene la precisión del estimador y el tamaño de la muestra. De acuerdo con la expresión (3.1), dicha precisión es proporcional a $\frac{1}{\sqrt{n}}$.

A continuación se detallan las partes principales del algoritmo de estimación PEHT desarrollado en este trabajo que, según lo indicado, se basa en la técnica de Monte Carlo.

3.2.3. Parametrización de las variables de entrada del PEHT

Dado que los cortocircuitos en el sistema eléctrico son la principal causa de aparición de los huecos de tensión, las variables que caracterizan dichas faltas son las que influyen en el número y las características de los huecos producidos en la red. Por ello, las variables de entrada consideradas en el algoritmo desarrollado son:

- La tasa de fallo, designada a través de la variable λ , indica el promedio de fallos al año que tienen los elementos de la red (nudo o línea) a largo plazo. Su representación en el PEHT se realiza mediante la variable aleatoria C_f , generando para cada año de simulación un número de fallos en cada elemento del sistema.
- Elemento de contacto en el cortocircuito. Esta variable, desde el punto de vista eléctrico, está relacionada de forma directa con la impedancia de fallo Z_f .
- Tipo de cortocircuito. Dependiendo del tipo de fallo T_f producido (monofásico, trifásico, etc.), puede variar la severidad del cortocircuito, y por ende, la profundidad del evento de hueco de tensión.
- Ubicación del fallo. La localización del fallo Ψ se genera de forma aleatoria, ya sea a lo largo de las líneas o en barras de las subestaciones de la red.
- La duración del fallo D está ligada a la velocidad de actuación del sistema de protecciones de la red. Su determinación está basada en un comportamiento aleatorio de datos estadísticos de interruptores reales de acuerdo a su nivel de tensión y ubicación.

- Fallo de las protecciones. Se contempla la posibilidad de fallo de la protección primaria y, en ese caso, la actuación de la protección secundaria o de respaldo que daría lugar a un tiempo más largo de despeje de la falta.

A continuación se estudia de forma pormenorizada cada una de las variables de entrada anteriormente mencionadas (C_f , Z_f , Ψ , T_f , D) y se analizan las distribuciones de probabilidad paramétricas que mejor se ajustan al modelado de las mismas [Zambrano y otros, 2015b,a].

3.2.3.1. Coeficiente de fallo

El coeficiente de fallos C_f representa la cantidad de veces al año que un elemento de la red es afectado en su operación normal, siendo este dato registrado por el sistema de protecciones de la red.

De forma general, el coeficiente de fallo de una red eléctrica se caracteriza por tener valores bajos en los nudos y valores mayores en las líneas, con la tendencia a disminuir su magnitud al aumentar el nivel de tensión de operación [Kjolle y otros, 2006].

El coeficiente de fallos es una variable que está determinada tanto por factores predecibles como por aspectos aleatorios. Es decir, su parte pronosticable puede ser determinada a través de las características particulares del elemento; por ejemplo, la longitud de una línea que, para distancias largas, aumentaría la probabilidad de aparición de fallos. Para la parte aleatoria, factores exógenos como las características geográficas en las que esté situado el elemento de la red aportarían incertidumbre a esta variable.

En el presente trabajo, la variable aleatoria coeficiente de fallo de los elementos del sistema se modela mediante una distribución Poisson. La distribución de probabilidad de Poisson se modela mediante la expresión:

$$f(k; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (3.3)$$

donde $f(k; \lambda)$ representa la función de probabilidad de los fallos de C_f , siendo λ la tasa de fallos al año del elemento del sistema, y la variable k el número de fallos generados al año. A manera de ejemplo, en la Fig. 3.2 se simulan 200 años de registros de la variable C_f para un elemento cualquiera del sistema que tiene una tasa de fallos de $\lambda = 1.5$ eventos/año.

En la Fig. 3.2 se puede observar que los valores obtenidos de números de fallos en cada año cumplen con una tendencia cercana a una situación real, donde existirán años sin fallos y otros con un elevado valor (máximo 6 fallos/año), donde el valor más frecuente es 1 fallo/año (este valor aparece en 65 de los 200 años). La media y la varianza calculada en los 200 años de simulación de este ejemplo de la variable aleatoria C_f es de 1.54 fallos/año y 1.58 fallos/año, respectivamente.

Para el desarrollo del PEHT, el valor de λ necesario para simular la variable de entrada C_f se obtiene de los datos estadísticos de fallos de los elementos de la red. No obstante, de carecer de esta información (por ejemplo, en los casos de las redes de prueba), se determina mediante los valores por defecto mostrados en la tabla 3.3 [Subcommittee, 1979].

Figura 3.2 – Generación aleatoria de C_f con una tasa de fallo 1.5 fallos/año durante un periodo de 200 años.

Tabla 3.3 – Parametrización de la variable tasa de fallo λ .

Elemento	Tensión (kV)	Tasa de fallo λ
Nudo	$U \leq 138$	0.027 fallos/año
	$U \geq 230$	0.021 fallos/año
Línea	$U \leq 138$	3.28 fallos/(año·100 km)
	$U \geq 230$	1.53 fallos/(año·100 km)

3.2.3.2. Impedancia de fallo

De acuerdo con las expresiones clásicas de análisis de cortocircuitos que se detallan en el Apéndice A.1, la impedancia de fallo Z_f es una de las variables principales para determinar la severidad de un cortocircuito. Su influencia, sin importar el tipo de falta, es inversamente proporcional a la magnitud de la intensidad de corriente del cortocircuito. Es decir, cuanto menor valor tenga Z_f , mayor será la corriente de cortocircuito que fluye hacia el punto de fallo, dando como resultado un incremento de la severidad del posible hueco de tensión registrado.

La caracterización de Z_f es un asunto complejo, ya que hasta el momento no se dispone de datos precisos de medidas de esta variable. Las escasas estimaciones suelen realizarse a partir de la medición de otras variables como la tensión y la corriente, y su cálculo conlleva la suposición de ciertas hipótesis como el tipo de fallo, localización a lo largo de la línea, etc., que llevan a bastante incertidumbre en el valor obtenido.

A continuación se proporcionan algunos datos que ayudarán a establecer una mejor caracterización del posible rango de valores y distribución de probabilidad de la variable impedancia de fallo Z_f .

Fallos típicos como las descargas eléctricas en las líneas y defectos en los aisladores, producen que la corriente de cortocircuito suela fluir a través de un arco entre la línea

energizada y la estructura de la torre, permitiendo la descarga por la puesta a tierra de la estructura. Si imaginamos este caso común, la Z_f vendría dada por la ecuación (3.4), siendo R_{arc} la resistencia del arco y R_{cont} la resistencia del elemento de contacto hasta su descarga a tierra [Chamorro, 2005].

$$Z_f = R_{arc} + R_{cont} \quad (3.4)$$

A través de la ecuación (3.5), propuesta por Warrington, se observa que la resistencia de arco está en función de la longitud l del arco y la intensidad del cortocircuito I_{cc} que fluye en el arco. Como la distancia entre conductores aéreos está estandarizada por su tensión de operación, en la tabla 3.4 se estima la resistencia de arco para diversos escenarios de distancias e intensidades de cortocircuito [C Warrington, AR, 1946].

$$R_{arc} = \frac{28710 \cdot l}{I_{cc}^{1.4}} \quad (3.5)$$

Tabla 3.4 – Estimación de resistencia de arco en líneas aéreas R_{arc} .

Distancia (m)	Tensión (kV)	Resistencia de arco (Ω)		
		$I_{cc} = 1 \text{ kA}$	$I_{cc} = 5 \text{ kA}$	$I_{cc} = 10 \text{ kA}$
2	33	3.6	0.4	0.2
5	110	9.1	1	0.4
8	220	14.5	1.5	0.6

Fuente: Datos obtenidos de [Chamorro, 2005].

En el caso de la R_{cont} del mencionado fallo por descargas eléctricas de la ecuación (3.4), su valor podría ser estimado con la puesta a tierra de los apoyos que dependiendo de cada región suele estar normalizada. En el caso de España, el Reglamento de Líneas de Alta Tensión limita este valor a 20Ω [BOE-5269, 2008]. En el caso de líneas que incorporan cables de tierra, la resistencia equivalente de las puestas a tierra sería considerablemente menor, llegando a tener un valor inferior a $6 \Omega^2$ [Chamorro, 2005]. Este análisis permite hacer una primera aproximación de la impedancia de falta a través de las siguientes expresiones:

$$\text{Líneas sin cable a tierra :} \quad Z_f \leq R_{arc} + 20 (\Omega) \quad (3.6)$$

$$\text{Líneas con cable a tierra :} \quad Z_f \leq R_{arc} + 6 (\Omega) \quad (3.7)$$

Cuando el cortocircuito se origina por el contacto externo de un elemento, como la proximidad de la vegetación con la línea o por contacto de algún material entre líneas, se da la posibilidad de un rango muy amplio de valores de la impedancia de fallo, volviendo compleja su cuantificación. Para estos casos, se han analizado las aportaciones de dos fuentes bibliográficas³: un antiguo estudio de la impedancia de fallo en redes reales en [Gilkeson y otros, 1937] y el manual de protecciones de distancia en [Chamorro, 2005].

²Para un terreno de resistividad $1000 \Omega \cdot m$ y un conductor ACSR.

³Solamente se considera estas dos bibliografías por la escasez de estudios de la impedancia de fallo en sistemas eléctricos reales.

La tabla 3.5 muestra los principales resultados al estudio presentado en [Gilkeson y otros, 1937].

Tabla 3.5 – Registros de impedancia de fallo en sistemas eléctricos reales.

Sistema	Eventos capturados	Moda (Ω)	Mediana (Ω)	Promedio (Ω)
A - 33 kV	161	8	22	25
B - 33 kV	89	24	28	30
C - 44 kV	1031	13	23	57
D - 132 kV	14	15	28	30
E - 220 kV	60	25	31	34

Fuente: Datos obtenidos de [Gilkeson y otros, 1937].

Las estimaciones de Z_f presentados en la tabla 3.5 están basados en las siguientes consideraciones:

- Los resultados fueron obtenidos en base a un análisis de corrientes de falta fase a tierra.
- La impedancia de fallo incluye la resistencia de arco, el contacto entre conductor y tierra, y el elemento de unión entre la torre y la puesta a tierra.
- La impedancia de fallo es considerada puramente resistiva.

Tomando como referencia la tabla 3.5, se observa que para las redes de alta tensión el rango de valores de Z_f tiene una media entre 30 a 34 Ω . Por otra parte, considerando lo indicado en [Chamorro, 2005], se recomienda un ajuste conservador de Z_f de 40 Ω para las protecciones de distancia. Esta información permite inferir las siguientes características de la variable Z_f para una red de alta tensión:

- Como límite inferior de Z_f , su magnitud sería de al menos el valor de la resistencia de arco R_{arc} (ver tabla 3.4).
- Para el caso típico, fallos monofásicos producto de descargas en las líneas, el valor mínimo de Z_f sería la suma de la resistencia de arco y la resistencia de la puesta a tierra de la estructura, según lo indicado en la ecuación (3.6). En el caso de líneas con cable a tierra, aplicaría lo expresado en la ecuación (3.7). En sistemas de alta tensión, se estima un valor promedio conservador de Z_f entorno a los 30 Ω de resistencia.
- Como la naturaleza de Z_f es aleatoria y la carencia de datos no permite establecer propiedades estadísticas claras, se considera adecuado que la distribución de probabilidad de Z_f sea equiprobable; es decir, se ajuste a una distribución uniforme de probabilidad entre los valores extremos considerados.

Para el presente trabajo, basándose en los antecedentes comentados, se establece la hipótesis de $Z_f \sim U(0, 60)$. Es decir, la variable aleatoria Z_f se ajusta a una distribución

uniforme de probabilidad con media 30Ω y con un rango equiprobable de valores entre 0 y 60Ω .

En la Fig. 3.3 se ilustra un ejemplo del muestreo aleatorio de 200 observaciones ajustado a la hipótesis planteada. En la parte izquierda de la gráfica se detalla el valor del conjunto de las 200 observaciones de Z_f , y en la parte derecha el respectivo histograma. Como se observa, la distribución de probabilidades de los eventos de la variable aleatoria Z_f es equiprobable dentro del rango de 0-60 Ω , y para este ejemplo, su valor medio es de 29.64Ω .

Figura 3.3 – Generación aleatoria de 200 observaciones de la variable Z_f .

3.2.3.3. Tipo de fallo

Esta variable permite representar diferentes tipos de cortocircuitos en el momento de un fallo en la red. Entre los tipos de falta T_f considerados se tienen: monofásicas (1F), bifásicas (2F), bifásicas a tierra (2FT) y trifásicas (3F).

Al ser T_f una variable de naturaleza estocástica, la determinación del tipo de falta puede variar de acuerdo a factores externos como las condiciones geográficas, climatólogicos, etc., de ahí que las probabilidades del tipo de fallo varíen de una red a otra. Sin embargo, se debe tener presente que, de forma general, las faltas monofásicas son el tipo de fallo con mayor probabilidad de aparición en los sistemas eléctricos.

Tabla 3.6 – Probabilidades del tipo de fallo implementadas.

Tipo de falta	Probabilidad
1F	80 %
2F	5 %
2FT	10 %
3F	5 %

Considerando que la distribución del tipo de fallo suele ser un dato conocido del sistema, y que las propuestas de distribución de probabilidad de los diferentes tipos de fallo utilizadas por diversos autores son bastante homogéneas [Naidu y otros, 2012; Oliveira y otros, 2009; Aung y Milanovic, 2006; Espinosa y Hernández, 2006], en este trabajo se aplica de forma generalizada la propuesta de [Olguin y otros, 2005], tal como se detalla en la tabla 3.6.

3.2.3.4. Localización del fallo

En la Fig. 3.4 se representa de forma esquemática una línea de longitud L_{kj} situada entre los nudos k y j , en la que se produce una falta en el punto p . Los nudos m e i representan emplazamientos cualesquiera del sistema fuera de la línea k - j .

Figura 3.4 – Diagrama esquemático de la variable localización del fallo.

De acuerdo con la definición adoptada en [Lim y Strbac, 2002; Espinosa y Hernández, 2006], la profundidad del hueco de tensión está asociada a un parámetro Ψ que representa porcentualmente la ubicación de la falta dentro de la línea k - j . Este parámetro se define como:

$$\Psi = \frac{L_{kp}}{L_{kj}} \quad (3.8)$$

donde L_{kp} representa, según se muestra en la Fig. 3.4, la distancia desde el nudo inicial k de la línea y la falta ocurrida en p . Por tanto, así definido, el parámetro Ψ varía entre 0 (si la falta ocurriese en el origen de la línea) y 1 (si ocurre en el extremo final, el nudo j).

Suponiendo que el nudo k fuera el que monitoriza los eventos de huecos de tensión, cuanto menor sea la distancia al punto de fallo p , mayor será la severidad del hueco de tensión registrado, ya que el parámetro Ψ está asociado con el aumento o disminución de la impedancia de la línea involucrada en el cálculo del cortocircuito.

En este trabajo, para la representación de la variable localización de fallo se emplea una distribución uniforme de probabilidad $\Psi \sim U(0, 1)$, otorgando la misma probabilidad de fallo a cualquier punto a lo largo de las líneas del sistema eléctrico.

3.2.3.5. Duración del hueco de tensión

Los huecos de tensión se definen principalmente por dos parámetros: tensión residual durante el hueco y duración del mismo. Se comprende por duración al tiempo que transcurre entre el momento que cualquiera de las tres fases alcanza una tensión residual por debajo del valor límite de referencia hasta que la tensión vuelve a superar el citado umbral en las tres fases. Usualmente este umbral es del 90 % de la tensión nominal y la duración de los huecos de tensión oscila entre medio ciclo y un minuto [IEC 61000-2-8, 2002; IEEE Std. 1159, 2009].

La duración del hueco de tensión está ligada al tiempo de respuesta del sistema de protecciones [IEC 61000-2-8, 2002]. Durante el tiempo que circula la corriente de cortocircuito se produce un hueco de tensión en los nudos cercanos al fallo y, cuando el sistema de protecciones despeja la falta y deja circular la corriente de cortocircuito, el hueco desaparece. Por ello, la duración del hueco está determinada por el tiempo de actuación del relé y la respuesta mecánica de los interruptores.

En este trabajo, se considera un sistema de protecciones con protección de respaldo. Es decir, cuando la protección primaria no logra despejar la falta, se daría paso a la actuación de la denominada protección secundaria. Se considera que la probabilidad de fallo de la protección primaria (*PFPP*) para las líneas de transmisión es del 2.22 %, y para el caso de las barras en las subestaciones del 1.19 % [Schweitzer y otros, 1997]. Típicamente el retardo entre la actuación de la protección primaria y secundaria es desde 300 ms hasta varios segundos [Alstom, 1995; Schweitzer y otros, 1997].

Para simular el comportamiento del sistema de protecciones, en este trabajo se propone que los tiempos de despeje siguen una distribución normal; esto es, cuentan con un valor promedio μ que los caracteriza, y por sus propiedades, el 99 % de los valores generados estarán dentro del rango $\mu \pm 3\sigma$, siendo σ la desviación típica. Esta caracterización del tiempo de despeje simula con realismo el comportamiento de las protecciones, ya que otorga incertidumbre entre los tiempos de despeje de la falta de un evento a otro, además de que la mayoría de eventos estarían cercanos a la media del tiempo de despeje elegido. Esta incertidumbre del tiempo de despeje permitiría representar principalmente la variabilidad característica de la respuesta mecánica de los interruptores.

Para caracterizar el valor medio del tiempo de despeje, se han empleado los datos propuestos en [Aung y Milanovic, 2006], mientras que para la desviación típica se ha calculado tal que la variabilidad de los datos, con un 99 % de confianza (es decir, $\pm 3\sigma$), sea del $\pm 15\%$ y $\pm 25\%$ del tiempo promedio de despeje para las protecciones primarias y secundarias, respectivamente (ver tablas 3.7 y 3.8).

Tabla 3.7 – Tiempos de despeje en barras.

Nivel de tensión (kV)	Tiempo de despeje (ms)				PFPP
	Primario		Secundario		
	μ_{prim}	σ_{prim}	μ_{sec}	σ_{sec}	
U $\geq$ 132 kV	60	3	380	31.7	1.19 %
33 kV $\leq$ U<132 kV	60	3	550	45.8	
11 kV $\leq$ U<33 kV	60	3	800	66.7	
11 kV<U	60	3	1000	83.3	

Como se indica en las tablas 3.7 y 3.8, los fallos en barras serían despejados de forma prácticamente inmediata por el sistema de protecciones ($\mu_{prim} = 60 \text{ ms}$), mientras que los tiempos de despeje del sistema de respaldo estarán coordinados según su nivel de tensión de operación. Asimismo, los tiempos de despeje de las líneas, tanto para las protecciones primarias y secundarias, serán coordinados según el nivel de tensión de operación.

En la Fig. 3.5 se ilustra la propuesta del modelo esquemático del tiempo de despeje de fallos del sistema de protecciones que determina la duración D de los eventos de

huecos de tensión.

Tabla 3.8 – Tiempos de despeje en líneas.

Nivel de tensión (kV)	Tiempo de despeje (ms)				PFPP
	Primario		Secundario		
	μ_{prim}	σ_{prim}	μ_{sec}	σ_{sec}	
$U \geq 132 \text{ kV}$	80	4	380	31.7	2.22 %
$33 \text{ kV} \leq U < 132 \text{ kV}$	150	7.5	550	45.8	
$11 \text{ kV} \leq U < 33 \text{ kV}$	300	15	800	66.7	
$11 \text{ kV} < U$	500	25	1000	83.3

Figura 3.5 – Modelo esquemático del tiempo despeje del sistema de protecciones.

En la Fig. 3.6 se muestra un ejemplo de 200 eventos aleatorios del tiempo de despeje en una barra que opera bajo una tensión de 132 kV. Del mismo, se puede observar que la mayoría de registros del tiempo de despeje rondan los 60 ms, además de que el rango de valores estaría mayoritariamente entre 53-67 ms. Para este ejemplo, el valor promedio de los tiempos de despeje de la muestra es de 59.85 ms, y su desviación típica de 3.05 ms.

Figura 3.6 – Ejemplo de generación aleatoria de 200 observaciones del tiempo de despeje en barras que operan a 132 kV.

Cabe indicar que el tiempo de actuación de las protecciones afecta a la duración de los huecos pero no a su tensión residual, siendo este segundo parámetro el más crítico de cara a evaluar la severidad de los huecos tal y como se verá más adelante. Por ello, buena parte de los estudios realizados en esta Tesis se ciñen al análisis de la tensión residual del hueco y no consideran su duración.

De forma general, en la tabla 3.9 se muestra un resumen de las principales características de las variables de entrada del programa de estimación de huecos propuesto.

Tabla 3.9 – Parametrización estocástica de las variables de entrada del PEHT.

Variable de entrada	Distribución	Parámetros	Observaciones
Coeficiente de fallo	Poisson $C_f \sim Poi(\lambda)$	λ : tasa de fallo del elemento (nudo o línea)	Distribución ampliamente utilizada en estadística para representar fallos o eventos fortuitos.
Impedancia de fallo	Uniforme $Z_f \sim U(a, b)$	$a = 0 \Omega$ $b = 60 \Omega$ $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$	Basado en el estudio de diversos autores, se propone parametrizar Z_f con la misma probabilidad a cualquier valor dentro del rango de 0 a 60 Ω .
Localización del fallo	Uniforme $\Psi \sim U(a, b)$	$a = 0$ $b = 1$	Se le otorga la misma probabilidad de fallo a cualquier punto a lo largo de la línea. Siendo $\Psi = 0$ el nudo inicio y $\Psi = 1$ el nudo final de la línea.
Tipo de fallo	No paramétrica $T_f \in \{1F, 2F, 2FT, 3F\}$	$P(1F)=80 \%$ $P(2F)=5 \%$ $P(2FT)=10 \%$ $P(3F)=5 \%$	A partir de las referencias bibliográficas, se define la probabilidad de aparición de cada tipo de fallo.
Duración	Normal $D \sim N(\mu, \sigma^2)$	μ : tiempo de coord. protección σ : incertidumbre del sistema de protecciones	Esta propuesta modela la tendencia centralizada que tendría el tiempo de despeje del sistema de protección primario y secundario, además de su respectiva variabilidad.

3.2.4. Modelo analítico del PEHT

En la sección anterior se han descrito las variables de entrada del programa PEHT que caracterizan los fallos producidos en el sistema y, por tanto, los huecos a los que dichos fallos darán lugar. El siguiente paso en el desarrollo del algoritmo de Monte Carlo, es la utilización de un modelo analítico que permita calcular los huecos de tensión producidos por los fallos simulados. Para realizar dicho cálculo, se utilizan las ecuaciones analíticas clásicas de fallos simétricos y asimétricos detalladas en el Apéndice A.1.

Si en la Fig. 3.7 se supone un cortocircuito trifásico en el nudo k , las expresiones analíticas para calcular la tensión residual en un nudo genérico m son:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{V}_k^{pf}}{\underline{Z}_{kk} + Z_f} \quad (3.9)$$

$$\underline{V}_m = \underline{V}_m^{pf} - \underline{Z}_{mk} \cdot \underline{I}_k \quad (3.10)$$

Figura 3.7 – Circuito esquemático.

Cabe recalcar que la formulación de la expresión analítica de la corriente $\underline{I}_k$ varía al considerar otro tipo de fallo. Adicionalmente, si el cortocircuito sucediera a lo largo de una línea, en un punto de fallo p , las expresiones serían las siguientes:

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{V}_p^{pf}}{\underline{Z}_{pp} + Z_f} \quad (3.11)$$

$$\underline{V}_m = \underline{V}_m^{pf} - \underline{Z}_{mp} \cdot \underline{I}_p \quad (3.12)$$

$$\underline{V}_p^{pf} = (1 - L) \cdot \underline{V}_k^{pf} - L \cdot \underline{V}_j^{pf} \quad (3.13)$$

donde,

$\underline{I}_k :$	Corriente de cortocircuito en el nudo de sistema k .
$\underline{I}_p :$	Corriente de cortocircuito en el punto de fallo p (nudo virtual).
$\underline{V}_m :$	Tensión residual registrada en el nudo de sistema m .
$\underline{V}_m^{pf}, \underline{V}_k^{pf}, \underline{V}_j^{pf} :$	Tensión previa al fallo en el nudo de sistema indicado en el subíndice.
$\underline{V}_p^{pf} :$	Tensión previa al fallo en el punto de fallo p (nudo virtual).
$Z_f :$	Impedancia de falta del cortocircuito.

Mediante las ecuaciones (3.14)-(3.15), se relaciona la variable localización del fallo con el nudo del sistema m y el punto de fallo p (nudo virtual), de tal manera que se obtienen las impedancias nodales de secuencia requeridos para el cálculo de la corriente de cortocircuito.

$$\underline{Z}_{mp}^{012} = (1 - \Psi) \cdot \underline{Z}_{mk}^{012} + \Psi \cdot \underline{Z}_{mj}^{012} \quad (3.14)$$

$$\underline{Z}_{pp}^{012} = (1 - \Psi)^2 \cdot \underline{Z}_{kk}^{012} + \Psi^2 \cdot \underline{Z}_{jj}^{012} + 2 \cdot \Psi \cdot (1 - \Psi) \cdot \underline{Z}_{kj}^{012} + \Psi \cdot (1 - \Psi) \cdot \underline{Z}_{kj}^{012} \quad (3.15)$$

donde,

Ψ :	Localización de la falta a lo largo de la línea $k-j$.
$Z_{mp}^{012}, Z_{mk}^{012}, Z_{mj}^{012},$ $Z_{kk}^{012}, Z_{jj}^{012}, Z_{kj}^{012}$:	Impedancia obtenida de la matriz de impedancias de los nudos indicados en los subíndices. Donde los superíndices 012 representan las secuencias directa, inversa y homopolar, respectivamente.
z_{kj} :	Impedancia serie de la línea $k-j$.

3.2.5. Parametrización estocástica de las variables de salida

El programa de estimación de huecos (PEHT) tiene entre sus objetivos proporcionar un enfoque práctico de las predicciones de severidad de huecos de tensión obtenidas, por ello, se adoptan los índices más relevantes de las principales normativas y recomendaciones indicadas en [IEC 61000-4-11, 1994; EPRI, 1997; IEEE Std 1346, 1998; EPRI, 1999; IEC 61000-2-8, 2002; IEC 61000-4-30, 2003; Bollen y otros, 2008; IEEE Std. 1159, 2009; IEEE Std. 1668, 2014].

Los índices de huecos de tensión considerados como variables de salida predeterminadas del PEHT son el SARFI-X y el SARFI-Curve. Adicionalmente, en caso de requerirlo el usuario, el PEHT permite evaluar el índice de energía SEI (en el apartado 2.4 se describen con mayor detalle los mencionados índices).

Como se indicó en el capítulo anterior con detalle, los mencionados índices de huecos de tensión se definen como [IEEE Std. 1668, 2014]:

- **SARFI-X:** Es la tasa o número de eventos con una variación de la tensión eficaz de corta duración por debajo de un umbral $X\%$ de la tensión de referencia. Estos umbrales de tensión son típicamente definidos como $X \in \{90, 80, \dots, 10\}$.
- **SARFI-Curve:** Es la tasa o número de eventos con una tensión residual y duración por debajo de la curva de compatibilidad de la carga estudiada. Entre las principales curvas de compatibilidad se tienen: ITIC, CEI 61000-4-11, SEMI-F.47 [IEC 61000-4-11, 1994; ITIC, 1998; Standard, SEMI, 2000].

De cara al operador de la red, el SARFI-X es un índice de severidad de los huecos de gran interés, ya que permite conocer con facilidad la frecuencia y profundidad de los huecos de tensión en un punto cualquiera del sistema. Por otro lado, el índice SARFI-Curve representa el número de “huecos intolerables” para un usuario final; indica el número de huecos de tensión que alteraría o interrumpiría el funcionamiento normal de los equipos para un emplazamiento o usuario determinado.

3.2.6. Implementación del algoritmo

El programa de estimación de huecos de tensión (PEHT), se ha realizado de forma modular mediante el paquete informático Matlab, y consta de forma general de los siguientes cinco módulos:

- **Lectura de datos:** encargado de importar los datos de la red (en formato txt o xls) a formato matricial dentro del entorno Matlab. Los datos del sistema se leen en el formato estándar de entrada del programa comercial PSS utilizado por las compañías eléctricas (versión 29).

- Datos de red estimados: tiene como objetivo recopilar la información de la tasa media de fallos de los elementos (nudos o líneas) o estimarla en el caso de que no se disponga de datos.
- Variables aleatorias de entrada: genera para cada variable aleatoria un conjunto de datos de acuerdo a su distribución de probabilidad según se ha descrito en la sección 3.2.3.
- Cálculo de tensiones: ejecuta la simulación de fallos en el sistema. Para cada fallo se calcula y registra la tensión residual de todos los nudos de la red aplicando el modelo analítico descrito en el apartado 3.2.4.
- Estimación de índices: a partir del conjunto de tensiones generadas en los n años de simulación de la muestra, se calcula los índices de sitio y sistema de la red estudiada descritos en el apartado 3.2.5.

En el Apéndice A.3 se indican detalles de la estructura de la programación y del desarrollo de los módulos indicados.

Más adelante, en la sección de Resultados (apartado 3.4), se mostrarán ejemplos de aplicación del PEHT en tres redes eléctricas de distinto tamaño y se evaluarán como variables de salida los índices SARFI-X y SARFI-Curve.

3.3. Análisis de sensibilidad de los huecos de tensión

Utilizando como herramienta el programa PEHT anteriormente descrito, en este apartado se va a desarrollar un análisis de sensibilidad para conocer la influencia de la parametrización de las variables de entrada en la severidad de los huecos de tensión.

3.3.1. Antecedentes

Del estudio bibliográfico de las variables involucradas en la estimación de los huecos de tensión (coeficiente de fallo C_f , impedancia de fallo Z_f , tipo de fallo T_f , localización del fallo Ψ y duración D), se han observado considerables divergencias en las parametrizaciones propuestas en la bibliografía, especialmente en las variables coeficiente de fallo e impedancia de fallo, tal como se muestra en la tabla 3.10. En la tabla mencionada se puede observar que un gran número de referencias bibliográficas consideran un valor nulo de la impedancia de falta a pesar de que esta es una hipótesis muy poco realista (detalles en el apartado 3.2.3.2).

Según se muestra la tabla 3.10, la diversidad de criterios de las variables C_f y Z_f entre los autores, pone de manifiesto el interés de analizar el efecto de la parametrización de variables de entrada en la estimación de la severidad de los huecos de tensión para los sistemas eléctricos.

Este estudio de la influencia de las variables de entrada sobre la estimación de los huecos, se desarrolla a través del procedimiento estadístico “análisis de sensibilidad”, el cual permite evaluar e interpretar con rigor matemático la causalidad entre un conjunto de variables estocásticas de entrada y salida. A continuación se describen sus fundamentos.

Tabla 3.10 – Parametrización de las variables C_f y Z_f en bibliografía.

Referencia	C_f (fallos·año/km)	Z_f (Ω)
[Qader y otros, 1999]	Fijo para el sistema	0
[Olguin y Bollen, 2003b]	Fijo para el sistema	0
[Martínez y Martín-Arnedo, 2004]	Fijo para el sistema	$N(10, 1)$
[Milanovic y otros, 2005]	Fijo para el sistema	0
[Faried y otros, 2005]	No se indica	$N(5, 1)$
[Moschakis y Hatziaargyriou, 2006]	Fijo en cada nivel de tensión	0
[Aung y Milanovic, 2006]	Fijo en cada nivel de tensión	0
[Espinosa y Hernández, 2007]	Fijo para el sistema	0
[Oliveira y otros, 2009]	Poisson para cada nivel de tensión	{0, 5, 25, 40}
[Naidu y otros, 2011]	Fijo en cada nivel de tensión	$N(5, 1)$
[Goswami y otros, 2012]	Fijo para en nivel de tensión	0

3.3.2. Fundamentos del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es un procedimiento estadístico-matemático que permite estudiar la relación causa-efecto de un modelo o sistema mediante la técnica denominada “Diseño de Experimentos” o DoE. Esto es, mediante un conjunto de experimentos previamente establecidos, se evalúa e interpreta el efecto de las variables de entrada sobre las variables de salida del modelo planteado. Para realizar esta evaluación se utiliza la técnica conocida como Análisis de la Varianza o ANOVA. El proceso completo se muestra esquemáticamente en la Fig. 3.8.

Figura 3.8 – Procedimiento esquemático del análisis de sensibilidad aplicado al estudio de los huecos de tensión.

3.3.2.1. Diseño de experimentos

El Diseño de Experimentos (DoE) es una herramienta estadística que permite analizar el efecto de una o varias variables de entrada a las que se denomina “factores” del

modelo. Las variaciones de los factores son denominados “niveles”. En la figura 3.9, el diseño de experimentos genérico propuesto considera I niveles del factor 1 y J niveles del factor 2, esto es, el DoE consta de $I \times J$ “tratamientos”. Adicionalmente, el experimento se realiza un número arbitrario m de veces para cada nivel y factor, lo que da lugar a m “réplicas”.

		Factor 1			
		Nivel 1	Nivel 2		Nivel I
Factor 2	Nivel 1	y_{111}	y_{211}		y_{I11}
		y_{112}	y_{212}		y_{I12}
		$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
		y_{11m}	y_{21m}		y_{I1m}
	Nivel 2	y_{121}	y_{221}		y_{I21}
		y_{122}	y_{222}		y_{I22}
		$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
		y_{12m}	y_{22m}		y_{I2m}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	Nivel J	y_{1J1}	y_{2J1}		y_{IJ1}
		y_{1J2}	y_{2J2}		y_{IJ2}
		$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
		y_{1Jm}	y_{2Jm}		y_{IJm}

Dos factores

$I \times J$ tratamientos

m réplicas

$I \times J \times m$ observaciones

Figura 3.9 – Modelado genérico de un diseño de experimentos de dos factores.

De forma resumida, la ejecución del DoE debe tener presente los siguientes pasos:

- Establecer con claridad la hipótesis inicial; es decir, lo que se busca estudiar o comprobar del modelo.
- Seleccionar los factores a evaluar del modelo experimental.
- Para cada factor, definir un conjunto de niveles que permitan aceptar o rechazar la hipótesis inicial.
- Obtener de forma independiente un conjunto de réplicas de cada tratamiento.

Una vez desarrollado el conjunto de pruebas o experimentos del DoE, se procede a la evaluación de las respuestas obtenidas. Para ello, entre las diversas herramientas estadísticas que permiten su estudio, en este trabajo se emplea el conocido análisis de la varianza o ANOVA. Esta avalada técnica estadística permite contrastar las variables de salida y, que bajo un nivel de confianza predeterminado (típicamente 95 %), se pueda aceptar o rechazar la influencia de un determinado factor sobre la respuesta del modelo estudiado.

3.3.2.2. Análisis de la varianza

El análisis de la varianza o ANOVA (de la terminología anglosajona *Analysis of Variance*), es una técnica estadística que permite extraer o inferir la relación causa-efecto de uno o varios factores del modelo analizado a partir de los valores generados en el DoE.

Como una definición más formal, el ANOVA es una prueba que permite contrastar si varias poblaciones tienen la misma media, comparando lo distantes que estén entre sí las medias muestrales en relación con la variación existente en las observaciones dentro de la muestra [Moore, 2005].

Para un típico ANOVA de dos factores, como se plantea en la Fig. 3.9, la variable de salida y_{ijk} es representada analíticamente mediante la siguiente expresión:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + u_{ijk} \quad (3.16)$$

donde,

- μ : Media global.
- α_i : Factor N° 1 del modelo planteado.
- i : Niveles del factor α , siendo $i = 1, \dots, I$.
- β_j : Factor N° 2 del modelo planteado.
- j : Niveles del factor β , siendo $j = 1, \dots, J$.
- $\alpha\beta_{ij}$: Interacción de los factores α y β de niveles i y j respectivamente.
- u_{ijk} : Componentes aleatoria $N(0, \sigma^2)$, donde k es el número de réplicas del tratamiento con $k = 1, \dots, m$.

Conocida la variable de salida y_{ijk} a través de las medidas obtenidas del DoE, la prueba ANOVA relaciona la varianza de los residuos de cada factor respecto a la varianza residual del modelo, y se establece bajo el nivel de confianza considerado la significancia o influencia de un determinado factor en la respuesta obtenida. En el Apéndice A.4 se describe con mayor detalle el procedimiento matemático para aplicar el ANOVA [Peña, 2001; Navidi, 2008].

Adicionalmente, es de recalcar que, previo a considerar como válidas las interpretaciones de causa-efecto obtenidas de la prueba ANOVA, se requiere que los datos del DoE cumplan con la “diagnóstico del modelo” la cual establece las siguientes condiciones [Peña, 2001; Navidi, 2008]:

- Independencia de los residuos: No debe existir autocorrelación o patrones repetitivos entre los residuos e_{ijk} del modelo. Para su evaluación, típicamente se utiliza la gráfica de residuos.
- Normalidad de los residuos: Se verifica que los residuos del modelo e_{ijk} se ajustan a una distribución normal. Para ello, de forma simplificada, se suele construir un histograma de los residuos del que se observará la campana de Gauss. Adicionalmente, pueden ser aplicados métodos como el gráfico Q-Q, el gráfico de cajas y bigotes, test de Kolgomorov-Smirnov, etc., con el fin de verificar la normalidad de los residuos del modelo.
- Homocedasticidad de los residuos: Se confirma que los residuos del modelo e_{ijk} tienen un nivel de dispersión similar. Para su verificación se emplea la gráfica de residuos o lo métodos de Barlett, Cochram, etc.

3.3.3. Planteamiento del análisis de sensibilidad en el estudio de los huecos de tensión

En este apartado se describe cómo se aplican las técnicas estadísticas del DoE y ANOVA descritas en las secciones anteriores al análisis de los huecos de tensión.

La aplicación de la técnica de DoE al estudio de la sensibilidad de las variables involucradas en la estimación de los huecos de tensión se realiza de la siguiente forma:

- **Objetivo:** Conocer el efecto o influencia que tienen las variables de entrada en la estimación de la severidad de los huecos de tensión. Caracterizada mediante los índices SARFI-90 y el SARFI-70 según se han definido en el apartado 3.2.5.
- **Factores:** Las variables de entrada seleccionadas como factores del DoE son las que tienen mayor incertidumbre y por ello muestran la mayor divergencia de parametrización entre los diversos autores (ver tabla 3.10). Esto es, los factores a evaluar son el coeficiente de fallo (C_f) e impedancia de fallo (Z_f). Las otras variables de entrada del modelo de estimación de huecos del PEHT, como el tipo de fallo, localización del fallo y duración, no son consideradas en el estudio de sensibilidad dado que existe un grado de consenso mucho mayor entre las diferentes referencias bibliográficas respecto a su parametrización.

Para cada una de estas variables de entrada (C_f y Z_f), se considera como factor tanto la media como la desviación típica de los parámetros. Esto permitirá determinar la importancia de la parametrización de estas variables en la severidad de los huecos de tensión

- **Niveles:** Dados los factores seleccionados, se plantean tres niveles de variación de los parámetros media y desviación típica de las variables C_f y Z_f .
- **Réplicas:** Se desarrollarán tres pruebas independientes en cada tratamiento. Esto es, para unas condiciones específicas de los factores y niveles, se obtienen tres mediciones independientes del modelo experimental.

De cara a estudiar el comportamiento de los sistemas eléctricos en términos de las variables involucradas en la generación de huecos de tensión, resulta indispensable la utilización de una herramienta informática, por ello, las pruebas planteadas en el DoE son ejecutadas a través de un módulo adicional del PEHT.

Como se muestra en la Fig. 3.10, en cada experimento se modifican características específicas de las variables de entrada (factores) a estudiar, y a través del análisis de sensibilidad, se interpreta con rigor matemático el efecto o influencia de la parametrización de C_f y Z_f en la estimación de los huecos de tensión.

Para determinar el efecto de la parametrización de las variables C_f y Z_f en la estimación de los huecos, conviene:

- Realizar el experimento de forma que los índices obtenidos cuenten con una elevada precisión.
- Desarrollar los experimentos en varias redes eléctricas de tal forma que se puedan generalizar las interpretaciones del análisis causa-efecto.

Figura 3.10 – Modelo esquemático del análisis de sensibilidad aplicado a huecos de tensión.

Para conseguir la precisión requerida, en el estudio realizado se ha simulado una muestra de 2000 años de registros en cada réplica. Esto permite alcanzar una precisión de $\pm 0.044 \cdot \hat{s}$ en la estimación del valor medio del SARFI-90 y SARFI-70 (detalles en la tabla 3.1).

3.3.4. Formulación del análisis de sensibilidad en el estudio de los huecos de tensión

Según se ha indicado anteriormente, el objetivo de este análisis es evaluar la influencia de los factores C_f y Z_f en la estimación de los huecos de tensión. La tabla 3.11 indica de forma resumida los tres casos evaluados y a continuación se describe detalladamente cada uno de ellos.

Los tres casos de análisis de sensibilidad planteados en la tabla 3.11 son detallados de forma pormenorizada a continuación.

3.3.4.1. Caso N° 1

En el apartado 3.2.3.1 se describió el modelado de la variable coeficiente de fallos C_f , mediante la distribución de Poisson. Según se indicó en dicho apartado, la probabilidad de tener un cierto número de fallos C_f en un año dado, en un elemento cuya tasa media anual de fallos es λ , venía dado por la expresión (3.3).

En la Fig. 3.11, se muestra un ejemplo con el fin de clarificar la relación que existe entre el parámetro tasa de fallo λ , y la probabilidad de aparición de fallos de un número de fallos C_f . Así, por ejemplo, al considerar una tasa media de fallo $\lambda = 2$ fallos/año, los valores más probables de C_f son 1, 2 y 3 fallos/año. Estos valores se producen en 270, 285 y 197 años, respectivamente, de los 1000 años generados. Sin embargo, hay un año en el que puede alcanzarse un valor máximo de hasta 8 fallos. Con un λ de 3 y 4 fallos/año se influye de forma directa en la distribución de la variable aleatoria C_f , causando que el valor máximo de C_f llegue a alcanzar 10 y 12 fallos/año, respectivamente.

A fin de evaluar el efecto de la precisión del coeficiente de fallo en la estimación de

Tabla 3.11 – Resumen de los casos a evaluar en el análisis de sensibilidad.

Número de caso	Factor a evaluar	Objetivo	Hipótesis base
1	Incertidumbre de C_f	Evaluar la influencia de la precisión de C_f en la estimación de los parámetros media y desviación típica de los índices de severidad de huecos de tensión SARFI-90 y SARFI-70.	Las otras variables de entrada del modelo son parametrizadas en el PEHT según lo establecido en la tabla 3.9 (pág. 64).
2	Media de Z_f	Analizar el efecto del valor medio de Z_f en la estimación de los parámetros media y desviación típica en los índices de severidad de huecos de tensión SARFI-90 y SARFI-70.	
3	Desv. típica de Z_f	Evaluar la influencia de la dispersión de Z_f en la estimación de los parámetros media y desviación típica en los índices de severidad de huecos de tensión SARFI-90 y SARFI-70.

Figura 3.11 – Generación de 1000 años de muestra de la variable C_f ante diversos escenarios de tasa de fallo.

los huecos de tensión y realizar el análisis de sensibilidad oportuno, se ha introducido un ruido o incertidumbre en el cálculo del valor C_f . Esto se ha realizado mediante el modelado de un error de tipo Gaussiano en la tasa de fallo λ considerada para los elementos del sistema de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} C_f &\sim Poi(\lambda') \\ \text{siendo:} \quad \lambda' &\sim N(\lambda, \sigma_{incert.}^2) \\ \sigma_{incert.} &= k \% \cdot \lambda, \text{ donde } k \in \{1/9, 2/9, 1/3\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Es decir, el valor del coeficiente C_f se distribuye según una distribución de Poisson donde el valor de la tasa de fallos λ' sigue a su vez una distribución normal de media λ y desviación típica $\sigma_{incert.}$. Con el fin de modelar diferentes grados de variación o incertidumbre de la variable C_f , se consideran tres valores para la desviación típica:

- Nivel bajo de incertidumbre $\sigma_{incert.} = \frac{1}{9}\lambda$.
- Nivel medio de incertidumbre $\sigma_{incert.} = \frac{2}{9}\lambda$.
- Nivel alto de incertidumbre con un $\sigma_{incert.} = \frac{1}{3}\lambda$.

De acuerdo con las características de la distribución Gaussiana de la incertidumbre de C_f , representada en la Fig. 3.12, el valor de λ' se encontrará con un 99.6 % de probabilidad entre $\lambda \pm 3\sigma_{incert.}$. Es decir, por ejemplo, en el caso de “incertidumbre alta” el parámetro λ' oscilaría con un 99.6 % de probabilidad entre valores desde 0 a 2λ en cada año de simulación del factor C_f .

Figura 3.12 – Niveles de incertidumbre de la variable C_f .

En la Fig. 3.13, se muestra la generación aleatoria de 1000 años de la variable C_f en el caso base sin incertidumbre y en los tres escenarios de incertidumbre indicados anteriormente mediante la expresión (3.17), para una tasa de fallo de $\lambda = 4$ fallos/año.

De forma general, se observa que el modelo propuesto para estudiar el efecto de la precisión de la variable C_f en los huecos de tensión se ajusta a la premisa de no modificar los datos característicos de tasas de fallo de los elementos de la red. Asimismo, en el ejemplo presentado en la Fig. 3.13, se muestra que el error introducido sí varía

Figura 3.13 – Generación de 1000 años de muestra de la variable C_f bajo tres niveles de incertidumbre.

la distribución de probabilidades de C_f , permitiendo evaluar de forma específica la precisión de C_f en la estimación de la severidad de los huecos de tensión en sistemas eléctricos.

3.3.4.2. Caso N° 2

Con el objetivo de estudiar la influencia del parámetro media de la impedancia de fallo (μ_{Z_f}) en la estimación de los huecos de tensión, se plantean tres escenarios:

- Impedancia de fallo baja con $\mu_{Z_f} = 6 \Omega$,
- Impedancia de fallo media con $\mu_{Z_f} = 15 \Omega$,
- Impedancia de fallo alta con $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$.

Según se describió en el apartado 3.2.3.2, los valores de la variable Z_f se ajustan a una distribución uniforme entre 0 y 2 veces el valor medio; es decir: $Z_f \sim U(0, 2 \cdot \mu_{Z_f})$. Este planteamiento persigue evaluar el efecto a largo plazo del parámetro μ_{Z_f} en la estimación de los huecos de tensión.

Para ilustrar los tres escenarios de impedancia indicados, en la Fig. 3.14 se muestra un ejemplo de 1000 años de simulación de la variable aleatoria Z_f con la distribución descrita. Del mismo, se observa que el valor medio de la variable μ_{Z_f} se corresponde de forma muy aproximada con el valor esperado para cada escenario, y que su rango de valores oscila de forma uniforme entre 0 y $2\mu_{Z_f}$.

3.3.4.3. Caso N° 3

Como se indica en la tabla 3.11, este caso de estudio busca conocer la influencia que tiene el parámetro dispersión o desviación típica de Z_f (σ_{Z_f}) en la severidad de los

Figura 3.14 – Generación de 1000 años de muestra de la variable Z_f en tres escenarios de diferente valor medio.

Figura 3.15 – Generación de 1000 años de muestra de la variable Z_f bajo tres niveles de incertidumbre.

huecos de tensión en los sistemas eléctricos. Para ello, se han planteado tres niveles de incertidumbre para evaluar este factor, todos ellos con un valor medio de la impedancia $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$.

Suponiendo una distribución uniforme $Z_f \sim U(a, b)$, se plantean diversos rangos de los parámetros a y b , siendo:

- Dispersión baja de Z_f con $Z_f \sim U(20, 40) \Omega$.
- Dispersión media de Z_f con $Z_f \sim U(10, 50) \Omega$.
- Dispersión alta de Z_f con $Z_f \sim U(0, 60) \Omega$.

A partir de los tres niveles planteados, y mediante la técnica de análisis de sensibilidad, se evalúa el efecto de σ_{Z_f} en la estimación de los huecos de tensión.

Para aclarar el modelado de la dispersión de la variable Z_f , en la Fig. 3.15 se plantea un ejemplo de 1000 años de simulación en los tres escenarios planteados. En dicha gráfica, se observa también el valor medio de Z_f que no es alterado significativamente respecto al valor esperado en el periodo de simulación establecido. No obstante, se evidencia de forma clara la variación de la dispersión en la variable Z_f en los diversos escenarios planteados.

3.4. Resultados

En la presente sección se describen los resultados obtenidos en los casos de estudio realizados en el presente capítulo en relación con los dos aspectos abordados en el mismo:

- Aplicación del PEHT para estimar la severidad de los huecos de tensión en una red con ausencia de medidores (apartado 3.2).
- Estudio de sensibilidad de las variables de entrada C_f y Z_f en los huecos de tensión (apartado 3.3).

Estos casos se han aplicado y evaluado en tres sistemas eléctricos:

- Red de prueba IEEE de 24 nudos (IEEE-24): Red estándar de prueba que consta de 24 nudos, 33 líneas, 5 transformadores de potencia y 10 centrales generadoras que operan en dos niveles de tensión, 138 kV y 230 kV [Grigg y otros, 1999]. El diagrama unifilar y los datos de la red se encuentran detallados en el apéndice A.2.1.
- Red de prueba IEEE de 118 nudos (IEEE-118): Este sistema es también una red estándar de prueba que tiene 118 nudos, 177 líneas, 9 transformadores y 36 centrales generadoras. La red opera a 138 kV, 161 kV y 345 kV [Christie, 1993]. El diagrama unifilar y datos de la red se encuentran detallados en el apéndice A.2.2.
- Red EC-357: En este caso, se trata de una red real correspondiente a Ecuador que está conformada por 357 nudos (182 nudos en alta tensión), 146 líneas, 162 transformadores de potencia y 105 centrales de generación que operan principalmente en 69 kV, 138 kV y 230 kV⁴.

⁴Por razones de confidencialidad, los datos de la red EC-357 no se detallan en el apéndice.

3.4.1. Aplicación del PEHT en el diagnóstico de severidad de los huecos de tensión

Para las redes IEEE-24, IEEE-118 y EC-357, se han generado y analizado muestras correspondientes a 1000 años de simulación en el PEHT. Esto supone que se obtendría una incertidumbre máxima en la estimación del SARFI-X a largo plazo de ± 0.39 eventos/año para la red IEEE-24, ± 0.31 eventos/año para la red IEEE-118 y ± 0.20 eventos/año para la red EC-357 con un nivel de confianza del 95 %⁵.

3.4.1.1. Evaluación del PEHT en la red IEEE-24

En la Fig. 3.16, se muestran los índices de sitio SARFI-X de toda la red IEEE-24. A partir de esta gráfica, se puede observar que los cinco emplazamientos más conflictivos del sistema, en términos del índice SARFI-X serían los nudos: 6, 10, 9, 4 y 3. Por otra parte, se muestra que los nudos 7, 22, 23, etc., tendrían los niveles más bajos de severidad de huecos de tensión en un periodo de monitorización a largo plazo.

Figura 3.16 – Índices de sitio SARFI-X de la red IEEE-24.

Respecto al índice de sitio SARFI-Curve, ilustrado en las diversas curvas de compatibilidad de la Fig. 3.17, se muestra que, de forma coherente a los índices de sitio SARFI-X, los emplazamientos del sistema de mayor y menor alteración del suministro eléctrico debido a los huecos serían los nudos 6 y 7, respectivamente. Adicionalmente, si la tolerancia de la cargas se ajusta a las curvas de compatibilidad SARFI-IEC clase 3 o SARFI-SEMI, se registran valores más bajos de severidad de los huecos de tensión que si se consideran las curvas ITIC e IEC.C2 debido a la mayor sensibilidad de estas últimas.

Por otra parte, el método de Monte Carlo, que es la base del algoritmo programado en el del PEHT, permite evaluar no solo el valor esperado de los índices de huecos en nudos del sistema, sino también la interanualidad que tendrían estos indicadores; es decir, el valor máximo y mínimo del índice bajo un nivel de confianza determinado (típicamente el 95 %). Mediante el uso de la herramienta estadística diagrama de caja, ilustrado en la Fig. 3.18, se sintetiza de forma gráfica los 1000 años de simulación de cada nudo de la red IEEE-24.

De la Fig. 3.18, se observa que para el emplazamiento más conflictivo de la red IEEE-24 (nudo 6), se obtiene la siguiente información del respectivo diagrama de caja:

- El valor medio esperado a largo plazo del índice SARFI-90 del nudo 6 es de 11 huecos/año.

⁵La incertidumbre máxima de los estimadores es calculada del nudo con mayor desviación típica de cada red y se emplearon las expresiones mostradas en la tabla 3.1 para su cálculo.

- El rango de posibles valores interanuales del índice SARFI-90 del nudo 6 está entre 3 y 19 huecos/año en una monitorización a largo plazo.
- Con un 50 % de probabilidad de aparición, el rango de posibles valores interanuales del índice SARFI-90 del nudo 6 está entre 9 y 13 huecos/año en una monitorización a largo plazo

Figura 3.17 – Índices de sitio SARFI-Curve de la red IEEE-24.

Figura 3.18 – Diagramas de caja del índice de sitio SARFI-X de la red IEEE-24.

Por otra parte, al evaluar el nudo 7 que es el emplazamiento de menor severidad del índice SARFI-90 de la Fig. 3.18, el respectivo diagrama de caja muestra la siguiente información:

- El valor medio esperado a largo plazo del índice SARFI-90 del nudo 7 es de 4 huecos/año, con un rango de posibles valores interanuales entre 0 y 10 huecos/año.
- Con un 50 % de probabilidad de aparición, el rango de posibles valores interanuales del índice SARFI-90 del nudo 7 está entre 3 y 6 huecos/año en una monitorización a largo plazo

3.4.1.2. Evaluación del PEHT en las redes IEEE-118 y EC-357

De forma análoga al apartado anterior, se realiza la aplicación del PEHT para las redes IEEE-118 y EC-357. Por el tamaño de las redes y la similitud conceptual de las respuestas obtenidas, se ha sintetizado el análisis de los resultados obtenidos mediante el PEHT en las Figs. 3.19-3.22, que muestran los índices SARFI-X y SARFI-Curve de las redes IEEE-118 y EC-357 respectivamente. No obstante, en el apéndice A.2.4-A.2.5 se anexan adicionalmente las gráficas de interanualidad que permitirían al lector un diagnóstico más detallado de los huecos de tensión en las redes mencionadas.

Figura 3.19 – Índices de sitio SARFI-X de la red IEEE-118.

Figura 3.20 – Índices de sitio SARFI-Curve de la red IEEE-118.

Figura 3.21 – Índices de sitio SARFI-X de la red EC-357.

Figura 3.22 – Índices de sitio SARFI-Curve de la red EC-357.

3.4.2. Análisis de sensibilidad aplicado al estudio de la severidad de los huecos de tensión

En la tabla 3.12, se resume la parametrización y nomenclatura utilizada en los tres casos de estudio en los que se ha realizado el análisis de sensibilidad de los huecos de tensión según se describió en el apartado 3.3.

Tabla 3.12 – Parametrización de los casos de estudio del análisis de sensibilidad.

Caso de estudio	Factor	Nivel	Parametrización	Nomenclatura	Unidad
1	$C_f(\sigma_\lambda)$	1	$Poi(N(\lambda, (\frac{1}{9} \cdot \lambda)^2))$	Incertidumbre baja	fallos/año
		2	$Poi(N(\lambda, (\frac{2}{9} \cdot \lambda)^2))$	Incertidumbre media	
		3	$Poi(N(\lambda, (\frac{1}{3} \cdot \lambda)^2))$	Incertidumbre alta	
2	μ_{Z_f}	1	$U(0, 12), \mu_{Z_f} = 6$	Impedancia baja	ohmios
		2	$U(0, 30), \mu_{Z_f} = 15$	Impedancia media	
		3	$U(0, 60), \mu_{Z_f} = 30$	Impedancia alta	
3	σ_{Z_f}	1	$U(20, 40), \mu_{Z_f} = 30$	Incertidumbre baja	ohmios
		2	$U(10, 50), \mu_{Z_f} = 30$	Incertidumbre media	
		3	$U(0, 60), \mu_{Z_f} = 30$	Incertidumbre alta	

Tomando como referencia los casos mostrados en la tabla 3.12, el análisis de sensibilidad de los huecos de tensión se ha desarrollado a través de los dos enfoques siguientes:

- Estudiando de forma gráfica y más detallada una pequeña muestra de nudos representativos de la red IEEE-24.
- A través de un estudio analítico generalizado de todos los nudos en los sistemas planteados (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357).

3.4.2.1. Análisis de sensibilidad aplicado a una muestra de la red IEEE-24

De forma inicial, el análisis de sensibilidad se ha aplicado a una pequeña muestra de cuatro nudos de la red IEEE-24 detallados en la tabla 3.13. Este planteamiento tiene el objetivo de introducir o familiarizar el uso de la técnica estadística análisis de sensibilidad de las variables coeficiente de fallo (C_f) e impedancia de fallo (Z_f) en la estimación de los huecos de tensión en un caso relativamente sencillo.

Tabla 3.13 – Características de la muestra de nudos estudiados en la red IEEE-24.

Nudo número	Tensión de operación	Tipo
2	138 kV	Generador
8	138 kV	Carga
18	230 kV	Generador
19	230 kV	Carga

Como se ha indicado en los apartados anteriores, las variables de salida son los índices SARFI-90 y SARFI-70, en los cuales se considera tanto la media como la desviación típica estimada en el análisis gráfico causa-efecto para la muestra de nudos seleccionados.

a) Caso N° 1: Análisis de sensibilidad de la precisión de C_f aplicado a una muestra de la red IEEE-24

Para una muestra de cuatro nudos de la red IEEE-24 (detallados en la tabla 3.13), en la Fig. 3.23 se ilustra la estimación del valor medio de los índices SARFI-90 y SARFI-70 del análisis de sensibilidad del caso N° 1. En este caso se estudia, tal y como se explicó en el apartado 3.3.4, el efecto de la precisión de C_f en la estimación de los huecos de tensión. En la parte izquierda de la gráfica indicada (Fig. 3.23.a), se observa que, a pesar de la incertidumbre introducida en la precisión de la variable C_f , la estimación del valor medio del índice SARFI-90 ($\mu_{\text{SARFI-90}}$) no se ve afectado significativamente a largo plazo debido al solapamiento de los intervalos de confianza de las respuestas obtenidas. Asimismo, en la parte derecha de la gráfica (Fig. 3.23.b), se evidencia una relación causa-efecto similar para el índice SARFI-70. Esto significa que la incertidumbre de la variable C_f no resulta un parámetro significativamente influyente en la estimación del valor medio del índice SARFI-70 a largo plazo ($\mu_{\text{SARFI-70}}$) en los nudos analizados.

Figura 3.23 – Evaluación de la precisión de la variable C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.

En la Fig. 3.24, se ilustra el efecto del incremento de la incertidumbre de la variable C_f en el parámetro desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 ($\sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$) en la muestra estudiada. En la gráfica (a) de la figura, se observa que la relación causa-efecto no es clara para la variable de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$, ya que carece de una tendencia homogénea en la muestra de nudos seleccionada. De la misma manera, en la gráfica (b) de la figura, se evidencia de nuevo que el incremento de la incertidumbre

Figura 3.24 – Evaluación de la precisión de la variable C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de la red IEEE-24.

de la variable C_f carece de una influencia significativa en la desviación típica estimada a largo plazo del índice SARFI-70.

Este análisis muestral de la red IEEE-24 permitiría tener una primera impresión sobre la importancia de la precisión de la variable coeficiente de fallo en la estimación de los huecos de tensión donde se ha visto que, del incremento controlado del error o incertidumbre en la variable, no influye de forma significativa a la estimación del parámetro media de los índices SARFI-90 y SARFI-70, además de no afectar de forma relevante la desviación típica del índice SARFI-70. Este análisis parcial del efecto de C_f será evaluado de forma más exhaustiva posteriormente a través del estudio de todos los nudos de las tres redes eléctricas planteadas (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357).

b) Caso N° 2: Análisis de sensibilidad de la media de Z_f aplicado a una muestra de la red IEEE-24

En la Fig. 3.25 se ilustra el caso de estudio N° 2 aplicado a una muestra de nudos de la red IEEE-24. Esta prueba tiene como finalidad evaluar la influencia del parámetro media de la impedancia de fallo (μ_{Z_f}) en la estimación de los huecos de tensión. Como se observa de forma clara en las gráficas (a) y (b) de la figura indicada, al incrementar el valor del parámetro media de la variable Z_f ($\mu_{Z_f} \in \{6 \Omega, 15 \Omega, 30 \Omega\}$), se evidencia una marcada disminución del número esperado de huecos de tensión a largo plazo. A partir de la muestra estudiada, se establecería que el parámetro μ_{Z_f} , como por otro lado resultaría predecible, es un factor influyente en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70, por lo que su adecuada caracterización resulta clave en la fiabilidad de las predicciones de huecos de tensión obtenidas.

En la Fig. 3.26, se analiza la relación entre la desviación típica de los índices de huecos SARFI-90 y SARFI-70 y el valor medio de la impedancia de falta. En esta figura puede observarse que, en los nudos analizados, existe una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros. En general, al aumentar el valor de μ_{Z_f} ,

se disminuye de forma significativa los valores de las variables de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$.

Figura 3.25 – Evaluación del efecto del valor medio de la variable Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.

Figura 3.26 – Evaluación del efecto del valor medio de la variable Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.

c) Caso N° 3: Análisis de sensibilidad de la dispersión de Z_f aplicado a una muestra de la red IEEE-24

Este apartado tiene como objetivo evaluar el efecto del parámetro dispersión o desviación típica de la impedancia de fallo (σ_{Z_f}) en la estimación de la severidad de los huecos de tensión en una muestra de cuatro nudos de la red IEEE-24. Para ello, los experimentos de variación de σ_{Z_f} se desarrollan de forma controlada de acuerdo con el diseño de experimentos indicado en la tabla 3.12, es decir: incertidumbre baja con $Z_f \sim U(20, 40)$, incertidumbre media con $Z_f \sim U(10, 50)$, e incertidumbre alta con $Z_f \sim U(0, 60)$.

Como se observa en la Fig. 3.27.a, cuando se considera una mayor dispersión de la variable Z_f se incrementa el número medio estimado del índice SARFI-90 ($\mu_{\text{SARFI-90}}$). Esta primera aproximación del efecto de σ_{Z_f} mostraría la elevada importancia que tiene la parametrización de la variable Z_f no solamente de su valor medio sino también de su desviación típica en la estimación de los huecos de tensión.

En la Fig. 3.27.b, se ilustra el número medio esperado de huecos profundos ($\mu_{\text{SARFI-70}}$) para diversos escenarios de dispersión de σ_{Z_f} . Para la muestra de nudos seleccionada, se evidencia una relación directamente proporcional entre el factor σ_{Z_f} y la variable de salida $\mu_{\text{SARFI-70}}$. Es decir, al incrementar la dispersión de la variable Z_f se esperaría un aumento significativo de la media de eventos del índice SARFI-70.

Figura 3.27 – Evaluación del efecto de la dispersión de la variable Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de la red IEEE-24.

En la Fig. 3.28, se muestra el efecto de la dispersión de Z_f en la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 ($\sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$) de una muestra de nudos de la red IEEE-24. En la gráfica (a) de la figura, se observa que el incremento de la incertidumbre del factor σ_{Z_f} en la muestra seleccionada, provoca un incremento significativo de la variable de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$.

En el caso de la desviación típica del índice SARFI-70 ($\sigma_{\text{SARFI-70}}$) ilustrado en la Fig. 3.28.b, se evidencia una relación directamente proporcional entre las variables σ_{Z_f} y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$; esto es, al aumentar la dispersión de la variable Z_f la tendencia de $\sigma_{\text{SARFI-70}}$

Figura 3.28 – Evaluación del efecto de la dispersión de la variable Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en una muestra de nudos de la red IEEE-24.

es incrementarse de forma significativa.

En base al análisis de la muestra seleccionada, el caso N° 3 pone de manifiesto la importancia del parámetro desviación típica o dispersión de la variable Z_f en la estimación de los huecos de tensión en sistemas eléctricos. No obstante, como se indica en la tabla 3.10, este parámetro ha carecido de relevancia en la caracterización de Z_f en la mayoría de las referencias bibliográficas.

Esta evaluación gráfica del análisis de sensibilidad de una muestra de nudos permite tener un criterio somero de la relación causa-efecto de los tres casos de estudio planteados. En el siguiente apartado, estas interpretaciones son confirmadas o aclaradas con rigor matemático mediante un estudio generalizado de todos los nudos en las tres redes eléctricas estudiadas.

3.4.2.2. Análisis de sensibilidad generalizado de las redes eléctricas planteadas

En el presente apartado se estudia de forma analítica la relación causa-efecto de: la precisión de la variable coeficiente de fallo, el valor medio de la variable impedancia de fallo, y la desviación típica de la variable impedancia de fallo en la estimación de la severidad de los huecos de tensión de todos los nudos de las tres redes planteadas (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357).

Para desarrollar el análisis de sensibilidad de estos tres casos, se requiere de los datos de veintisiete experimentos ($3 \text{ factores} \cdot 3 \text{ niveles} \cdot 3 \text{ réplicas}$) para cada nudo de cada red, seguido del respectivo análisis de la relación causa-efecto. Por el volumen de la información a evaluar, resulta inviable un análisis gráfico, por ello, como se muestra en la Fig. 3.29, se implementa un algoritmo de análisis de sensibilidad analítico, el cual infiere la relación causa-efecto del modelo mediante la técnica ANOVA tal y como se explicó en el apartado 3.3.2.2.

Para el desarrollo de los experimentos y la interpretación del análisis de sensibilidad

Figura 3.29 – Modelo esquemático del algoritmo para el análisis de sensibilidad.

se consideran las siguientes premisas:

- Se establece una precisión elevada en las pseudo-medidas de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en los experimentos desarrollados. Esta condición es obtenida a través de una muestra de 2000 años de registros en cada experimento, dando a lugar a una incertidumbre máxima de ± 0.28 eventos/año de los índices SARFI-90 y SARFI-70 para las tres redes planteadas⁶.
- El ANOVA se desarrolla con un nivel de confianza del 95 %. Es decir, cuando el p-valor es mayor a 0.05, se considera que los niveles del factor estudiado no afectan de forma significativa a la variable de salida evaluada. Asimismo, si el p-valor es menor o igual a 0.05, se establece que los niveles del factor estudiado sí afectan de forma significativa a la respuesta del modelo.
- El análisis de sensibilidad se ha realizado para cada uno de los nudos de los tres sistemas eléctricos planteados. Si una relación causa-efecto coincide en más del 85 % de los nudos de la red y se repite en los tres sistemas planteados, se interpreta la mencionada relación causa-efecto como una tendencia generalizable en los sistemas eléctricos.

a) Caso N° 1: Efecto de la precisión de C_f en la estimación de los huecos de tensión

La tabla 3.14 muestra las características del análisis de sensibilidad desarrollado para evaluar la influencia de la precisión de C_f en la estimación de la severidad de los

⁶La incertidumbre máxima se estima para el nudo de mayor variabilidad de las tres redes planteadas con un nivel de confianza del 95 %.

huecos de tensión (índices SARFI-90 y SARFI-70).

Tabla 3.14 – Análisis de sensibilidad del caso N° 1.

Parametrización de las variables del PEHT	Factor: Precisión de C_f		
	Nivel 1 (Incert. baja) $\sigma_{incert.} = \frac{1}{9} \cdot \lambda$	Nivel 2 (Incert. media) $\sigma_{incert.} = \frac{2}{9} \cdot \lambda$	Nivel 3 (Incert. alta) $\sigma_{incert.} = \frac{1}{3} \cdot \lambda$
C_f : $Poi(N(\lambda, \sigma_{incert.}^2))$ Z_f : $U(0, 60)$, $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$ T_f : 80 % (1F), 5 % (2F), 10 % (2FT), 5 % (3F) Ψ : $U(0, 1)$	réplica 1: muestra = 2000 años	réplica 1: muestra = 2000 años	réplica 1: muestra = 2000 años
	réplica 2: muestra = 2000 años	réplica 2: muestra = 2000 años	réplica 2: muestra = 2000 años
	réplica 3: muestra = 2000 años	réplica 3: muestra = 2000 años	réplica 3: muestra = 2000 años

Tabla 3.15 – Porcentaje de nudos del sistema que son influenciados de forma significativa por la precisión de la variable de entrada C_f (caso de estudio N° 1).

Factor	Variable de salida	Red evaluada		
		IEEE-24	IEEE-118	EC-357
σ_{C_f}	$\mu_{SARFI-90}$	0 %	4.2 %	0.3 %
	$\mu_{SARFI-70}$	0 %	5.9 %	4.5 %
	$\sigma_{SARFI-90}$	83.3 %	65.3 %	76.2 %
	$\sigma_{SARFI-70}$	16.7 %	29.7 %	17.4 %

*Se considera un nivel de confianza del 95 % para el desarrollo del ANOVA.

En la tabla 3.15 se muestra un resumen del análisis de sensibilidad del caso de estudio N° 1 aplicado a todos los nudos de las tres redes planteadas. Del mismo, se extraen las siguientes conclusiones:

- A pesar de la incertidumbre introducida en la variable C_f , no se evidencian variaciones significativas en la estimación a largo plazo del parámetro media de los índices SARFI-90 y SARFI-70. Es decir, en el peor de los casos solo un 4.2 % y 5.9 % de los nudos de la red IEEE-118 detectó diferencias significativas para las variables de salida media del índice SARFI-90 y SARFI-70, respectivamente.

En la Fig. 3.30 se ilustra el efecto de la precisión de la variable C_f en la estimación de los índices SARFI-90 y SARFI-70. Como se observa en la gráfica, en general las respuestas obtenidas muestran un claro solapamiento entre sí. Este efecto es similar tanto para red IEEE-118 y EC-357 tal como se ilustra en los apartados B.1.1-B.1.2 del apéndice y corrobora los resultados mostrados en la tabla 3.15.

- En el caso del parámetro desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70, la precisión de la variable C_f carece de evidencias suficientes para establecer una tendencia generalizable. Como se indica en la tabla 3.15, ninguna de las tres redes estudiadas registra una tendencia mayor del 85 %, siendo la red IEEE-118 el sistema que reporta la relación causa-efecto de menor claridad, con un 65.3 %

Figura 3.30 – Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.

Figura 3.31 – Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.

y 29.7 % de nudos influenciados en las variables de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$, respectivamente.

Para este caso, se ilustra en la Fig. 3.31 el conjunto de experimentos de una de las réplicas del caso N° 1 para la red IEEE-24. Del mismo, se observa de forma coherente a los datos de la tabla 3.15, la mayor variabilidad de $\sigma_{\text{SARFI-90}}$ respecto a $\sigma_{\text{SARFI-70}}$ en las respuestas obtenidas. En el caso de las redes de mayor tamaño (IEEE-118 y EC-537), el efecto es similar a lo observado en la red IEEE-24 (apéndice B.1.1-B.1.2).

b) Caso N° 2: Efecto del parámetro media de Z_f en la estimación de los huecos de tensión

En la tabla 3.16 se detallan las características del análisis de sensibilidad desarrollado para evaluar la influencia del parámetro media de Z_f (μ_{Z_f}) en la estimación de la severidad de los huecos de tensión (SARFI-90 y SARFI-70) de las tres redes planteadas.

Tabla 3.16 – Análisis de sensibilidad del caso N° 2.

Parametrización de las variables del PEHT	Factor: Media de Z_f (μ_{Z_f})		
	Nivel 1 $\mu_{Z_f} = 6 \Omega$	Nivel 2 $\mu_{Z_f} = 15 \Omega$	Nivel 3 $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$
C_f : $Poi(\lambda)$ Z_f : $U(0, 2 \cdot \mu_{Z_f})$ T_f : 80 % (1F), 5 % (2F), 10 % (2FT), 5 % (3F) Ψ : $U(0, 1)$	réplica 1: muestra = 2000 años	réplica 1: muestra = 2000 años	réplica 1: muestra = 2000 años
	réplica 2: muestra = 2000 años	réplica 2: muestra = 2000 años	réplica 2: muestra = 2000 años
	réplica 3: muestra = 2000 años	réplica 3: muestra = 2000 años	réplica 3: muestra = 2000 años

Las variaciones de los niveles propuestos del parámetro μ_{Z_f} en la tabla 3.16 responden a una distribución uniforme de la variable Z_f con las siguientes características:

- $\mu_{Z_f} = 6 \Omega$ con $Z_f \sim U(0, 12) \Omega$.
- $\mu_{Z_f} = 15 \Omega$ con $Z_f \sim U(0, 30) \Omega$.
- $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$ con $Z_f \sim U(0, 60) \Omega$.

En la tabla 3.17 se describe el porcentaje de nudos del sistema que muestran una influencia relevante en la variable de salida al modificar el parámetro media de la impedancia de fallo en el análisis de sensibilidad. Para este caso, el efecto de μ_{Z_f} es muy claro para la estimación de los huecos de tensión, ya que afecta al 100 % de los nudos de todas las redes estudiadas. Es decir, modificar el valor medio de la impedancia de falta en el modelo de estimación de huecos de tensión, varía de forma directa tanto la media como la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70.

Tabla 3.17 – Porcentaje de nudos del sistema que son influenciados por el factor media de Z_f (caso de estudio N° 2).

Factor	Variable de salida	Red evaluada		
		IEEE-24	IEEE-118	EC-357
μ_{Z_f}	$\mu_{\text{SARFI-90}}$	100 %	100 %	100 %
	$\mu_{\text{SARFI-70}}$	100 %	100 %	100 %
	$\sigma_{\text{SARFI-90}}$	100 %	100 %	100 %
	$\sigma_{\text{SARFI-70}}$	100 %	100 %	100 %

*Se considera un nivel de confianza del 95 % para el desarrollo del ANOVA.

A continuación se describen las principales observaciones del análisis de sensibilidad del caso N° 2:

- Como se muestra en la Fig. 3.32, la relación del factor μ_{Z_f} con las variables de salida $\mu_{\text{SARFI-90}}$ y $\mu_{\text{SARFI-70}}$ es inversamente proporcional; al aumentar el parámetro μ_{Z_f} en el algoritmo de estimación de huecos de tensión, se disminuye de forma considerable la severidad de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 a largo plazo. Este efecto es análogo para las redes IEEE-118 y EC-357, tal como se muestra en las gráficas del apéndice B.1.1-B.1.2.

Figura 3.32 – Estudio del efecto del parámetro media de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.

- En la Fig. 3.33 se ilustra el efecto de la media de Z_f en la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24. De forma clara se observa la relación inversamente proporcional entre el factor μ_{Z_f} con las variables de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$. La relación causa efecto es similar para las redes de prueba de mayor tamaño, tal como se muestra en los apartados B.1.1-B.1.2 del apéndice.

Figura 3.33 – Estudio del efecto del parámetro media de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.

En consecuencia, esto confirmaría lo indicado en el análisis muestral del apartado 3.4.2.1. Es decir, por la fuerte influencia de la μ_{Z_f} en la estimación de la severidad de los huecos de tensión, el despreciar la impedancia de falta ($Z_f = 0 \Omega$) o inadecuada parametrización de la media de Z_f afectaría de forma considerable la fiabilidad del modelo de estimación de huecos de tensión planteado, tanto en la media como en la dispersión de los valores obtenidos.

c) Caso N° 3: Efecto del parámetro desviación típica de Z_f en la estimación de los huecos de tensión

Para conocer el efecto del parámetro desviación típica de Z_f (σ_{Z_f}) en la estimación de los huecos de tensión se desarrolla el conjunto de experimentos detallados en la tabla 3.18 para las tres redes planteadas (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357).

Tabla 3.18 – Diseño de experimentos a desarrollar en el caso de estudio N° 3.

Parametrización de las variables del PEHT	Factor: Desviación típica de Z_f (σ_{Z_f})		
	Nivel 1 (Incert. baja) $Z_f \in (20, 40) \Omega$	Nivel 2 (Incert. media) $Z_f \in (10, 50) \Omega$	Nivel 3 (Incert. alta) $Z_f \in (0, 60) \Omega$
C_f : $Poi(\lambda)$ Z_f : $U(a, b)$, $\mu_{Z_f} = 30 \Omega$ T_f : 80 % (1F), 5 % (2F), 10 % (2FT), 5 % (3F) Ψ : $U(0, 1)$ D : $N(\mu, \sigma^2)$	réplica 1: muestra = 2000 años	réplica 1: muestra = 2000 años	réplica 1: muestra = 2000 años
	réplica 2: muestra = 2000 años	réplica 2: muestra = 2000 años	réplica 2: muestra = 2000 años
	réplica 3: muestra = 2000 años	réplica 3: muestra = 2000 años	réplica 3: muestra = 2000 años

La tabla 3.19 resume el análisis de sensibilidad aplicado a todos los nudos de las

tres redes planteadas para el caso N° 3. De los datos de la tabla mencionada, se observa una marcada influencia del factor σ_{Z_f} en la estimación de la severidad de los huecos de tensión de los sistemas eléctricos estudiados. La variable de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$ se muestra con un 87.4 % de los nudos de la red EC-357 como la relación causa-efecto de menor grado de influencia; es decir, 312 de 357 de los nudos de la red EC-357 muestran evidencias significativas de ser influenciados por los niveles de σ_{Z_f} en la variable de salida $\sigma_{\text{SARFI-90}}$.

Tabla 3.19 – Porcentaje de nudos del sistema que son influenciados por el factor desviación típica de Z_f (caso de estudio N° 3).

Factor	Variable de salida	Red evaluada		
		IEEE-24	IEEE-118	EC-357
σ_{Z_f}	$\mu_{\text{SARFI-90}}$	100 %	100 %	93.3 %
	$\mu_{\text{SARFI-70}}$	100 %	99.2 %	93.3 %
	$\sigma_{\text{SARFI-90}}$	100 %	95.8 %	87.4 %
	$\sigma_{\text{SARFI-70}}$	100 %	99.2 %	91.6 %

*Se considera un nivel de confianza del 95 % para el desarrollo del ANOVA.

En la Fig. 3.34 se ilustra la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24, en la que se evidencia un claro incremento del número medio de huecos de tensión ($\mu_{\text{SARFI-90}}$ y $\mu_{\text{SARFI-70}}$) al aumentar la dispersión de la variable Z_f (σ_{Z_f}). Este efecto se da de forma generalizada para las redes de mayor tamaño (ver apéndice B.1.1-B.1.2).

Figura 3.34 – Estudio del efecto del parámetro dispersión de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.

En la Fig. 3.35 se estudia el efecto de σ_{Z_f} en la estimación a largo plazo de la dispersión de los índices SARFI-90 y SARFI-70 ($\sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{\text{SARFI-70}}$) en la red IEEE-24. En

las condiciones experimentales establecidas, se puede inferir una relación directamente proporcional tal que: $\sigma_{Z_f} \sim \sigma_{\text{SARFI-90}}$ y $\sigma_{Z_f} \sim \sigma_{\text{SARFI-70}}$. Este efecto es análogo para la redes IEEE-118 y EC-357 (ver apéndice B.1.1-B.1.2).

Figura 3.35 – Estudio del efecto del parámetro dispersión de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-24.

Este análisis de sensibilidad demuestra que, no solo el valor medio de la impedancia de falta, sino también su desviación es crítica para la obtención de valores precisos de los índices de huecos SARFI-90 y SARFI-70, tanto en lo que se refiere a su media a largo plazo como a su desviación típica, la cual reflejaría su variabilidad interanual.

3.5. Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se han realizado dos aportaciones principales en relación con el estudio de los huecos de tensión:

- La implementación de una herramienta informática que permite estimar de forma realista los huecos de tensión de cualquier sistema eléctrico.
- Profundizar en el estudio de la relación causa-efecto de las variables involucradas en la estimación de los huecos de tensión.

En general, los procedimientos presentados tienen como característica principal el uso de técnicas estadísticas, proporcionando una gran fiabilidad a las estimaciones de huecos obtenidas, además de permitir interpretar la relación causa-efecto de los casos de estudio con rigor matemático.

Respecto a la herramienta informática desarrollada (PEHT), la generación aleatoria de los huecos de tensión es realizada mediante un simulador de cortocircuitos alimentado por cinco variables estocásticas (coeficiente de fallo, impedancia de fallo, tipo de fallo, localización del fallo y duración), y el cálculo de las pseudo-medidas de los índices

de huecos de tensión se obtiene mediante la aplicación del método de muestreo Monte Carlo aplicable de forma generalizada para cualquier sistema eléctrico.

Dentro de los aspectos más novedosos, se resalta la parametrización implementada para dos de las variables de entrada en el modelado del PEHT: impedancia de fallo y duración, que potencian una mayor fiabilidad y versatilidad en las estimaciones obtenidas.

Aprovechando las características del PEHT, este capítulo presenta también un estudio de la influencia de las variables involucradas en la caracterización de los huecos, siendo seleccionadas las variables coeficiente de fallo (C_f) e impedancia de fallo (Z_f) por la considerable divergencia de parametrización de estas variables en la bibliografía relacionada con la estimación de los huecos de tensión.

El procedimiento implementado para el análisis de sensibilidad aplicado a la estimación de los huecos de tensión es una metodología que permite evaluar la relación causa-efecto de las variables del modelo de estimación de huecos para diversos escenarios. Como aplicación práctica se han presentado tres casos de estudio:

- Conocer el efecto de la precisión de la variable C_f .
- Evaluar la influencia del parámetro media de Z_f .
- Estudiar el efecto del parámetro desviación típica de Z_f en la estimación de los huecos de tensión (índices SARFI-90 y SARFI-70).

A partir de los casos de estudio indicados, se han obtenido de forma categórica las siguientes observaciones:

- La precisión de la variable coeficiente de fallo tiene una influencia prácticamente despreciable en la estimación del valor esperado de los índices SARFI-90 y SARFI-70 a largo plazo.
- La parametrización de la media de la variable impedancia de fallo es un factor muy influyente en las estimaciones de severidad de huecos de tensión obtenidas. La relación de la media de la impedancia de fallo es inversamente proporcional a la media y desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70.
- La parametrización de la desviación típica de la variable impedancia de fallo sí influye en las estimaciones tanto de la media como de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70. La relación causa-efecto de las mencionadas variables es directamente proporcional; es decir, al aumentar la dispersión de la impedancia de fallo en el modelo de estimación de huecos de tensión, se espera que aumente la media y la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70.

Estos dos últimos resultados son especialmente destacables dada la gran divergencia de valores de parametrización encontradas en la bibliografía para el valor medio de la impedancia de falta y la práctica inexistencia de estudios o análisis sobre su dispersión.

La aplicación del programa de diagnóstico desarrollado y las conclusiones obtenidas del análisis de sensibilidad están basados en el análisis íntegro de tres redes de potencia: dos redes de prueba IEEE de 24 y 118 nudos (IEEE-24, IEEE-118), y el sistema de transporte de la República del Ecuador (EC-357).

ESTIMACIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN A PARTIR DE UN CONJUNTO LIMITADO DE MEDICIONES

4.1. Introducción y estructura del capítulo

4.1.1. Introducción

Es habitual que la política de control y análisis de los huecos de tensión de la red eléctrica de un país o región equivalente sea planteada inicialmente mediante una monitorización parcial, esto es:

- Que la monitorización de los huecos no abarque todos los nudos del sistema, o bien, se concentra especialmente en la sección de la red que opera a mayor tensión (sistema de transporte), con extensión a una parte del sistema de distribución.
- O en su defecto, se restringe la ubicación de los medidores de huecos y el análisis de los datos a emplazamientos conflictivos, o donde haya sido requerido por los usuarios finales; usualmente grandes consumidores con cargas sensibles a los huecos de tensión.

Estos escenarios habituales en la práctica, plantean el interés de desarrollar una metodología que permita estimar la severidad de los huecos de tensión en la zona no monitorizada de la red partiendo de la información de los medidores instalados. Al respecto, autores como [Wang y otros, 2005; Espinosa y Hernández, 2007; Hernández y otros, 2013] han propuesto diversos métodos que fueron discutidos en el capítulo 2 para solucionar esta necesidad. Tal y como se describió en dicho capítulo, los métodos propuestos hasta la fecha presentan diversas limitaciones en su aplicabilidad o en la hipótesis planteadas, restándole versatilidad y realismo a las respuestas obtenidas.

Considerando esas limitaciones, el presente capítulo tiene como objetivo el desarrollo de un procedimiento que permita estimar los valores de los índices de huecos de tensión en uno o todos los nudos no monitorizados de una red a partir de los datos de un conjunto limitado de medidores.

4.1.2. Estructura

Para alcanzar el objetivo anterior, este capítulo se estructura en cuatro secciones con el contenido siguiente:

- En primer lugar, se muestra una visión general del método propuesto.
- A continuación, se expone y justifica la correlación entre los eventos de huecos de tensión en los emplazamientos de una red de potencia. Para ello, a partir de las pseudo-medidas generadas por el Programa de Estimación de Huecos Tensión (PEHT) descrito en el capítulo anterior, se realiza un estudio estadístico de los datos de huecos de tensión generados.
- En la siguiente sección, se desarrolla la base analítica del método propuesto y se describe la implementación del algoritmo para una red genérica.
- Por último, se realizan un conjunto de casos de estudio para evaluar el método planteado. Estos casos se realizan en tres redes de potencia: dos redes de prueba de 24 y 118 nudos de la IEEE (IEEE-24 e IEEE-118), y la red nacional del Ecuador de 357 nudos (EC-357)¹.

4.2. Visión general del método propuesto de estimación de huecos de tensión

En la Fig. 4.1, se muestra un diagrama esquemático del método de estimación propuesto. De manera general, este método contempla tres etapas principales:

- Creación de una base de datos representativa del número de huecos de tensión en los nudos del sistema estudiado. Esto es, mediante el Programa de Estimación de Huecos de Tensión (PEHT) presentado en el Capítulo 3, se genera una matriz que representa el valor del índice de huecos de cada emplazamiento del sistema en n años de simulación. Para ello, se emplea
- Aplicación del teorema de probabilidad condicional de Bayes, el cual permite obtener la función de densidad de probabilidad de índices de huecos de tensión del emplazamiento de interés. Es decir, de la base de datos generada de pseudo-medidas de huecos de tensión y la información aportada por el conjunto de medidores de huecos (datos reales), se filtran o estiman los valores posibles de índices de huecos en los nudos de interés (filtrado Bayesiano).
- Finalmente, a partir del criterio de máxima probabilidad, se estima el índice de huecos de tensión más probable en el nudo de interés o en el sistema eléctrico en su conjunto.

Como se ha indicado anteriormente, el método de estimación se fundamenta en la aplicación del teorema de Bayes. Por ello, entre los puntos claves del método propuesto está la generación de una base de datos representativa del universo de posibles valores de índices de huecos de tensión de la red estudiada.

¹Detalles de los sistemas eléctricos mencionados en el apartado 3.4.

Figura 4.1 – Diagrama esquemático de la metodología de estimación.

Por otro lado, el método propuesto es aplicable gracias a una importante propiedad de los huecos de tensión, como es la correlación de los eventos. Es decir, la correlación entre huecos de tensión refleja la asociación o dependencia que tienen los eventos de huecos entre diferentes nudos de la red, de forma que, independientemente de la naturaleza aleatoria con la que se generan los eventos, el conjunto de posibles índices de huecos estaría caracterizado por la correspondiente zona de correlación. A continuación, se describe con mayor detalle este aspecto y su justificación matemática.

4.3. Correlación de medidas de huecos de tensión en los sistemas eléctricos

Como se muestra en la Fig. 4.2, para un nudo cualquiera de la red (nudo m) y un cortocircuito en un punto p de la red, la tensión residual del evento es analíticamente calculada mediante la expresión $V_m = V_m^{pf} - Z_{mp} \cdot I_p$, donde V_m^{pf} es la tensión previa al fallo en el nudo m del sistema, Z_{mp} es la impedancia entre el nudo m del sistema y el punto de fallo p , e I_p es la corriente de cortocircuito en el punto de fallo p (esta expresión se explicó de forma más detallada en la ecuación (3.12)).

Del análisis de esta expresión, se plantea como hipótesis que los nudos fuertemente interconectados deberán tener índices de huecos de tensión correlacionados. Es decir, suponiendo en la Fig. 4.2 que $Z_{mk} \gg Z_{kj}$ y $Z_{kj} \approx 0$, sería de esperar que los índices de huecos de tensión de los nudos k y j estén fuertemente correlacionados, y que la severidad de los huecos en los nudos $m-k$ y $m-j$ tengan un grado escaso o nulo de correlación entre sí.

Figura 4.2 – Sistema eléctrico simplificado.

Para aclarar la hipótesis planteada, se toma como ejemplo dos parejas de nudos de la red IEEE-24. Como se ilustra en la Fig. 4.3, para los nudos 1 y 2, se esperaría que exista una fuerte correlación entre los índices de huecos de tensión ya que ambos nudos están muy próximos (fuertemente interconectados). Por otro lado, para emplazamientos

alejados del sistema, como los nudos 1 y 22, se esperaría una baja correlación entre los huecos de tensión registrados.

Figura 4.3 – Diagrama unifilar de la red IEEE-24.

Para ilustrar este hecho, se ha calculado el número esperado de huecos de tensión ($V < 0.9$ pu) de la red IEEE-24 utilizando la herramienta PEHT (descrita en el capítulo anterior) con un periodo de simulación de 1000 años. Como se observa en la tabla 4.1, para una pseudo-monitorización a largo plazo los huecos de tensión afectan de forma similar a los nudos cercanos o fuertemente interconectados (ej. nudos 1 y 2), mientras que para nudos alejados o con interconexión débil (ej. nudos 1 y 22), el número medio esperado de huecos de tensión no guarda tan estrecha relación.

Tabla 4.1 – Número medio estimado de huecos de tensión de la red IEEE-24.

Huecos de tensión (huecos/año)					
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6
7.45	7.51	9.87	10.02	9.62	11.07
Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12
4.30	8.53	10.34	10.51	9.29	8.99
Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18
5.64	8.48	5.42	5.68	5.08	4.41
Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24
5.74	5.17	4.46	3.81	4.55	8.20

4.3.1. Aplicación del coeficiente de correlación a medidas de huecos de tensión

4.3.1.1. Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación descrita en el apartado anterior de una forma intuitiva puede definirse mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente evalúa el grado de asociación o correlación que tienen las observaciones de dos muestras y se obtiene mediante la siguiente expresión analítica [Peña, 2002; Navidi, 2008]:

$$R_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{S_i \cdot S_j} \quad (4.1)$$

donde, asociando la expresión al análisis de huecos de tensión, en particular al índice SARFI-X, sus variables se definen como:

- $S_{i,j}$: Covarianza del índice SARFI-X en los nudos i y j del sistema eléctrico.
- S_i, S_j : Desviación típica del índice SARFI-X en los nudos i y j , respectivamente.

Como se muestra en la Fig. 4.4, el coeficiente de Pearson es un indicador que varía de $-1 \leq R_{i,j} \leq 1$, y determina el grado de asociación entre dos muestras. En el caso de que $R_{i,j}$ sea unitario (-1 o 1), esto indicaría una relación lineal perfecta. Por otro lado, si el coeficiente $R_{i,j}$ es igual o cercano a cero, esto señalaría que la muestra de datos del nudo i no está correlacionada con los registros del nudo j .

Figura 4.4 – Coeficiente de correlación de Pearson de diversas muestras.

Como se muestra en la tabla 4.2, cuando el coeficiente de Pearson es mayor o igual a 0.6, se interpreta como una “correlación fuerte” entre las muestras [Evans, 1996]. Aplicado a una monitorización a largo plazo de los huecos de tensión de una pareja de nudos, un $R_{i,j} \geq 0.6$ implicaría que, independientemente de la aleatoriedad de las variables que originan los huecos de tensión en el tiempo, los nudos i y j tendrían una elevada correlación entre sus índices de huecos. En otras palabras, si se conociera

Tabla 4.2 – Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.

Coeficiente	Interpretación
$0.00 \geq R_{i,j} < 0.20$	muy débil
$0.20 \geq R_{i,j} < 0.40$	débil
$0.40 \geq R_{i,j} < 0.60$	moderada
$0.60 \geq R_{i,j} < 0.80$	fuerte
$0.80 \geq R_{i,j} \leq 1.00$	muy fuerte

el índice SARFI-X del nudo i (monitorizado), y existiera una fuerte correlación con el nudo j , sería analíticamente sencillo estimar el respectivo índice del nudo j sin monitorización.

4.3.1.2. Matriz de correlación de medidas de huecos de tensión

Para analizar con mayor profundidad el grado de correlación que tiene el número de huecos de tensión en los nudos de un sistema eléctrico, se calcula el coeficiente de Pearson de una muestra de 1000 años de simulación de la red IEEE-24². De la aplicación de la ecuación (4.1) en el índice SARFI-90 de huecos de tensión de la red IEEE-24, se obtiene una matriz cuadrada de correlación múltiple de 24×24 elementos, la cual se detalla en la tabla 4.3.

De lo indicado en las tablas 4.2 y 4.3 se extraen las siguientes observaciones:

- La matriz de correlación múltiple de la red es simétrica, con un número de filas y columnas igual al número de nudos del sistema a estudiar. Como es lógico la diagonal principal tiene valor unitario en todos los nudos.
- Para una monitorización a largo plazo de los huecos de tensión de la pareja de nudos 1 y 2, se determina que los eventos registrados tienen una correlación de $R_{1,2} = 0.97$ (ver tabla 4.3). Es decir, existe una relación lineal “muy fuerte” entre los índices SARFI-90 de los nudos indicados.
- Del análisis de correlación entre los nudos 1 y 22, se determina una “débil” correlación entre los índices SARFI-90 registrados en los nudos, con un coeficiente de correlación $R_{1,22} = 0.32$. Esto es, los eventos de huecos de tensión en una monitorización a largo plazo de estos nudos tendrían una relación escasa o nula.

En la tabla 4.4, se muestra de forma resumida para cada nudo de la red IEEE-24 el número de nudos del sistema con los que dicho nudo mantiene una correlación “muy fuerte”. De la misma, se puede observar que los nudos 4, 5, 9 y 11, tienen el mayor número de nudos del sistema con una correlación $R_{i,j} \geq 0.8$. Es decir, a partir de estos nudos, se podría estimar con precisión los índices SARFI-90 de otros nueve nudos del sistema (ver tabla 4.3).

Este análisis da cabida a introducir el concepto de “área de correlación del nudo” A_R , que estaría definido como el número de emplazamientos del sistema con correlación

²Para el desarrollo de la simulación de huecos de tensión de la red IEEE-24, se utiliza el PEHT bajo los parámetros indicados en la tabla 3.9 de la página 64.

Tabla 4.3 – Matriz de correlación múltiple de Pearson del índice SARFI-90 de la red IEEE-24.

		Nudo																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nudo	1	1.00	0.97	0.78	0.83	0.86	0.80	0.61	0.77	0.78	0.79	0.77	0.78	0.70	0.71	0.49	0.49	0.41	0.38	0.50	0.52	0.39	0.32	0.54	0.69
	2	0.97	1.00	0.76	0.84	0.85	0.80	0.61	0.77	0.78	0.79	0.77	0.77	0.70	0.71	0.48	0.49	0.41	0.38	0.50	0.52	0.38	0.31	0.54	0.68
	3	0.78	0.76	1.00	0.80	0.79	0.77	0.55	0.73	0.82	0.78	0.82	0.79	0.69	0.83	0.65	0.65	0.56	0.54	0.64	0.62	0.55	0.47	0.59	0.87
	4	0.83	0.84	0.80	1.00	0.89	0.86	0.59	0.79	0.89	0.87	0.85	0.86	0.70	0.76	0.50	0.51	0.42	0.40	0.52	0.54	0.40	0.33	0.56	0.69
	5	0.86	0.85	0.79	0.89	1.00	0.89	0.60	0.80	0.86	0.90	0.85	0.86	0.72	0.75	0.49	0.50	0.41	0.38	0.52	0.54	0.39	0.31	0.56	0.67
	6	0.80	0.80	0.77	0.86	0.89	1.00	0.58	0.78	0.90	0.95	0.87	0.88	0.70	0.75	0.50	0.52	0.43	0.40	0.53	0.56	0.40	0.33	0.58	0.66
	7	0.61	0.61	0.55	0.59	0.60	0.58	1.00	0.71	0.60	0.60	0.61	0.62	0.65	0.58	0.38	0.39	0.31	0.28	0.39	0.41	0.29	0.21	0.43	0.52
	8	0.77	0.77	0.73	0.79	0.80	0.78	0.71	1.00	0.80	0.81	0.82	0.83	0.73	0.74	0.46	0.47	0.38	0.35	0.49	0.51	0.35	0.29	0.53	0.63
	9	0.78	0.78	0.82	0.89	0.86	0.90	0.60	0.80	1.00	0.92	0.92	0.91	0.72	0.80	0.54	0.56	0.46	0.44	0.57	0.60	0.44	0.37	0.60	0.73
	10	0.79	0.79	0.78	0.87	0.90	0.95	0.60	0.81	0.92	1.00	0.91	0.91	0.72	0.78	0.52	0.53	0.44	0.42	0.55	0.58	0.42	0.35	0.60	0.68
	11	0.77	0.77	0.82	0.85	0.85	0.87	0.61	0.82	0.92	0.91	1.00	0.95	0.76	0.87	0.58	0.60	0.51	0.48	0.63	0.65	0.48	0.41	0.64	0.73
	12	0.78	0.77	0.79	0.86	0.86	0.88	0.62	0.83	0.91	0.91	0.95	1.00	0.78	0.82	0.54	0.56	0.47	0.44	0.59	0.62	0.44	0.36	0.65	0.70
	13	0.70	0.70	0.69	0.70	0.72	0.70	0.65	0.73	0.72	0.72	0.76	0.78	1.00	0.79	0.57	0.62	0.50	0.46	0.65	0.70	0.46	0.37	0.74	0.71
	14	0.71	0.71	0.83	0.76	0.75	0.75	0.58	0.74	0.80	0.78	0.87	0.82	0.79	1.00	0.70	0.73	0.63	0.60	0.75	0.70	0.60	0.52	0.67	0.82
	15	0.49	0.48	0.65	0.50	0.49	0.50	0.38	0.46	0.54	0.52	0.58	0.54	0.57	0.70	1.00	0.91	0.88	0.84	0.84	0.76	0.85	0.72	0.70	0.78
	16	0.49	0.49	0.65	0.51	0.50	0.52	0.39	0.47	0.56	0.53	0.60	0.56	0.62	0.73	0.91	1.00	0.86	0.82	0.90	0.81	0.81	0.70	0.76	0.77
	17	0.41	0.41	0.56	0.42	0.41	0.43	0.31	0.38	0.46	0.44	0.51	0.47	0.50	0.63	0.88	0.86	1.00	0.92	0.79	0.71	0.90	0.80	0.65	0.68
	18	0.38	0.38	0.54	0.40	0.38	0.40	0.28	0.35	0.44	0.42	0.48	0.44	0.46	0.60	0.84	0.82	0.92	1.00	0.75	0.67	0.96	0.84	0.61	0.65
	19	0.50	0.50	0.64	0.52	0.52	0.53	0.39	0.49	0.57	0.55	0.63	0.59	0.65	0.75	0.84	0.90	0.79	0.75	1.00	0.91	0.75	0.64	0.83	0.74
	20	0.52	0.52	0.62	0.54	0.54	0.56	0.41	0.51	0.60	0.58	0.65	0.62	0.70	0.70	0.76	0.81	0.71	0.67	0.91	1.00	0.66	0.57	0.92	0.68
	21	0.39	0.38	0.55	0.40	0.39	0.40	0.29	0.35	0.44	0.42	0.48	0.44	0.46	0.60	0.85	0.81	0.90	0.96	0.75	0.66	1.00	0.83	0.60	0.66
	22	0.32	0.31	0.47	0.33	0.31	0.33	0.21	0.29	0.37	0.35	0.41	0.36	0.37	0.52	0.72	0.70	0.80	0.84	0.64	0.57	0.83	1.00	0.51	0.56
	23	0.54	0.54	0.59	0.56	0.56	0.58	0.43	0.53	0.60	0.60	0.64	0.65	0.74	0.67	0.70	0.76	0.65	0.61	0.83	0.92	0.60	0.51	1.00	0.64
	24	0.69	0.68	0.87	0.69	0.67	0.66	0.52	0.63	0.73	0.68	0.73	0.70	0.71	0.82	0.78	0.77	0.68	0.65	0.74	0.68	0.66	0.56	0.64	1.00

Tabla 4.4 – Número de nudos con correlación muy fuerte del índice SARFI-90 de la red IEEE-24.

Número de nudos con correlación muy fuerte					
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6
4	4	5	9	9	8
Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12
0	5	9	7	9	8
Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18
0	5	5	6	5	5
Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24
4	3	5	3	2	2

“fuerte” de medidas de huecos de tensión, esto es, con un coeficiente de correlación de $R_{i,j} \geq 0.6$. Con este criterio, en la tabla 4.5 se detalla el área de correlación del índice SARFI-90 $A_{R_{90}}$ de la red IEEE-24.

Tabla 4.5 – Área de correlación del índice SARFI-90 $A_{R_{90}}$ de la red IEEE-24.

Área de correlación SARFI-90					
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6
14	14	17	13	14	13
Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12
9	14	16	15	18	16
Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18
18	21	11	13	10	10
Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24
13	14	10	6	14	21

De lo indicado en la tabla 4.5, se muestra que los nudos 7 y 22 son los emplazamientos de menor área de correlación SARFI-90 de la red IEEE-24, con valores $A_{R_{90}}$ de 9 y 6 nudos, respectivamente. Por otro lado, los nudos con mayor área de correlación son los emplazamientos 14 y 24, en ambos casos con un valor de $A_{R_{90}} = 21$ nudos. En consecuencia, es de esperar que el área de correlación del nudo donde esté ubicado el medidor influya de forma directa en el número de nudos con SARFI-90 estimado con precisión.

Del análisis de los datos de la red IEEE-24, y de estudios similares en las redes IEEE-118 y EC-357 detallados en el apéndice C.2 y C.3, respectivamente, se confirma la existencia de zonas con correlación fuerte en el número de huecos de tensión. Esto es, independientemente de la naturaleza aleatoria de las variables que caracterizan los huecos de tensión, se corrobora la alta relación de linealidad del índice SARFI-90 entre ciertos nudos del sistema eléctrico, especialmente en los emplazamientos que están fuertemente interconectados.

De forma análoga al estudio de correlación del índice SARFI-90 en los sistemas eléctricos estudiados, se evalúa el índice SARFI-70, que representa de forma anual el número de huecos profundos (con tensión residual menor a 0.7 pu) o típicamente intolerables para el usuario final [Zambrano y otros, 2015b]. Mediante la ecuación (4.1), se calcula en la tabla 4.6 la matriz de correlación múltiple del índice SARFI-70 de la red IEEE-24.

Como se observa en la tabla 4.7, el área de correlación SARFI-70 $A_{R_{70}}$ es en general menor que su equivalente SARFI-90 en la red IEEE-24. Esto se interpreta por el hecho de que las caídas profundas de tensión (tensión residual menor a 0.7 pu) son principalmente registradas por los nudos más cercanos al punto de fallo, situación que disminuye el área afectada, y por ende, el área de correlación entre los nudos.

Asimismo, el valor máximo de $A_{R_{70}}$ es de 5 emplazamientos en los nudos: 11, 15, 16, 17, 18 y 21 de la red IEEE-24. Por otro lado, los emplazamientos 4, 7 y 8 serían los nudos del sistema que carecen de área de correlación SARFI-70. Esto es, un medidor de huecos localizado en una de estas ubicaciones no permitiría establecer una adecuada predicción del índice SARFI-70 del resto del sistema (ver tabla 4.7).

Tabla 4.6 – Matriz de correlación múltiple de Pearson del índice SARFI-70 A_{R70} de la red IEEE-24.

		Nudo																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nudo	1	1	0.87	0.22	0.42	0.58	0.43	0.21	0.17	0.17	0.34	0.17	0.16	0.17	0.12	0.12	0.11	0.12	0.13	0.12	0.13	0.11	0.11	0.15	0.1
	2	0.87	1	0.2	0.45	0.55	0.45	0.21	0.18	0.17	0.34	0.17	0.17	0.17	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	0.1	0.16	0.09
	3	0.22	0.2	1	0.28	0.22	0.21	0.17	0.18	0.33	0.2	0.27	0.22	0.25	0.33	0.38	0.31	0.3	0.32	0.27	0.18	0.31	0.2	0.15	0.61
	4	0.42	0.45	0.28	1	0.52	0.45	0.17	0.3	0.56	0.43	0.43	0.41	0.39	0.28	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.07	0.06	0.12	0.1
	5	0.58	0.55	0.22	0.52	1	0.65	0.19	0.31	0.37	0.64	0.42	0.41	0.4	0.28	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.1	0.08	0.07	0.14	0.08
	6	0.43	0.45	0.21	0.45	0.65	1	0.19	0.3	0.51	0.8	0.52	0.51	0.43	0.33	0.08	0.1	0.07	0.08	0.1	0.14	0.07	0.06	0.17	0.08
	7	0.21	0.21	0.17	0.17	0.19	0.19	1	0.56	0.21	0.22	0.19	0.19	0.24	0.2	0.23	0.21	0.22	0.23	0.21	0.2	0.22	0.22	0.22	0.2
	8	0.17	0.18	0.18	0.3	0.31	0.3	0.56	1	0.38	0.36	0.32	0.31	0.29	0.22	0.1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.12	0.07
	9	0.17	0.17	0.33	0.56	0.37	0.51	0.21	0.38	1	0.59	0.68	0.64	0.51	0.44	0.13	0.14	0.12	0.12	0.15	0.18	0.11	0.1	0.21	0.18
	10	0.34	0.34	0.2	0.43	0.64	0.8	0.22	0.36	0.59	1	0.62	0.62	0.49	0.39	0.08	0.11	0.08	0.08	0.12	0.16	0.07	0.07	0.21	0.08
	11	0.17	0.17	0.27	0.43	0.42	0.52	0.19	0.32	0.68	0.62	1	0.7	0.63	0.65	0.16	0.21	0.16	0.16	0.21	0.24	0.15	0.12	0.25	0.15
	12	0.16	0.17	0.22	0.41	0.41	0.51	0.19	0.31	0.64	0.62	0.7	1	0.66	0.42	0.09	0.14	0.1	0.09	0.21	0.31	0.08	0.09	0.39	0.09
	13	0.17	0.17	0.25	0.39	0.4	0.43	0.24	0.29	0.51	0.49	0.63	0.66	1	0.47	0.13	0.15	0.14	0.13	0.2	0.26	0.13	0.12	0.33	0.13
	14	0.12	0.13	0.33	0.28	0.28	0.33	0.2	0.22	0.44	0.39	0.65	0.42	0.47	1	0.41	0.49	0.38	0.36	0.46	0.32	0.34	0.25	0.29	0.34
	15	0.12	0.12	0.38	0.09	0.09	0.08	0.23	0.1	0.13	0.08	0.16	0.09	0.13	0.41	1	0.76	0.76	0.76	0.51	0.28	0.77	0.52	0.23	0.73
	16	0.11	0.12	0.31	0.08	0.08	0.1	0.21	0.09	0.14	0.11	0.21	0.14	0.15	0.49	0.76	1	0.7	0.7	0.68	0.44	0.67	0.48	0.39	0.6
	17	0.12	0.11	0.3	0.07	0.09	0.07	0.22	0.09	0.12	0.08	0.16	0.1	0.14	0.38	0.76	0.7	1	0.86	0.48	0.25	0.79	0.66	0.19	0.58
	18	0.13	0.12	0.32	0.07	0.08	0.08	0.23	0.09	0.12	0.08	0.16	0.09	0.13	0.36	0.76	0.7	0.86	1	0.46	0.23	0.88	0.64	0.18	0.59
	19	0.12	0.12	0.27	0.08	0.08	0.1	0.21	0.09	0.15	0.12	0.21	0.21	0.2	0.46	0.51	0.68	0.48	0.46	1	0.74	0.43	0.34	0.61	0.42
	20	0.13	0.13	0.18	0.09	0.1	0.14	0.2	0.09	0.18	0.16	0.24	0.31	0.26	0.32	0.28	0.44	0.25	0.23	0.74	1	0.21	0.18	0.83	0.22
	21	0.11	0.11	0.31	0.07	0.08	0.07	0.22	0.08	0.11	0.07	0.15	0.08	0.13	0.34	0.77	0.67	0.79	0.88	0.43	0.21	1	0.65	0.16	0.6
	22	0.11	0.1	0.2	0.06	0.07	0.06	0.22	0.08	0.1	0.07	0.12	0.09	0.12	0.25	0.52	0.48	0.66	0.64	0.34	0.18	0.65	1	0.15	0.4
	23	0.15	0.16	0.15	0.12	0.14	0.17	0.22	0.12	0.21	0.21	0.25	0.39	0.33	0.29	0.23	0.39	0.19	0.18	0.61	0.83	0.16	0.15	1	0.17
	24	0.1	0.09	0.61	0.1	0.08	0.08	0.2	0.07	0.18	0.08	0.15	0.09	0.13	0.34	0.73	0.6	0.58	0.59	0.42	0.22	0.6	0.4	0.17	1

Tabla 4.7 – Área de correlación SARFI-70 A_{R70} de la red IEEE-24.

Área de correlación SARFI-70					
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6
1	1	1	0	2	2
Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12
0	0	2	4	5	4
Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18
2	1	5	5	5	5
Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24
2	2	5	3	1	2

En el caso de las redes IEEE-118 y EC-357, el área de correlación del índice SARFI-70 es detallado en el apéndice C.2 y C.3, respectivamente. De forma general, las conclusiones obtenidas son análogas al caso de la red IEEE-24.

4.3.1.3. Consideraciones del índice de correlación de Pearson

Cabe indicar que el coeficiente de Pearson puede ser sensible a muestras que tengan distribuciones asimétricas o datos atípicos, por ello, para una interpretación adecuada del coeficiente, previamente se debe confirmar la normalidad de las variables estudiadas [Navidi, 2008].

Una forma simplificada de evaluar la normalidad de las muestras, es a través del uso del diagrama de caja, tal como se muestra en la Fig. 4.5³. La idoneidad de los datos a estudiar deberán ajustarse a los siguientes patrones: (i) que el valor de la media este centrado respecto al diagrama de caja, y (ii) que los bigotes de las cajas tengan longitudes similares.

Figura 4.5 – Diagrama de caja de la pseudo-monitorización del índice SARFI-90.

De las muestras ilustradas en la Fig. 4.5, se puede observar que los datos sí se ajustarían a las hipótesis requeridas.

Si los datos no se ajustaran a la suposición indicada, las pruebas deberán ser realizadas con el coeficiente de correlación de Spearman, el cual permite estudiar la correlación de datos no paramétricos (con distribución libre). Para visualizar las diferencias teóricas y numéricas de ambos coeficientes, en el apéndice C.1 se describe la expresión analítica, y, adicionalmente, para los índices SARFI-90 y SARFI-70, se calcula el coeficiente de Spearman en la red IEEE-24.

De forma general, ambas metodologías muestran respuestas muy similares (ver apéndice C.1), y confirman la existencia de zonas con fuerte correlación de eventos de huecos de tensión en las redes estudiadas.

³En el diagrama de caja se resumen los 1000 años de simulación del índice SARFI-90 de cada nudo.

4.4. Estimación probabilística de huecos de tensión mediante el filtrado Bayesiano

Una vez vista la fuerte correlación de los eventos de huecos de tensión entre grupos de nudos de los sistemas eléctricos, se plantea la estimación probabilística de los índices de huecos de la sección de la red no monitorizada a partir de la información de un conjunto de medidores conocidos.

Inicialmente, se realiza un breve repaso de los conceptos de probabilidad condicional, seguido de ejemplos aplicados al estudio de los huecos de tensión. Después, se plantea el desarrollo del algoritmo de estimación de huecos, el cual está basado en el teorema de Bayes y en la correlación de los huecos de tensión en los sistemas eléctricos. Finalmente, se analiza la metodología de estimación mediante diversos ejemplos ilustrativos.

4.4.1. Probabilidad condicional

Si dos nudos del sistema están fuertemente correlacionados, se esperaría que manifesten una elevada probabilidad condicional de sus eventos de huecos de tensión. Es decir, si se suponen dos nudos A y B con fuerte correlación ($R_{A,B} \geq 0.6$), se esperaría que los eventos ocurridos en A estén condicionados a la aparición de eventos en B , y viceversa.

De forma teórica, la expresión analítica que define la probabilidad de un suceso en A condicionada a un suceso en B , $P(A|B)$, es [Navidi, 2008]:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (4.2)$$

donde, $P(A \cap B)$ es la probabilidad de que ocurra un suceso en A y B simultáneamente, y $P(B)$ es la probabilidad de que ocurra un suceso solamente en B .

Mediante la ecuación (4.2) es posible determinar la probabilidad condicional de un suceso a partir de las probabilidades calculadas de un espacio muestral Ω con n muestras equiprobables. En este caso, en el que la probabilidad se calcula en un espacio muestral finito, la ecuación (4.3) puede desarrollarse a partir del número de elementos en dicho espacio como:

$$\begin{aligned} P(A|B) &= \frac{\text{card}(A \cap B)/\text{card}(\Omega)}{\text{card}(B)/\text{card}(\Omega)} = \frac{\text{card}(A \cap B)/n}{\text{card}(B)/n} = \\ &= \frac{\text{card}(A \cap B)}{\text{card}(B)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

siendo la expresión *card* el cardinal de la muestra (número de elementos).

Por otra parte, la probabilidad de que ocurra un evento de hueco de tensión en un nudo genérico A se calcula como:

$$P(A) = \frac{\text{card}(A)}{n} \quad (4.4)$$

donde, $\text{card}(A)$ es el número de huecos de tensión en el nudo A dentro de la muestra de n observaciones considerada.

A manera de ejemplo, en la tabla 4.8 se muestra la probabilidad de aparición de eventos de huecos de tensión para una pareja de nudos con muy fuerte correlación (nudos 1 y 2). Por otra parte, para una pareja de nudos con débil correlación de la misma red (nudos 1 y 22), se describe en la tabla 4.9 la probabilidad de aparición de eventos de huecos de tensión. Para este análisis, se considera un espacio muestral de 1000 años de simulación⁴, y mediante las expresiones (4.2)-(4.4), se calculan sus respectivas probabilidades de aparición.

Tabla 4.8 – Análisis probabilístico de huecos de tensión de una pareja de nudos de alta correlación de la red IEEE-24 (nudos 1 y 2).

Casos	Frecuencia		Probabilidad	
	V<0.90	V<0.70	V<0.90	V<0.70
Nudo 1	7456	929	42.3 %	10.4 %
Nudo 2	7520	970	42.7 %	10.8 %
Nudo 1 y Nudo 2	7265	835	41.3 %	9.3 %
Tamaño muestral	17611	8966		

Tabla 4.9 – Análisis probabilístico de huecos de tensión de una pareja de nudos de baja correlación de la red IEEE-24 (nudos 1 y 22).

Casos	Frecuencia		Probabilidad	
	V<0.90	V<0.70	V<0.90	V<0.70
Nudo 1	7456	929	42.3 %	10.4 %
Nudo 22	3787	1152	21.5 %	12.8 %
Nudo 1 y Nudo 22	1680	0	9.5 %	0.0 %
Tamaño muestral	17611	8966		

Como se indica en las tablas 4.8 y 4.9, a partir de 1000 años de simulación se generaron 17611 y 8966 eventos SARFI-90 y SARFI-70, respectivamente, en toda la red IEEE-24. Asimismo, respecto a todos los huecos registrados en el sistema, se observa que la probabilidad de que ocurra un evento SARFI-90 en el nudo 1 es $P(1) = \frac{7456}{17611} = 42.3\%$, mientras que en el nudo 22 es $P(22) = \frac{3787}{17611} = 21.5\%$.

De la observación de la tabla 4.8 se extraen las siguientes observaciones:

- La probabilidad de que suceda un evento SARFI-90 en el nudo 1, cuando se registra un hueco equivalente en el nudo 2 es de $P(1|2) = \frac{7265}{7520} = 96.6\%$. En el caso opuesto, la probabilidad es igual a $P(2|1) = \frac{7265}{7456} = 97.4\%$. Es decir, se observa un grado de coincidencia del número de huecos muy elevado ($>96\%$) entre estos nudos. En el caso del índice SARFI 70, la probabilidad condicional entre ambos nudos es de $P(1|2) = \frac{835}{970} = 86.4\%$ y $P(2|1) = \frac{835}{929} = 89.9\%$ de los eventos registrados.

⁴Para el desarrollo de la simulación de huecos de tensión de los nudos indicados, se utiliza el PEHT bajo los parámetros señalados en la tabla 3.9.

- Dado que $P(1|2) > P(1)$ y $P(2|1) > P(2)$, para los índices de huecos SARFI-90 y SARFI-70, se dice que un evento en el nudo 2, favorece la aparición de un registro en el nudo 1, y viceversa.

De la observación de la tabla 4.9 se deduce que:

- En el caso de la pareja de nudos con baja correlación de medidas de huecos de tensión (nudos 1 y 22), la probabilidad condicional del índice SARFI-90 es $P(1|22) = \frac{1680}{3787} = 44.4\%$ y $P(22|1) = \frac{1680}{7456} = 22.5\%$. En el caso del índice SARFI-70, la probabilidad condicional es nula, ya que no existen eventos SARFI-90 o SARFI-70 coincidentes (ver tabla 4.9).
- Como $P(1|22) \approx P(1)$ y $P(22|1) \approx P(22)$, para los registros SARFI-90; y, $P(1|22) < P(1)$ y $P(22|1) < P(22)$ para los eventos SARFI-70, se puede inferir que los huecos registrado en el nudo 1 no favorecen la aparición de los huecos en el nudo 22, y viceversa.

Este breve análisis probabilístico permite corroborar la alta dependencia que tienen los eventos de huecos de tensión en nudos fuertemente correlacionados. Este hecho confirmaría que, dada la información que se tenga de un evento de hueco de tensión en un nudo, variaría la probabilidad de aparición de registrar eventos de huecos de tensión en los nudos circunscritos en su zona de fuerte correlación. Es decir, el número de huecos registrados en un emplazamiento está condicionado tanto por las características eléctricas del nudo en sí como por las propiedades eléctricas de su zona de correlación.

4.4.2. Filtrado Bayesiano

Para dar respuesta al objetivo de estimar el número más probable de huecos en los nudos no monitorizados, dado el dato del número de huecos registrado en uno o varios nudos, en este trabajo se aplica el teorema de Bayes a través de la siguiente ecuación:

$$P(H_i = h|D_j = d) = \frac{P(H_i = h) \cdot P(D_j = d|H_i = h)}{P(D_j = d)} \quad (4.5)$$

donde,

- H_i : Número de huecos de tensión en un nudo i sin monitorización del sistema.
- h : Número de huecos de tensión observados en un cierto año en el nudo i .
- D_j : Número de huecos de tensión medidos en el nudo j .
- d : Valor específico del número de huecos medidos en un cierto año en el nudo j monitorizado.

De acuerdo con lo anterior, los términos de la expresión (4.5) tienen la interpretación siguiente:

- El término del lado izquierdo de (4.5), $P(H_i = h|D_j = d)$, se denomina “hipótesis posteriori” y representa la probabilidad de que el número de huecos sea h en un nudo i sin monitorización, dado el dato d en un nudo j monitorizado.
- $P(H_i = h)$ es la probabilidad de que el número de huecos sea h en un cierto año en el nudo i sin monitorización, antes de que se conozcan los datos medidos en los nudos monitorizados. Este término se denomina “hipótesis a priori”.

- $P(D_j = d|H_i = h)$ representa la probabilidad de registrar un número específico de huecos d en el nudo j monitorizado, dada la hipótesis a priori en un nudo i sin monitorización.

Es importante destacar que para la aplicación del estudio, no es de interés conocer los valores exactos de probabilidad de la hipótesis a posteriori $P(H_i = h|D_j = d)$, puesto que lo que se busca es la estimación del número de huecos h que tiene una mayor probabilidad. Es decir, se persigue determinar el valor h que hace que la probabilidad $P(H_i = h|D_j = d)$ sea máxima dada la medición d , pero no se requiere conocer el valor exacto de dicha probabilidad. Por ello, en la expresión (4.5) no es relevante calcular la función $P(D_j = d)$, ya que es una constante común para todos los posibles valores de huecos h . En consideración a lo expuesto, la fórmula de Bayes puede ser adaptada del siguiente modo:

$$P(H_i = h|D_j = d) \propto P(H_i = h) \cdot P(D_j = d|H_i = h) \quad (4.6)$$

Esto es, la hipótesis a priori $P(H_i = h)$, se corrige mediante la actualización de la variable $P(D_j = d|H_i = h)$, y con ello, se estima la hipótesis posteriori $P(H_i = h|D_j = d)$ de los nudos del sistema sin monitorización.

Para el cálculo de las variables indicadas en (4.6), se considera un espacio finito de pseudo-medidas de huecos en una base de datos grande de 5000 años de simulación. Mediante una interpretación frecuentista, las variables del lado derecho de la ecuación (4.6) se pueden calcular mediante las siguientes expresiones:

$$P(H_i = h) = \frac{n_h}{n} \quad (4.7)$$

$$P(D_j = d|H_i = h) = \frac{n_{d,h}}{n_h} \quad (4.8)$$

donde,

- n : Número total de años simulados.
- n_h : Número de veces que se registra un número h de huecos al año en un nudo i sin monitorización.
- $n_{d,h}$: Número de veces que se tiene simultáneamente un número d de huecos en el nudo j monitorizado y que se observa un número h en un nudo i sin monitorización.

A partir de la hipótesis posteriori obtenida $P(H_i = h|D_j = d)$ en la expresión (4.6), el valor del índice de huecos de tensión estimado $\hat{h}$ se determina analíticamente mediante el criterio de máxima verosimilitud. Esto es, el valor de h que hace máxima la probabilidad indicada en (4.6):

$$\hat{h} = \operatorname{argmax}(P(H_i = h|D_j = d)) \quad (4.9)$$

En el caso de tener los datos de dos o más nudos monitorizados del sistema, esta formulación se extendería fácilmente. A partir del valor estimado $\hat{h}$ se puede definir el error absoluto ε y porcentual $\varepsilon(\%)$ de la estimación como:

$$\varepsilon = |h - \hat{h}| \quad (4.10)$$

$$\varepsilon(\%) = \frac{\varepsilon}{h} \quad (4.11)$$

donde, h es el número real de huecos en un año cualquiera en el nudo i si monitorización, y $\hat{h}$ es el número de huecos estimado mediante (4.9).

En la Fig. 4.6 se muestra el efecto característico del filtrado Bayesiano para obtener la hipótesis posteriori de medidas de huecos de un nudo sin monitorización dadas las medidas de un conjunto de nudos monitorizados de la red de potencia.

Figura 4.6 – Efecto característico del filtrado Bayesiano en la estimación de medidas de huecos de tensión.

Como se puede observar en la Fig. 4.6, la aplicación del filtrado acota la distribución de probabilidad de las posibles medidas $P(H)$, acercando a $\hat{h}$ al valor real de la medida h .

4.4.2.1. Aplicación de la metodología en la predicción de los huecos de tensión

La metodología descrita anteriormente se aplica a la estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 de la red IEEE-24 a través de tres escenarios:

- Carencia total de medidores de huecos de tensión en la red.
- Solo se dispone del registro del SARFI-90 de un cierto año en el nudo 2 (nudo de correlación fuerte).
- Únicamente se dispone del registro del SARFI-90 de un cierto año en el nudo 22 (nudo de correlación débil).

Para el primer caso, donde se carece de la información de medidores, los posibles valores del índice SARFI-90 en una monitorización a largo plazo del nudo 1 estarían en un rango de 0 a 19 eventos/año, tal como muestra en la Fig. 4.7. Esta gráfica que representa el histograma de número de huecos antes de conocer los datos de los medidores (hipótesis a priori), evidencia que en el nudo 1 son posibles veinte valores diferentes del índice SARFI-90. El SARFI-90 más probable dada la ausencia de medidores es $\hat{h} = 7$ eventos/año.

Suponiendo que se busca estimar el número de huecos de tensión del nudo 1 a partir de las mediciones de un emplazamiento fuertemente correlacionado, se considera como medida real la información de un medidor que estuviera ubicado en el nudo 2, el cual registra un índice SARFI-90 = 10 eventos/año para el año de interés. Para este caso, en la Fig. 4.8 se ilustra la aplicación de la metodología de estimación propuesta, donde la

Figura 4.7 – Hipótesis a priori del índice SARFI-90 para el nodo 1 de la red IEEE-24 (estimación sin considerar medidas).

hipótesis posteriori $P(H|D)$ se observa considerablemente reducida debido a los datos del medidor ubicado en el nudo 2. En este caso, la medida estimada y la medida real son las mismas ($\varepsilon = 0$).

Figura 4.8 – Estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 a partir de las medidas del nudo 2 de la red IEEE-24 (estimado mediante un medidor con correlación fuerte).

De forma similar al caso anterior, en la Fig. 4.9 se muestra la estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 a través de la monitorización de un nudo de baja correlación, como es el caso del nudo 22 con un SARFI-90 = 4 eventos/año. Como se observa en la gráfica, el estimador tiene una precisión inferior respecto al caso anterior (ver Fig. 4.8), ya que el conjunto de posibles respuestas es considerablemente mayor, además de tener una distribución similar a las observaciones de la hipótesis a priori. Para este caso, se estima que el índice SARFI-90 en el nudo 1 es de $\hat{h} = 7$ eventos/año con un error del estimador de $\varepsilon = 10 - 7 = 3$ eventos/año.

La influencia de la correlación de eventos de huecos de tensión entre los nudos de un sistema eléctrico muestra un efecto determinante en la predicción de los huecos

Figura 4.9 – Estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 a partir de las medidas del nudo 22 de la red IEEE-24 (estimación mediante un medidor con correlación débil).

mediante la estimación o filtrado Bayesiano. Es decir, si la localización del medidor y el nudo a predecir están fuertemente correlacionados, se espera una elevada precisión de la estimación obtenida. No obstante, en la práctica, la localización de los medidores y los nudos a estimar podrían no estar circunscrito en la misma área de correlación. En este caso, los datos de uno o más nudos extras del sistema en el filtrado Bayesiano compensarían la calidad de las estimaciones.

4.4.2.2. Implementación y validación del algoritmo

El método descrito en los apartados anteriores se ha implementado de forma integral mediante el programa Matlab, dando a lugar al Programa de Estimación de Huecos de Tensión con Medidas Previas (PEHT+MP). A continuación se describen sus pasos:

- Paso N° 1: Generación de la base de datos con $n = 5000$ años de simulación mediante el algoritmo PEHT (detallado en el apartado 3.2.2). A partir de esta pseudo-monitorización del sistema, se determina la función de densidad de probabilidad de la hipótesis a priori $P(H)$ de todos los nudos de la red.
- Paso N° 2: Para un año dado, se recopilan los datos D de los medidores de huecos del sistema. Es decir, se registran en el estimador Bayesiano las medidas de huecos (índices) de los nudos con medidor. A partir de esta información, se calcula la probabilidad $P(D|H)$ de los nudos no monitorizados del sistema mediante las expresiones (4.7)-(4.8).
- Paso N° 3: Se desarrolla el estimador Bayesiano. Esto es, una vez que han sido filtradas las medidas en la hipótesis posteriori $P(H|D)$ de los nudos sin monitorización, se estima la medida de huecos $\hat{h}$ a partir del criterio de máxima verosimilitud definido en la ecuación (4.9).
- Paso N° 4: Obtenidas las estimaciones de las medidas de huecos del sistema, se calcula el error absoluto y porcentual del estimador ε de todos los nudos de la red mediante las expresiones (4.10) y (4.11).

- Paso N° 5: Las respuestas obtenidas son representadas de forma gráfica.

El proceso de validación de las estimaciones obtenidas del PEHT+MP se realiza mediante el desarrollo de la siguiente secuencia:

- Paso N° 1: Se genera una base de datos de 5000 años de pseudo-medidas de huecos de tensión. En este caso, los índices de sitio SARFI-90 y SARFI-70 de la red de interés.
- Paso N° 2: Se determina la localización de los nudos monitorizados del sistema.
- Paso N° 3: Se establecen como “medidas reales” los datos de un año cualquiera de la base de datos de pseudo-medidas de huecos de tensión del Paso N° 1. Es decir, los nudos monitorizados del Paso N° 2 consideran estas pseudo-medidas como la información que sería medida en el año considerado, y, en el caso del resto de nudos del sistema (nudos sin monitorización), como los valores reales de índices de huecos a ser comparados con los valores estimados.
- Paso N° 4: Mediante la aplicación del programa PEHT+MP, se estiman los valores de los índices de huecos de tensión SARFI-90 y SARFI-70 de los nudos sin monitorización del sistema en el año de estudio.
- Paso N° 5: Se calcula el error entre los índices estimados en el Paso N° 4 y los valores considerados como reales según se ha definido en el Paso N° 3.

Una validación más exhaustiva del método podría considerar datos reales de medidas de huecos de tensión para la verificación del algoritmo propuesto, no obstante, acceder a esta información de la calidad de energía de una red resulta restringido o muy limitado hasta la actualidad.

4.5. Casos de estudio

Para el análisis del método propuesto, el PEHT+MP se aplica en tres redes de diversas características: dos redes de prueba de la IEEE de 24 y 118 nudos (IEEE-24 y IEEE-118) y el sistema de transmisión del Ecuador con 357 nudos (EC-357)⁵.

Para evaluar las principales características del método de estimación (PEHT+MP), se plantea el análisis de los siguientes casos:

- Caso 1: Efecto del área de correlación del medidor en la estimación de huecos de tensión de un sistema eléctrico.
- Caso 2: Influencia del número de medidores en la estimación de huecos de tensión del PEHT+MP.
- Caso 3: Evaluación del nivel de carga en la red en el PEHT+MP.
- Caso 4: Análisis del algoritmo de estimación PEHT+MP bajo condiciones severas o atípicas del número de faltas de un elemento de la red.

⁵Detalles de los sistemas eléctricos mencionados en el apartado 3.4 de la página 77 y apéndice A.2

4.5.1. Caso 1: Influencia del área de correlación en la estimación del PEHT+MP

En el presente caso de estudio se analiza el efecto del área de correlación del medidor en la estimación de medidas de huecos de tensión de un sistema. Para ello, se consideran los índices de sitio SARFI-90 y SARFI-70 que típicamente representan el número total de huecos y el número de huecos profundos, respectivamente, en los nudos de la red estudiada.

Debido al volumen de la información, las redes de 24 y 118 nudos (IEEE-24 e IEEE-118) se presentan como las más adecuadas para mostrar el efecto del estimador Bayesiano en la predicción de la severidad de los huecos de tensión. Por ello, los escenarios planteados se evalúan con mayor detalle en estos sistemas. No obstante, para realizar un estudio generalizable del algoritmo PEHT+MP, se evalúa adicionalmente la red EC-357, lo que permite fundamentalmente analizar el efecto del tamaño de la red en las estimaciones del algoritmo PEHT+MP.

4.5.1.1. Estimación del índice SARFI-90 del Caso 1

En la Fig. 4.10 se ilustra la estimación del índice SARFI-90 del nudo 1 la red IEEE-24 mediante la información de un medidor localizado en el nudo 11 con elevada área de correlación ($A_{R_{90}}=18$ nudos). De la misma manera, en la Fig. 4.11 se muestra el análisis análogo pero considerando la información de un medidor localizado en el nudo 7 con baja área de correlación ($A_{R_{90}}=9$ nudos). En las gráficas indicadas, se muestran en las curvas de color rojo los límites de la hipótesis a priori, representando el rango de valores posibles del índice SARFI-90 de todos los nudos de la red IEEE-24 en una monitorización a largo plazo. Por otra parte, en las curvas de color verde se ilustran los límites de la hipótesis posteriori, las cuales representan el rango de valores posibles del índice SARFI-90 de los nudos de la red IEEE-24 considerando la información de un medidor localizado en el nudo 11 o 7 (Figs. 4.10 y 4.11, respectivamente).

De forma particular, al considerar la información del medidor ubicado en el nudo 11, se observa una reducción considerable del rango de la hipótesis posteriori de la red IEEE-24, mucho mayor que la que se obtiene al considerar el medidor en el nudo 7 de baja correlación, tal y como se puede apreciar en los límites de las hipótesis posteriori de las Figs. 4.10 y 4.11. Esta característica implica un menor rango de posibles valores del índice SARFI-90 para los nudos sin monitorización, y con ello, una estimación de la severidad de los huecos de tensión más precisa.

Comparando la parte inferior de las Figs. 4.10 y 4.11, se confirma que al realizar la predicción con un nudo de alta área de correlación (nudo 11), se espera una disminución del error del estimador ε , calculado mediante las ecuaciones (4.10) y (4.11). Es decir, la precisión de las estimaciones se muestra directamente influenciada por el área de correlación del medidor empleado.

Adicionalmente, como se observa en la matriz de correlación SARFI-90 de la red IEEE-24, detallada en la tabla 4.3, los nudos que tienen una fuerte correlación con el emplazamiento del medidor muestran las predicciones del índice SARFI-90 de mayor precisión. El área de correlación SARFI-90 del nudo 11 está conformada por los nudos 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12 y 14, y para estos emplazamientos, se observa un error de hasta 1 evento en las estimaciones del respectivo índice (ver la parte inferior de la Fig. 4.10).

En la Fig. 4.12, se ilustra el efecto de un medidor localizado en el nudo 5 de elevada área de correlación en la estimación del índice SARFI-90 de la red IEEE-118. Debido

Figura 4.10 – Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo con elevada área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 11).

Figura 4.11 – Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo con baja área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 7).

Figura 4.12 – Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo de alta área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 5).

Figura 4.13 – Estimación del índice SARFI-90 mediante un medidor ubicado en un nudo de baja área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 46).

al mayor tamaño del sistema estudiado, se observa que el área de correlación de un solo monitor, aunque tenga elevada área de correlación como es el caso del nudo 5 con $A_{R_{90}} = 22$ nudos, no es un factor determinante para el incremento generalizado de la precisión de las estimaciones del sistema⁶. No obstante, a partir del filtrado Bayesiano, se evidencia una considerable disminución del error en los nudos circunscritos al área de correlación del nudo 5 de la red IEEE-118.

Por otra parte, en la Fig. 4.13 se ilustra la estimación de los índices de sitio SARFI-90 de la red IEEE-118 con un medidor localizado en el nudo 46 de baja área de correlación con $A_{R_{90}} = 4$. Para este caso, se observa una reducción muy leve o nula del rango de las observaciones de la hipótesis a priori (líneas de color rojo) respecto a la hipótesis posteriori (líneas de color verde). Es decir, debido a la localización del medidor y el tamaño de la red, la información brindada no permite mejorar de forma significativa las estimaciones obtenidas.

En el caso de la red EC-357, el efecto del área de correlación en la estimación del índice SARFI-90 es comparable al de la red IEEE-118. Es decir, debido al tamaño de la red, el efecto de un solo medidor no es un factor determinante para mejorar la precisión de los estimadores del sistema. No obstante, los emplazamientos fuertemente correlacionados a la ubicación del monitor muestran una mejoría considerable en sus estimaciones⁷.

De forma general, se observa que las estimaciones de los nudos circunscritos al área de correlación del emplazamiento del medidor evidencian considerables incrementos en la precisión de sus estimadores. Además, se muestra que el tamaño de la red es un factor relevante en la calidad de las estimaciones, y para disminuir el error de los estimadores, se requiere de un mayor número de medidores (evidencias o datos) que retroalimenten al algoritmo PEHT+MP.

4.5.1.2. Estimación del índice SARFI-70 del Caso 1

En la Fig. 4.14 se muestra el efecto de estimar las medidas del índice SARFI-70 de la red IEEE-24 mediante la información de un medidor localizado en el nudo 11 de elevada área de correlación ($A_{R_{70}}=5$ nudos). Por otra parte, en la Fig. 4.15 se muestra de forma similar la estimación de las medidas SARFI-70 de la red IEEE-24 al considerar solo la información de un medidor localizado en un nudo con baja área de correlación ($A_{R_{70}}=0$ nudos). De forma similar al índice SARFI-90 analizado en el apartado anterior, las estimaciones de medidas de huecos de tensión realizadas con el medidor localizado en el nudo de mayor área de correlación (nudo 11) muestra en la Fig. 4.14 las estimaciones de mayor precisión.

Por las características del índice de huecos SARFI-70, diversos nudos del sistema registran “medidas reales” de 0 eventos/año, razón por la cual el error porcentual $\varepsilon(\%)$, calculado mediante la expresión (4.11), es indefinido. Para estos valores particulares del $\varepsilon(\%)$, el error es identificado gráficamente mediante una estrella de color rojo (parte inferior de las Figs. 4.14 y 4.15).

En el caso de las redes de mayor tamaño (IEEE-118 y EC-357), el efecto del área de correlación en la estimación del índice SARFI-70 es análogo al SARFI-90, es decir, se espera que los nudos circunscritos al área de correlación del emplazamiento del medidor tengan las mejores predicciones del índice SARFI-70 respecto al resto del

⁶Detalles de la matriz de correlación de la red IEEE-118 en el apéndice C.2.

⁷Detalles del área de correlación SARFI-90 de la red EC-357 en el apéndice C.3.

Figura 4.14 – Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con alta área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 11).

Figura 4.15 – Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con baja área de correlación de la red IEEE-24 (nudo 7).

sistema. No obstante, como se observa en las Figs. 4.16 y 4.17 de la red IEEE-118, independientemente del área de correlación del medidor, un solo medidor no sería suficiente para una adecuada estimación del índice de sitio SARFI-70 de todos los nudos del sistema.

Figura 4.16 – Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con alta área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 5).

Figura 4.17 – Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de un medidor de huecos localizado en un nudo con baja área de correlación de la red IEEE-118 (nudo 46).

4.5.2. Caso 2: Influencia del número de medidores en la estimación del PEHT+MP

En el presente apartado, se evalúa el efecto de considerar dos o más medidores de huecos de tensión en la estimación generalizada de medidas de huecos del PEHT+MP para los sistemas eléctricos. Para su estudio, los índices de sitio analizados son el SARFI-90 y SARFI-70, que indican el número de huecos en general y el número de huecos profundos para los emplazamientos de una red eléctrica de potencia.

4.5.2.1. Estimación del índice SARFI-90 del Caso 2

En la Fig. 4.18, se ilustra el efecto de los datos de dos medidores localizados en los nudos 2 y 23 en la estimación de severidad de los huecos de tensión del PEHT+MP en la red IEEE-24. Al considerar la información de dos medidores en el PEHT+MP, se observa una reducción considerable del error de las estimaciones que, en este caso, se calculan por debajo del 60 % para todos los nudos de la red IEEE-24.

Figura 4.18 – Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de dos medidores de huecos de la red IEEE-24 (nudos: 2 y 23).

En el caso de considerar en el nudo 12 un medidor adicional para el ejemplo anterior, se observa una reducción mayor del error estimado de la red IEEE-24 en la Fig. 4.19, siendo nulo dicho error para buena parte de los nudos del sistema e inferior al 40 % en general. Si en la estimación del PEHT+MP se incluye la información de un cuarto medidor, por ejemplo en el nudo 7, se alcanzaría una estimación ideal ($\varepsilon = 0$) tal como se muestra en la Fig. 4.20. En este caso, la curva de las medidas estimadas coincide con la curva de las medidas reales.

Otro ejemplo de lo indicado se ilustra en la Fig. 4.21, donde a partir de la información de cuatro medidores localizados arbitrariamente en el lado de 138 kV de la red IEEE-24, es posible obtener una información precisa de las medidas SARFI-90 de todo el resto del sistema.

Figura 4.19 – Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de tres medidores de huecos de la red IEEE-24 (nudos: 2, 12 y 23).

Figura 4.20 – Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de huecos de la red IEEE-24 (nudos: 2, 7, 12 y 23).

De forma análoga al caso anterior, planteando una localización sectorizada de los medidores de huecos en el lado de 230 kV de la red IEEE-24, ver Fig. 4.22, se requerirían seis medidores para alcanzar una estimación ideal de las medidas de huecos de la red IEEE-24 ($\varepsilon = 0$) para un año determinado.

Figura 4.21 – Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de huecos en el lado de 138 kV de la red IEEE-24 (nudos: 1, 2, 6 y 7).

Figura 4.22 – Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de seis medidores de huecos en el lado de 230 kV de la red IEEE-24 (nudos: 19, 20, 21, 22, 23 y 24).

Para evaluar el desempeño del PEHT+MP en redes de mayor tamaño, en la Fig. 4.23 se ilustra un ejemplo de estimación del número de huecos de la red IEEE-118 en un cierto año. En esta gráfica se observa que con cuatro medidores (nudos 10, 25, 80 y 110), el error de las estimaciones ε se hace nulo en el año indicado. Esto es, la variabilidad de los registros de huecos de tensión en el tiempo, presenta múltiples medidas interanuales posibles para cada emplazamiento del sistema. Por ello, para un conjunto de medidores predeterminados, el error ε varía dependiendo de la aleatoriedad intrínseca de cada año de las medidas.

Figura 4.23 – Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de la red IEEE-118 (nudos: 10, 25, 80 y 110).

Tabla 4.10 – Estimación del índice SARFI-90 aplicado a las redes IEEE-118 y EC-357.

Nº	Red	Localización del medidor (nudo)	Medida real (eventos/año)	Nº de medidores	Prom(ε)
1	IEEE-118	10, 55, 110	9, 25, 4	3	6.0 %
2		10, 55, 70, 110	9, 25, 12, 4	4	0.0 %
3	EC-357	1, 100, 200, 300, 350	10, 0, 17, 30, 30	5	14.8 %
4		1, 50, 100, 200, 300, 350	10, 29, 0, 17, 30, 30	6	5.3 %
5		1, 50, 100, 150, 200, 300, 350	10, 29, 0, 6, 17, 30, 30	7	0.0 %

En la tabla 4.10 se detallan diversos ejemplos de estimación del índice SARFI-90 para las redes IEEE-118 y EC-357. Del análisis de los casos de la mencionada tabla, se ratifican las observaciones indicadas anteriormente, es decir:

- Al aumentar el número de medidores se espera que el error de las estimaciones de huecos del sistema tienda a disminuir.

- A mayor tamaño de la red, la tendencia es de requerir un mayor número de medidores para alcanzar una estimación ideal en el año de estudio.

4.5.2.2. Estimación del índice SARFI-70 del Caso 2

El efecto del número de medidores de huecos en la estimación del índice SARFI-70 es similar al índice SARFI-90 en el PEHT+MP. Es decir, al aumentar el número de medidores, el método de estimación obtiene considerables mejorías en la predicción del número de huecos profundos (SARFI-70). Esta característica del algoritmo propuesto se pone de manifiesto en los ejemplos planteados a continuación.

En la Fig. 4.24, se observa que mediante la información de cuatro medidores seleccionados al azar (nudos: 2, 7, 12 y 23), el error máximo del estimador SARFI 70 oscila entre 0 y 3 eventos/año en la red IEEE-24 (ver parte inferior de la Fig. 4.24). Si se supone conocida la información de un medidor adicional en el nudo 17 (seleccionado al azar), el error de las estimaciones disminuye de forma considerable, tal como se observa en la Fig. 4.25. No obstante, al considerar conocida la información de seis medidores (ver Fig. 4.26), se alcanza la estimación ideal en el sistema; esto es, que sean iguales las mediciones estimadas y las reales en toda la red en el año estudiado.

Figura 4.24 – Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de cuatro medidores de la red IEEE-24 (nudos 2, 7, 12 y 23).

Adicionalmente, la Fig. 4.26 muestra que para realizar una estimación ideal ($\varepsilon = 0$) del índice SARFI-70 de toda la red IEEE-24, se suele requerir un mayor número de medidores que en el caso del índice SARFI-90 (ver Fig. 4.22). Este comportamiento del PEHT+MT se debe a que el área de correlación SARFI-70 es en general menor que el área de correlación SARFI-90 en los sistemas eléctricos, tal como se observa en las tablas 4.5 y 4.7.

En la tabla 4.11, se describe un conjunto de ejemplos aplicados del PEHT+MP en las redes IEEE-118 y EC-357. Del mismo, se pueden confirmar las observaciones anteriormente indicadas, esto es: (i) que la estimación del índice SARFI-70 respecto al

Figura 4.25 – Estimación del índice SARFI-70 mediante la información de cinco medidores de la red IEEE-24 (nodos 2, 7, 12, 17 y 23).

Figura 4.26 – Estimación ideal del índice SARFI-70 mediante la información de seis medidores de la red IEEE-24 (nodos 2, 6, 7, 12, 21 y 23).

índice SARFI-90 suele requerir un mayor número de medidores para una estimación ideal, y (ii) que a mayor tamaño de la red se requiere más medidores para una predicción precisa. No obstante, como análisis global del algoritmo y las redes estudiadas, se observa que con un conjunto pequeño de medidores de huecos se alcanza niveles elevados de precisión en las estimaciones del índice SARFI-70 en los tres sistemas eléctricos estudiados.

Tabla 4.11 – Estimación del índice SARFI-70 aplicado a las redes IEEE-118 y EC-357.

Nº	Red	Localización del medidor (nudo)	Medida real (eventos/año)	Nº de medidores	Prom(ε)
1	IEEE-118	10, 55, 110	2, 3, 1	3	48.1 %
2		10, 55, 70, 110	2, 3, 1, 1	4	44.7 %
3		10, 15, 55, 70, 110	2, 4, 3, 1, 1	5	31.7 %
4		10, 15, 55, 70, 85, 110	2, 4, 3, 1, 3, 1	6	0.0 %
5	EC-357	1, 100, 200, 300, 350	0, 0, 2, 5, 5	5	49.3 %
6		1, 50, 100, 200, 300, 350	0, 5, 0, 2, 5, 5	6	45.9 %
7		1, 50, 100, 150, 200, 300, 350	0, 5, 0, 0, 2, 5, 5	7	43.3 %
8		1, 50, 100, 150, 200, 240, 300, 350	0, 5, 0, 0, 2, 6, 5, 5	8	34.6 %
9		1, 50, 100, 110, 150, 200, 240, 300, 350	0, 5, 0, 3, 0, 2, 6, 5, 5	9	0.0 %

4.5.2.3. Análisis general del Caso 2

En la tabla 4.12 se resume las estimaciones ideales obtenidas a partir de 1000 años de pruebas de las redes IEEE-118 y EC-357. Esto es, suponiendo la localización de medidores planteada en los casos Nº 2 y 5 de la tabla 4.10 para el índice SARFI-90; y, la localización de medidores de los casos Nº 4 y 9 de la tabla 4.11 para el índice SARFI-70, se calcula el porcentaje de estimaciones ideales de todos los nudos de los citados sistemas en 1000 años de pruebas.

Tabla 4.12 – Porcentaje de años con una estimación ideal de los índices SARFI-90 y SARFI-70 a partir de un conjunto de 1000 años de pruebas de las redes IEEE-118 y EC-357.

Red	Porcentaje de años con una estimación ideal	
	SARFI-90	SARFI-70
IEEE-118	72 %	82.8 %
EC-357	97.7 %	85.1 %

Bajo las condiciones indicadas, en la tabla 4.12 se observa que un 72 % y 82.8 % de las 1000 pruebas desarrolladas son estimadas sin error para los índices SARFI-90 y

SARFI-70 de la red IEEE-118, respectivamente. De forma análoga, en el caso de la red ecuatoriana (EC-357), se calculó una efectividad superior al 85 % de estimación ideal de las pruebas mencionadas.

4.5.2.4. Observaciones del Caso 2

Del conjunto de pruebas realizadas en el PEHT+MP, ilustradas en las Figs. 4.18-4.26, además de los ejemplos expuestos en las tablas 4.10-4.12, se deducen las siguientes observaciones:

- Independientemente de la naturaleza aleatoria de los eventos de huecos de tensión en la red, la calidad de las estimaciones SARFI-90 y SARFI-70 del sistema tienen una relación directa con el número n de medidores de huecos. Esto es, a mayor número de medidores de huecos en el PEHT+MP, se espera una mayor precisión de las estimaciones obtenidas.
- El número de medidores de huecos necesarios para alcanzar una estimación ideal ($\varepsilon = 0$) de los índices de huecos de toda la red tiene relación con la localización de los medidores. Instalando los medidores en nudos de elevada área de correlación, y evitando que estén circunscritos en la misma área, se requeriría un menor número de medidores para obtener estimaciones precisas en un elevado espacio muestral de casos (años de estudio).
- Se evidencia que en redes de mayor tamaño, se requiere de un mayor número de medidores para alcanzar una estimación ideal del PEHT+MT. No obstante, este número de medidores representa un porcentaje relativamente pequeño del sistema estudiado.
- Por último, es importante destacar que los resultados mostrados en este caso de estudio se refieren a la estimación de los índices de huecos en un año en concreto. Es decir, podría ocurrir que el número y emplazamiento de los medidores con el que se alcanza la estimación con error nulo en todos los nudos del sistema en un año dado, no permita alcanzar dicha estimación ideal en otro año. Estos aspectos se analizarán con mayor detalle en el capítulo siguiente en el que se aborda el problema de localización óptima de medidores.

4.5.3. Caso 3: Efecto del nivel de carga de la red en la estimación del PEHT+MP

El presente caso de estudio está enfocado a analizar el efecto de la condición de carga en la estimación de los índices SARFI-90 y SARFI-70 del PEHT+MP. Para su desarrollo, se ha empleado la red ecuatoriana (EC-357) bajo tres escenarios de carga: bajo, medio y alto. Para cada nivel de carga, se considera la respectiva variación de la topología de la red y su despacho de generación asociado. En la tabla 4.13 se muestra la distribución de probabilidad de los distintos niveles de carga⁸, así como la respectiva potencia activa consumida por la red.

Para generar la base de datos del PEHT+MP, se ha simulado una muestra de $n = 5000$ años de registros de huecos de tensión de la red EC-357, teniendo en cuenta

⁸La distribución de probabilidad del nivel de la carga de la red EC-357 corresponde a un típico día laborable del año 2014.

Tabla 4.13 – Distribución de probabilidad del nivel de carga de la red EC-357.

Escenario de carga	Probabilidad (%)	Potencia (MW)
Alto	12.5	3535
Medio	55.0	2920
Bajo	32.5	1980

que el nivel de carga del sistema puede encontrarse en uno de los tres estados con la probabilidad mostrada en la tabla 4.13. Las tensiones de prefallo asociadas a cada nivel de carga se calculan mediante un flujo de cargas.

Para evaluar el efecto del estado de la red en el método de estimación propuesto, se considera una localización de medidores de huecos que ha obtenido una estimación ideal de la red EC-357 sin considerar previamente las condiciones de carga (tensión de prefallo unitaria). Esto es, se emplea la información recopilada en la tabla 4.14, la cual resume los datos del caso N° 5 de la tabla 4.10 y del caso N° 9 de la tabla 4.11 de la red EC-357.

Tabla 4.14 – Estimación de los índices SARFI-90 y SARFI-70 considerando el efecto del nivel de carga de la red EC-357.

N°	Índice	Localización del medidor (nudo)	Medida real (eventos/año)	N° de medidores	Prom(ε)
1	SARFI-90	1, 50, 100, 150, 200, 300, 350	10, 29, 0, 6, 17, 30, 30	7	0.0 %
2	SARFI-70	1, 50, 100, 110, 150, 200, 240, 300, 350	0, 5, 0, 3, 0, 2, 6, 5, 5	9	0.0 %

Suponiendo las condiciones indicadas en el caso N° 1 de la tabla 4.14, se ha alcanzado con el PEHT+MP una estimación ideal del índice SARFI-90 en todos los nudos de la red EC-357. De forma similar, para la localización de medidores establecida en el caso N° 2 de la tabla 4.14, el índice SARFI-70 se estima sin errores para todos los emplazamientos de la red EC-357.

De forma general, se observa que la condición de carga de la red evaluada no afecta a la calidad de estimación de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en el PEHT+MP.

4.5.4. Caso 4: Estimación del PEHT+MP bajo condiciones severas de fallos en un elemento del sistema

En este apartado se evalúan las estimaciones obtenidas del PEHT+MP bajo condiciones severas o atípicas de fallos de algún elemento de las redes planteadas. Esto es, se modelan situaciones o comportamientos extremos en algún elemento de la red, y se evalúan las predicciones de huecos de tensión obtenidas por el PEHT+MP.

A manera de ejemplo, en el elemento ilustrado en la Fig. 4.27 se plantea un incremento muy significativo del número de fallos en la línea N° 26 que conecta los nudos 16 y 19 de la red IEEE-24. Por las características de la línea de transporte, el promedio anual de fallos de esta línea es de 0.25 fallos/año, no obstante, se analiza el

efecto de provocar un valor atípico de 3 fallos/año en el elemento mencionado sobre la estimación de severidad de los huecos de tensión de la red IEEE-24. En la tabla 4.15 se describen las características principales de los fallos, los cuales han sido generados de forma aleatoria⁹.

Figura 4.27 – Línea de transmisión N° 24 de la red IEEE-24.

Tabla 4.15 – Características de los tres fallos aleatorios registrados en la línea N° 26 de la red IEEE-24.

Nudo inicio	Nudo fin	Descripción	Impedancia	Tipo de fallo	Localización (dist. fallo/long. línea)
16	19	Fallo 1	41.1 Ω	1F	4 %
		Fallo 2	14.8 Ω	1F	32 %
		Fallo 3	6.8 Ω	1F	73 %

En la Fig. 4.28, se ilustra la estimación del índice SARFI-90 en base a la información de dos medidores seleccionados al azar (nudos 2 y 22). Del contraste de las medidas reales (curva de color gris) respecto de las estimaciones obtenidas (curva de color azul), se observa que de forma mayoritaria las medidas reales están por encima de las predicciones esperadas. Esto es, al tratarse de un escenario atípico de fallos y con la información de solo dos monitores, el algoritmo tiende a calcular estimadores subdimensionados como el escenario más probable en cada nudo de la red IEEE-24. Para este caso, el error medio del sistema del índice SARFI-90 es del 18.8 %, y en el nudo con mayor error en la predicción se registra un valor de $\varepsilon = 40\%$ (ver parte inferior de la Fig. 4.28).

Al considerar la información de un medidor adicional (nudos: 2, 10 y 22) en el algoritmo PEHT+MP, ilustrado en la Fig. 4.29, se observa una reducción significativa del error de la estimaciones del índice SARFI-90. Para las condiciones planteadas, se calcula un error promedio del 14.2% para todo el sistema.

⁹El criterio de generación de los fallos se basa en los parámetros indicados en la tabla 3.9.

Figura 4.28 – Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de dos medidores seleccionados al azar de la red IEEE-24 (nudos 2 y 22).

Figura 4.29 – Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de tres medidores seleccionados al azar de la red IEEE-24 (nudos 2, 10 y 22).

En la Fig. 4.30, se plantea un escenario de estimación ideal ($\varepsilon = 0\%$) del índice SARFI-90 de la red IEEE-24. En este caso, la información de cuatro medidores seleccionados al azar (nudos: 2, 6, 10 y 22) resulta suficiente para reducir el error de las estimaciones a cero.

Figura 4.30 – Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores de la red IEEE-24 (nudos 2, 6, 10 y 22).

Como se observa en los ejemplos planteados en la red IEEE-24, a pesar del considerable incremento del número de fallos de la línea N° 26 (de 0.25 fallos/año de media a 3 fallos/año en un año dado), el algoritmo PEHT+MP permite estimar de forma óptima las medidas de todo el sistema, alcanzando una estimación ideal del número de huecos a partir de un conjunto relativamente pequeño de medidores.

En la Fig. 4.31, se ilustra un ejemplo de estimación del índice SARFI-90 de la red IEEE-118 a partir de los datos de tres medidores seleccionados al azar (nudos: 10, 55 y 110). Para este caso, la línea de transmisión afectada con un número atípico de fallos es la N° 90, la cual conecta los nudos 38 y 65 a una tensión 345 kV. La tasa de fallo histórica de este elemento es de $\lambda = 3.1$ fallos/año, no obstante, en un año particular, se simula un incremento de fallos del 387 %, alcanzando un número atípico de 12 fallos/año. En la tabla 4.16 se describen las principales características de los fallos, los cuales fueron generados de forma aleatoria¹⁰.

Como muestra la Fig. 4.31, a partir de los datos de tres medidores de huecos de la red IEEE-118, y considerando un súbito incremento del número de fallos de la línea N° 90 conectada entre los nudos 38 y 65, el algoritmo de predicción PEHT+MP calcula un error promedio en las estimaciones del índice de sitio SARFI-90 del 28.8 % en toda la red IEEE-118 (ver la parte inferior de la Fig. 4.31).

El error de la estimación dependerá directamente del número y el área de correlación de los medidores considerados. Así, en la Fig. 4.32 se muestra el efecto de considerar un medidor adicional al conjunto previamente establecido, esto es, considerar la infor-

¹⁰El criterio de generación de los fallos se basa en los parámetros indicados en la tabla 3.9.

Figura 4.31 – Estimación del índice SARFI-90 mediante la información de tres medidores seleccionados al azar de la red IEEE-118 (nudos 10, 55 y 110).

Tabla 4.16 – Características de los doce fallos registrados en la línea N° 90 de la red IEEE-118.

Nudo inicio	Nudo fin	Descripción	Impedancia	Tipo de fallo	Localización (dist. fallo/long. línea)
34	37	Fallo 1	27.5 Ω	2FT	69 %
		Fallo 2	27.7 Ω	1F	9 %
		Fallo 3	36.6 Ω	1F	99 %
		Fallo 4	49.0 Ω	3F	99 %
		Fallo 5	43.8 Ω	1F	46 %
		Fallo 6	54.4 Ω	1F	24 %
		Fallo 7	17.9 Ω	1F	4 %
		Fallo 8	53.1 Ω	1F	28 %
		Fallo 9	24.7 Ω	1F	12 %
		Fallo 10	8.5 Ω	1F	49 %
		Fallo 11	29.6 Ω	2F	82 %
		Fallo 12	24.4 Ω	1F	90 %

mación de cuatro medidores de huecos localizados en los nudos 10, 55, 70 y 110 de la red IEEE-118. Para este caso, se alcanza un error nulo en las estimaciones del citado sistema.

Figura 4.32 – Estimación ideal del índice SARFI-90 mediante la información de cuatro medidores seleccionados al azar de la red IEEE-118 (nudos 10, 55, 70 y 110).

Como se ha demostrado en los ejemplos estudiados en las Figs. 4.28-4.32, el algoritmo de estimación PEHT+MP es aplicable a redes de potencia de diversas características y tamaños. Asimismo, debido a la representación estocástica de las variables que caracterizan los eventos de huecos de tensión, y la información almacenada en la base de datos ($n = 5000$ años), el PEHT+MP permite estimar de forma adecuada el número de huecos de tensión tanto en condiciones regulares como en situaciones atípicas o severas de fallos de algún elemento del sistema.

4.6. Conclusiones

Mediante el desarrollo del presente capítulo, orientado a la estimación de índices de huecos de tensión a partir de los datos de una monitorización parcial del sistema eléctrico, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Por las características intrínsecas de las redes de potencia, los índices de sitio de los huecos de tensión registrados en diversas zonas de la red guardan un grado de relación lineal entre sí. Esta hipótesis se ha confirmado a través del análisis de correlación de las pseudo-medidas de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de tres sistemas eléctricos estudiados.
- Aprovechando la propiedad de que los índices de huecos de tensión guardan fuerte correlación en diversas secciones de una red, se plantea el desarrollo de un algoritmo denominado PEHT+MT, que permite la estimación estocástica de las

medidas de huecos de tensión de la zona no monitorizada a través de la información de un conjunto conocido de medidores del sistema. Su formulación está basada en la estimación o filtrado Bayesiano.

- De la aplicación del PEHT+MP en tres redes de potencia (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357), se observa que la calidad de las estimaciones depende de las características propias de la red y la información aportada por los medidores. Como se ha demostrado en los diversos casos estudiados, con una fracción monitorizada del sistema es posible obtener estimaciones precisas de los índices SARFI-90 y SARFI-70 del resto de la red.
- El área de correlación del nudo donde está ubicado el medidor de huecos se muestra como un parámetro influyente en la calidad de las estimaciones del PEHT+MP. Al emplear medidores con mayor área de correlación, se reduce el error de las estimaciones de severidad de los huecos de tensión, especialmente en la estimación de los nudos circunscritos a la misma. Adicionalmente, el número de medidores empleados en la estimación se evidencia como otra vía para mejorar la precisión de las predicciones de medidas de huecos en el PEHT+MP.
- El considerar el nivel de carga de la red no se muestra como un parámetro relevante en la calidad de las estimaciones del PEHT+MP.
- Para condiciones atípicas de fallos de un elemento del sistema, el PEHT+MP permite estimar de forma adecuada las mediciones de la zona no monitorizada de la red.

Debido a las características comentadas, el filtrado Bayesiano se muestra como una herramienta potente para la estimación de severidad de los huecos de tensión cuando se tiene medidas previas en una red. Este procedimiento, sería extendido de forma sencilla a otros índices de severidad de huecos (SARFI-X, SARFI-Curve, etc.), y en base a las pruebas realizadas, es aplicable a cualquier red de potencia.

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MEDIDORES DE HUECOS DE TENSIÓN

5.1. Introducción y estructura del capítulo

5.1.1. Introducción

Los métodos de localización óptima de medidores de huecos de tensión tienen como objetivo general la supervisión de los huecos de una red a partir de los datos de un conjunto de medidores menor que el número de nudos del sistema eléctrico. Es decir, en estos métodos se plantea un criterio técnico-económico que permita disminuir los costes del sistema de monitorización sin alterar de forma significativa la supervisión de la red en términos de huecos de tensión.

Al respecto, diversos autores plantean la localización óptima de los medidores de huecos de tensión mediante el “criterio de observabilidad”, que garantiza analíticamente que todos los fallos que originen huecos de tensión en la red van a ser detectados por al menos un medidor del conjunto óptimo calculado [Olguin y otros, 2006; Espinosa y otros, 2009]. Habitualmente, este criterio está relacionado con la utilización de métodos de estimación de huecos de tensión a partir de un conjunto reducido de medidas [Wang y otros, 2005; Espinosa y Hernández, 2007; Hernández y otros, 2013], que se basan en la detección de la falta y determinación del posible hueco producido. Para estos métodos es imprescindible, por tanto, garantizar que cualquier falta del sistema que origine un hueco sea registrado por al menos un medidor.

Tomando como referencia los objetivos alcanzados en los trabajos previos basados en este tipo de estrategias, el presente capítulo persigue dar un paso adicional y plantea un método que potencia la fiabilidad del resultado obtenido mediante la optimización basada en el criterio de observabilidad.

Por otra parte, en este trabajo se propone un criterio adicional para la localización óptima de medidores de huecos de tensión, basado en el concepto del “área de correlación¹”. Este nuevo enfoque de optimización permite determinar la ubicación de los

¹Detalles del área de correlación de los nudos en el apartado 4.3.1.2 del capítulo anterior (página 104).

medidores de tal forma que todos los nudos de la red estén dentro del área de correlación de al menos un medidor del conjunto óptimo de medidores, y, en combinación del algoritmo PEHT+MP propuesto en el capítulo anterior, se pueda estimar con precisión el número de huecos de tensión de todo el sistema eléctrico. Es decir, con la información de un reducido conjunto de medidores determinado mediante el método propuesto, se persigue garantizar analíticamente la estimación sin error de todos los índices de sitio del sistema estudiado a largo plazo, esto es, en cualquier año de estudio.

Cada uno de los dos métodos de optimización propuestos tiene un fin específico, y, dependiendo de la estrategia del operador de la red, ambas metodologías pueden ser de interés para la supervisión de los huecos de tensión.

5.1.2. Estructura

En el presente capítulo se proponen dos métodos para la localización óptima de medidores de huecos de tensión. Tal y como se ha indicado anteriormente, el primero de ellos se basa en el criterio de observabilidad, mientras que el segundo en el criterio del área de correlación. La estructura general del capítulo es la siguiente:

- Se plantea una visión global de los componentes y estructura de los algoritmos de localización óptima de medidores de huecos de tensión.
- Se describe el primer método de localización óptima de medidores propuesto, el cual es fundamentado en el criterio de observabilidad. Previamente se detallan brevemente los principales métodos de localización óptima de medidores de huecos de tensión presentados hasta el momento en la bibliografía.
- Se describe el segundo método de localización óptima de medidores propuesto, el cual se basa en el criterio del área de correlación.
- Se evalúan de forma práctica los resultados obtenidos mediante los métodos propuestos de localización óptima de medidores. Para su análisis, se estudian tres redes eléctricas.
- Se resumen las principales conclusiones extraídas de los métodos propuestos de localización óptima de medidores.

5.2. Planteamiento general de los métodos propuestos de localización óptima de medidores

Como se indicó en el apartado anterior, en el presente capítulo se proponen dos métodos de localización óptima de medidores de huecos de tensión: uno basado en el criterio de observabilidad y otro según el criterio del área de correlación del medidor. Independientemente del criterio utilizado en la localización óptima de los medidores de huecos de tensión, los métodos se modelan de forma general según lo indicado en la Fig. 5.1. Sus partes principales son las siguientes:

- Simulación de una monitorización de medidas de huecos de tensión a largo plazo de la red. Este primer paso busca estimar todos los posibles escenarios de huecos de tensión que tendría la red. Para su desarrollo en este trabajo, se utiliza el

Figura 5.1 – Modelo esquemático de los métodos de emplazamiento óptimo de medidores de huecos de tensión.

programa de estimación de huecos de tensión (PEHT) propuesto en el capítulo 3.

- Las pseudo-medidas generadas de huecos de tensión de la red estudiada se almacenan en una base de datos. De forma particular, se considera el número anual de huecos (SARFI-90) y el número anual de huecos profundos (SARFI-70) que han sido registrados en la pseudo-monitorización del sistema.
- Se aplica el criterio de optimización y se calcula el emplazamiento óptimo del sistema de monitorización de huecos de tensión. Bien sea mediante el criterio clásico de observabilidad, o a través del criterio del área de correlación. En apartados siguientes se explican de manera pormenorizada las características principales de cada método.
- Según el criterio de localización óptima utilizado, se determina la ubicación y el número total de medidores óptimos de la red evaluada. Este paso se aplica para la monitorización de índices SARFI-90 y SARFI-70.

A continuación, se describen de forma detallada los dos métodos propuestos de localización óptima de medidores de huecos de tensión.

5.3. Localización óptima de medidores mediante el criterio de observabilidad

En el presente apartado, se describen las partes principales del método propuesto de localización óptima de medidores de huecos basado en el criterio de observabilidad. Previamente, se describe a continuación un breve antecedente de los métodos relacionados al criterio de observabilidad:

5.3.1. Antecedentes

Como se indicó en el apartado 2.7 del capítulo de “Fundamentos y trabajos previos”, entre las aportaciones más relevantes en el ámbito de la localización óptima de medidores de huecos de tensión se tienen los métodos de [Olguin y Bollen, 2003a; Olguin y otros, 2006] y [Espinosa y otros, 2009]. En la Fig. 5.2 se muestra un breve resumen de las características más relevantes de los métodos mencionados.

En la Fig. 5.2, se observa que las mencionadas propuestas persiguen estimar la localización óptima de los medidores de huecos de tensión a partir de la simulación de fallos en todas las líneas del sistema con el objetivo de que cualquier fallo que

Figura 5.2 – Antecedente de los principales métodos de emplazamiento óptimo de medidores de huecos de tensión.

origine algún hueco en el sistema haga actuar, al menos, a un medidor. El criterio empleado para formular el problema de optimización es el denominado “criterio de observabilidad”, y, para su resolución matemática, se utiliza la técnica de *Branch and Bound* [Castillo y otros, 2002].

Siendo estos métodos de localización óptima de medidores de huecos los precedentes más directos de los que se parte en este trabajo, se estudian tanto sus puntos fuertes como limitaciones para definir los objetivos a resolver en una nueva propuesta. A partir de este análisis, los métodos propuestos presentan las siguientes mejoras:

- Se considera el efecto de la impedancia de fallo en la simulación de los huecos de tensión. Anteriormente, los métodos relacionados a la localización óptima de medidores solamente consideraban fallos francos para simular los huecos de tensión en la red estudiada. Esta hipótesis de los modelos mencionados sobredimensiona la severidad de todos los huecos de tensión simulados, y, por ende, afecta negativamente al realismo y fiabilidad de los resultados obtenidos.
- Se incluye la incertidumbre característica de las variables de entrada que caracterizan los huecos de tensión en los nuevos métodos de localización óptima de medidores de huecos. Datos estadísticos como el número de fallos al año que tienen los elementos de la red, la impedancia de falta, la duración, etc., son variables de naturaleza aleatoria, las cuales alteran la probabilidad de aparición de los huecos de tensión en la red estudiada. Por ello, conviene parametrizar las variables de este tipo de forma estocástica para determinar el emplazamiento óptimo de medidores a largo plazo.
- Se reemplaza el procedimiento determinista de los métodos propuestos de localización óptima de medidores por una metodología probabilística, que permita

simular y estimar todos los posibles escenarios de huecos de tensión en el sistema a largo plazo.

El procedimiento propuesto en este trabajo parte, al igual que métodos anteriores, de un criterio de optimización de la observabilidad, si bien incluye las mejoras que se han indicado anteriormente. A continuación se describe de manera detallada el método propuesto.

5.3.2. Aspectos generales del método de localización óptima mediante el criterio de observabilidad

El criterio de observabilidad garantiza matemáticamente que al menos un medidor va a registrar a los fallos que originen algún hueco de tensión en una red de interés [Olguin y otros, 2006; Espinosa y otros, 2009]. El método propuesto de localización óptima de medidores basado en el criterio de observabilidad (denominado LOM+OBS) se ilustra en la Fig. 5.3.

Figura 5.3 – Método de localización óptima de medidores de huecos de tensión basado en el criterio de observabilidad (LOM+OBS).

Como puede observarse en la Fig. 5.3, el método LOM+OBS consta de los siguientes pasos:

1. Como primer paso, mediante el programa de estimación de huecos de tensión (PEHT) desarrollado en el capítulo 3, se simula una monitorización a largo plazo de los huecos de tensión del sistema eléctrico. Esta simulación considera los factores aleatorios propios y exógenos de la red en la caracterización de los eventos de huecos de tensión.

2. Una vez caracterizada la naturaleza aleatoria de los eventos de huecos de tensión de la red, se determinan los parámetros tensión residual y duración a través de la teoría clásica de cortocircuitos y la simulación de la duración del evento [Grainger y Stevenson, 1994; Zambrano y otros, 2015b].
3. Para estimar los posibles eventos de huecos de tensión de la red a largo plazo, se aplican los principios del método de muestreo Bootstrap. Este método permite estimar propiedades valiosas de la población² a través del estudio de los parámetros de sus muestras. La precisión de las estimaciones del Bootstrap depende principalmente de dos parámetros: del tamaño n de registros de la muestra y del número b de muestras generadas [Davison y Hinkley, 1997].

Aplicando el Bootstrap al estudio de los huecos de tensión, el tamaño n de la muestra representa el número total de años de simulación de los huecos de tensión, y las b muestras son el número total de pseudo-monitorizaciones que se han generado del sistema. Por ejemplo, en las simulaciones utilizadas en este trabajo se consideran $b = 200$ muestras de $n = 500$ años.

4. Esta información es almacenada de forma matricial mediante la denominada “matriz de huecos de tensión”.
5. A continuación, se plantea el problema de optimización según el criterio de observabilidad. Básicamente, la formulación del problema de optimización es un sistema de ecuaciones compatible indeterminado.
6. Se resuelve el sistema de ecuaciones planteado en el paso anterior mediante conocidos métodos matemáticos [Cánovas y otros, 2011].
7. Asimismo, por las características del método de muestreo empleado, es posible determinar la probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores mediante un tratamiento probabilístico sencillo. Es decir, además de estimar la localización óptima de los medidores de huecos de la red, es factible calcular el grado de utilización que va a tener cada medidor a largo plazo.

Esta descripción general de las características del método LOM+OBS se desarrolla con más profundidad en los próximos apartados.

5.3.3. Bootstrap

La técnica de muestreo *Bootstrap* o *Bootstrapping*, es una técnica estadística numérica que permite inferir propiedades de una población a través de las muestras generadas [Efron y Tibshirani, 1994]. El uso de este método de muestreo es especialmente apropiado para los siguientes casos [Adèr y otros, 2008]:

- Cuando se busca conocer propiedades de un fenómeno o modelo matemático muy complejo o desconocido.
- Cuando el volumen de los datos de una muestra es muy pequeño o insuficiente para la inferencia estadística directa.

²Se interpreta por “población” al universo de observaciones que tendría un modelo o fenómeno, en este caso la pseudo-monitorización de huecos de tensión en sistemas eléctricos.

- Para calcular la potencia estadística de un modelo a partir de una pequeña muestra.

El primer y segundo caso resultan especialmente aplicables al estudio de los huecos de tensión. Como el modelo matemático para estimar la severidad de los huecos de tensión es complejo y de múltiples variables aleatorias, la técnica de muestreo Bootstrap permitiría inferir el comportamiento de los posibles eventos de huecos de tensión a largo plazo para cualquier sistema eléctrico.

Por otro lado, de llegar a tener medidas reales de huecos de tensión en una red, lo más probable es que el volumen de la información sea limitada o escasa, por lo que el uso del Bootstrap permitiría aprovechar la información de esta pequeña muestra de datos reales, amplificando su tamaño para inferir de mejor forma las propiedades de una monitorización a largo plazo en dicha red.

El tercer caso de aplicación del Bootstrap, que trata del cálculo de la potencia estadística de un modelo, es un proceso especialmente utilizado en estudios sociológicos, permitiendo establecer la confiabilidad de no cometer un “falso negativo”³. Es decir, de no encontrar diferencias significativas en las muestras estudiadas cuando sí existen en la realidad. Por sus características, esta posible aplicación del Bootstrap es de menor interés para el estudio de los huecos de tensión.

Según lo indicado, para la presente propuesta de localización óptima de medidores de huecos, se aplica la técnica del Bootstrap con el fin de predecir los posibles registros de huecos de tensión a largo plazo, y, con ello, poder formular y resolver la localización óptima de los medidores en el sistema de interés. En la Fig. 5.4 se muestra un diagrama esquemático del procedimiento empleado en el método de muestreo Bootstrap.

Figura 5.4 – Esquema del método de muestreo Bootstrap.

Para definir la precisión de la media muestral del parámetro estimado con el método de muestreo Bootstrap, se utiliza la expresión (5.1) presentada por [Efron, 1987].

³En estadística el “falso negativo” se comete cuando un investigador no rechaza la hipótesis nula siendo falsa en la población.

$$e_{sb}(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{b-1} \cdot \sum_{l=1}^b \left(\hat{\theta}^*(l) - \hat{\theta}^*(\bullet) \right)^2} \quad (5.1)$$

donde,

- e_{sb} : Error estimado de la media del parámetro estadístico a determinar.
- $\hat{\theta}$: Parámetro estadístico a determinar en el Bootstrap. Por ejemplo: media, desviación típica, mediana, percentil, etc.
- $\hat{\theta}^*(l)$: Parámetro estadístico calculado a partir de los datos de la muestra l , siendo $l \in \{1, 2, \dots, b\}$.
- $\hat{\theta}^*(\bullet)$: Media de todas los parámetros muestrales estimados.

Según esta expresión, el error del estimador del Bootstrap depende principalmente de dos factores:

- El tamaño n de las observaciones de la muestra, que en el presente caso son generadas a través del programa de estimación de huecos de tensión PEHT.
- El número b de muestras generadas en el Bootstrap de la red estudiada.

En el caso del muestreo para estimar la localización óptima de los medidores de huecos de tensión, se busca plantear un equilibrio entre el esfuerzo computacional y la precisión de los parámetros. Así, se plantea una generación de $b = 200$ muestras o pseudo-monitorizaciones independientes con un volumen de $n = 500$ años de pseudo-medidas de huecos de tensión para cada muestra de la red estudiada. En base a esta información, cada muestra tendría un error máximo de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de ± 0.48 huecos/año y ± 0.24 huecos/año, respectivamente, en las tres redes de prueba estudiadas (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357)⁴.

Como el método LOM+OBS está basado en un procedimiento estocástico, cada muestra generada se caracterizará por una componente constante con su respectiva incertidumbre. La componente constante se define por las características propias de la red, y la incertidumbre, por la naturaleza aleatoria de las variables que caracterizan a los huecos de tensión. Por ello, las pseudo-monitorizaciones o muestras generadas en el Bootstrap tendrán características muy similares, pero no iguales.

La estructura de las muestras o pseudo-monitorizaciones de huecos de tensión a obtener en el Bootstrap se detalla en el siguiente apartado.

5.3.4. Matriz de huecos de tensión de la red

Las muestras de pseudo-medidas de huecos obtenidas mediante la técnica Bootstrap se generan mediante el PEHT. A continuación, se almacena de forma matricial mediante la denominada matriz de huecos de tensión M^t de la red.

Como se muestra en la tabla 5.1, esta matriz binaria M^t indica para cada nudo del sistema todos los posibles eventos de huecos de tensión a largo plazo. Si el fallo simulado por el PEHT provoca en el nudo un hueco de tensión con tensión residual por debajo del umbral t considerado, se registra este evento con un valor de 1 en la matriz M^t , caso contrario, con un valor de 0.

⁴Detalles del cálculo del error máximo de los índices mencionados en el apartado 3.2.2.1 de la página 54.

Tabla 5.1 – Estructura de la matriz de huecos de tensión M^t .

			Nudos			
			1	2	...	N
Fallos	Año 1	Fallo 1 en el elemento 1	0 o 1	...	...	0 o 1
		Fallo 2 en el elemento 1	0 o 1	...	...	0 o 1
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		Fallo k1 en el elemento 1	0 o 1	...	...	0 o 1
		Fallo 1 en el elemento 2	0 o 1	...	...	0 o 1
		Fallo 2 en el elemento 2	0 o 1	...	...	0 o 1
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		Fallo k2 en el elemento 2	0 o 1	...	...	0 o 1
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		Fallo 1 en el elemento m	0 o 1	...	...	0 o 1
		Fallo 2 en el elemento m	0 o 1	...	...	0 o 1
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		Fallo km en el elemento m	0 o 1	...	...	0 o 1
	Año 2	...				
	⋮	⋮				
	Año n	...				

Las dimensiones de la matriz de huecos de tensión M^t se definen de la siguiente forma:

- Un número de filas igual al total de fallos generados en los n años de simulación del PEHT.
- Un número de columnas igual a un número de nudos N del sistema.

Por las características estocásticas de todas las variables de entrada del PEHT, los m elementos de la red tienen un número independiente de fallos al año que se registran en la matriz de huecos de tensión en los n años de simulación. De esta forma, el número total de fallos simulados N_F en la red se calcula mediante la expresión:

$$N_F = \sum_{v=1}^n \sum_{w=1}^m y_{vw} \quad (5.2)$$

siendo y_{vw} una variable aleatoria que representa el número de fallos del elemento v en el año w de la red.

Una vez definida la matriz de huecos de tensión de la red de interés, en el siguiente apartado se plantea la función objetivo con la cual se formula y calcula el problema de localización óptima de los medidores mediante el criterio de observabilidad.

5.3.5. Función objetivo del criterio de observabilidad

Como se ha indicado anteriormente, el criterio de observabilidad plantea de forma general que todos los fallos que generen registros de huecos de tensión deben ser detectados por al menos un medidor. Para ello, se define el modelo de optimización de la siguiente forma [Olguin y otros, 2006; Espinosa y otros, 2009]:

$$\min \sum_{i=1}^N X(i), \quad \text{sujeto a :} \quad (5.3)$$

$$M^t(i, j) \cdot X(i) \geq 1$$

donde,

- X : Vector binario de localización óptima de medidores, siendo 1 si hay medidor en el nudo y 0 si no lo hay.
- M^t : Matriz de huecos de tensión de la red, donde t es el umbral de tensión residual por debajo del cual se considera que se produce un hueco de tensión en el nudo. En el caso de los índices SARFI-90 y SARFI-70, el umbral de tensión se define como $t = \{90 \%, 70 \%\}$ de la tensión nominal del nudo, respectivamente.
- i : Representa el nudo de la red, siendo $i = \{1, 2, \dots, N\}$ y N es el número total de nudos de la red.
- j : Representa el número de fallo generado, donde $j = \{1, 2, \dots, N_F\}$ y N_F es el número de fallos simulados según se ha definido en la expresión (5.2).

De acuerdo con el planteamiento de la ecuación (5.3), el método LOM+OBS tiene como objetivo:

- Minimizar el número de medidores seleccionado.
- Que todos los fallos que originen huecos de tensión por debajo de un umbral de tensión residual t en la matriz M^t sean detectados por al menos un medidor del conjunto óptimo calculado.

Definida la función objetivo, así como las condiciones a las que está sujeta, se emplea el programa GAMS (*General Algebraic Modeling System*) para el cálculo del vector X de localización óptima de medidores. En este caso particular, se emplea la programación lineal entera-mixta del GAMS para resolver el sistema de ecuaciones dado que solo se manejan números binarios.

A manera de ejemplo, si en una red de cinco nudos, el vector X de localización óptima de medidores calculado por el método LOM+OBS es $X = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$, se puede inferir que para monitorizar todos los fallos que generaron huecos de tensión en este sistema, se requerirían al menos tres medidores ubicados en los nudos 1, 2 y 5.

Considerando la aplicación de la técnica Bootstrap en la localización óptima de medidores de huecos de tensión del método LOM+OBS, el cálculo del vector X se repite $b = 200$ veces, obteniendo un conjunto de 200 posibles localizaciones óptimas

del sistema de monitorización. Cabe indicar que por la característica estocástica de la generación de los fallos en el método LOM+OBS, las respuestas del vector X pueden diferir ligeramente entre las muestras.

Como el método LOM+OBS persigue una respuesta única del vector de localización óptima de medidores, se supone que el universo de posibles escenarios de registros de huecos de tensión está íntegramente representado en las $b = 200$ muestras de $n = 500$ años de simulación. A partir de esta información, la localización óptima unificada de los medidores $X_{LOM+OBS}$ se calcula mediante la siguiente expresión:

$$X_{LOM+OBS}(i) = \begin{cases} 1, & \text{si } \sum_{l=1}^b X_l(i) \geq 1, \forall i = \{1, 2, \dots, N\} \wedge \forall l = \{1, 2, \dots, b\} \\ 0, & \text{si } \sum_{l=1}^b X_l(i) = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

siendo $X_{LOM+OBS}$ el vector binario unificado de localización de medidores óptimos de la red de interés, X_l el vector binario de medidores óptimos de la muestra l , la variable i el nudo del sistema donde se localiza el medidor, N el número total de nudos de la red, y b el número total de muestras generadas en el programa LOM+OBS.

En la tabla 5.2, se muestra un ejemplo simplificado del cálculo del vector $X_{LOM+OBS}$ para una red de 5 nudos. Del mismo, se observa que a excepción del nudo 4, todos los demás nudos de esta red son considerados dentro del conjunto óptimo de medidores.

Tabla 5.2 – Ejemplo simplificado del cálculo del vector $X_{LOM+OBS}$.

		Nudos				
		1	2	3	4	5
X_j	X_1	1	0	1	0	0
	X_2	1	0	0	0	1
	X_3	1	1	1	0	1
	X_4	1	0	1	0	1
	X_5	1	0	1	0	0
	X_6	1	0	1	0	1
$\sum_{j=1}^b X_j(i)$		6	1	5	0	4
$X_{LOM+OBS}$		1	1	1	0	1

5.3.6. Probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores

La probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores se puede calcular a partir de un análisis frecuentista de las respuestas obtenidas por el Bootstrap del método LOM+OBS. Al considerar las respuestas $X_l \in \{X_1, X_2, \dots, X_b\}$ como el conjunto universo de los vectores de localización óptima de medidores para todos los posibles registros de huecos de tensión de la red estudiada a largo plazo, se puede establecer un “nivel de utilización” del sistema óptimo de medidores de huecos calculado. Su cuantificación se estima mediante la siguiente expresión:

$$P(i) = \frac{\sum_{l=1}^b X_l(i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^b X_l(i)} \quad (5.5)$$

donde,

- $P(i)$: Probabilidad de utilización del medidor localizado en el nudo i .
 $X_l(i)$: Valor binario que indica si el nudo i de la muestra l ha sido considerado o no como localización óptima por el método LOM+OBS.
 b : Número total de muestras generadas.
 N : Número total de nudos de la red.

Tomando los datos de la tabla 5.2, se desarrolla un ejemplo sencillo del cálculo de la probabilidad de utilización de los medidores del sistema óptimo de monitorización en la tabla 5.3. En este caso, con cuatro medidores localizados en los nudos 1, 2, 3 y 5 es factible cumplir a cabalidad con la función objetivo del método LOM+OBS. Asimismo, se estima que solo un 6.3 % de veces va a ser requerido el medidor localizado en el nudo 2 a largo plazo (ver tabla 5.2).

Tabla 5.3 – Ejemplo del cálculo de la probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores del método LOM+OBS.

		Nudos				
		1	2	3	4	5
X	X_1	1	0	1	0	0
	X_2	1	0	0	0	1
	X_3	1	1	1	0	1
	X_4	1	0	1	0	1
	X_5	1	0	1	0	0
	X_6	1	0	1	0	1
$\sum_1^b X(i)$		6	1	5	0	4
$\sum_1^N \sum_1^b X(i)$		16				
P(i)		37.5 %	6.3 %	31.3 %	0.0 %	25.0 %

Por otra parte, si se plantea como objetivo la localización de un medidor de huecos de altas prestaciones en esta red de 5 nudos, lo analíticamente lógico es que sea ubicado en el nudo 1 de mayor probabilidad de utilización con $P(1) = 37.5 \%$.

Esta información adicional del conjunto óptimo de medidores de huecos de tensión puede ser de gran utilidad para el operador de un sistema eléctrico, ya que de requerir excluir o potenciar el uso de algún medidor, la probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores le permitiría tomar esta decisión en base a un criterio analíticamente justificable.

5.3.7. Implementación y validación del algoritmo LOM+OBS

En la Fig. 5.5, se ilustra la estructura del algoritmo del método LOM+OBS. Su implementación se ha desarrollado íntegramente en el entorno Matlab, aunque de manera

puntual se emplea una interfaz con el programa GAMS para la resolución del problema de optimización. A continuación se describen los pasos del algoritmo:

Figura 5.5 – Estructura del algoritmo del método LOM+OBS.

- Paso N° 1: Mediante el uso del programa de estimación de huecos de tensión PEHT, se desarrolla el Bootstrap mediante un conjunto de $b = 200$ muestras con $n = 500$ años de simulación de la red de interés. La estructura de las muestras de pseudo-medidas de huecos de tensión de la red se ajustan al formato presentado en la matriz M^t de la tabla 5.1 para un umbral de tensión de huecos $t = \{0.9, 0.7\}$ pu.
- Paso N° 2: Para cada muestra generada, se plantea el problema de optimización según lo indicado en la ecuación (5.3).
- Paso N° 3: Mediante el uso del programa de optimización GAMS, se resuelve el sistema binario de ecuaciones, de tal forma que se obtiene un vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión para cada muestra generada.
- Paso N° 4: Teniendo en cuenta el conjunto de vectores de localización óptima de medidores obtenido mediante el Bootstrap, se calcula un vector único de localización óptima de medidores $X_{LOM+OBS}$ según lo indicado en la expresión (5.4).
- Paso N° 5: Finalmente, aplicando un criterio frecuentista de las respuestas obtenidas en las $b = 200$ muestras, se calcula la probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores determinado en el Paso N° 4.

El procedimiento de validación de la localización óptima de los medidores estimada por el método LOM+OBS se detalla a continuación:

- Se genera con el PEHT una muestra independiente de pseudo-medidas de huecos de tensión de $n = 100$ años de simulación de la red de interés. Es decir, se obtiene una matriz de huecos de tensión M_{val}^t con la estructura indicada en la tabla 5.1. Esta matriz se genera para cada umbral de tensión $t = \{0.9, 0.7\}$ pu.

- Mediante la función objetivo expresada en (5.3), se calcula el producto de la matriz de huecos de validación y el vector de localización óptima calculado, esto es, $Y = M_{val}^t \cdot X_{LOM+OSB}$.
- Si todos los elementos del vector calculado Y son mayores o iguales a 1, se considera que el conjunto óptimo de medidores $X_{LOM+OBS}$ sí cumple con el criterio de observabilidad. Caso contrario, se considera que uno o más fallos que originaron algún hueco de tensión en el sistema no han sido detectados por el conjunto óptimo de medidores calculado.

En la sección de Resultados, se evalúa al método LOM+OBS en tres sistemas eléctricos. Esto es, en dos redes de prueba de la IEEE de 24 y 118 nudos (IEEE-24 e IEEE-118) y la red del Ecuador de 357 nudos (EC-357).

5.4. Localización óptima de medidores mediante el criterio del área de correlación

Como propuesta alternativa para la localización óptima de medidores de huecos de tensión, se presenta el método LOM+COR basado en el criterio del área de correlación de los medidores. Este método busca determinar de forma estratégica el emplazamiento óptimo de los medidores de una red de tal forma que, en combinación del programa de estimación de huecos de tensión con medidas previas (PEHT+MP)⁵, se pueda estimar la severidad de los huecos de tensión en cualquier nudo de la red estudiada. Esto es, el método LOM+COR permitiría que se estimen con elevada precisión el número de huecos de todos los nudos de la red mediante los datos de un conjunto reducido de nudos monitorizados determinados mediante dicho método.

El criterio de optimización propuesto en el método LOM+COR se describe con mayor detalle en el siguiente apartado.

5.4.1. Función objetivo del criterio del área de correlación

El criterio del área de correlación del método LOM+COR persigue establecer el número mínimo de medidores que cumpla con las siguientes condiciones:

- Condición N° 1: Todos los nudos del sistema deberán estar dentro del área de correlación de al menos un medidor del conjunto óptimo de medidores de huecos calculado. Esta condición tiene que ver con el hecho de que el algoritmo PEHT+MP aprovecha la propiedad de correlación entre los diferentes nudos para obtener resultados satisfactorios al estimar los índices de huecos. Por ello, se requiere que los nudos sin monitorización estén bien correlacionados (esto es, dentro del área de correlación) con los nudos con medidor.
- Condición N° 2: Mediante la información del conjunto óptimo de medidores y la aplicación del método de estimación PEHT+MP, se deberá poder estimar de forma ideal el número de huecos de tensión al año de todos los nudos del sistema.

⁵Detalles del PEHT+MP en el capítulo anterior.

Esto es, se persigue alcanzar un error nulo ($\varepsilon = 0$) en la predicción de los índices de sitio de todos los nudos de la red⁶.

5.4.1.1. Condición N° 1 del criterio del área de correlación

Para formular la primera condición del método LOM+COR, se emplea la matriz binaria de correlación de medidas de huecos de tensión $M_{COR}^t(i, j)$. Por sus características, esta matriz indica la existencia o no de un nivel predeterminado de correlación $R_{i,j}$ entre los nudos del sistema. Para el cálculo del nivel de correlación de los nudos de una red, se emplea la ecuación (4.1) de la página 103.

La matriz $M_{COR}^t(i, j)$, representada en (5.6), se calcula teniendo en cuenta dos parámetros: el umbral de tensión t con el cual se clasifica el evento de hueco de tensión y el coeficiente de correlación $R_{i,j}$ que indica el nivel de correlación que tienen los eventos de huecos de tensión a largo plazo entre los nudos del sistema. Asimismo, como se indica en la expresión (5.6), esta matriz es simétrica, con un número de filas y columnas iguales al número de nudos N del sistema.

$$M_{COR}^t(i, j) = \begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & . & . & . & m_{1,N} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & . & . & . & . \\ . & . & m_{3,3} & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ m_{N,1} & . & . & . & . & m_{N,N} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Para formular el problema de optimización de la condición N° 1, en la matriz $M_{COR}^t(i, j)$ se considera inicialmente un nivel de correlación “muy fuerte”, de $R_{i,j} \geq 0.80$, para determinar el área de correlación de los nudos del sistema. Es decir, los elementos de la matriz $M_{COR}^t(i, j)$ se determinan mediante la expresión:

$$m_{COR}^t(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } R_{i,j} \geq 0.80 \\ 0, & \text{si } R_{i,j} < 0.80 \end{cases}, \forall i, j \quad (5.7)$$

A manera de ejemplo, se emplea la red IEEE-24 para calcular la matriz binaria $M_{COR}^t(i, j)$. En la tabla 5.4 se muestra la matriz $M_{COR}^{90}(i, j)$ para los eventos SARFI-90 ($t < 0.9$ pu), y en la tabla 5.5, se detalla la matriz $M_{COR}^{70}(i, j)$ para los eventos SARFI-70 ($t < 0.7$ pu) de la red IEEE-24.

A partir de la información de las tablas 5.4 y 5.5, se infieren los siguientes datos del área de correlación del nudo 1:

- El área de correlación de los eventos SARFI-90 del nudo 1 está conformada por tres nudos, estos son los nudos: 2, 4 y 5 de la red IEEE-24 (ver tabla 5.4).
- En el caso del área de correlación de los eventos SARFI-70 del nudo 1, solamente el nudo 2 tendría un nivel de correlación superior a 0.80 (ver tabla 5.5).

Cabe destacar que el área de correlación de una red varía según el umbral del parámetro $R_{i,j}$ utilizado. Es decir, si se disminuye el umbral de correlación, un mayor número de nudos cumpliría con la condición planteada, por lo que el área de correlación de los nudos del sistema aumentaría. En el caso opuesto, cuando se aumenta el

⁶El error del estimador del PEHT+MP se calcula según lo indicado en la expresión (4.10) de la página 112.

Tabla 5.4 – Matriz binaria de correlación ($R_{i,j} \geq 0.80$) de eventos SARFI-90 de la red IEEE-24.

		Nudo																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nudo	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
	24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabla 5.5 – Matriz binaria de correlación ($R_{i,j} \geq 0.80$) de eventos SARFI-70 de la red IEEE-24.

		Nudo																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nudo	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

umbral del parámetro $R_{i,j}$ de la matriz de correlación de huecos de tensión, el área de correlación de los nudos disminuirá.

5.4.1.2. Condición N° 2 del criterio del área de correlación

Las propiedades de la matriz $M_{COR}^t(i, j)$ se utilizan como estrategia para cumplir con la condición N° 2 del método, que tiene como objetivo estimar con exactitud los índices de sitio de todo el sistema con el menor número de medidores posible y para cualquier año de estudio.

Por lo indicado anteriormente, la condición N° 2 del criterio del área de correlación del método LOM+COR se define mediante la expresión:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N X_{LOM+COR}(i), \quad \text{suje}to \ a : \\ M_{COR}^t(i, j) \cdot X_{LOM+COR}(i) \geq 1 \\ y \ a : \quad \varepsilon(i) = 0 \end{aligned} \tag{5.8}$$

donde,

N :	Número total de nudos de la red.
$X_{LOM+COR}$:	Vector binario de localización óptima de medidores con N elementos cada uno correspondiente a un nudo. Cada elemento toma el valor 1 si hay medidor en el nudo y 0 si no lo hay.
M_{COR}^t :	Matriz binaria de correlación de huecos de tensión de la red, donde t es el umbral de tensión residual que define la existencia o no de eventos de huecos de tensión. En este caso, $t = \{90\%, 70\%\}$ de la tensión nominal del nudo respectivamente.
ε :	Error estimado en los índices de sitio de cada nudo del sistema.
i y j :	Representan los nudos del sistema, siendo $i = \{1, 2, \dots, N\}$ y $j = \{1, 2, \dots, N\}$.

Para aclarar la función objetivo del método LOM+COR, en la tabla 5.6 se plantea un ejemplo sencillo de la matriz binaria de correlación de huecos de tensión de una red de 5 nudos. A partir de los datos de esta matriz, se observa que el nudo 4 cumpliría con la condición N° 1 de la expresión (5.8), es decir, el nudo 4 tiene todos los nudos del sistema dentro de su área de correlación. No obstante, quedaría pendiente confirmar la segunda condición de (5.8), esto es, si solamente con los datos del medidor del nudo 4 en el PEHT+MP se puede determinar con error nulo los índices de sitio de todo el sistema a largo plazo.

5.4.2. Desarrollo del algoritmo LOM+COR

Para la implementación del algoritmo del método LOM+COR, ilustrado en la Fig. 5.6, se utiliza como plataforma informática al programa Matlab. Para resolver el problema de optimización, se emplea una interfaz sencilla con el programa GAMS, lo que finalmente permite a Matlab calcular el emplazamiento óptimo de medidores en la red de interés. A continuación se describe su procedimiento:

Tabla 5.6 – Ejemplo de matriz de correlación de huecos de tensión de una red genérica de 5 nudos.

		Nudos				
		1	2	3	4	5
Nudos	1	1	0	0	1	1
	2	0	1	1	1	1
	3	0	1	1	1	0
	4	1	1	1	1	1
	5	1	1	0	1	1

- Paso N° 1: Mediante el uso del programa de estimación de huecos de tensión PEHT detallado en el capítulo 3, se obtienen las pseudo-medidas de los huecos de tensión en $n = 1000$ años en la red de interés.
- Paso N° 2: Se almacenan de forma matricial las pseudo-medidas de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de toda la red. Esta matriz tiene dimensiones $n \times N$, siendo n el número de años de simulación y N el número de nudos del sistema. Cada celda representa el valor del índice SARFI-90 o SARFI-70 que tiene un nudo del sistema en un año específico de simulación.
- Paso N° 3: Se calcula la matriz binaria de correlación de huecos de tensión M_{COR}^t según lo indicado en las expresiones (5.6) y (5.7). Esto es, se calcula M_{COR}^t para un nivel de correlación muy fuerte con $R_{i,j} \geq 0.8$ para los umbrales de tensión residual de los huecos con $t < 0.9$ pu y $t < 0.7$ pu.
- Paso N° 4: Se formula el problema de optimización de acuerdo con lo indicado en la expresión (5.8). De esta forma, la interfaz Matlab-GAMS calcula el vector de localización óptima de medidores que cumple con la condición N° 1 del método LOM+COR. Es decir, se calcula el número mínimo de medidores X tal que todos los nudos del sistema estén dentro del área de correlación del conjunto óptimo de medidores seleccionado.
- Paso N° 5: Con la respuesta preliminar X del Paso N° 4, se procede a la verificación de la condición N° 2 del método LOM+COR mediante el uso del programa de estimación de huecos de tensión con medidas previas PEHT+MP⁷.

Si no se cumpliera el error nulo ($\varepsilon = 0$) de los índices de sitio del sistema en todos los nudos y todos los años, se disminuye el coeficiente de correlación en $R_{i,j} - 0.05$ y se retorna al Paso N° 3. Por otra parte, si se confirma la condición de error nulo de los índices de sitio, se aumenta el coeficiente de correlación en $R_{i,j} + 0.05$ y se retorna al Paso N° 3. De esta forma, se recalcula el número mínimo de medidores óptimos hasta que se cumpla con las condiciones del método LOM+COR.

- Paso N° 6: Se presentan los datos del vector $X_{LOM+COR}$ de emplazamiento óptimo de medidores de huecos de tensión en la red de interés.

⁷Detalles del algoritmo PEHT+MP en el capítulo 4.

Figura 5.6 – Estructura del algoritmo de localización óptima de medidores LOM+COR.

En la sección de Resultados del presente capítulo, se calcula y analiza la localización óptima de medidores de huecos de tensión de tres sistemas eléctricos mediante el algoritmo LOM+COR.

5.5. Resultados

Los métodos propuestos de localización óptima de medidores se han evaluado en tres redes eléctricas de 24, 118 y 357 nudos (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357) y los resultados obtenidos se describen en la presente sección. Detalles de las redes mencionadas pueden encontrarse en el apartado 3.4 de la página 77.

En el caso del método de localización óptima basado en el criterio de observabilidad LOM+OBS, la estructura de los casos de estudio se detalla en la tabla 5.7. Tal y como muestra dicha tabla, se plantea evaluar cuatro escenarios que incluyen dos umbrales de tensión residual para clasificar los eventos observados de huecos de tensión ($t < 0.9$ pu y $t < 0.7$ pu), además de considerar dos niveles de probabilidad de utilización del 100 % y 95 % del conjunto óptimo de medidores. Al finalizar estas pruebas, se realiza un proceso de validación para determinar si la solución obtenida permite observar todos los fallos ocurridos en el sistema.

Respecto al método LOM+COR, basado en el criterio del área de correlación de los medidores, se plantea evaluar la localización óptima de los medidores de huecos de tensión según dos umbrales de tensión ($t < 0.9$ pu y $t < 0.7$ pu) para los tres sistemas eléctricos planteados.

Tabla 5.7 – Descripción de los casos de estudio del método LOM+OBS.

Escenario	Umbral de tensión	Prob. de utilización
1	$t < 0.9$ pu	100 %
2		95 %
3	$t < 0.7$ pu	100 %
4		95 %

A continuación se describen los resultados obtenidos en cada método de localización óptima de medidores de huecos de tensión.

5.5.1. Evaluación del método LOM+OBS

En la tabla 5.8, se muestran los resultados de localización óptima de medidores basados en el criterio de observabilidad para la red IEEE-24. De la misma, se puede observar que todos los nudos de la red requieren ser monitorizados para garantizar el registro del 100 % de los fallos que originan huecos de tensión por debajo del umbral de tensión 0.9 pu. Es decir, debido al tamaño reducido de la red y la condición de observabilidad planteada, el conjunto óptimo de medidores es igual al total de nudos de la red IEEE-24.

Tabla 5.8 – Localización óptima de medidores de la red IEEE-24 para un umbral de tensión $t < 0.9$ pu con el método LOM+OBS.

Nº	Prob. de utilización	Localización óptima SARFI-90	
		Número de medidores	Emplazamiento
1	100 %	24	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
2	95 %	23	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24

Por otra parte, de plantear una probabilidad de utilización del 95 % del conjunto óptimo de medidores calculado para la red IEEE-24, en la tabla 5.8 se muestra que solo el medidor localizado en el nudo 7 deberá ser excluido del sistema de monitorización propuesto.

En el caso de los fallos que generan huecos profundos ($t < 0.7$ pu), la tendencia lógica es de que sea mayor el número de medidores óptimos requeridos respecto al caso de tensión residual por debajo de $t < 0.9$ pu. Esto se debe a la mayor área de alcance que tiene un fallo que provoca una caída de tensión de 0.9 pu respecto a una caída de tensión de 0.7 pu. Según lo indicado, en la tabla 5.9 se muestra que el número de medidores óptimos requeridos para detectar todos los fallos que generan

huecos profundos en la red IEEE-24 es igual al total de nudos del sistema. Para una probabilidad de utilización del 95 % del conjunto óptimo de medidores a largo plazo, el número de medidores requerido es de 23 unidades, excluyendo solo al medidor localizado en el nudo 16 del sistema óptimo de medidores.

Tabla 5.9 – Localización óptima de medidores de la red IEEE-24 para un umbral de tensión $t < 0.7$ pu con el método LOM+OBS.

Nº	Prob. de utilización	Localización óptima SARFI-70	
		Número de medidores	Emplazamiento
1	100 %	24	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
2	95 %	23	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24

Como se indica en la tabla 5.10, se requieren 106 medidores para registrar el 100 % de los fallos que generan huecos de tensión por debajo de 0.9 pu en la red IEEE-118. De forma análoga, se necesitan 99 medidores para garantizar un nivel de utilización del 95 % del conjunto óptimo de medidores a largo plazo. Si el conjunto óptimo de medidores es analizado para los fallos que causan huecos profundos ($t < 0.7$ pu), una probabilidad de utilización del 100 % y 95 % del sistema óptimo de medidores requeriría un número de 118 y 114 medidores, respectivamente. En el apartado D.1.1.1 del apéndice se describe la localización óptima de los medidores de la red IEEE-118.

Tabla 5.10 – Número óptimo de medidores según el método LOM+OBS.

	Umbral de tensión	Prob. de utilización	Red evaluada		
			IEEE-24	IEEE-118	EC-357
Número de medidores	t<0.9 pu	100 %	24	106	233
		95 %	23	99	144
	t<0.7 pu	100 %	24	118	272
		95 %	23	114	183

Al aplicar el método LOM+OBS en la red de 357 nudos (EC-357), se muestra en la tabla 5.10 que una probabilidad de utilización del 100 % y 95 % del conjunto óptimo de medidores para huecos con tensión residual por debajo a 0.9 pu requeriría un número de 233 y 144 medidores, respectivamente. Asimismo, para monitorizar los huecos profundos según este criterio de probabilidad de utilización del 100 % y 95 %, se requerirían de 272 y 183 medidores del sistema de monitorización propuesto, respectivamente. En el apartado D.1.1.3 del apéndice se detalla la localización óptima de los medidores de la red EC-357.

Con la ejecución del procedimiento de validación, en todos los casos se estima un nivel de detección igual o superior al 100 % y 97 % de los fallos que originan huecos para

una probabilidad de utilización del 100 % y 95 % del conjunto óptimo de medidores, respectivamente.

5.5.1.1. Evaluación del método LOM+OBS con otras metodologías de localización óptima de medidores de huecos

Al contrastar las respuestas de localización óptima de medidores en [Espinosa y otros, 2009] respecto a las obtenidas en el método propuesto (LOM+OBS), se observan diferencias muy significativas en el número de medidores requeridos para cumplir el criterio de observabilidad planteado. Para los fallos que generan huecos con tensión residual inferior a 0.9 pu, según lo indicado en [Espinosa y otros, 2009]⁸ se requeriría de 1 y 8 medidores para las redes IEEE-24 e IEEE-118, respectivamente, para cumplir con el criterio de observabilidad. En el caso del método LOM+OBS, para las condiciones anteriormente comentadas se requiere un número de 24 y 106 medidores para las redes IEEE-24 e IEEE-118, respectivamente.

Esta diferencia entre los métodos en el número óptimo de medidores se basa en la forma que es modelada la variable impedancia de fallo en el cálculo de las tensiones residuales de los cortocircuitos simulados. En el caso de [Espinosa y otros, 2009], la impedancia de fallo tiene un valor nulo en todos los fallos simulados, situación que, además de ser poco realista, causa un sobredimensionamiento de la severidad del posible hueco, provocando que el evento simulado sea detectado por gran parte de los nudos de la red estudiada. En el caso del método LOM+OBS, la generación estocástica de los fallos está asociado a una impedancia de fallo aleatoria, donde el rango de valores oscila entre 0 y 60 Ω . Debido a esta caracterización de la simulación de los fallos en la red, en [Espinosa y otros, 2009] se requeriría de un número de medidores mucho menor para satisfacer el mismo criterio de observabilidad. El efecto de la variable impedancia de fallo en la estimación de los huecos de tensión es estudiado con mayor detalle en el apartado de análisis de sensibilidad del capítulo 3 (página 67).

5.5.1.2. Observaciones del método LOM+OBS

En resumen, el algoritmo LOM+OBS se muestra como un método robusto, el cual brinda al usuario las siguientes ventajas:

- El método LOM+OBS se puede aplicar a cualquier tipo de sistema eléctrico.
- Por las características estocásticas del simulador de huecos del método LOM+OBS, se puede obtener una estimación realista de los posibles registros de huecos de tensión de una red a largo plazo.
- Como el modelo de optimización está formulado en base a un escenario realista de los posibles huecos de tensión de la red, se considera que la localización óptima de los medidores calculada es una respuesta fiable del criterio de observabilidad planteado.
- El algoritmo LOM+OBS permite estimar la probabilidad de utilización del conjunto óptimo de medidores a largo plazo. Con esta información se puede potenciar o excluir el uso de algún medidor de acuerdo a un criterio analítico.

⁸En el modelo de optimización se consideran todos los tipos de fallos.

5.5.2. Evaluación del método LOM+COR

A continuación se presentan diversos casos de estudio para evaluar el segundo método propuesto de localización óptima de medidores de huecos de tensión. Esto es, el método denominado LOM+COR, cuyo criterio de optimización se basa en el área de correlación⁹.

En la tabla 5.11, se muestran las respuestas de localización óptima de medidores de la red IEEE-24 según el método LOM+COR. Para monitorizar de forma optimizada los huecos con tensión residual inferior a 0.9 pu en esta red, los medidores deberán ser instalado en los nudos: 3, 5, 7, 8, 11, 13, 15, 20 y 22. Es decir, con los datos de estos 9 medidores (37.5 % del sistema) es posible determinar sin error el número de eventos SARFI-90 ($t < 0.9$ pu) de toda la red IEEE-24 a largo plazo. Es importante destacar que el concepto “largo plazo” hace referencia al hecho de que el emplazamiento óptimo determinado permite alcanzar la estimación ideal (sin error) en cualquier año del universo considerado (en este caso 5000 años).

Tabla 5.11 – Localización óptima de medidores de huecos de tensión de la red IEEE-24.

Nº	Umbral de tensión	Umbral del coeficiente de correlación	Número óptimo de medidores	Localización (nudos)
1	$t < 0.9$ pu	$R_{i,j} > 0.85$	9	3, 5, 7, 8, 11, 13, 15, 20, 22
2	$t < 0.7$ pu	$R_{i,j} > 0.85$	21	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24

Asimismo, si se plantea conocer la localización óptima de los medidores de la red IEEE-24 para los huecos de tensión profundos ($t < 0.7$ pu), se requeriría ubicar 21 medidores en esta red. Esto es, los nudos 2, 17 y 21 no requerirían tener medidores de huecos para garantizar la monitorización sin error del índice SARFI-70 a largo plazo en la red IEEE-24 (ver tabla 5.11).

En la Fig. 5.7, se muestra el área de correlación de los medidores seleccionados en la red IEEE-24. En la figura (a), se ilustra el área de correlación de los medidores para el índice SARFI-90. De forma análoga, en el literal (b) de la mencionada figura, se muestra el área de correlación de los medidores óptimos para el índice SARFI-70. De forma general, se observa que todos los nudos de la red IEEE-24 están dentro del área de correlación de al menos un medidor del conjunto óptimo calculado.

En el caso de una red de mayor tamaño, en la tabla 5.12 se muestran los datos de localización óptima de medidores de huecos de la red IEEE-118 según el método LOM+COR. En este caso, para garantizar la monitorización de los eventos SARFI-90 a largo plazo, se requeriría ubicar 12 medidores de huecos situados en los nudos: 23, 30, 42, 46, 59, 72, 75, 81, 86, 98, 102 y 110. Asimismo, para una monitorización precisa de los eventos SARFI-70, se requieren 15 medidores situados en los nudos: 1, 23, 30, 31, 41, 45, 54, 71, 72, 81, 86, 89, 97, 100 y 108 de la red IEEE-118. De forma general, con un 13 % de nudos de la red IEEE-118, se puede garantizar la adecuada estimación de los eventos SARFI-90 y SARFI-70 de todo el sistema en cualquier año de estudio, mediante la aplicación del método PEHT+MP descrito en el capítulo anterior.

⁹Detalles del criterio del área de correlación en el apartado 5.4.

Figura 5.7 – Localización óptima de medidores de huecos de tensión para la red IEEE-24 según el método LOM+COR.

Tabla 5.12 – Localización óptima de medidores de huecos de tensión de la red IEEE-118 según el método LOM+COR.

Nº	Umbral de tensión	Umbral del coeficiente de correlación	Número óptimo de medidores	Localización (nodos)
1	$t < 0.9$ pu	$R_{i,j} \geq 0.55$	12	23, 30, 42, 46, 59, 72, 75, 81, 86, 98, 102, 110
2	$t < 0.7$ pu	$R_{i,j} \geq 0.20$	15	1, 23, 30, 31, 41, 45, 54, 71, 72, 81, 86, 89, 97, 100, 108

Por el tamaño de la red IEEE-118, se observa que el umbral del coeficiente de correlación requerido en la localización óptima de medidores del método LOM+COR disminuye considerablemente respecto a la red IEEE-24. Esto es debido a que el objetivo del algoritmo de localización óptima de medidores LOM+COR es definir el número mínimo de medidores que cumpla las restricciones de la expresión (5.8), y, por las propiedades del programa de estimación PEHT+MP, no se requeriría de un número muy elevado de medidores para garantizar una estimación ideal de todo el sistema evaluado.

Esta característica del PEHT+MP de requerir los datos de un porcentaje relativamente pequeño de nudos en redes medianas y grandes para obtener estimaciones precisas de todo el sistema, provoca en el método LOM+COR la tendencia de disminuir el número óptimo de medidores para satisfacer el criterio del área de correlación. Por ello, el umbral del coeficiente de correlación $R_{i,j}$ tenderá a disminuir en sistemas de mayor tamaño.

En el caso de la localización óptima de medidores de la red ecuatoriana de 357 nudos (EC-357), se observa en la tabla 5.13 que el número requerido de medidores para monitorizar los eventos SARFI-90 y SARFI-70 es de solo 17 y 20 medidores, respectivamente. Es decir, colocando estratégicamente un medidor en menos del 6 % de los nudos de la red EC-357, se garantizaría a largo plazo la estimación ideal (sin error) de los índices SARFI-90 y SARFI-70 en toda la red EC-357.

Tabla 5.13 – Localización óptima de medidores de huecos de tensión de la red EC-357 según el método LOM+COR.

Nº	Umbral de tensión	Umbral del coeficiente de correlación	Número óptimo de medidores	Localización (nudos)
1	$t < 0.9$ pu	$R_{i,j} \geq 0.30$	17	13, 26, 55, 78, 90, 95, 119, 122, 129, 151, 178, 180, 196, 201, 262, 277, 352
2	$t < 0.7$ pu	$R_{i,j} \geq 0.30$	20	8, 21, 23, 26, 27, 40, 43, 46, 51, 60, 66, 70, 72, 80, 86, 89, 95, 100, 106, 110

Como tendencia general del método LOM+COR, se evidencia que el número óptimo de medidores requeridos tiende a aumentar cuando se incrementa el tamaño de la red. No obstante, se observa que la proporción de nudos con medidor respecto del número total de nudos de la red disminuye en redes de mayor tamaño. Por ejemplo, en el caso de la red IEEE-24, se requirió un 37.5 % del sistema para garantizar la monitorización a largo plazo del índice SARFI-90; en el caso de la red IEEE-118 un 10.2 % de nudos de dicha red; y, para la red EC-357, solamente un 4.8 % de nudos de este sistema. Para el índice SARFI-70, este efecto es análogo en las tres redes estudiadas.

5.5.3. Comparación de los métodos propuestos

En el presente capítulo se han propuesto dos métodos de localización óptima de medidores de huecos de tensión: uno basado en el criterio de observabilidad (LOM+OBS), y otro según el criterio del área de correlación (LOM+COR).

El método LOM+OBS representa una evolución y mejora de la técnica de localización óptima propuesta en [Olguin y otros, 2006; Espinosa y otros, 2009], y se basa en garantizar que cualquier fallo que origine algún hueco de tensión en el sistema va a ser registrado por al menos un medidor del conjunto óptimo calculado. De forma general, se considera que el método LOM+OBS tiene las siguientes características:

- Es adecuado para aplicar técnicas de estimación de huecos basadas en la utilización de medidas tales como las presentadas en [Wang y otros, 2005; Espinosa

y Hernández, 2007; Hernández y otros, 2013] que tienen como fundamento la detección de las faltas que originan los huecos.

- El criterio de observabilidad bajo un procedimiento estocástico realista a largo plazo, se presenta como una condición muy restrictiva para la localización óptima de medidores. Es decir, debido a la gran cantidad de escenarios posibles de registros de huecos de tensión que se van a generar en la red estudiada, el método propuesto requiere un número relativamente alto de medidores en dicho sistema.

El segundo método presentado, denominado LOM+COR, constituye un enfoque novedoso del problema de emplazamiento óptimo de medidores al introducir en el criterio de optimización el concepto del área de correlación. Esto es, el método LOM+COR presenta las siguientes particularidades:

- Es idóneo para ser aplicado en combinación con técnicas de estimación como la propuesta en el capítulo anterior, denominado PEHT+MP.
- Aprovechando las características del método PEHT+MP, se puede obtener un conjunto óptimo de medidores de dimensiones reducidas respecto al tamaño total de la red. No obstante, el método PEHT+MP es capaz de garantizar una estimación sin error del número de huecos en cualquier nudo sin monitorización del sistema a largo plazo (en cualquier año de estudio).

5.6. Conclusiones

En este capítulo se han propuesto dos métodos de emplazamiento óptimo de medidores de huecos de tensión.

El primero de ellos, denominado LOM+OBS, se basa en garantizar la observabilidad de cualquier falta que origine algún hueco de tensión en el sistema. Respecto a métodos anteriores como [Olguin y otros, 2006; Espinosa y otros, 2009] que presentan la misma estrategia, se proponen las siguientes ventajas:

- La inclusión del efecto de la impedancia de fallo que tiene una marcada influencia en la caracterización de la severidad del hueco, y, por ende, en la localización óptima de los medidores de una red.
- Considerar el efecto de aleatoriedad en las variables que caracterizan los registros de huecos de tensión de la red de interés. Esta característica del método LOM+OBS le otorga realismo y fiabilidad al conjunto óptimo de medidores calculado a largo plazo.

En el caso del método LOM+COR, se propone un nuevo criterio de optimización para definir la localización óptima de los medidores de huecos. Este criterio se basa en el área de correlación de los nudos del sistema donde van a estar ubicados los medidores. De forma resumida, sus principales aportaciones incluyen:

- Se obtiene como resultado un número muy reducido de medidores para verificar los criterios requeridos en el LOM+COR.

- Ese reducido número de medidores garantiza que a partir de las medidas de huecos registradas, y en combinación con el método PEHT+MP, se pueda estimar sin error el valor de los índices de huecos (SARFI-90 o SARFI-70) en el resto de nudos sin monitorización de la red estudiada.
- El número de medidores requerido respecto del número total de nudos de la red se reduce al estudiar redes de mayor tamaño (en este caso, IEEE-118 y EC-357).
- El método LOM+COR se puede aplicar a la localización óptima de medidores de otros índices de severidad de huecos de tensión. Por ejemplo: otros niveles de tensión SARFI-X, SARFI-Curve, SEI, etc.

De forma general, los métodos propuestos de localización óptima de medidores de huecos de tensión fueron evaluados en tres sistemas eléctricos de potencia, del que se confirma la aplicabilidad y versatilidad en su uso.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

En la presente tesis se han desarrollado un conjunto de métodos que permiten profundizar en la comprensión, estimación y monitorización óptima de los huecos de tensión en los sistema eléctricos.

En particular, las principales aportaciones realizadas se han centrado en los siguientes objetivos:

- La predicción de la severidad de los huecos de tensión cuando no se tienen medidas previas en el sistema eléctrico.
- Realizar un estudio causa-efecto de las variables que caracterizan los registros de huecos de tensión en una red a largo plazo.
- A partir de los datos de una red parcialmente monitorizada, utilizar esta información para estimar la severidad de huecos de tensión de todo el sistema.
- Definir un método o estrategia para localizar de forma óptima al sistema de monitorización de huecos de tensión de una red genérica.

En el primero de estos ámbitos, tratado en el capítulo 3 de “Predicción de huecos de tensión en ausencia de medidas y estudio de sensibilidad”, se ha implementado un método estocástico de estimación de huecos de tensión denominado PEHT, que permite representar con mayor realismo la simulación de los eventos de huecos de un sistema a largo plazo. Esta primera propuesta de la tesis es considerada como un paso clave para el desarrollo de futuros métodos del presente trabajo, ya que permite emular de forma fiable los registros de huecos de tensión a largo plazo en una red genérica. Entre las características más relevantes del PEHT se tienen:

- Considerar el efecto combinado de cinco variables aleatorias de entrada para simular los eventos de huecos de tensión en una pseudo-monitorización a largo plazo. Las variables de entrada modeladas en la caracterización de los huecos de tensión en el PEHT son: (i) coeficiente de fallo, (ii) impedancia de fallo, (iii) tipo de fallo, (iv) localización del fallo y (v) duración.

- Se desarrolla el modelado estocástico de las variables de entrada impedancia de fallo y duración en la caracterización de los eventos de huecos de tensión. Para la parametrización de las variables mencionadas, se realizó un estudio bibliográfico detallado de los valores adoptados por las mismas según diversos autores. Asimismo, se define la función estadística que mejor representa la naturaleza aleatoria de cada variable.
- Considerar como variables de salida del PEHT a indicadores de severidad de huecos de uso común en las normativas, como es el caso de los índices: SARFI-X, SARFI-Curve, etc.

Adicionalmente, en el mencionado capítulo 3, se presenta un análisis de sensibilidad de las variables de entrada de mayor divergencia en su parametrización entre las referencias relacionadas con la estimación de los huecos de tensión en redes eléctricas. De forma específica, se profundiza en el estudio de la influencia de la parametrización de las variables coeficiente de fallo e impedancia de fallo en la predicción de los huecos de tensión. En base a las pruebas realizadas en las tres redes analizadas (IEEE-24, IEEE-118 y EC-357), las conclusiones más relevantes son las siguientes:

- La precisión de la variable de entrada coeficiente de fallo se muestra como un parámetro no influyente en la estimación del número de huecos de tensión (SARFI-90 y SARFI-70) a largo plazo. Es decir, no se requiere de una alta precisión del dato tasa de fallo de los elementos del sistema para obtener una adecuada estimación de los huecos de tensión en el largo plazo.
- La parametrización de la variable impedancia de fallo se muestra como un factor muy sensible en la estimación de la severidad de los huecos de tensión. Por ejemplo, al aumentar el valor medio de esta variable aleatoria, se disminuye considerablemente la severidad estimada de los huecos en la red. Por otra parte, al evaluar el parámetro desviación típica de la impedancia de fallo, se observa una relación directamente proporcional de este parámetro con la severidad de los huecos de tensión de la red. Esto es, al aumentar la desviación típica de la impedancia de fallo, se evidencia un aumento de la media y de la variación interanual de los índices SARFI-90 y SARFI-70.

De acuerdo con el análisis de sensibilidad desarrollado en la variable impedancia de fallo, se considera muy cuestionable la fiabilidad de los métodos de estimación de huecos de tensión que omiten su efecto en el modelo planteado.

En el capítulo 4, denominado “Estimación de huecos de tensión a partir de un conjunto limitado de mediciones”, se ha desarrollado un método que parte de los registros de una red parcialmente monitorizada para determinar la severidad de los huecos de la zona sin monitorización del sistema eléctrico. El método implementado (PEHT+MP) posee las siguientes características:

- El proceso de estimación de los huecos de tensión de la zona no monitorizada de la red se fundamenta en la aplicación del teorema de probabilidad condicional de Bayes. Es decir, tomando como punto de partida los datos observados (los registros de los nudos monitorizados), el PEHT+MP calcula de forma probabilística la severidad de los huecos de los nudos sin monitorización del sistema.

- Las predicciones de medidas de huecos de tensión del PEHT+MP se sustentan en la propiedad de correlación de los huecos de tensión en diversas zonas de un sistema eléctrico.
- Con los datos de un conjunto de medidores relativamente pequeño del sistema, es posible obtener estimaciones precisas (error nulo) de la severidad de los huecos de la zona sin monitorizar en las tres redes estudiadas.
- El PEHT+MP se podría aplicar a diversos tipos de indicadores de severidad de los huecos de tensión, como es el caso de los índices: SARFI-X, SARFI-Curve, SEI, etc. En los casos de estudio planteados, se ha aplicado a la estimación de los índices SARFI-90 y SARFI-70.

A continuación, en el capítulo 5 de “Localización óptima de medidores de huecos de tensión”, se han planteado dos métodos para ubicar de forma estratégica los medidores de huecos de tensión en una red genérica. La primera propuesta incluye mejoras a los métodos presentados hasta ahora en la bibliografía basados en garantizar que, ante la presencia de cualquier falta que origina huecos en varios nudos del sistema, al menos uno de dichos nudos dispone de medidor. Este método, que toma como criterio la observabilidad de los eventos que originan los huecos, se ha denominado LOM+OBS.

Además, se ha realizado una segunda propuesta para el emplazamiento de medidores, basada en el criterio del área de correlación (LOM+COR). El emplazamiento determinado mediante este método es tal que permite estimar de forma precisa los índices de huecos de tensión en todo el sistema eléctrico a partir de las medidas registradas, mediante la aplicación del método PEHT+MP descrito en el capítulo 3. A partir del desarrollo de los casos de estudio de los citados métodos de localización óptima de medidores, se describen a continuación las conclusiones más relevantes.

En el caso del método LOM+OBS, basado en el criterio de observabilidad, se evidenciaron las siguientes propiedades en los casos de estudio realizados:

- Al aumentar el tamaño de la red, se observa la tendencia de disminuir el porcentaje de nudos que requieren monitorización en dicho sistema para cumplir con el criterio requerido. Por ejemplo, en la red IEEE-24, se requiere monitorizar el 100 % de los nudos del sistema. En el caso de las redes IEEE-118 y EC-357, el método LOM+OBS determina que con la monitorización de un 89.5 % y 65.3 % del sistema, respectivamente, se cumpliría con el criterio de observabilidad del método.
- El método LOM+OBS permite calcular la probabilidad de utilización (100 %, 95 %, etc.) del conjunto óptimo de medidores requerido a largo plazo, estableciendo así un criterio de la relevancia que tiene cada medidor en la monitorización del sistema.

En el caso del método de localización óptima de medidores basado en el criterio del área de correlación (LOM+COR), las diversas pruebas realizadas permitieron alcanzar las siguientes conclusiones:

- El procedimiento del método LOM+COR combina los métodos de estimación de huecos de tensión de capítulos anteriores (PEHT y PEHT+MP) con técnicas de optimización lineal para definir la localización óptima de los medidores de huecos de tensión en una red genérica.

- El método LOM+COR requiere un porcentaje relativamente reducido de nudos del sistema para cumplir con las condiciones de optimización establecidas en el criterio del área de correlación. Por ejemplo, en el caso de la obtención del emplazamiento óptimo para la estimación del índice SARFI-90 de las redes IEEE-24, IEEE-118 y EC-357, se calculó un conjunto óptimo de 9, 12 y 17 medidores de huecos, respectivamente. Es decir, solamente se requeriría monitorizar el 38 %, 10 % y 5 % de los sistemas indicados para estimar sin error los eventos SARFI-90 en toda la red.
- El método LOM+COR se muestra como un procedimiento de optimización versátil, el cual permite reducir el número de medidores de huecos necesarios para la monitorización de esta perturbación en todo el sistema eléctrico. Por ello, este nuevo método de optimización de medidores sería aplicable a operadores de redes que busquen disminuir los costes de instalación y operación del sistema de monitorización de los huecos de tensión.

De forma general, los métodos propuestos en la presente tesis son herramientas que permiten al lector profundizar en el análisis y supervisión de los huecos de tensión en los sistemas eléctricos. Para su evaluación, se desarrollaron múltiples pruebas en tres sistemas eléctricos, esto es, las redes de prueba IEEE-24 e IEEE-118, y la red de transporte de la República del Ecuador.

6.2. Trabajos futuros

Los métodos planteados en el presente trabajo han dado lugar a una serie de líneas de trabajo en las que será muy interesante continuar investigando en futuros desarrollos:

- La primera de ellas es el contraste y validación de los métodos planteados con registros reales de huecos de tensión, especialmente, en lo que se refiere al método propuesto en el capítulo 4, de estimación de índices de huecos en nudos no monitorizados a partir de los datos medidos en un sistema eléctrico. Como se indicó anteriormente, en la actualidad resulta complejo disponer de datos reales de huecos de tensión en regiones extensas como un país, comunidad, etc. No obstante, realizar un procedimiento de validación con medidas reales de los diversos métodos propuestos permitiría ajustar y reafirmar su aplicabilidad en condiciones reales en la planificación y control de calidad de suministro de tensión en los sistemas eléctricos.
- Otra línea de trabajo que se plantea a futuro es extender la implementación de los métodos de estimación y monitorización óptima de huecos de tensión a redes de media y baja tensión. La parametrización de las variables de entrada de los modelos planteados deberán ser reajustados a las características intrínsecas de las redes de media y baja tensión. Asimismo, por el incremento del tamaño de este tipo de redes, la programación requeriría de paquetes informáticos más avanzados para su implementación.
- Otro aspecto en el que se puede trabajar a futuro es el desarrollo e implementación de un algoritmo para la localización óptima de compensadores estáticos (*StatCom*) en sistemas eléctricos. Tomando como base los métodos planteados

de estimación de huecos de tensión, desarrollar un método que sirva como un simulador de proyectos de mitigación de huecos en una red genérica.

Bibliografía

- ADÈR, MELLENBERGH; ADÈR, HERMAN J; MELLENBERGH, GJ y otros: *Advising on research methods: A consultant's companion*. Johannes van Kessel Publishing., 2008.
- ALSTOM, GEC: «Protective Relays Application Guide (Blue Book)», 1995.
- AUNG, MYO THU y MILANOVIC, J.V.: «Stochastic prediction of voltage sags by considering the probability of the failure of the protection system». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2006, **21(1)**, pp. 322 – 329. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2005.852385.
- BAGGINI, ANGELO B y otros: *Handbook of power quality*. volumen 520. Wiley Online Library, 2008.
- BARSS, RUSS: «When Voltage Sags, Productivity Lags». *Informe técnico AP.37H.40A.T.E.*, Cutler-Hammer, 2001.
- BEAULIEU, GERMAIN; BOLLEN, MHJ; MALGAROTTI, S y BALL, R: «Power quality indices and objectives. Ongoing activities in CIGRE WG 36-07». En: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, volumen 2, pp. 789–794. IEEE, 2002.
- BOE-5269: «Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión», 2008. Cap. 6, Art. 26..
- BOLLEN, MATH; MCMICHAEL, IAN; STEPHENS, MARK; STOCKMAN, KURT; DJOKIC, S; ZAVODA, FRANCISC; BRUMSICKLE, BILL; MCEACHERN, ALEX; ROMERO GORDON, J; ETHIER, GAETAN y otros: «CIGRE/CIREN/UIE JWG C4. 110-voltage dip immunity of equipment in installations-status April 2008». En: *Harmonics and Quality of Power, 2008. ICHQP 2008. 13th International Conference on*, pp. 1–8. IEEE, 2008.
- BOLLEN, M.H.J.: «Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags». *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, 1998a, **145(1)**, pp. 70–76. ISSN 1350-2360. doi: 10.1049/ip-gtd:19981739.
- BOLLEN, MHJ: «Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags». En: *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, volumen 145, pp. 70–76. IET, 1998b.

- BOLLEN, M.H.J.: «Additions to the method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags». En: *Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE*, volumen 2, pp. 1241–1246 vol.2, 1999. doi: 10.1109/PESW.1999.747391.
- : *Understanding power quality problems*. IEEE press New York, 2000.
- BOLLEN, M.H.J.; SABIN, D.D. y THALLAM, R.S.: «Voltage-sag indices - recent developments in IEEE PI564 task force». En: *Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 2003. CIGRE/PES 2003. CIGRE/IEEE PES International Symposium*, pp. 34 – 41, 2003. doi: 10.1109/QSEPDS.2003.1259321.
- BROOKS, DANIEL L; DUGAN, ROGER C; WACLAWIAK, MAREK y SUNDARAM, ASHOK: «Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1998, **13**(1), pp. 254–259.
- C WARRINGTON, AR: «Application of the ohm and mho principles to protective relays». *Electrical Engineering*, 1946, **65**(6), pp. 378–385.
- CÁNOVAS, M^A JOSEFA CÁNOVAS; NAVARRO, VÍCTOR HUERTAS y ORTS, MARÍA SEMPERE: *Optimización matemática aplicada. Enunciados, ejercicios y aplicaciones del mundo real con MATLAB: Enunciados, ejercicios y aplicaciones del mundo real con matlab*. Editorial Club Universitario, 2011.
- CASTILLO, ENRIQUE; CONEJO, ANTONIO J; PEDREGAL, PABLO; GARCIA, RICARDO y ALGUACIL, NATALIA: «Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.», 2002.
- CHAMORRO, A.: *Protecciones de distancia: guía de aplicación*, 2005.
- CHAN, JY y MILANOVIC, JV: «Severity indices for assessment of equipment sensitivity to voltage sags and short interruptions». En: *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1–7. IEEE, 2007.
- CHRISTIE, R.: «Power Flow Test Cases, 118 Bus Power Flow Test Case», 1993.
- DAVENPORT, F. W. T.: «Voltage Dips and Short Interruptions in Medium Voltage Public Electricity Supply Systems». *Informe técnico*, UNIDEPE/DISDIP, 1990.
- DAVISON, ANTHONY CHRISTOPHER y HINKLEY, DAVID VICTOR: *Bootstrap methods and their application*. volumen 1. Cambridge university press, 1997.
- EFRON, BRADLEY: «Better bootstrap confidence intervals». *Journal of the American statistical Association*, 1987, **82**(397), pp. 171–185.
- EFRON, BRADLEY y TIBSHIRANI, ROBERT J: *An introduction to the bootstrap*. CRC press, 1994.
- EPRI: «Reliability Benchmarking Methodology (TR-107938)». *Informe técnico*, 1997.
- : «Reliability Benchmarking Application Guide For Utility/Customer PQ Indices», 1999.
- ESCOM: «NRS 048-2, Electricity Supply - Quality of Supply Standards; Part 2: Minimum Standards», 1996.

- ESPINOSA, E. y HERNÁNDEZ, A.: «An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2006, **21(3)**, pp. 1493–1500. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2005.860266.
- : «A Method for Voltage Sag State Estimation in Power Systems». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2007, **22(4)**, pp. 2517–2526. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2007.905587.
- ESPINOSA, E.; HERNANDEZ, A. y OLGUIN, G.: «An Approach Based on Analytical Expressions for Optimal Location of Voltage Sags Monitors». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2009, **24(4)**, pp. 2034–2042. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2028777.
- EVANS, JAMES D: *Straightforward statistics for the behavioral sciences*. Brooks/Cole, 1996.
- FARIED, S.O.; BILLINTON, R. y ABORESHAID, S.: «Stochastic evaluation of voltage sag and unbalance in transmission systems». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2005, **20(4)**, pp. 2631–2637. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2005.855438.
- GILKESON, C. L.; JEANNE, P. A. y VAAGE, E. F.: «Power System Faults to Ground Part II: Fault Resistance». *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, 1937, **56(4)**, pp. 428–474. ISSN 0096-3860. doi: 10.1109/T-AIEE.1937.5057568.
- GOSWAMI, A.K.; GUPTA, C. P. y SINGH, G.K.: «Voltage Sag Assessment in a Large Chemical Industry». *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2012, **48(5)**, pp. 1739–1746. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/TIA.2012.2209854.
- GRAINGER, J.J. y STEVENSON, W.D.: *Power systems analysis*. McGraw-Hill, 1994.
- GRIGG, C.; WONG, P.; ALBRECHT, P.; ALLAN, R.; BHAVARAJU, M.; BILLINTON, R.; CHEN, Q.; FONG, C.; HADDAD, S.; KURUGANTY, S.; LI, W.; MUKERJI, R.; PATTON, D.; RAU, N.; REPPEN, D.; SCHNEIDER, A; SHAHIDEHPOUR, M. y SINGH, C.: «The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee». *Power Systems, IEEE Transactions on*, 1999, **14(3)**, pp. 1010–1020. ISSN 0885-8950. doi: 10.1109/59.780914.
- HERNÁNDEZ, A.; ESPINOSA-JUAREZ, E.; DE CASTRO, R.M. y IZZEDDINE, M.: «SVD Applied to Voltage Sag State Estimation». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2013, **28(2)**, pp. 866–874. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2012.2218627.
- IEC 61000-2-8: «IEC 61000-2-8. Electromagnetic Compatibility». *Informe técnico*, 2002.
- IEC 61000-4-11: «Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and Measurement Techniques, Section 11: Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests, Std». *Informe técnico*, IEC 61000-4-11, 1994.
- IEC 61000-4-30: «Testing and measurement techniques—Power quality measurement methods». *International Electrotechnical Commission Standard*, 2003.

- IEEE STD. 1159: «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality». (*Revision of IEEE Std 1159-1995*), 2009, pp. c1 –81. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067.
- IEEE STD 1346: «IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment». *IEEE Std 1346-1998*, 1998. doi: 10.1109/IEEESTD.1998.87816.
- IEEE STD. 1668: «IEEE Trial-Use Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V», 2014, pp. 1–92. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6895236.
- IEEE STD 446: «IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications». *IEEE Std 446-1995 [The Orange Book]*, 1996, pp. 1–320. doi: 10.1109/IEEESTD.1996.85950.
- IEEE STD C37.48.1: «IEEE Guide for the Application, Operation, and Coordination of High-Voltage Current-Limiting Fuses». (*Revision of IEEE Std C37.48.1-2011*), 2012, pp. 1–87. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6178752.
- ITIC: «Information Technology Industry Council», 1998.
<http://www.itic.org>
- KEY, THOMAS S: «Diagnosing power quality-related computer problems». *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1979, (4), pp. 381–393.
- KJOLLE, GH; GJERDE, O; HJARTSJO, BT; ENGEN, H; HAARLA, L; KOIVISTO, L y LINDBLAD, P: «Protection System Faults—a Comparative Review of Fault Statistics». En: *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on*, pp. 1–7. IEEE, 2006.
- LI, YAN; WEN, JINYU; XIONG, YINYIN y YIN, XIANGGEN: «Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags in a meshed distribution system». En: *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, volumen 3, pp. 953–956 vol. 2, 2004.
- LIM, YS y STRBAC, G: «Analytical approach to probabilistic prediction of voltage sags on transmission networks». *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2002, **149**(1), pp. 7–14.
- MARTÍNEZ, JUAN A y MARTÍN-ARNEDO, JACINTO: «Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, **19**(4), pp. 1975–1982.
- MILANOVIC, JOVICA V; AUNG, MYO THU y GUPTA, CP: «The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2005, **20**(1), pp. 278–285.
- MOORE, DAVID S: *Estadística aplicada básica*. Antoni Bosch editor, 2005.
- MOSCHAKIS, MN y HATZIARGYRIOU: «Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2006, **21**(3), pp. 1727–1734.

- NAIDU, SR; DE ANDRADE, GILVAN V y DA COSTA, EDSON G: «Voltage sag performance of a distribution system and its improvement». *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2012, **48**(1), pp. 218–224.
- NAIDU, S.R.; DE ANDRADE, G.V. y DA COSTA, E.G.: «Voltage sag performance of a distribution system and its improvement». En: *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE*, pp. 1–7. ISSN 0197-2618, 2011. doi: 10.1109/IAS.2011.6074409.
- NAVIDI, WILLIAM CYRUS: *Statistics for engineers and scientists*. McGraw-Hill Higher Education, 2008.
- OLGUIN, G: *Voltage dip (sag) estimation in power systems based on stochastic assessment an optimal monitoring*. Tesis doctoral, Chalmers University of Technology, Sweden, 2005.
- OLGUIN, G.; AEDO, M.; ARIAS, M. y ORTIZ, A.: «A Monte Carlo Simulation Approach to the Method of Fault Positions for Stochastic Assessment of Voltage Dips (Sags)». En: *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, pp. 1 –6, 2005. doi: 10.1109/TDC.2005.1546794.
- OLGUIN, G. y BOLLEN, M.H.J.: «Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system». En: *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, volumen 4, pp. –2490 Vol. 4, 2003a. doi: 10.1109/PES.2003.1271033.
- : «Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in large transmission systems». En: *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, volumen 4, p. 8 pp. Vol.4, 2003b. doi: 10.1109/PTC.2003.1304795.
- OLGUIN, G.; VUINOVICH, F. y BOLLEN, M.H.J.: «An optimal monitoring program for obtaining Voltage sag system indexes». *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2006, **21**(1), pp. 378–384. ISSN 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.2005.857837.
- OLIVEIRA, T.C.; DE CARVALHO FILHO, J.M.; LEBORGNE, R.C. y BOLLEN, M.H.J.: «Voltage Sags: Validating Short-Term Monitoring by Using Long-Term Stochastic Simulation». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2009, **24**(3), pp. 1344–1351. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2021029.
- PEÑA, DANIEL: *Fundamentos de estadística*. Alianza editorial, 2001.
- : *Regresión y diseño de experimentos*, 2002.
- POLYCARPOU, ROMERO: *Power Quality and Voltage Sag Indices in Electrical Power Systems, Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances*. InTech, 2011.
- QADER, M.R.; BOLLEN, M.H.J. y ALLAN, R.N.: «Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system». *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1999, **35**(1), pp. 152 –162. ISSN 0093-9994. doi: 10.1109/28.740859.
- SCHWEITZER, EDMUND O; FLEMING, BILL; LEE, TONY J y ANDERSON, PAUL M: «Reliability analysis of transmission protection using fault tree methods». En: *Proceedings of the 24th Annual Western Protective Relay Conference*, pp. 1–17, 1997.

- SPP: *Power Flow Model Development Procedure Manual*. SPP Model Development Working Group, 2004.
- STANDARD, SEMI: «F47-0200: Specification for semiconductor processing equipment voltage sag immunity». *Semiconductor Equipment Materials International, San Jose, CA*, 2000.
- SUBCOMMITTEE: «IEEE Reliability Test System RTS-24». *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1979, **PAS-98(6)**, pp. 2047–2054. ISSN 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1979.319398.
- USHAKOV, IGOR A.: *Probabilistic Reliability Models*. Wiley, 2012.
- WALPOLE, RONALD E; MYERS, RAYMOND H; MYERS, SHARON L y YE, KEYING: *Probability and statistics for engineers and scientists*. volumen 5. Macmillan New York, 1993.
- WANG, BIN; XU, WILSON y PAN, ZHENCUN: «Voltage sag state estimation for power distribution systems». *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2005, **20(2)**, pp. 806–812. ISSN 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.2005.846174.
- XIANGNING, XIAO; SHUN, TAO; TIANSHU, BI y YONGHAI, XU: «Study on Distribution Reliability Considering Voltage Sags and Acceptable Indices». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2007, **22(2)**, pp. 1003–1008. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2006.886770.
- ZAMBRANO, XAVIER; HERNÁNDEZ, ARACELI; DE CASTRO, ROSA y IZZEDDINE, MOHAMED: «Comparison of voltage sags prediction methods in power networks». En: *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*, pp. 89–94, 2015a. doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165439.
- ZAMBRANO, XAVIER; HERNÁNDEZ, ARACELI; IZZEDDINE, MOHAMED y DE CASTRO, ROSA: «Analysis of the Secondary Protection Effect on Voltage Sags Severity». *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 2015b, **4**, pp. 1–14. doi: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7546>.

Apéndice

Apéndice A

APÉNDICE DEL CAPÍTULO 2

A.1. Ecuaciones para el análisis de cortocircuitos

Falta 1 ϕ

$$I_p^{012} = \begin{bmatrix} \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \\ \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \\ \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \end{bmatrix} \quad V_m^{012} = \begin{bmatrix} -\frac{Z_{mp}^0 \cdot V_p^{pf}}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \\ V_m^{pf} - \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \\ -\frac{Z_{mp}^2 \cdot V_p^{pf}}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \end{bmatrix}$$

Falta 2 ϕ

$$I_p^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + Z_f} \\ -\frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + Z_f} \end{bmatrix} \quad V_m^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_m^{pf} - \frac{Z_{mp}^1 \cdot V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + Z_f} \\ \frac{Z_{mp}^2 \cdot V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + Z_f} \end{bmatrix}$$

Falta 2 ϕ -T

$$\alpha = \frac{(Z_{pp}^0 + 3Z_f) \cdot Z_{pp}^2}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^2 + 3Z_f}$$

$$I_p^{012} = \begin{bmatrix} -I_p^1 \cdot \frac{Z_{pp}^2}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \\ \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + \alpha} \\ -I_p^1 \cdot \frac{Z_{pp}^0 + 3Z_f}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \end{bmatrix} \quad V_m^{012} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{mp}^0 \cdot Z_{pp}^2 \cdot V_p^{pf}}{(Z_{pp}^1 + \alpha) \cdot (Z_{pp}^0 + Z_{pp}^2 + 3Z_f)} \\ V_m^{pf} - \frac{Z_{mp}^1 \cdot V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + \alpha} \\ \frac{Z_{mp}^2 \cdot (Z_{pp}^0 + 3Z_f) \cdot V_p^{pf}}{(Z_{pp}^1 + \alpha) \cdot (Z_{pp}^0 + Z_{pp}^2 + 3Z_f)} \end{bmatrix}$$

Falta 3 ϕ

$$I_p^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + Z_f} \\ 0 \end{bmatrix} \quad V_m^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_m^{pf} - \frac{Z_{mp}^1 \cdot V_p^{pf}}{Z_{pp}^1 + Z_f} \\ 0 \end{bmatrix}$$

(A.1)

Figura A.1 – Circuito esquemático

A.2. Datos de las redes de prueba

A.2.1. Red IEEE-24

A.2.1.1. Datos de nudos

Número	Identi.	Nombre	Tensión nominal	Tipo de nudo	GL	BL	Area	Zona	Magnitud V	Fase V	Dueño
1	1	Abel	138	2	0	0	11	11	1	0	1
2	2	Adams	138	2	0	0	11	12	1	0	1
3	3	Adler	138	1	0	0	11	11	1	0	1
4	4	Agricola	138	1	0	0	11	11	1	0	1
5	5	Aiken	138	1	0	0	11	11	1	0	1
6	6	Alber	138	1	0	0	11	12	1	0	1
7	7	Alder	138	2	0	0	11	12	1	0	1
8	8	Alger	138	1	0	0	11	12	1	0	1
9	9	Ali	138	1	0	0	11	13	1	0	1
10	10	Allen	138	1	0	0	11	13	1	0	1
11	11	Anna	230	1	0	0	11	13	1	0	1
12	12	Archer	230	1	0	0	11	13	1	0	1
13	13	Arne	230	3	0	0	12	14	1	0	1
14	14	Arnold	230	2	0	0	12	16	1	0	1
15	15	Arthur	230	2	0	0	12	16	1	0	1
16	16	Asser	230	2	0	0	12	16	1	0	1
17	17	Aston	230	1	0	0	12	17	1	0	1
18	18	Astor	230	2	0	0	12	17	1	0	1
19	19	Attar	230	1	0	0	12	15	1	0	1
20	20	Attila	230	1	0	0	12	15	1	0	1
21	21	Attlee	230	2	0	0	12	17	1	0	1
22	22	Aubrey	230	2	0	0	12	17	1	0	1
23	23	Austen	230	2	0	0	12	15	1	0	1
24	24	Avery	230	1	0	0	12	16	1	0	1

A.2.1.2. Datos de generadores

Secuencia directa e inversa:

Número	Nodo	PG	QG	QT	QB	VS	Mbase	ZR	ZX	Serv.	Max PG	Min PG
1	1	172.0	28.20	999	-999	1	100	0	0.192064	1	999	-999
2	2	172.0	14.00	999	-999	1	100	0	0.192064	1	999	-999
3	7	240.0	51.60	999	-999	1	100	0	0.127133	1	999	-999
4	13	285.3	122.10	999	-999	1	100	0	0.064666	1	999	-999
5	15	215.0	0.05	999	-999	1	100	0	0.172787	1	999	-999
6	16	155.0	25.22	999	-999	1	100	0	0.236300	1	999	-999
7	18	400.0	137.40	999	-999	1	100	0	0.116800	1	999	-999
8	21	400.0	108.20	999	-999	1	100	0	0.116800	1	999	-999
9	22	300.0	-29.76	999	-999	1	100	0	0.119500	1	999	-999
10	23	660.0	135.36	999	-999	1	100	0	0.055425	1	999	-999

Secuencia homopolar:

Número	Identi.	Nombre	R0	X0
1	1	'1 '	0	0.06402133
2	2	'1 '	0	0.06402133
3	7	'1 '	0	0.04237767
4	13	'1 '	0	0.02155533
5	15	'1 '	0	0.05759567
6	16	'1 '	0	0.07876667
7	18	'1 '	0	0.03893333
8	21	'1 '	0	0.03893333
9	22	'1 '	0	0.03983333
10	23	'1 '	0	0.018475

A.2.1.3. Datos de líneas

Secuencia directa e inversa:

Número	Nodo inicio	Nodo fin	Nombre	R	X	B	MVA a	MVA b	MVA c	GI	BI	GJ	BJ	Serv.	Long. Línea
1	1	2	A1	0.003	0.014	0.461	175	193	200	0	0	0	0	1	3
2	1	3	A2	0.055	0.211	0.057	175	208	220	0	0	0	0	1	55
3	1	5	A3	0.022	0.085	0.023	175	208	220	0	0	0	0	1	22
4	2	4	A4	0.033	0.127	0.034	175	208	220	0	0	0	0	1	33
5	2	6	A5	0.05	0.192	0.052	175	208	220	0	0	0	0	1	50
6	3	9	A6	0.031	0.119	0.032	175	208	220	0	0	0	0	1	31
7	4	9	A8	0.027	0.104	0.028	175	208	220	0	0	0	0	1	27
8	5	10	A9	0.023	0.088	0.024	175	208	220	0	0	0	0	1	23
9	6	10	A10	0.014	0	2.459	175	193	200	0	0	0	0	1	16
10	7	8	A11	0.016	0.061	0.017	175	208	220	0	0	0	0	1	16
11	8	9	A12-1	0.043	0.165	0.045	175	208	220	0	0	0	0	1	43
12	8	10	A13-2	0.043	0.165	0.045	175	208	220	0	0	0	0	1	43
13	11	13	A18	0.006	0.048	0.1	500	600	625	0	0	0	0	1	33
14	11	14	A19	0.005	0.042	0.088	500	600	625	0	0	0	0	1	29
15	12	13	A20	0.006	0.048	0.1	500	600	625	0	0	0	0	1	33
16	12	23	A21	0.012	0.097	0.203	500	600	625	0	0	0	0	1	67
17	13	23	A22	0.011	0.087	0.182	500	600	625	0	0	0	0	1	60
18	14	16	A23	0.005	0.059	0.082	500	600	625	0	0	0	0	1	27
19	15	16	A24	0.002	0.017	0.036	500	600	625	0	0	0	0	1	12
20	15	21	A25-1	0.006	0.049	0.103	500	600	625	0	0	0	0	1	34
21	15	21	A25-2	0.006	0.049	0.103	500	600	625	0	0	0	0	1	34
22	15	24	A26	0.007	0.052	0.109	500	600	625	0	0	0	0	1	36
23	16	17	A27	0.003	0.026	0.055	500	600	625	0	0	0	0	1	18
24	16	19	A28	0.003	0.023	0.049	500	600	625	0	0	0	0	1	16
25	17	18	A29	0.002	0.014	0.03	500	600	625	0	0	0	0	1	10
26	17	22	A30	0.014	0.105	0.221	500	600	625	0	0	0	0	1	73
27	18	21	A31-1	0.003	0.026	0.055	500	600	625	0	0	0	0	1	18
28	18	21	A31-2	0.003	0.026	0.055	500	600	625	0	0	0	0	1	18
29	19	20	A32-1	0.005	0.04	0.083	500	600	625	0	0	0	0	1	27.5
30	19	20	A32-2	0.005	0.04	0.083	500	600	625	0	0	0	0	1	27.5
31	20	23	A33-1	0.003	0.022	0.046	500	600	625	0	0	0	0	1	15
32	20	23	A33-2	0.003	0.022	0.046	500	600	625	0	0	0	0	1	15
33	21	22	A34	0.009	0.068	0.142	500	600	625	0	0	0	0	1	47

Secuencia homopolar:

Número	Inicio	Fin	Nombre	R0	X0	B0	Gi	Bi	Gj	Bj
1	1	2	A1	0.009	0.042	0.1536667	0	0	0	0
2	1	3	A2	0.165	0.633	0.019	0	0	0	0
3	1	5	A3	0.066	0.255	0.0076667	0	0	0	0
4	2	4	A4	0.099	0.381	0.0113333	0	0	0	0
5	2	6	A5	0.15	0.576	0.0173333	0	0	0	0
6	3	9	A6	0.093	0.357	0.0106667	0	0	0	0
7	4	9	A8	0.081	0.312	0.0093333	0	0	0	0
8	5	10	A9	0.069	0.264	0.008	0	0	0	0
9	6	10	A10	0.042	0.183	0.8196667	0	0	0	0
10	7	8	A11	0.048	0.183	0.0056667	0	0	0	0
11	8	9	A12-1	0.129	0.495	0.015	0	0	0	0
12	8	10	A13-2	0.129	0.495	0.015	0	0	0	0
13	11	13	A18	0.018	0.144	0.0333333	0	0	0	0
14	11	14	A19	0.015	0.126	0.0293333	0	0	0	0
15	12	13	A20	0.018	0.144	0.0333333	0	0	0	0
16	12	23	A21	0.036	0.291	0.0676667	0	0	0	0
17	13	23	A22	0.033	0.261	0.0606667	0	0	0	0
18	14	16	A23	0.015	0.177	0.0273333	0	0	0	0
19	15	16	A24	0.006	0.051	0.012	0	0	0	0
20	15	21	A25-1	0.018	0.147	0.0343333	0	0	0	0
21	15	21	A25-2	0.018	0.147	0.0343333	0	0	0	0
22	15	24	A26	0.021	0.156	0.0363333	0	0	0	0
23	16	17	A27	0.009	0.078	0.0183333	0	0	0	0
24	16	19	A28	0.009	0.069	0.0163333	0	0	0	0
25	17	18	A29	0.006	0.042	0.01	0	0	0	0
26	17	22	A30	0.042	0.315	0.0736667	0	0	0	0
27	18	21	A31-1	0.009	0.078	0.0183333	0	0	0	0
28	18	21	A31-2	0.009	0.078	0.0183333	0	0	0	0
29	19	20	A32-1	0.015	0.12	0.0276667	0	0	0	0
30	19	20	A32-2	0.015	0.12	0.0276667	0	0	0	0
31	20	23	A33-1	0.009	0.066	0.0153333	0	0	0	0
32	20	23	A33-2	0.009	0.066	0.0153333	0	0	0	0
33	21	22	A34	0.027	0.204	0.0473333	0	0	0	0

A.2.1.4. Datos de transformadores

Secuencia directa, inversa y homopolar:

Numero	Inicio	Fin	Nombre	R	X	B	Rel.	Ang.	GI	BI	GJ	BJ	Servicio
1	3	24	'1 '	0.002	0.084	0	1.015	0	0	0	0	0	1
2	9	11	'1 '	0.002	0.084	0	1.03	0	0	0	0	0	1
3	9	12	'1 '	0.002	0.084	0	1.03	0	0	0	0	0	1
4	10	11	'1 '	0.002	0.084	0	1.015	0	0	0	0	0	1
5	10	12	'1 '	0.002	0.084	0	1.015	0	0	0	0	0	1

A.2.2. Red IEEE-118

A.2.2.1. Datos de nudos

Número	Identi.	Nombre	Tensión nominal	Tipo de nudo	GL	BL	Magnitud V	Fase V
1	1	Riversde	138	2	0	0	0.96	10.67
2	2	Pokagon	138	0	0	0	0.97	11.22
3	3	HickryCk	138	0	0	0	0.97	11.56
4	4	NwCarlsl	138	2	0	0	1.00	15.28
5	5	Olive	138	0	0	-0.4	1.00	15.73
6	6	Kankakee	138	2	0	0	0.99	13.00
7	7	JacksnRd	138	0	0	0	0.99	12.56
8	8	Olive	345	2	0	0	1.02	20.77
9	9	Bequine	345	0	0	0	1.04	28.02
10	10	Breed	345	2	0	0	1.05	35.61
11	11	SouthBnd	138	0	0	0	0.99	12.72
12	12	TwinBrch	138	2	0	0	0.99	12.20
13	13	Concord	138	0	0	0	0.97	11.35
14	14	GoshenJt	138	0	0	0	0.98	11.50
15	15	FtWayne	138	2	0	0	0.97	11.23
16	16	NE	138	0	0	0	0.98	11.91
17	17	Sorenson	138	0	0	0	1.00	13.74
18	18	McKinley	138	2	0	0	0.97	11.53
19	19	Lincoln	138	2	0	0	0.96	11.05
20	20	Adams	138	0	0	0	0.96	11.93
21	21	Jay	138	0	0	0	0.96	13.52
22	22	Randolph	138	0	0	0	0.97	16.08
23	23	CollCrnr	138	0	0	0	1.00	21.00
24	24	Trenton	138	2	0	0	0.99	20.89
25	25	TannrsCk	138	2	0	0	1.05	27.93
26	26	TannrsCk	345	2	0	0	1.02	29.71
27	27	Madison	138	2	0	0	0.97	15.35
28	28	Mullin	138	0	0	0	0.96	13.62
29	29	Grant	138	0	0	0	0.96	12.63
30	30	Sorenson	345	0	0	0	0.97	18.79
31	31	DeerCrk	138	2	0	0	0.97	12.75
32	32	Delaware	138	2	0	0	0.96	14.80
33	33	Haviland	138	0	0	0	0.97	10.63
34	34	Rockhill	138	2	0	0.14	0.99	11.30
35	35	WestLima	138	0	0	0	0.98	10.87
36	36	Sterling	138	2	0	0	0.98	10.87
37	37	EastLima	138	0	0	-0.25	0.99	11.77
38	38	EastLima	345	0	0	0	0.96	16.91
39	39	NwLibrty	138	0	0	0	0.97	8.41
40	40	WestEnd	138	2	0	0	0.97	7.35
41	41	STiffin	138	0	0	0	0.97	6.92
42	42	Howard	138	2	0	0	0.99	8.53
43	43	SKenton	138	0	0	0	0.98	11.28
44	44	WMVernon	138	0	0	0.1	0.99	13.82
45	45	NNewark	138	0	0	0.1	0.99	15.67
46	46	WLancst	138	2	0	0.1	1.01	18.49
47	47	Crooksvl	138	0	0	0	1.02	20.73
48	48	Zanesvll	138	0	0	0.15	1.02	19.93
49	49	Philo	138	2	0	0	1.03	20.94
50	50	WCambrdg	138	0	0	0	1.00	18.90
51	51	Newcmrst	138	0	0	0	0.97	16.28
52	52	SCoshoct	138	0	0	0	0.96	15.32
53	53	Wooster	138	0	0	0	0.95	14.35
54	54	Torrey	138	2	0	0	0.96	15.26
55	55	Wagenhls	138	2	0	0	0.95	14.97
56	56	Sunnysde	138	2	0	0	0.95	15.16
57	57	WNwPhil1	138	0	0	0	0.97	16.36
58	58	WNwPhil2	138	0	0	0	0.96	15.51
59	59	Tidd	138	2	0	0	0.99	19.37
60	60	SWKammer	138	0	0	0	0.99	23.15
61	61	WKammer	138	2	0	0	1.00	24.04
62	62	Natrium	138	2	0	0	1.00	23.43
63	63	Tidd	345	0	0	0	0.97	22.75
64	64	Kammer	345	0	0	0	0.98	24.52
65	65	Muskngum	345	2	0	0	1.01	27.65

66	66	Muskngum	138	2	0	0	1.05	27.48
67	67	Summerfl	138	0	0	0	1.02	24.84
68	68	Sporn	345	0	0	0	1.00	27.55
69	69	Sporn	138	3	0	0	1.04	30.00
70	70	Portsmth	138	2	0	0	0.98	22.58
71	71	NPortsmt	138	0	0	0	0.99	22.15
72	72	Hillsbro	138	2	0	0	0.98	20.98
73	73	Sargents	138	2	0	0	0.99	21.94
74	74	Beliefnt	138	2	0	0.12	0.96	21.64
75	75	SthPoint	138	0	0	0	0.97	22.91
76	76	Darrah	138	2	0	0	0.94	21.77
77	77	Turner	138	2	0	0	1.01	26.72
78	78	Chemical	138	0	0	0	1.00	26.42
79	79	CapitlHl	138	0	0	0.2	1.01	26.72
80	80	CabinCrk	138	2	0	0	1.04	28.96
81	81	Kanawha	345	0	0	0	1.00	28.10
82	82	Logan	138	0	0	0.2	0.99	27.24
83	83	Sprigg	138	0	0	0.1	0.99	28.42
84	84	BetsyLne	138	0	0	0	0.98	30.95
85	85	BeaverCk	138	2	0	0	0.99	32.51
86	86	Hazard	138	0	0	0	0.99	31.14
87	87	Pineville	161	2	0	0	1.02	31.40
88	88	Fremont	138	0	0	0	0.99	35.64
89	89	ClinchRv	138	2	0	0	1.01	39.69
90	90	Holston	138	2	0	0	0.99	33.29
91	91	HolstonT	138	2	0	0	0.98	33.31
92	92	Saltvle	138	2	0	0	0.99	33.80
93	93	Tazewell	138	0	0	0	0.99	30.79
94	94	Switchbk	138	0	0	0	0.99	28.64
95	95	Caldwell	138	0	0	0	0.98	27.67
96	96	Baileysv	138	0	0	0	0.99	27.51
97	97	Sundial	138	0	0	0	1.01	27.88
98	98	Bradley	138	0	0	0	1.02	27.40
99	99	Hinton	138	2	0	0	1.01	27.04
100	100	GlenLyn	138	2	0	0	1.02	28.03
101	101	Wythe	138	0	0	0	0.99	29.61
102	102	Smythe	138	0	0	0	0.99	32.30
103	103	Claytor	138	2	0	0	1.00	24.44
104	104	Hancock	138	2	0	0	0.97	21.69
105	105	Roanoke	138	2	0	0.2	0.97	20.57
106	106	Cloverdl	138	0	0	0	0.96	20.32
107	107	Reusens	138	2	0	0.06	0.95	17.53
108	108	Blaine	138	0	0	0	0.97	19.38
109	109	Franklin	138	0	0	0	0.97	18.93
110	110	Fieldale	138	2	0	0.06	0.97	18.09
111	111	DanRiver	138	2	0	0	0.98	19.74
112	112	Danville	138	2	0	0	0.98	14.99
113	113	DeerCrk	138	2	0	0	0.99	13.74
114	114	WMedford	138	0	0	0	0.96	14.46
115	115	Medford	138	0	0	0	0.96	14.46
116	116	KygerCrk	138	2	0	0	1.01	27.12
117	117	Corey	138	0	0	0	0.97	10.67
118	118	WHuntngd	138	0	0	0	0.95	21.92

A.2.2.2. Datos de generadores

Secuencia directa e inversa:

Número	Nodo	PG	QG	QT	QB	VS	Mbase	ZR	ZX	Serv.	Max PG	Min PG
1	4	-9.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
2	8	-28.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
3	10	450.0	0	999	-999	1.0	100	0.00090	0.0900	1	999	-999
4	12	85.0	0	999	-999	1.0	100	0.00220	0.2200	1	999	-999
5	24	-13.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
6	25	220.0	0	999	-999	1.0	100	0.00150	0.1500	1	999	-999
7	26	314.0	0	999	-999	1.0	100	0.00119	0.1190	1	999	-999
8	27	-9.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999

9	31	7.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
10	40	-46.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
11	42	-59.0	0	999	-999	1.0	100	0.00196	0.1960	1	999	-999
12	46	19.0	0	999	-999	1.0	100	0.00179	0.1790	1	999	-999
13	49	204.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
14	54	48.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
15	59	155.0	0	999	-999	1.0	100	0.00236	0.2363	1	999	-999
16	61	160.0	0	999	-999	1.0	100	0.00230	0.2300	1	999	-999
17	65	391.0	0	999	-999	1.0	100	0.00117	0.1170	1	999	-999
18	66	392.0	0	999	-999	1.0	100	0.00117	0.1170	1	999	-999
19	69	516.4	0	999	-999	1.0	100	0.00070	0.0700	1	999	-999
20	72	-12.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
21	73	-6.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
22	80	477.0	0	999	-999	1.0	100	0.00080	0.0800	1	999	-999
23	87	4.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
24	89	607.0	0	999	-999	1.0	100	0.00060	0.0600	1	999	-999
25	90	-85.0	0	999	-999	1.0	100	0.00200	0.2000	1	999	-999
26	91	-10.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
27	99	-42.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
28	100	252.0	0	999	-999	1.0	100	0.00120	0.1200	1	999	-999
29	103	40.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
30	107	-22.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
31	111	36.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
32	112	-43.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
33	113	-6.0	0	999	-999	1.0	100	0.00170	0.1700	1	999	-999
34	116	-184.0	0	999	-999	1.0	100	0.00180	0.1800	1	999	-999

Secuencia homopolar:

Número	Identi.	Nombre	R0	X0
1	4	'1 '	0.001700	0.170000
2	8	'1 '	0.001700	0.170000
3	10	'1 '	0.000900	0.090000
4	12	'1 '	0.002200	0.220000
5	24	'1 '	0.001700	0.170000
6	25	'1 '	0.001500	0.150000
7	26	'1 '	0.001190	0.119000
8	27	'1 '	0.001700	0.170000
9	31	'1 '	0.001700	0.170000
10	40	'1 '	0.001700	0.170000
11	42	'1 '	0.001960	0.196000
12	46	'1 '	0.001790	0.179000
13	49	'1 '	0.001700	0.170000
14	54	'1 '	0.001700	0.170000
15	59	'1 '	0.002363	0.236300
16	61	'1 '	0.002300	0.230000
17	65	'1 '	0.001170	0.117000
18	66	'1 '	0.001170	0.117000
19	69	'1 '	0.000700	0.070000
20	72	'1 '	0.001700	0.170000
21	73	'1 '	0.001700	0.170000
22	80	'1 '	0.000800	0.080000
23	87	'1 '	0.001700	0.170000
24	89	'1 '	0.000600	0.060000
25	90	'1 '	0.002000	0.200000
26	91	'1 '	0.001700	0.170000
27	99	'1 '	0.001700	0.170000
28	100	'1 '	0.001200	0.120000
29	103	'1 '	0.001700	0.170000
30	107	'1 '	0.001700	0.170000
31	111	'1 '	0.001700	0.170000
32	112	'1 '	0.001700	0.170000
33	113	'1 '	0.001700	0.170000
34	116	'1 '	0.001800	0.180000

A.2.2.3. Datos de carga

Secuencia directa e inversa:

Número	Identi.	Serv.	PL	QL	IP	IQ	YP	YQ
1	1	1	51.0000	27.0000	0	0	0	0
2	2	1	20.0000	9.0000	0	0	0	0
3	3	1	39.0000	10.0000	0	0	0	0
4	4	1	30.0000	12.0000	0	0	0	0
5	6	1	52.0000	22.0000	0	0	0	0
6	7	1	19.0000	2.0000	0	0	0	0
7	11	1	70.0000	23.0000	0	0	0	0
8	12	1	47.0000	10.0000	0	0	0	0
9	13	1	34.0000	16.0000	0	0	0	0
10	14	1	14.0000	1.0000	0	0	0	0
11	15	1	90.0000	30.0000	0	0	0	0
12	16	1	25.0000	10.0000	0	0	0	0
13	17	1	11.0000	3.0000	0	0	0	0
14	18	1	60.0000	34.0000	0	0	0	0
15	19	1	45.0000	25.0000	0	0	0	0
16	20	1	18.0000	3.0000	0	0	0	0
17	21	1	14.0000	8.0000	0	0	0	0
18	22	1	10.0000	5.0000	0	0	0	0
19	23	1	7.0000	3.0000	0	0	0	0
20	27	1	62.0000	13.0000	0	0	0	0
21	28	1	17.0000	7.0000	0	0	0	0
22	29	1	24.0000	4.0000	0	0	0	0
23	31	1	43.0000	27.0000	0	0	0	0
24	32	1	59.0000	23.0000	0	0	0	0
25	33	1	23.0000	9.0000	0	0	0	0
26	34	1	59.0000	26.0000	0	0	0	0
27	35	1	33.0000	9.0000	0	0	0	0
28	36	1	31.0000	17.0000	0	0	0	0
29	39	1	27.0000	11.0000	0	0	0	0
30	40	1	20.0000	23.0000	0	0	0	0
31	41	1	37.0000	10.0000	0	0	0	0
32	42	1	37.0000	23.0000	0	0	0	0
33	43	1	18.0000	7.0000	0	0	0	0
34	44	1	16.0000	8.0000	0	0	0	0
35	45	1	53.0000	22.0000	0	0	0	0
36	46	1	28.0000	10.0000	0	0	0	0
37	47	1	34.0000	0.0000	0	0	0	0
38	48	1	20.0000	11.0000	0	0	0	0
39	49	1	87.0000	30.0000	0	0	0	0
40	50	1	17.0000	4.0000	0	0	0	0
41	51	1	17.0000	8.0000	0	0	0	0
42	52	1	18.0000	5.0000	0	0	0	0
43	53	1	23.0000	11.0000	0	0	0	0
44	54	1	113.0000	32.0000	0	0	0	0
45	55	1	63.0000	22.0000	0	0	0	0
46	56	1	84.0000	18.0000	0	0	0	0
47	57	1	12.0000	3.0000	0	0	0	0
48	58	1	12.0000	3.0000	0	0	0	0
49	59	1	277.0000	113.0000	0	0	0	0
50	60	1	78.0000	3.0000	0	0	0	0
51	62	1	77.0000	14.0000	0	0	0	0
52	66	1	39.0000	18.0000	0	0	0	0
53	67	1	28.0000	7.0000	0	0	0	0
54	70	1	66.0000	20.0000	0	0	0	0
55	74	1	68.0000	27.0000	0	0	0	0
56	75	1	47.0000	11.0000	0	0	0	0
57	76	1	68.0000	36.0000	0	0	0	0
58	77	1	61.0000	28.0000	0	0	0	0
59	78	1	71.0000	26.0000	0	0	0	0
60	79	1	39.0000	32.0000	0	0	0	0
61	80	1	130.0000	26.0000	0	0	0	0
62	82	1	54.0000	27.0000	0	0	0	0
63	83	1	20.0000	10.0000	0	0	0	0
64	84	1	11.0000	7.0000	0	0	0	0
65	85	1	24.0000	15.0000	0	0	0	0
66	86	1	21.0000	10.0000	0	0	0	0
67	88	1	48.0000	10.0000	0	0	0	0

68	90	1	78.0000	42.0000	0	0	0	0
69	92	1	65.0000	10.0000	0	0	0	0
70	93	1	12.0000	7.0000	0	0	0	0
71	94	1	30.0000	16.0000	0	0	0	0
72	95	1	42.0000	31.0000	0	0	0	0
73	96	1	38.0000	15.0000	0	0	0	0
74	97	1	15.0000	9.0000	0	0	0	0
75	98	1	34.0000	8.0000	0	0	0	0
76	100	1	37.0000	18.0000	0	0	0	0
77	101	1	22.0000	15.0000	0	0	0	0
78	102	1	5.0000	3.0000	0	0	0	0
79	103	1	23.0000	16.0000	0	0	0	0
80	104	1	38.0000	25.0000	0	0	0	0
81	105	1	31.0000	26.0000	0	0	0	0
82	106	1	43.0000	16.0000	0	0	0	0
83	107	1	28.0000	12.0000	0	0	0	0
84	108	1	2.0000	1.0000	0	0	0	0
85	109	1	8.0000	3.0000	0	0	0	0
86	110	1	39.0000	30.0000	0	0	0	0
87	112	1	25.0000	13.0000	0	0	0	0
88	114	1	8.0000	3.0000	0	0	0	0
89	115	1	22.0000	7.0000	0	0	0	0
90	117	1	20.0000	8.0000	0	0	0	0
91	118	1	33.0000	15.0000	0	0	0	0

A.2.2.4. Datos de líneas

Secuencia directa e inversa:

Num	Nodo inicio	Nodo fin	R	X	B	MVA a	MVA b	MVA c	GI	BI	GJ	BJ	Serv	Long Línea
1	1	2	0.0303	0.0999	0.0254	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2	1	3	0.0129	0.0424	0.0108	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	4	5	0.0018	0.0080	0.0021	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	3	5	0.0241	0.1080	0.0284	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	5	6	0.0119	0.0540	0.0143	0	0	0	0	0	0	0	1	0
6	6	7	0.0046	0.0208	0.0055	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	8	9	0.0024	0.0305	1.1600	0	0	0	0	0	0	0	1	0
8	9	10	0.0026	0.0322	1.2300	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	4	11	0.0209	0.0688	0.0175	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	5	11	0.0203	0.0682	0.0174	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	11	12	0.0060	0.0196	0.0050	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	2	12	0.0187	0.0616	0.0157	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13	3	12	0.0484	0.1600	0.0406	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	7	12	0.0086	0.0340	0.0087	0	0	0	0	0	0	0	1	0
15	11	13	0.0223	0.0731	0.0188	0	0	0	0	0	0	0	1	0
16	12	14	0.0215	0.0707	0.0182	0	0	0	0	0	0	0	1	0
17	13	15	0.0744	0.2444	0.0627	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	14	15	0.0595	0.1950	0.0502	0	0	0	0	0	0	0	1	0
19	12	16	0.0212	0.0834	0.0214	0	0	0	0	0	0	0	1	0
20	15	17	0.0132	0.0437	0.0444	0	0	0	0	0	0	0	1	0
21	16	17	0.0454	0.1801	0.0466	0	0	0	0	0	0	0	1	0
22	17	18	0.0123	0.0505	0.0130	0	0	0	0	0	0	0	1	0
23	18	19	0.0112	0.0493	0.0114	0	0	0	0	0	0	0	1	0
24	19	20	0.0252	0.1170	0.0298	0	0	0	0	0	0	0	1	0
25	15	19	0.0120	0.0394	0.0101	0	0	0	0	0	0	0	1	0
26	20	21	0.0183	0.0849	0.0216	0	0	0	0	0	0	0	1	0
27	21	22	0.0209	0.0970	0.0246	0	0	0	0	0	0	0	1	0
28	22	23	0.0342	0.1590	0.0404	0	0	0	0	0	0	0	1	0
29	23	24	0.0135	0.0492	0.0498	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	23	25	0.0156	0.0800	0.0864	0	0	0	0	0	0	0	1	0
31	25	27	0.0318	0.1630	0.1764	0	0	0	0	0	0	0	1	0
32	27	28	0.0191	0.0855	0.0216	0	0	0	0	0	0	0	1	0
33	28	29	0.0237	0.0943	0.0238	0	0	0	0	0	0	0	1	0
34	8	30	0.0043	0.0504	0.5140	0	0	0	0	0	0	0	1	0

35	26	30	0.0080	0.0860	0.9080	0	0	0	0	0	0	0	1	0
36	17	31	0.0474	0.1563	0.0399	0	0	0	0	0	0	0	1	0
37	29	31	0.0108	0.0331	0.0083	0	0	0	0	0	0	0	1	0
38	23	32	0.0317	0.1153	0.1173	0	0	0	0	0	0	0	1	0
39	31	32	0.0298	0.0985	0.0251	0	0	0	0	0	0	0	1	0
40	27	32	0.0229	0.0755	0.0193	0	0	0	0	0	0	0	1	0
41	15	33	0.0380	0.1244	0.0319	0	0	0	0	0	0	0	1	0
42	19	34	0.0752	0.2470	0.0632	0	0	0	0	0	0	0	1	0
43	35	36	0.0022	0.0102	0.0027	0	0	0	0	0	0	0	1	0
44	35	37	0.0110	0.0497	0.0132	0	0	0	0	0	0	0	1	0
45	33	37	0.0415	0.1420	0.0366	0	0	0	0	0	0	0	1	0
46	34	36	0.0087	0.0268	0.0057	0	0	0	0	0	0	0	1	0
47	34	37	0.0026	0.0094	0.0098	0	0	0	0	0	0	0	1	0
48	37	39	0.0321	0.1060	0.0270	0	0	0	0	0	0	0	1	0
49	37	40	0.0593	0.1680	0.0420	0	0	0	0	0	0	0	1	0
50	30	38	0.0046	0.0540	0.4220	0	0	0	0	0	0	0	1	0
51	39	40	0.0184	0.0605	0.0155	0	0	0	0	0	0	0	1	0
52	40	41	0.0145	0.0487	0.0122	0	0	0	0	0	0	0	1	0
53	40	42	0.0555	0.1830	0.0466	0	0	0	0	0	0	0	1	0
54	41	42	0.0410	0.1350	0.0344	0	0	0	0	0	0	0	1	0
55	43	44	0.0608	0.2454	0.0607	0	0	0	0	0	0	0	1	0
56	34	43	0.0413	0.1681	0.0423	0	0	0	0	0	0	0	1	0
57	44	45	0.0224	0.0901	0.0224	0	0	0	0	0	0	0	1	0
58	45	46	0.0400	0.1356	0.0332	0	0	0	0	0	0	0	1	0
59	46	47	0.0380	0.1270	0.0316	0	0	0	0	0	0	0	1	0
60	46	48	0.0601	0.1890	0.0472	0	0	0	0	0	0	0	1	0
61	47	49	0.0191	0.0625	0.0160	0	0	0	0	0	0	0	1	0
62	42	49	0.0715	0.3230	0.0860	0	0	0	0	0	0	0	1	0
63	42	49	0.0715	0.3230	0.0860	0	0	0	0	0	0	0	1	0
64	45	49	0.0684	0.1860	0.0444	0	0	0	0	0	0	0	1	0
65	48	49	0.0179	0.0505	0.0126	0	0	0	0	0	0	0	1	0
66	49	50	0.0267	0.0752	0.0187	0	0	0	0	0	0	0	1	0
67	49	51	0.0486	0.1370	0.0342	0	0	0	0	0	0	0	1	0
68	51	52	0.0203	0.0588	0.0140	0	0	0	0	0	0	0	1	0
69	52	53	0.0405	0.1635	0.0406	0	0	0	0	0	0	0	1	0
70	53	54	0.0263	0.1220	0.0310	0	0	0	0	0	0	0	1	0
71	49	54	0.0730	0.2890	0.0738	0	0	0	0	0	0	0	1	0
72	49	54	0.0869	0.2910	0.0730	0	0	0	0	0	0	0	1	0
73	54	55	0.0169	0.0707	0.0202	0	0	0	0	0	0	0	1	0
74	54	56	0.0028	0.0096	0.0073	0	0	0	0	0	0	0	1	0
75	55	56	0.0049	0.0151	0.0037	0	0	0	0	0	0	0	1	0
76	56	57	0.0343	0.0966	0.0242	0	0	0	0	0	0	0	1	0
77	50	57	0.0474	0.1340	0.0332	0	0	0	0	0	0	0	1	0
78	56	58	0.0343	0.0966	0.0242	0	0	0	0	0	0	0	1	0
79	51	58	0.0255	0.0719	0.0179	0	0	0	0	0	0	0	1	0
80	54	59	0.0503	0.2293	0.0598	0	0	0	0	0	0	0	1	0
81	56	59	0.0825	0.2510	0.0569	0	0	0	0	0	0	0	1	0
82	56	59	0.0803	0.2390	0.0536	0	0	0	0	0	0	0	1	0
83	55	59	0.0474	0.2158	0.0565	0	0	0	0	0	0	0	1	0
84	59	60	0.0317	0.1450	0.0376	0	0	0	0	0	0	0	1	0
85	59	61	0.0328	0.1500	0.0388	0	0	0	0	0	0	0	1	0
86	60	61	0.0026	0.0135	0.0146	0	0	0	0	0	0	0	1	0
87	60	62	0.0123	0.0561	0.0147	0	0	0	0	0	0	0	1	0
88	61	62	0.0082	0.0376	0.0098	0	0	0	0	0	0	0	1	0
89	63	64	0.0017	0.0200	0.2160	0	0	0	0	0	0	0	1	0
90	38	65	0.0090	0.0986	1.0460	0	0	0	0	0	0	0	1	0
91	64	65	0.0027	0.0302	0.3800	0	0	0	0	0	0	0	1	0
92	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	0	0	0	0	0	0	0	1	0
93	49	66	0.0180	0.0919	0.0248	0	0	0	0	0	0	0	1	0
94	62	66	0.0482	0.2180	0.0578	0	0	0	0	0	0	0	1	0
95	62	67	0.0258	0.1170	0.0310	0	0	0	0	0	0	0	1	0
96	66	67	0.0224	0.1015	0.0268	0	0	0	0	0	0	0	1	0
97	65	68	0.0014	0.0160	0.6380	0	0	0	0	0	0	0	1	0
98	47	69	0.0844	0.2778	0.0709	0	0	0	0	0	0	0	1	0
99	49	69	0.0985	0.3240	0.0828	0	0	0	0	0	0	0	1	0
100	69	70	0.0300	0.1270	0.1220	0	0	0	0	0	0	0	1	0
101	24	70	0.0022	0.4115	0.1020	0	0	0	0	0	0	0	1	0
102	70	71	0.0088	0.0355	0.0088	0	0	0	0	0	0	0	1	0
103	24	72	0.0488	0.1960	0.0488	0	0	0	0	0	0	0	1	0
104	71	72	0.0446	0.1800	0.0444	0	0	0	0	0	0	0	1	0
105	71	73	0.0087	0.0454	0.0118	0	0	0	0	0	0	0	1	0
106	70	74	0.0401	0.1323	0.0337	0	0	0	0	0	0	0	1	0
107	70	75	0.0428	0.1410	0.0360	0	0	0	0	0	0	0	1	0

108	69	75	0.0405	0.1220	0.1240	0	0	0	0	0	0	0	1	0
109	74	75	0.0123	0.0406	0.0103	0	0	0	0	0	0	0	1	0
110	76	77	0.0444	0.1480	0.0368	0	0	0	0	0	0	0	1	0
111	69	77	0.0309	0.1010	0.1038	0	0	0	0	0	0	0	1	0
112	75	77	0.0601	0.1999	0.0498	0	0	0	0	0	0	0	1	0
113	77	78	0.0038	0.0124	0.0126	0	0	0	0	0	0	0	1	0
114	78	79	0.0055	0.0244	0.0065	0	0	0	0	0	0	0	1	0
115	77	80	0.0170	0.0485	0.0472	0	0	0	0	0	0	0	1	0
116	77	80	0.0294	0.1050	0.0228	0	0	0	0	0	0	0	1	0
117	79	80	0.0156	0.0704	0.0187	0	0	0	0	0	0	0	1	0
118	68	81	0.0018	0.0202	0.8080	0	0	0	0	0	0	0	1	0
119	77	82	0.0298	0.0853	0.0817	0	0	0	0	0	0	0	1	0
120	82	83	0.0112	0.0367	0.0380	0	0	0	0	0	0	0	1	0
121	83	84	0.0625	0.1320	0.0258	0	0	0	0	0	0	0	1	0
122	83	85	0.0430	0.1480	0.0348	0	0	0	0	0	0	0	1	0
123	84	85	0.0302	0.0641	0.0123	0	0	0	0	0	0	0	1	0
124	85	86	0.0350	0.1230	0.0276	0	0	0	0	0	0	0	1	0
125	86	87	0.0283	0.2074	0.0445	0	0	0	0	0	0	0	1	0
126	85	88	0.0200	0.1020	0.0276	0	0	0	0	0	0	0	1	0
127	85	89	0.0239	0.1730	0.0470	0	0	0	0	0	0	0	1	0
128	88	89	0.0139	0.0712	0.0193	0	0	0	0	0	0	0	1	0
129	89	90	0.0518	0.1880	0.0528	0	0	0	0	0	0	0	1	0
130	89	90	0.0238	0.0997	0.1060	0	0	0	0	0	0	0	1	0
131	90	91	0.0254	0.0836	0.0214	0	0	0	0	0	0	0	1	0
132	89	92	0.0099	0.0505	0.0548	0	0	0	0	0	0	0	1	0
133	89	92	0.0393	0.1581	0.0414	0	0	0	0	0	0	0	1	0
134	91	92	0.0387	0.1272	0.0327	0	0	0	0	0	0	0	1	0
135	92	93	0.0258	0.0848	0.0218	0	0	0	0	0	0	0	1	0
136	92	94	0.0481	0.1580	0.0406	0	0	0	0	0	0	0	1	0
137	93	94	0.0223	0.0732	0.0188	0	0	0	0	0	0	0	1	0
138	94	95	0.0132	0.0434	0.0111	0	0	0	0	0	0	0	1	0
139	80	96	0.0356	0.1820	0.0494	0	0	0	0	0	0	0	1	0
140	82	96	0.0162	0.0530	0.0544	0	0	0	0	0	0	0	1	0
141	94	96	0.0269	0.0869	0.0230	0	0	0	0	0	0	0	1	0
142	80	97	0.0183	0.0934	0.0254	0	0	0	0	0	0	0	1	0
143	80	98	0.0238	0.1080	0.0286	0	0	0	0	0	0	0	1	0
144	80	99	0.0454	0.2060	0.0546	0	0	0	0	0	0	0	1	0
145	92	100	0.0648	0.2950	0.0472	0	0	0	0	0	0	0	1	0
146	94	100	0.0178	0.0580	0.0604	0	0	0	0	0	0	0	1	0
147	95	96	0.0171	0.0547	0.0147	0	0	0	0	0	0	0	1	0
148	96	97	0.0173	0.0885	0.0240	0	0	0	0	0	0	0	1	0
149	98	100	0.0397	0.1790	0.0476	0	0	0	0	0	0	0	1	0
150	99	100	0.0180	0.0813	0.0216	0	0	0	0	0	0	0	1	0
151	100	101	0.0277	0.1262	0.0328	0	0	0	0	0	0	0	1	0
152	92	102	0.0123	0.0559	0.0146	0	0	0	0	0	0	0	1	0
153	101	102	0.0246	0.1120	0.0294	0	0	0	0	0	0	0	1	0
154	100	103	0.0160	0.0525	0.0536	0	0	0	0	0	0	0	1	0
155	100	104	0.0451	0.2040	0.0541	0	0	0	0	0	0	0	1	0
156	103	104	0.0466	0.1584	0.0407	0	0	0	0	0	0	0	1	0
157	103	105	0.0535	0.1625	0.0408	0	0	0	0	0	0	0	1	0
158	100	106	0.0605	0.2290	0.0620	0	0	0	0	0	0	0	1	0
159	104	105	0.0099	0.0378	0.0099	0	0	0	0	0	0	0	1	0
160	105	106	0.0140	0.0547	0.0143	0	0	0	0	0	0	0	1	0
161	105	107	0.0530	0.1830	0.0472	0	0	0	0	0	0	0	1	0
162	105	108	0.0261	0.0703	0.0184	0	0	0	0	0	0	0	1	0
163	106	107	0.0530	0.1830	0.0472	0	0	0	0	0	0	0	1	0
164	108	109	0.0105	0.0288	0.0076	0	0	0	0	0	0	0	1	0
165	103	110	0.0391	0.1813	0.0461	0	0	0	0	0	0	0	1	0
166	109	110	0.0278	0.0762	0.0202	0	0	0	0	0	0	0	1	0
167	110	111	0.0220	0.0755	0.0200	0	0	0	0	0	0	0	1	0
168	110	112	0.0247	0.0640	0.0620	0	0	0	0	0	0	0	1	0
169	17	113	0.0091	0.0301	0.0077	0	0	0	0	0	0	0	1	0
170	32	113	0.0615	0.2030	0.0518	0	0	0	0	0	0	0	1	0
171	32	114	0.0135	0.0612	0.0163	0	0	0	0	0	0	0	1	0
172	27	115	0.0164	0.0741	0.0197	0	0	0	0	0	0	0	1	0
173	114	115	0.0023	0.0104	0.0028	0	0	0	0	0	0	0	1	0
174	68	116	0.0003	0.0041	0.1640	0	0	0	0	0	0	0	1	0
175	12	117	0.0329	0.1400	0.0358	0	0	0	0	0	0	0	1	0
176	75	118	0.0145	0.0481	0.0120	0	0	0	0	0	0	0	1	0
177	76	118	0.0164	0.0544	0.0136	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Secuencia homopolar:

Número	Inicio	Fin	Nombre	R0	X0	B0	Gi	Bi	Gj	Bj
1	1	2	A1	0.0909	0.2997	0.0085	0	0	0	0
2	1	3	A2	0.0387	0.1272	0.0036	0	0	0	0
3	4	5	A3	0.0053	0.0239	0.0007	0	0	0	0
4	3	5	A4	0.0723	0.3240	0.0095	0	0	0	0
5	5	6	A5	0.0357	0.1620	0.0048	0	0	0	0
6	6	7	A6	0.0138	0.0624	0.0018	0	0	0	0
7	8	9	A7	0.0073	0.0915	0.3867	0	0	0	0
8	9	10	A8	0.0077	0.0966	0.4100	0	0	0	0
9	4	11	A9	0.0627	0.2064	0.0058	0	0	0	0
10	5	11	A10	0.0609	0.2046	0.0058	0	0	0	0
11	11	12	A11	0.0179	0.0588	0.0017	0	0	0	0
12	2	12	A12	0.0561	0.1848	0.0052	0	0	0	0
13	3	12	A13	0.1452	0.4800	0.0135	0	0	0	0
14	7	12	A14	0.0259	0.1020	0.0029	0	0	0	0
15	11	13	A15	0.0668	0.2193	0.0063	0	0	0	0
16	12	14	A16	0.0645	0.2121	0.0061	0	0	0	0
17	13	15	A17	0.2232	0.7332	0.0209	0	0	0	0
18	14	15	A18	0.1785	0.5850	0.0167	0	0	0	0
19	12	16	A19	0.0636	0.2502	0.0071	0	0	0	0
20	15	17	A20	0.0396	0.1311	0.0148	0	0	0	0
21	16	17	A21	0.1362	0.5403	0.0155	0	0	0	0
22	17	18	A22	0.0369	0.1515	0.0043	0	0	0	0
23	18	19	A23	0.0336	0.1479	0.0038	0	0	0	0
24	19	20	A24	0.0756	0.3510	0.0099	0	0	0	0
25	15	19	A25	0.0360	0.1182	0.0034	0	0	0	0
26	20	21	A26	0.0549	0.2547	0.0072	0	0	0	0
27	21	22	A27	0.0627	0.2910	0.0082	0	0	0	0
28	22	23	A28	0.1026	0.4770	0.0135	0	0	0	0
29	23	24	A29	0.0405	0.1476	0.0166	0	0	0	0
30	23	25	A30	0.0468	0.2400	0.0288	0	0	0	0
31	25	27	A31	0.0954	0.4890	0.0588	0	0	0	0
32	27	28	A32	0.0574	0.2565	0.0072	0	0	0	0
33	28	29	A33	0.0711	0.2829	0.0079	0	0	0	0
34	8	30	A34	0.0129	0.1512	0.1713	0	0	0	0
35	26	30	A35	0.0240	0.2580	0.3027	0	0	0	0
36	17	31	A36	0.1422	0.4689	0.0133	0	0	0	0
37	29	31	A37	0.0324	0.0993	0.0028	0	0	0	0
38	23	32	A38	0.0951	0.3459	0.0391	0	0	0	0
39	31	32	A39	0.0894	0.2955	0.0084	0	0	0	0
40	27	32	A40	0.0687	0.2265	0.0064	0	0	0	0
41	15	33	A41	0.1140	0.3732	0.0106	0	0	0	0
42	19	34	A42	0.2256	0.7410	0.0211	0	0	0	0
43	35	36	A43	0.0067	0.0306	0.0009	0	0	0	0
44	35	37	A44	0.0330	0.1491	0.0044	0	0	0	0
45	33	37	A45	0.1245	0.4260	0.0122	0	0	0	0
46	34	36	A46	0.0261	0.0804	0.0019	0	0	0	0
47	34	37	A47	0.0077	0.0282	0.0033	0	0	0	0
48	37	39	A48	0.0963	0.3180	0.0090	0	0	0	0
49	37	40	A49	0.1779	0.5040	0.0140	0	0	0	0
50	30	38	A50	0.0139	0.1620	0.1407	0	0	0	0
51	39	40	A51	0.0552	0.1815	0.0052	0	0	0	0
52	40	41	A52	0.0435	0.1461	0.0041	0	0	0	0
53	40	42	A53	0.1665	0.5490	0.0155	0	0	0	0
54	41	42	A54	0.1230	0.4050	0.0115	0	0	0	0
55	43	44	A55	0.1824	0.7362	0.0202	0	0	0	0
56	34	43	A56	0.1239	0.5043	0.0141	0	0	0	0
57	44	45	A57	0.0672	0.2703	0.0075	0	0	0	0
58	45	46	A58	0.1200	0.4068	0.0111	0	0	0	0
59	46	47	A59	0.1140	0.3810	0.0105	0	0	0	0
60	46	48	A60	0.1803	0.5670	0.0157	0	0	0	0
61	47	49	A61	0.0573	0.1875	0.0053	0	0	0	0
62	42	49	A62	0.2145	0.9690	0.0287	0	0	0	0
63	42	49	A63	0.2145	0.9690	0.0287	0	0	0	0
64	45	49	A64	0.2052	0.5580	0.0148	0	0	0	0
65	48	49	A65	0.0537	0.1515	0.0042	0	0	0	0
66	49	50	A66	0.0801	0.2256	0.0062	0	0	0	0
67	49	51	A67	0.1458	0.4110	0.0114	0	0	0	0
68	51	52	A68	0.0609	0.1764	0.0047	0	0	0	0
69	52	53	A69	0.1215	0.4905	0.0135	0	0	0	0

70	53	54	A70	0.0789	0.3660	0.0103	0	0	0	0
71	49	54	A71	0.2190	0.8670	0.0246	0	0	0	0
72	49	54	A72	0.2607	0.8730	0.0243	0	0	0	0
73	54	55	A73	0.0507	0.2121	0.0067	0	0	0	0
74	54	56	A74	0.0083	0.0287	0.0024	0	0	0	0
75	55	56	A75	0.0146	0.0453	0.0012	0	0	0	0
76	56	57	A76	0.1029	0.2898	0.0081	0	0	0	0
77	50	57	A77	0.1422	0.4020	0.0111	0	0	0	0
78	56	58	A78	0.1029	0.2898	0.0081	0	0	0	0
79	51	58	A79	0.0765	0.2157	0.0060	0	0	0	0
80	54	59	A80	0.1509	0.6879	0.0199	0	0	0	0
81	56	59	A81	0.2475	0.7530	0.0190	0	0	0	0
82	56	59	A82	0.2409	0.7170	0.0179	0	0	0	0
83	55	59	A83	0.1422	0.6474	0.0188	0	0	0	0
84	59	60	A84	0.0951	0.4350	0.0125	0	0	0	0
85	59	61	A85	0.0984	0.4500	0.0129	0	0	0	0
86	60	61	A86	0.0079	0.0405	0.0049	0	0	0	0
87	60	62	A87	0.0369	0.1683	0.0049	0	0	0	0
88	61	62	A88	0.0247	0.1128	0.0033	0	0	0	0
89	63	64	A89	0.0052	0.0600	0.0720	0	0	0	0
90	38	65	A90	0.0270	0.2958	0.3487	0	0	0	0
91	64	65	A91	0.0081	0.0906	0.1267	0	0	0	0
92	49	66	A92	0.0540	0.2757	0.0083	0	0	0	0
93	49	66	A93	0.0540	0.2757	0.0083	0	0	0	0
94	62	66	A94	0.1446	0.6540	0.0193	0	0	0	0
95	62	67	A95	0.0774	0.3510	0.0103	0	0	0	0
96	66	67	A96	0.0672	0.3045	0.0089	0	0	0	0
97	65	68	A97	0.0041	0.0480	0.2127	0	0	0	0
98	47	69	A98	0.2532	0.8334	0.0236	0	0	0	0
99	49	69	A99	0.2955	0.9720	0.0276	0	0	0	0
100	69	70	A100	0.0900	0.3810	0.0407	0	0	0	0
101	24	70	A101	0.0066	1.2345	0.0340	0	0	0	0
102	70	71	A102	0.0265	0.1065	0.0029	0	0	0	0
103	24	72	A103	0.1464	0.5880	0.0163	0	0	0	0
104	71	72	A104	0.1338	0.5400	0.0148	0	0	0	0
105	71	73	A105	0.0260	0.1362	0.0039	0	0	0	0
106	70	74	A106	0.1203	0.3969	0.0112	0	0	0	0
107	70	75	A107	0.1284	0.4230	0.0120	0	0	0	0
108	69	75	A108	0.1215	0.3660	0.0413	0	0	0	0
109	74	75	A109	0.0369	0.1218	0.0034	0	0	0	0
110	76	77	A110	0.1332	0.4440	0.0123	0	0	0	0
111	69	77	A111	0.0927	0.3030	0.0346	0	0	0	0
112	75	77	A112	0.1803	0.5997	0.0166	0	0	0	0
113	77	78	A113	0.0113	0.0372	0.0042	0	0	0	0
114	78	79	A114	0.0164	0.0732	0.0022	0	0	0	0
115	77	80	A115	0.0510	0.1455	0.0157	0	0	0	0
116	77	80	A116	0.0882	0.3150	0.0076	0	0	0	0
117	79	80	A117	0.0468	0.2112	0.0062	0	0	0	0
118	68	81	A118	0.0053	0.0606	0.2693	0	0	0	0
119	77	82	A119	0.0894	0.2559	0.0272	0	0	0	0
120	82	83	A120	0.0336	0.1100	0.0127	0	0	0	0
121	83	84	A121	0.1875	0.3960	0.0086	0	0	0	0
122	83	85	A122	0.1290	0.4440	0.0116	0	0	0	0
123	84	85	A123	0.0906	0.1923	0.0041	0	0	0	0
124	85	86	A124	0.1050	0.3690	0.0092	0	0	0	0
125	86	87	A125	0.0848	0.6222	0.0148	0	0	0	0
126	85	88	A126	0.0600	0.3060	0.0092	0	0	0	0
127	85	89	A127	0.0717	0.5190	0.0157	0	0	0	0
128	88	89	A128	0.0417	0.2136	0.0064	0	0	0	0
129	89	90	A129	0.1554	0.5640	0.0176	0	0	0	0
130	89	90	A130	0.0714	0.2991	0.0353	0	0	0	0
131	90	91	A131	0.0762	0.2508	0.0071	0	0	0	0
132	89	92	A132	0.0297	0.1515	0.0183	0	0	0	0
133	89	92	A133	0.1179	0.4743	0.0138	0	0	0	0
134	91	92	A134	0.1161	0.3816	0.0109	0	0	0	0
135	92	93	A135	0.0774	0.2544	0.0073	0	0	0	0
136	92	94	A136	0.1443	0.4740	0.0135	0	0	0	0
137	93	94	A137	0.0669	0.2196	0.0063	0	0	0	0
138	94	95	A138	0.0396	0.1302	0.0037	0	0	0	0
139	80	96	A139	0.1068	0.5460	0.0165	0	0	0	0
140	82	96	A140	0.0486	0.1590	0.0181	0	0	0	0
141	94	96	A141	0.0807	0.2607	0.0077	0	0	0	0
142	80	97	A142	0.0549	0.2802	0.0085	0	0	0	0

143	80	98	A143	0.0714	0.3240	0.0095	0	0	0	0
144	80	99	A144	0.1362	0.6180	0.0182	0	0	0	0
145	92	100	A145	0.1944	0.8850	0.0157	0	0	0	0
146	94	100	A146	0.0534	0.1740	0.0201	0	0	0	0
147	95	96	A147	0.0513	0.1641	0.0049	0	0	0	0
148	96	97	A148	0.0519	0.2655	0.0080	0	0	0	0
149	98	100	A149	0.1191	0.5370	0.0159	0	0	0	0
150	99	100	A150	0.0540	0.2439	0.0072	0	0	0	0
151	100	101	A151	0.0831	0.3786	0.0109	0	0	0	0
152	92	102	A152	0.0369	0.1677	0.0049	0	0	0	0
153	101	102	A153	0.0738	0.3360	0.0098	0	0	0	0
154	100	103	A154	0.0480	0.1575	0.0179	0	0	0	0
155	100	104	A155	0.1353	0.6120	0.0180	0	0	0	0
156	103	104	A156	0.1398	0.4752	0.0136	0	0	0	0
157	103	105	A157	0.1605	0.4875	0.0136	0	0	0	0
158	100	106	A158	0.1815	0.6870	0.0207	0	0	0	0
159	104	105	A159	0.0298	0.1134	0.0033	0	0	0	0
160	105	106	A160	0.0420	0.1641	0.0048	0	0	0	0
161	105	107	A161	0.1590	0.5490	0.0157	0	0	0	0
162	105	108	A162	0.0783	0.2109	0.0061	0	0	0	0
163	106	107	A163	0.1590	0.5490	0.0157	0	0	0	0
164	108	109	A164	0.0315	0.0864	0.0025	0	0	0	0
165	103	110	A165	0.1172	0.5439	0.0154	0	0	0	0
166	109	110	A166	0.0834	0.2286	0.0067	0	0	0	0
167	110	111	A167	0.0660	0.2265	0.0067	0	0	0	0
168	110	112	A168	0.0741	0.1920	0.0207	0	0	0	0
169	17	113	A169	0.0274	0.0903	0.0026	0	0	0	0
170	32	113	A170	0.1845	0.6090	0.0173	0	0	0	0
171	32	114	A171	0.0405	0.1836	0.0054	0	0	0	0
172	27	115	A172	0.0492	0.2223	0.0066	0	0	0	0
173	114	115	A173	0.0069	0.0312	0.0009	0	0	0	0
174	68	116	A174	0.0010	0.0122	0.0547	0	0	0	0
175	12	117	A175	0.0987	0.4200	0.0119	0	0	0	0
176	75	118	A176	0.0435	0.1443	0.0040	0	0	0	0
177	76	118	A177	0.0492	0.1632	0.0045	0	0	0	0

A.2.2.5. Datos de transformadores

Secuencia directa, inversa y homopolar:

Numero	Inicio	Fin	Nombre	R	X	B	Rel.	Ang.	GI	BI	GJ	BJ	Servicio
1	8	5	'1 '	0	0.0267	0	0.985	0	0	0	0	0	1
2	26	25	'1 '	0	0.0382	0	0.960	0	0	0	0	0	1
3	30	17	'1 '	0	0.0388	0	0.960	0	0	0	0	0	1
4	38	37	'1 '	0	0.0375	0	0.935	0	0	0	0	0	1
5	63	59	'1 '	0	0.0386	0	0.960	0	0	0	0	0	1
6	64	61	'1 '	0	0.0268	0	0.985	0	0	0	0	0	1
7	65	66	'1 '	0	0.0370	0	0.935	0	0	0	0	0	1
8	68	69	'1 '	0	0.0370	0	0.935	0	0	0	0	0	1
9	81	80	'1 '	0	0.0370	0	0.935	0	0	0	0	0	1

A.2.2.6. Diagrama unifilar

Figura A.3 – Diagrama unifilar de la red de prueba IEEE-118

A.2.4. Índices de sitio de la red IEEE-118

Figura A.5 – Estimación del índice SARFI-X de la red IEEE-118.

A.2.5. Índices de sitio de la red EC-357

Figura A.6 – Estimación del índice SARFI-X de la red EC-357.

Figura A.7 – Estimación del índice SARFI-X de la red EC-357.

A.3. Implementación del programa de estimación de huecos de tensión (PEHT)

El programa de estimación de huecos de tensión (PEHT), es realizado de forma modular mediante del paquete informático Matlab, y consta de forma macro de las siguientes cinco partes:

Módulo N° 1.- Lectura de datos, encargado de importar los datos de la red a formato matricial (Matlab).

Módulo N° 2.- Datos de red estimados, tiene como objetivo recopilar y/o estimar la información de la tasa media de fallos de los elementos (nudos o líneas).

Módulo N° 3.- Variables aleatorias de entrada, genera para cada variable aleatoria un conjunto de datos que en lo posterior servirán para caracterizar cada evento o fallo simulado en el sistema.

Módulo N° 4.- Cálculo de tensiones, ejecuta la simulación de fallos en el sistema. Para cada fallo se calcula y registra la tensión residual de todos los nudos de la red.

Módulo N° 5.- Estimación de índices, a partir del conjunto de tensiones generadas en los n años de simulación, este módulo está encargado de calcular los índices de sitio y sistema de la red estudiada.

A continuación se tiene la descripción de cada uno de los módulos del PEHT:

A.3.0.1. Lectura de datos

Se encarga de la lectura de datos de la red ya sea desde un archivo tipo texto o tipo excel, donde la información del sistema está almacenada en formato PSSE-23. Adicionalmente, este módulo realiza el cálculo de la matriz de impedancia directa, inversa y homopolar del sistema, que posteriormente se utiliza para el cálculo de las tensiones residuales en los nudos. En la Fig. A.8 se muestra un modelo esquemático del desarrollo del módulo.

Figura A.8 – Flujograma del módulo “lectura de datos”.

A.3.0.2. Datos de red estimados

En esta sección se registran los datos históricos relacionados con el número de fallos de los elementos (nudos o líneas). En caso de no contar con la longitud de las líneas, el programa realiza una estimación de la longitud basada en la tensión de operación e impedancia del elemento, tal como se muestra en la tabla A.7. Para el caso de los nudos, el número medio de fallos se estima según la tensión que esté operando.

Tabla A.7 – Parámetros típicos de una línea.

U (kV)	I (A)	R/D (Ω /mi)	X/D (Ω /mi)	S (MVA)	X/R
69	600	0.00540	0.01430	71	2.6
115	1200	0.00064	0.00500	240	7.8
138	1200	0.00045	0.00380	286	8.4
161	2000	0.00020	0.00190	558	9.5
230	2000	0.00010	0.00100	796	10
345	2000	0.00004	0.00048	1195	12
500	2000	0.00002	0.00026	1732	13

Fuente: Datos tomados de [SPP, 2004].

Tabla A.8 – Ejemplo de estimación de la tasa media de fallo de los elementos.

Elemento del sistema	U (kV)	Z (Ω)	$\hat{D}$ (km)	λ (fallos/año)	$\hat{\lambda}$ (fallos/año)
Nodo	230	n/a	n/a	0.021	0.021
Línea	138	$0.0303 + 0.0999j$	43.90	0.0328/km	1.44

En la tabla A.8 se describe un ejemplo del cálculo de la tasa promedio de fallo estimada $\hat{\lambda}$. Suponiendo que no se conoce los datos de fallos de estos dos elementos del sistema, el procedimiento a desarrollar sería el siguiente:

- Para el nudo que opera a 230 kV, los datos proporcionados en la tabla 3.3 permiten estimar a través de la tensión de operación U la tasa media esperada de fallos al año, que es de un valor de $\hat{\lambda} = 0.021$ fallos/año.
- En el caso de la línea de transmisión, como primer paso se define la impedancia de la línea y la tensión de operación del elemento ($Z = 0.0303 + 0.0999j \Omega$ y $U = 138$ kV). A partir de esta información, se estima la longitud $\hat{D}$ con los datos de parámetros típicos de “R/D y X/D” de las líneas, presentados en la tabla A.7. Es decir, con el dato de tensión de operación de la línea se puede estimar la longitud que es de $\hat{D} = \left| \frac{0.0303 + 0.0999j}{0.00045 + 0.0038j} \right| = 27.28$ mi, equivalentes a 43.90 km. Para finalizar, mediante los datos de fallos promedio λ presentados en la tabla 3.3, se estima la tasa media de fallo anual $\hat{\lambda}$, que en este caso es de $\hat{\lambda} = 43.9 \text{ km} \cdot 3.28 \frac{\text{fallos}}{\text{año} \cdot 100 \text{ km}} = 1.44$ fallos/año.

De forma general, los parámetros para generar los registros del coeficiente de fallo C_f de cada elemento del sistema se encuentran detallados en la tabla 3.3. En la Fig. A.9 se muestra un modelo esquemático del desarrollo del módulo.

Figura A.9 – Esquemático del módulo “datos de red estimados”.

A.3.0.3. Variables aleatorias de entrada

En este módulo se generan aleatoriamente los datos de las variables de entrada para los n años de simulación que posteriormente son empleadas para el cálculo de la tensión residual debido a los cortocircuitos aplicados en la red.

Figura A.10 – Esquemático del módulo “variables aleatorias de entrada”.

Previo a la simulación de cada fallo, resulta indispensable haber generado una muestra aleatoria de las cinco variables estocásticas. Estos datos de entrada que permitirán caracterizar cada fallo, están almacenados de forma matricial, donde las filas representan cada año simulado, las columnas el elemento (nudo o línea) donde se efectuó el fallo, y el vector profundidad que permite caracterizar un número de fallos en cada año. Cabe recalcar que cada elemento del sistema tendrá un número independiente de fallos al año, que dependerá básicamente del parámetro tasa media de fallos de la variable C_f . En la Fig. A.10 se detallan las cinco variables estocásticas que alimentan el PEHT.

A.3.0.4. Cálculo de tensiones

Una vez definido los datos de todas las variables de entrada, como se muestra en la Fig. A.11, este módulo se encarga de realizar la simulación de los cortocircuitos y el registro de las tensiones residuales que se generan en todos los nudos del sistema.

Las tensiones registradas para cada nudo, durante los n años de simulación se encuentran registradas en archivos denominados *huecos nudo m*, donde m representa el nudo del sistema que ha registrado los eventos. Esta estrategia de seccionar los registros de las tensiones residuales en m nudos es especialmente útil en redes grandes (por encima de 100 nudos), y permite evitar almacenar matrices de gran tamaño y agilizar en lo posterior cualquier análisis de los datos.

Es decir, para cada nudo se tendría una matriz $HUECOS(i, j, k, v)$, que almacena las tensiones residuales de todos los cortocircuitos simulados. Donde i es el año simulado, j el elemento fallido, k el número de fallo en el año i , y v el nudo que registra las tensiones residuales. Bajo este formato, el volumen de información que almacenaría cada matriz sería muy considerable, al punto de poder saturar la memoria volátil (RAM) del ordenador.

Basado en lo indicado, se considera el “almacenamiento seccionado” de la matriz $HUECOS$ mediante los archivos *huecos nudo m*, que registra para cada nudo todas las tensiones residuales con dimensión (i, j, k) . Este archivo *huecos nudo m* es almacenado dentro del disco duro con formato *.mat*, e inmediatamente eliminado de la memoria volátil. Aunque este método pueda ralentizar la velocidad de cálculo del Matlab, se vuelve una forma efectiva de simular redes de mediano y gran tamaño mediante el método de Monte Carlo.

A.3.0.5. Estimación de índices

Como último paso, se desarrolla la estimación de los índices de huecos de tensión, donde a través de la muestra generada de n años de simulación, se calculan los índices SARFI-X, SARFI-Curve y SEI para todo el sistema (para detalles de los índices ver Capítulo 3).

Figura A.11 – Esquemático del módulo “cálculo de tensiones”.

A.4. Ecuaciones para el cálculo del ANOVA

En la expresión analítica (3.16) existen ciertos parámetros desconocidos (μ , α_i , β_j , $\alpha\beta_{ij}$, u_{ijk}) que se calculan a partir de los datos medidos y_{ijk} del DoE. Estas estimaciones son obtenidas mediante el método de *máxima verosimilitud* [Peña, 2001; Navidi, 2008], con las cuales se calcula y caracteriza el modelo. En el conjunto de expresiones de la tabla A.9, se encuentran recopiladas las clásicas ecuaciones para estimar los distintos parámetros del ANOVA. De forma general, la información del ANOVA se desarrolla bajo el esquema expuesto en tabla A.10.

Tabla A.9 – Estimadores del modelo.

Media	$\hat{\mu} = \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet}$
Factor 1	$\hat{\alpha}_i = \hat{y}_{i\bullet\bullet} - \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet}$
Factor 2	$\hat{\beta}_j = \hat{y}_{\bullet j\bullet} - \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet}$
Interacción	$\hat{\alpha}\hat{\beta}_{ij} = \hat{y}_{ij\bullet} - \hat{y}_{i\bullet\bullet} - \hat{y}_{\bullet j\bullet} + \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet}$
Varianza residual	$\hat{\sigma}^2 = \hat{S}_R^2 = \frac{\sum \sum \sum e_{ijk}^2}{IJ(m-1)}$
Residuos	$e_{ijk} = y_{ijk} - (\hat{\mu} + \hat{\alpha}_i + \hat{\beta}_j + \hat{\alpha}\hat{\beta}_{ij}) = y_{ijk} - \bar{y}_{ij\bullet}$

Tabla A.10 – Tabla de análisis de la varianza (ANOVA).

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Varianza	p-valor $F_{I-1, n-I}$
A	$mJ \sum (\hat{y}_{i\bullet\bullet} - \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2$	$I - 1$	$\hat{S}_A^2$	$\frac{\hat{S}_A^2}{\hat{S}_R^2} = P_A$
B	$mJ \sum (\hat{y}_{\bullet j\bullet} - \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2$	$J - 1$	$\hat{S}_B^2$	$\frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_R^2} = P_B$
AxB	$m \sum \sum (\hat{y}_{ij\bullet} - \hat{y}_{i\bullet\bullet} - \hat{y}_{\bullet j\bullet} + \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2$	$(I - 1)(J - 1)$	$\hat{S}_{AB}^2$	$\frac{\hat{S}_{AB}^2}{\hat{S}_R^2} = P_{AB}$
Residuo	$\sum \sum \sum e_{ijk}^2$	$IJ(m - 1)$	$\hat{S}_R^2$	
Total	$\sum \sum \sum (y_{ijk} - \hat{y}_{\bullet\bullet\bullet})^2$	$n - 1$		

A.4.0.6. Interpretación del ANOVA

La tabla de análisis de varianza está basada en el contraste de hipótesis, es decir orientada a aceptar o rechazar la *hipótesis nula* H_0 . Como tendencia se tiene que H_0 representa la condición más sencilla, es decir la igualdad del parámetro ($H_0 : parametro_1 = parametro_2 = \dots = parametro_n$), y la *hipótesis alternativa* H_1 , que algún parámetro es distinto.

Del *p-valor* obtenido en el ANOVA (ver tabla A.10), bajo un nivel de confianza determinado (típicamente 95%), se puede aseverar o no estadísticamente que existe una diferencia entre los niveles del factor, figura A.12. Si el p-valor es superior a 0.05¹, se acepta H_0 , caso contrario se tienen diferencias significativas en los parámetros de los niveles, es decir se rechaza H_0 .

¹Este criterio es válido para un nivel de confianza del 95 %

Figura A.12 – Curva de Fisher para el contraste de hipótesis

A.4.0.7. Diagnósis del modelo experimental

Se comprende por *diagnósis* al conjunto de pruebas que se realiza al modelo estadístico para validar la hipótesis inicial del ANOVA. Los supuestos del ANOVA, figura A.13, son que los errores del modelo son variables independientes, con distribución normal, y *homocedásticos* [Peña, 2001; Navidi, 2008].

Figura A.13 – Hipótesis del error del modelo para el Análisis de Varianza

- **Independencia:** Se requiere que las variables hayan sido muestreadas al azar. Esta aleatoriedad del modelo es obtenida mediante la asignación aleatoria del MATLAB durante la simulación del método de Monte Carlo.
- **Normalidad:** Prueba enfocada en explorar si los errores del modelo se ajustan en un distribución normal o Gaussiana. Estas pruebas pueden ser realizadas de forma analítica y de manera gráfica.

Dentro de la técnicas visuales para probar la normalidad de un modelo, se tiene el *gráfico Q-Q*, que diagnóstica la existencia o no de diferencias entre la distribución normal teórica y la del modelo. Si la distribución de los errores del modelo es normal, esta gráfica se asemejará a una línea recta. A manera de ejemplo, en la Fig. A.14 se ilustra el gráfico Q-Q de 200 observaciones generadas de una distribución normal.

Figura A.14 – Prueba de normalidad - gráfico Q-Q

Entre los diversos métodos analíticos para probar la normalidad de un modelo, se tienen los *contrastes de bondad de ajuste*, como: *chi-cuadrado*, *Kolmogorov-Smirnov*, *Shapiro-Wilk*, etc. Cada uno está basado en ciertas hipótesis base, y brindan un criterio objetivo de la normalidad o no del modelo. En la figura A.15, se muestra un ejemplo de un modelo experimental que no se ajustaría a una distribución normal ($p\text{-valor} > 0.05$).

Tests de Bondad de Ajuste para Prueba Normalidad					
Contraste Chi-cuadrado					
	Limite Inferior	Limite Superior	Frecuencia Observada	Frecuencia Esperada	Chi-cuadrado
menor o igual	9,73193	9,73193	13	12,50	0,02
	9,73193	9,83572	13	12,50	0,02
	9,83572	9,91334	13	12,50	0,02
	9,91334	9,98284	7	12,50	2,42
	9,98284	10,0523	16	12,50	0,98
	10,0523	10,13	16	12,50	0,98
	10,13	10,2337	9	12,50	0,98
mayor	10,2337		13	12,50	0,02
Chi-cuadrado = 5,44004 con 5 g.l. P-Valor = 0,364566					
Estadístico DMAS de Kolmogorov = 0,0450101					
Estadístico DMENOS de Kolmogorov = 0,0581892					
Estadístico DN global de Kolmogorov = 0,0581892					
P-Valor aproximado = 0,887313					
Estadístico EDF	Valor	Forma Modificada	P-Valor		
Kolmogorov-Smirnov D	0,0581892	0,586256	>=0,10*		
Anderson-Darling A^2	0,187424	0,188872	0,9012*		
*Indica que el p-valor se ha comparado con las tablas de valores criticos especialmente construido para el ajuste de la distribución actualmente seleccionada. Otros p-valores están basados en tablas generales y pueden ser muy conservadores.					

Figura A.15 – Pruebas de contraste de hipótesis - normalidad

- **Homocedasticidad:** Esta prueba consiste en confirmar si la dispersión entre niveles de los residuos es similar o no. Es factible verificarla mediante un gráfico de dispersión, de tal forma que no se observe ningún patrón o “forma de embudo”. En la figura A.16 se ilustra un ejemplo de un modelo homocedástico. Adicionalmente, mediante métodos analíticos como los *contrastes de varianza* (p. ej. *prueba de Levene*, *Contraste de Cochran*, etc.), es posible evaluar de forma numérica la homocedasticidad de un modelo.

Figura A.16 – Gráfica de residuos

En el escenario de no cumplirse la diagnosis, las interpretaciones del ANOVA no tendrían validez, y se procedería a realizar una *transformación de los datos* de tal forma que se cumpla la hipótesis base del ANOVA, esto es: independencia, normalidad, y homocedasticidad del modelo.

APÉNDICE DEL CAPÍTULO 3

B.1. Análisis de sensibilidad

B.1.1. Gráficas del análisis de sensibilidad aplicado a la red IEEE-118

Figura B.1 – Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.

Figura B.2 – Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.

Figura B.3 – Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.

Figura B.4 – Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.

Figura B.5 – Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.

Figura B.6 – Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-118.

B.1.2. Gráficas del análisis de sensibilidad aplicado a la red EC-357

Figura B.7 – Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.

Figura B.8 – Estudio del efecto de la precisión de C_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.

Figura B.9 – Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.

Figura B.10 – Estudio del efecto de la media de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.

Figura B.11 – Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la media de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.

Figura B.12 – Estudio del efecto de la dispersión de Z_f en la estimación de la desviación típica de los índices SARFI-90 y SARFI-70 de la red IEEE-357.

APÉNDICE DEL CAPÍTULO 4

C.1. Correlación de medidas de huecos de tensión

C.1.1. Coeficiente de correlación de Spearman

C.1.1.1. Expresión analítica

Para dos variables aleatoria X y Y , que tienen una distribución no paramétrica, Spearman propone como criterio de asociación la siguiente expresión [Navidi, 2008]:

$$r = 1 - 6 \cdot \sum \frac{d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (\text{C.1})$$

$$d_i = x_i - y_i \quad (\text{C.2})$$

donde, d es la diferencia entre los rangos de las variables ordenadas, y N el número de observaciones de las muestras.

Figura C.1 – Análisis comparativo de correlación de muestras.

La interpretación del coeficiente de Spearman es similar a la de Pearson, es decir, r es un valor adimensional entre -1 y 1. Asimismo, cuando $|r| = 1$, se interpreta como una correlación perfecta entre las muestras, y en caso de que r sea igual o próximo a cero, se infiere una ausencia o carencia de relación lineal entre las variables.

C.1.1.2. Cálculo de la matriz de correlación de Spearman en la red IEEE-24.

Tabla C.1 – Matriz de correlación múltiple de Spearman del índice SARFI-90 de la red IEEE-24.

		Nudo																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nudo	1	1	0.97	0.76	0.82	0.85	0.78	0.6	0.75	0.76	0.78	0.76	0.76	0.69	0.7	0.47	0.48	0.4	0.37	0.49	0.51	0.37	0.31	0.52	0.68
	2	0.97	1	0.75	0.83	0.84	0.79	0.6	0.76	0.76	0.78	0.75	0.76	0.69	0.69	0.46	0.47	0.39	0.37	0.48	0.5	0.37	0.31	0.52	0.67
	3	0.76	0.75	1	0.78	0.77	0.75	0.54	0.71	0.81	0.76	0.81	0.78	0.67	0.82	0.63	0.63	0.55	0.53	0.63	0.6	0.54	0.46	0.57	0.86
	4	0.82	0.83	0.78	1	0.88	0.85	0.57	0.77	0.88	0.86	0.85	0.85	0.69	0.74	0.49	0.5	0.42	0.39	0.51	0.53	0.39	0.34	0.55	0.67
	5	0.85	0.84	0.77	0.88	1	0.88	0.59	0.79	0.85	0.89	0.84	0.85	0.7	0.74	0.47	0.49	0.4	0.38	0.51	0.53	0.38	0.32	0.54	0.66
	6	0.78	0.79	0.75	0.85	0.88	1	0.57	0.76	0.89	0.95	0.87	0.87	0.68	0.74	0.48	0.5	0.42	0.39	0.52	0.55	0.39	0.33	0.56	0.65
	7	0.6	0.6	0.54	0.57	0.59	0.57	1	0.7	0.59	0.59	0.6	0.6	0.64	0.57	0.37	0.38	0.31	0.28	0.38	0.41	0.29	0.22	0.43	0.51
	8	0.75	0.76	0.71	0.77	0.79	0.76	0.7	1	0.79	0.79	0.81	0.81	0.71	0.72	0.45	0.46	0.37	0.35	0.48	0.5	0.35	0.29	0.52	0.61
	9	0.76	0.76	0.81	0.88	0.85	0.89	0.59	0.79	1	0.91	0.92	0.9	0.7	0.79	0.53	0.54	0.46	0.43	0.56	0.58	0.43	0.37	0.59	0.71
	10	0.78	0.78	0.76	0.86	0.89	0.95	0.59	0.79	0.91	1	0.9	0.91	0.7	0.77	0.5	0.52	0.43	0.41	0.54	0.57	0.41	0.35	0.58	0.66
	11	0.76	0.75	0.81	0.85	0.84	0.87	0.6	0.81	0.92	0.9	1	0.95	0.74	0.86	0.57	0.59	0.5	0.48	0.61	0.64	0.48	0.41	0.63	0.72
	12	0.76	0.76	0.78	0.85	0.85	0.87	0.6	0.81	0.9	0.91	0.95	1	0.76	0.81	0.53	0.55	0.46	0.43	0.58	0.61	0.43	0.36	0.63	0.68
	13	0.69	0.69	0.67	0.69	0.7	0.68	0.64	0.71	0.7	0.7	0.74	0.76	1	0.77	0.56	0.6	0.48	0.45	0.64	0.68	0.45	0.36	0.72	0.69
	14	0.7	0.69	0.82	0.74	0.74	0.74	0.57	0.72	0.79	0.77	0.86	0.81	0.77	1	0.69	0.72	0.62	0.6	0.74	0.69	0.6	0.52	0.65	0.81
	15	0.47	0.46	0.63	0.49	0.47	0.48	0.37	0.45	0.53	0.5	0.57	0.53	0.56	0.69	1	0.91	0.87	0.83	0.83	0.75	0.84	0.7	0.68	0.76
	16	0.48	0.47	0.63	0.5	0.49	0.5	0.38	0.46	0.54	0.52	0.59	0.55	0.6	0.72	0.91	1	0.85	0.81	0.89	0.8	0.8	0.68	0.74	0.76
	17	0.4	0.39	0.55	0.42	0.4	0.42	0.31	0.37	0.46	0.43	0.5	0.46	0.48	0.62	0.87	0.85	1	0.91	0.78	0.69	0.89	0.79	0.63	0.66
	18	0.37	0.37	0.53	0.39	0.38	0.39	0.28	0.35	0.43	0.41	0.48	0.43	0.45	0.6	0.83	0.81	0.91	1	0.74	0.66	0.96	0.83	0.6	0.64
	19	0.49	0.48	0.63	0.51	0.51	0.52	0.38	0.48	0.56	0.54	0.61	0.58	0.64	0.74	0.83	0.89	0.78	0.74	1	0.9	0.73	0.63	0.82	0.73
	20	0.51	0.5	0.6	0.53	0.53	0.55	0.41	0.5	0.58	0.57	0.64	0.61	0.68	0.69	0.75	0.8	0.69	0.66	0.9	1	0.65	0.56	0.91	0.67
	21	0.37	0.37	0.54	0.39	0.38	0.39	0.29	0.35	0.43	0.41	0.48	0.43	0.45	0.6	0.84	0.8	0.89	0.96	0.73	0.65	1	0.82	0.59	0.64
	22	0.31	0.31	0.46	0.34	0.32	0.33	0.22	0.29	0.37	0.35	0.41	0.36	0.36	0.52	0.7	0.68	0.79	0.83	0.63	0.56	0.82	1	0.5	0.55
	23	0.52	0.52	0.57	0.55	0.54	0.56	0.43	0.52	0.59	0.58	0.63	0.63	0.72	0.65	0.68	0.74	0.63	0.6	0.82	0.91	0.59	0.5	1	0.62
	24	0.68	0.67	0.86	0.67	0.66	0.65	0.51	0.61	0.71	0.66	0.72	0.68	0.69	0.81	0.76	0.76	0.66	0.64	0.73	0.67	0.64	0.55	0.62	1

Tabla C.2 – Matriz de correlación múltiple de Spearman del índice SARFI-70 de la red IEEE-24.

		Nudo																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Nudo	1	1	0.87	0.22	0.42	0.58	0.43	0.21	0.17	0.17	0.34	0.17	0.16	0.17	0.12	0.12	0.11	0.12	0.13	0.12	0.13	0.11	0.11	0.15	0.1
	2	0.87	1	0.2	0.45	0.55	0.45	0.21	0.18	0.17	0.34	0.17	0.17	0.17	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	0.1	0.16	0.09
	3	0.22	0.2	1	0.28	0.22	0.21	0.17	0.18	0.33	0.2	0.27	0.22	0.25	0.33	0.38	0.31	0.3	0.32	0.27	0.18	0.31	0.2	0.15	0.61
	4	0.42	0.45	0.28	1	0.52	0.45	0.17	0.3	0.56	0.43	0.43	0.41	0.39	0.28	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.07	0.06	0.12	0.1
	5	0.58	0.55	0.22	0.52	1	0.65	0.19	0.31	0.37	0.64	0.42	0.41	0.4	0.28	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.1	0.08	0.07	0.14	0.08
	6	0.43	0.45	0.21	0.45	0.65	1	0.19	0.3	0.51	0.8	0.52	0.51	0.43	0.33	0.08	0.1	0.07	0.08	0.1	0.14	0.07	0.06	0.17	0.08
	7	0.21	0.21	0.17	0.17	0.19	0.19	1	0.56	0.21	0.22	0.19	0.19	0.24	0.2	0.23	0.21	0.22	0.23	0.21	0.2	0.22	0.22	0.22	0.2
	8	0.17	0.18	0.18	0.3	0.31	0.3	0.56	1	0.38	0.36	0.32	0.31	0.29	0.22	0.1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.12	0.07
	9	0.17	0.17	0.33	0.56	0.37	0.51	0.21	0.38	1	0.59	0.68	0.64	0.51	0.44	0.13	0.14	0.12	0.12	0.15	0.18	0.11	0.1	0.21	0.18
	10	0.34	0.34	0.2	0.43	0.64	0.8	0.22	0.36	0.59	1	0.62	0.62	0.49	0.39	0.08	0.11	0.08	0.08	0.12	0.16	0.07	0.07	0.21	0.08
	11	0.17	0.17	0.27	0.43	0.42	0.52	0.19	0.32	0.68	0.62	1	0.7	0.63	0.65	0.16	0.21	0.16	0.16	0.21	0.24	0.15	0.12	0.25	0.15
	12	0.16	0.17	0.22	0.41	0.41	0.51	0.19	0.31	0.64	0.62	0.7	1	0.66	0.42	0.09	0.14	0.1	0.09	0.21	0.31	0.08	0.09	0.39	0.09
	13	0.17	0.17	0.25	0.39	0.4	0.43	0.24	0.29	0.51	0.49	0.63	0.66	1	0.47	0.13	0.15	0.14	0.13	0.2	0.26	0.13	0.12	0.33	0.13
	14	0.12	0.13	0.33	0.28	0.28	0.33	0.2	0.22	0.44	0.39	0.65	0.42	0.47	1	0.41	0.49	0.38	0.36	0.46	0.32	0.34	0.25	0.29	0.34
	15	0.12	0.12	0.38	0.09	0.09	0.08	0.23	0.1	0.13	0.08	0.16	0.09	0.13	0.41	1	0.76	0.76	0.76	0.51	0.28	0.77	0.52	0.23	0.73
	16	0.11	0.12	0.31	0.08	0.08	0.1	0.21	0.09	0.14	0.11	0.21	0.14	0.15	0.49	0.76	1	0.7	0.7	0.68	0.44	0.67	0.48	0.39	0.6
	17	0.12	0.11	0.3	0.07	0.09	0.07	0.22	0.09	0.12	0.08	0.16	0.1	0.14	0.38	0.76	0.7	1	0.86	0.48	0.25	0.79	0.66	0.19	0.58
	18	0.13	0.12	0.32	0.07	0.08	0.08	0.23	0.09	0.12	0.08	0.16	0.09	0.13	0.36	0.76	0.7	0.86	1	0.46	0.23	0.88	0.64	0.18	0.59
	19	0.12	0.12	0.27	0.08	0.08	0.1	0.21	0.09	0.15	0.12	0.21	0.21	0.2	0.46	0.51	0.68	0.48	0.46	1	0.74	0.43	0.34	0.61	0.42
	20	0.13	0.13	0.18	0.09	0.1	0.14	0.2	0.09	0.18	0.16	0.24	0.31	0.26	0.32	0.28	0.44	0.25	0.23	0.74	1	0.21	0.18	0.83	0.22
	21	0.11	0.11	0.31	0.07	0.08	0.07	0.22	0.08	0.11	0.07	0.15	0.08	0.13	0.34	0.77	0.67	0.79	0.88	0.43	0.21	1	0.65	0.16	0.6
	22	0.11	0.1	0.2	0.06	0.07	0.06	0.22	0.08	0.1	0.07	0.12	0.09	0.12	0.25	0.52	0.48	0.66	0.64	0.34	0.18	0.65	1	0.15	0.4
	23	0.15	0.16	0.15	0.12	0.14	0.17	0.22	0.12	0.21	0.21	0.25	0.39	0.33	0.29	0.23	0.39	0.19	0.18	0.61	0.83	0.16	0.15	1	0.17
	24	0.1	0.09	0.61	0.1	0.08	0.08	0.2	0.07	0.18	0.08	0.15	0.09	0.13	0.34	0.73	0.6	0.58	0.59	0.42	0.22	0.6	0.4	0.17	1

C.2. Área de correlación de la red IEEE-118

C.2.1. Correlación del índice SARFI-90

Tabla C.3 – Área de correlación del índice SARFI-90 de la red IEEE-118

Área de correlación SARFI-90 (eventos/año)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
21	22	21	21	22	22	22	25	21	13	23	23	25
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
26	29	25	29	29	29	20	19	15	11	0	10	10
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
8	9	9	32	9	9	27	16	16	16	17	20	10
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
7	3	1	9	2	4	4	7	13	14	13	13	12
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
13	16	16	16	15	12	17	13	12	11	17	11	9
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
10	8	5	3	6	5	0	3	6	8	8	7	7
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
7	8	4	8	9	7	5	4	0	6	5	2	3
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
8	6	10	11	8	10	5	2	4	6	6	8	7
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
7	7	7	7	7	9	2	2	30	9	9	4	22
Nudo 118												
8												

C.2.2. Correlación del índice SARFI-70

Tabla C.4 – Área de correlación del índice SARFI-70 de la red IEEE-118

Área de correlación SARFI-70 (eventos/año)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
9	10	9	12	13	12	12	4	3	2	12	12	8
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
9	4	7	4	5	4	2	2	2	0	0	1	1
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
4	4	2	2	1	3	8	5	5	5	5	5	0
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	3	3
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
4	5	2	3	2	5	4	6	6	5	5	6	2
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
0	4	3	0	2	2	0	1	4	3	3	3	3
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
3	3	2	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
1	1	2	2	2	1	0	0	0	1	2	0	3
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
3	2	0	3	2	1	1	1	0	4	4	3	10
Nudo 118												
3												

C.3. Área de correlación de la red EC-357

C.3.1. Correlación del índice SARFI-90

Tabla C.5 – Área de correlación del índice SARFI-90 de la red EC-357

Área de correlación SARFI-90 (eventos/año)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
31	103	105	108	105	109	103	110	110	108	110	105	4
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
1	103	102	103	7	7	14	103	16	16	20	20	8
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
8	101	7	20	15	15	27	12	101	101	101	101	107
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
14	14	14	110	15	15	15	67	3	103	103	21	26
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
26	13	0	1	5	13	14	2	14	103	103	103	11
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
13	12	65	66	66	99	6	9	9	109	65	65	65
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
103	110	110	108	110	11	12	11	26	104	102	0	0
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
109	109	98	2	2	65	65	67	2	13	64	66	65
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
9	9	9	9	110	65	8	8	8	8	8	13	103
Nudo 118	Nudo 119	Nudo 120	Nudo 121	Nudo 122	Nudo 123	Nudo 124	Nudo 125	Nudo 126	Nudo 127	Nudo 128	Nudo 129	Nudo 130
103	0	59	66	0	40	94	68	71	68	104	6	102
Nudo 131	Nudo 132	Nudo 133	Nudo 134	Nudo 135	Nudo 136	Nudo 137	Nudo 138	Nudo 139	Nudo 140	Nudo 141	Nudo 142	Nudo 143
98	6	98	6	76	102	102	102	109	101	10	13	64
Nudo 144	Nudo 145	Nudo 146	Nudo 147	Nudo 148	Nudo 149	Nudo 150	Nudo 151	Nudo 152	Nudo 153	Nudo 154	Nudo 155	Nudo 156
64	12	67	21	8	12	9	15	12	104	104	10	10
Nudo 157	Nudo 158	Nudo 159	Nudo 160	Nudo 161	Nudo 162	Nudo 163	Nudo 164	Nudo 165	Nudo 166	Nudo 167	Nudo 168	Nudo 169
67	12	102	64	12	65	1	57	67	62	64	69	14
Nudo 170	Nudo 171	Nudo 172	Nudo 173	Nudo 174	Nudo 175	Nudo 176	Nudo 177	Nudo 178	Nudo 179	Nudo 180	Nudo 181	Nudo 182
53	18	20	20	21	21	9	22	24	24	1	15	1
Nudo 183	Nudo 184	Nudo 185	Nudo 186	Nudo 187	Nudo 188	Nudo 189	Nudo 190	Nudo 191	Nudo 192	Nudo 193	Nudo 194	Nudo 195
16	16	21	21	18	17	46	110	64	65	65	2	46
Nudo 196	Nudo 197	Nudo 198	Nudo 199	Nudo 200	Nudo 201	Nudo 202	Nudo 203	Nudo 204	Nudo 205	Nudo 206	Nudo 207	Nudo 208
1	1	106	107	112	18	23	68	67	67	103	103	98
Nudo 209	Nudo 210	Nudo 211	Nudo 212	Nudo 213	Nudo 214	Nudo 215	Nudo 216	Nudo 217	Nudo 218	Nudo 219	Nudo 220	Nudo 221
102	98	23	23	23	23	68	68	67	67	67	64	67
Nudo 222	Nudo 223	Nudo 224	Nudo 225	Nudo 226	Nudo 227	Nudo 228	Nudo 229	Nudo 230	Nudo 231	Nudo 232	Nudo 233	Nudo 234
59	59	66	66	20	21	19	19	19	19	21	21	21
Nudo 235	Nudo 236	Nudo 237	Nudo 238	Nudo 239	Nudo 240	Nudo 241	Nudo 242	Nudo 243	Nudo 244	Nudo 245	Nudo 246	Nudo 247
21	12	14	14	103	100	18	21	22	21	22	23	15
Nudo 248	Nudo 249	Nudo 250	Nudo 251	Nudo 252	Nudo 253	Nudo 254	Nudo 255	Nudo 256	Nudo 257	Nudo 258	Nudo 259	Nudo 260
23	1	7	1	103	7	108	6	103	103	101	105	109
Nudo 261	Nudo 262	Nudo 263	Nudo 264	Nudo 265	Nudo 266	Nudo 267	Nudo 268	Nudo 269	Nudo 270	Nudo 271	Nudo 272	Nudo 273
108	0	82	82	97	97	104	104	104	99	103	101	42
Nudo 274	Nudo 275	Nudo 276	Nudo 277	Nudo 278	Nudo 279	Nudo 280	Nudo 281	Nudo 282	Nudo 283	Nudo 284	Nudo 285	Nudo 286
39	60	40	9	9	19	24	25	24	99	48	12	65
Nudo 287	Nudo 288	Nudo 289	Nudo 290	Nudo 291	Nudo 292	Nudo 293	Nudo 294	Nudo 295	Nudo 296	Nudo 297	Nudo 298	Nudo 299
0	68	68	68	72	8	24	21	23	104	104	110	110
Nudo 300	Nudo 301	Nudo 302	Nudo 303	Nudo 304	Nudo 305	Nudo 306	Nudo 307	Nudo 308	Nudo 309	Nudo 310	Nudo 311	Nudo 312
103	102	108	110	26	100	15	64	106	106	106	6	6
Nudo 313	Nudo 314	Nudo 315	Nudo 316	Nudo 317	Nudo 318	Nudo 319	Nudo 320	Nudo 321	Nudo 322	Nudo 323	Nudo 324	Nudo 325
6	14	15	15	2	12	12	68	68	69	65	65	69
Nudo 326	Nudo 327	Nudo 328	Nudo 329	Nudo 330	Nudo 331	Nudo 332	Nudo 333	Nudo 334	Nudo 335	Nudo 336	Nudo 337	Nudo 338
12	14	20	39	12	109	1	68	68	8	65	1	6
Nudo 339	Nudo 340	Nudo 341	Nudo 342	Nudo 343	Nudo 344	Nudo 345	Nudo 346	Nudo 347	Nudo 348	Nudo 349	Nudo 350	Nudo 351
11	4	15	8	19	21	59	2	103	103	103	103	110
Nudo 352	Nudo 353	Nudo 354	Nudo 355	Nudo 356	Nudo 357							
0	8	14	17	101	64							

C.3.2. Correlación del índice SARFI-70

Tabla C.6 – Área de correlación del índice SARFI-70 de la red EC-357

Área de correlación SARFI-70 (eventos/año)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
2	89	89	91	89	91	89	65	64	90	65	89	2
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
0	84	84	84	9	9	9	83	8	8	5	5	0
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
0	81	0	0	3	3	3	3	82	82	81	81	89
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
9	9	9	91	2	6	6	50	0	84	89	4	5
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
4	5	0	1	1	5	5	0	5	89	89	89	3
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
2	3	46	45	45	89	0	6	6	2	50	45	47
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
89	90	91	91	64	2	2	2	3	89	84	0	0
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
91	91	89	2	2	49	48	51	2	2	45	45	47
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
6	6	6	6	90	6	0	1	0	0	0	2	89
Nudo 118	Nudo 119	Nudo 120	Nudo 121	Nudo 122	Nudo 123	Nudo 124	Nudo 125	Nudo 126	Nudo 127	Nudo 128	Nudo 129	Nudo 130
88	0	26	52	0	2	2	50	1	50	89	4	82
Nudo 131	Nudo 132	Nudo 133	Nudo 134	Nudo 135	Nudo 136	Nudo 137	Nudo 138	Nudo 139	Nudo 140	Nudo 141	Nudo 142	Nudo 143
80	3	81	6	7	83	82	82	91	9	2	2	48
Nudo 144	Nudo 145	Nudo 146	Nudo 147	Nudo 148	Nudo 149	Nudo 150	Nudo 151	Nudo 152	Nudo 153	Nudo 154	Nudo 155	Nudo 156
48	2	45	4	2	5	2	7	3	50	20	6	6
Nudo 157	Nudo 158	Nudo 159	Nudo 160	Nudo 161	Nudo 162	Nudo 163	Nudo 164	Nudo 165	Nudo 166	Nudo 167	Nudo 168	Nudo 169
7	6	84	6	6	6	0	1	39	2	28	29	2
Nudo 170	Nudo 171	Nudo 172	Nudo 173	Nudo 174	Nudo 175	Nudo 176	Nudo 177	Nudo 178	Nudo 179	Nudo 180	Nudo 181	Nudo 182
2	2	13	13	19	14	2	5	5	5	1	5	1
Nudo 183	Nudo 184	Nudo 185	Nudo 186	Nudo 187	Nudo 188	Nudo 189	Nudo 190	Nudo 191	Nudo 192	Nudo 193	Nudo 194	Nudo 195
2	2	18	18	9	9	3	91	50	47	47	0	1
Nudo 196	Nudo 197	Nudo 198	Nudo 199	Nudo 200	Nudo 201	Nudo 202	Nudo 203	Nudo 204	Nudo 205	Nudo 206	Nudo 207	Nudo 208
1	1	2	87	29	0	6	48	50	50	88	88	89
Nudo 209	Nudo 210	Nudo 211	Nudo 212	Nudo 213	Nudo 214	Nudo 215	Nudo 216	Nudo 217	Nudo 218	Nudo 219	Nudo 220	Nudo 221
82	89	6	6	7	7	48	48	49	49	50	47	51
Nudo 222	Nudo 223	Nudo 224	Nudo 225	Nudo 226	Nudo 227	Nudo 228	Nudo 229	Nudo 230	Nudo 231	Nudo 232	Nudo 233	Nudo 234
32	32	17	15	12	16	12	12	12	12	16	16	16
Nudo 235	Nudo 236	Nudo 237	Nudo 238	Nudo 239	Nudo 240	Nudo 241	Nudo 242	Nudo 243	Nudo 244	Nudo 245	Nudo 246	Nudo 247
16	5	8	8	89	81	8	2	2	7	3	4	2
Nudo 248	Nudo 249	Nudo 250	Nudo 251	Nudo 252	Nudo 253	Nudo 254	Nudo 255	Nudo 256	Nudo 257	Nudo 258	Nudo 259	Nudo 260
3	1	1	1	83	0	90	4	88	88	89	89	91
Nudo 261	Nudo 262	Nudo 263	Nudo 264	Nudo 265	Nudo 266	Nudo 267	Nudo 268	Nudo 269	Nudo 270	Nudo 271	Nudo 272	Nudo 273
90	0	5	5	6	6	8	4	8	90	88	89	9
Nudo 274	Nudo 275	Nudo 276	Nudo 277	Nudo 278	Nudo 279	Nudo 280	Nudo 281	Nudo 282	Nudo 283	Nudo 284	Nudo 285	Nudo 286
8	11	4	1	1	2	5	3	4	90	0	6	6
Nudo 287	Nudo 288	Nudo 289	Nudo 290	Nudo 291	Nudo 292	Nudo 293	Nudo 294	Nudo 295	Nudo 296	Nudo 297	Nudo 298	Nudo 299
0	50	50	49	45	1	10	7	2	89	89	77	80
Nudo 300	Nudo 301	Nudo 302	Nudo 303	Nudo 304	Nudo 305	Nudo 306	Nudo 307	Nudo 308	Nudo 309	Nudo 310	Nudo 311	Nudo 312
84	84	91	65	5	81	2	6	89	89	89	4	3
Nudo 313	Nudo 314	Nudo 315	Nudo 316	Nudo 317	Nudo 318	Nudo 319	Nudo 320	Nudo 321	Nudo 322	Nudo 323	Nudo 324	Nudo 325
6	7	7	7	0	8	8	49	49	48	47	47	48
Nudo 326	Nudo 327	Nudo 328	Nudo 329	Nudo 330	Nudo 331	Nudo 332	Nudo 333	Nudo 334	Nudo 335	Nudo 336	Nudo 337	Nudo 338
12	7	8	1	1	2	1	48	42	0	46	1	6
Nudo 339	Nudo 340	Nudo 341	Nudo 342	Nudo 343	Nudo 344	Nudo 345	Nudo 346	Nudo 347	Nudo 348	Nudo 349	Nudo 350	Nudo 351
6	0	3	5	5	0	18	0	88	88	89	89	91
Nudo 352	Nudo 353	Nudo 354	Nudo 355	Nudo 356	Nudo 357							
0	2	5	7	89	6							

Apéndice D

APÉNDICE DEL CAPÍTULO 5

D.1. Localización óptima de medidores de huecos de tensión

D.1.1. Respuestas obtenidas por el algoritmo LOM+OBS (criterio de observabilidad)

D.1.1.1. Localización óptima de medidores de huecos con umbral $t < 0.9$ pu de la red IEEE-118

Tabla D.1 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red IEEE-118.

Localización óptima de medidores de la red IEEE-118 con un nivel de observabilidad del 100 % ($t < 0.9$ pu)									
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26	Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30
0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39	Nudo 40
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Nudo 51	Nudo 52	Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65	Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78	Nudo 79	Nudo 80
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 91	Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104	Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117	Nudo 118		
1	1	1	1	1	1	1	1		

Tabla D.2 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red IEEE-118.

Localización óptima de medidores de la red IEEE-118 con un nivel de observabilidad del 95 % ($t < 0.9$ pu)									
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26	Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30
0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39	Nudo 40
1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Nudo 51	Nudo 52	Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65	Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70
0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78	Nudo 79	Nudo 80
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 91	Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104	Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117	Nudo 118		
1	1	1	0	1	1	1	0		

D.1.1.2. Localización óptima de medidores de huecos de tensión con umbral $t < 0.7$ pu de la red IEEE-118

Tabla D.3 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red IEEE-118.

Localización óptima de medidores de la red IEEE-118 con un nivel de observabilidad del 100 % ($t < 0.7$ pu)									
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26	Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39	Nudo 40
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 51	Nudo 52	Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65	Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78	Nudo 79	Nudo 80
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 91	Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104	Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117	Nudo 118		
1	1	1	1	1	1	1	1		

Tabla D.4 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red IEEE-118.

Localización óptima de medidores de la red IEEE-118 con un nivel de observabilidad del 95 % ($t < 0.7$ pu)									
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10
1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13	Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26	Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39	Nudo 40
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 51	Nudo 52	Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65	Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78	Nudo 79	Nudo 80
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 91	Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104	Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117	Nudo 118		
1	1	1	1	1	1	1	1		

D.1.1.3. Localización óptima de medidores de huecos con umbral $t < 0.9$ pu de la red EC-357

Tabla D.5 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red EC-357.

Localización óptima de medidores de la red EC-357 con un nivel de observabilidad del 100 % ($t < 0.9$ pu)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 118	Nudo 119	Nudo 120	Nudo 121	Nudo 122	Nudo 123	Nudo 124	Nudo 125	Nudo 126	Nudo 127	Nudo 128	Nudo 129	Nudo 130
1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Nudo 131	Nudo 132	Nudo 133	Nudo 134	Nudo 135	Nudo 136	Nudo 137	Nudo 138	Nudo 139	Nudo 140	Nudo 141	Nudo 142	Nudo 143
0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Nudo 144	Nudo 145	Nudo 146	Nudo 147	Nudo 148	Nudo 149	Nudo 150	Nudo 151	Nudo 152	Nudo 153	Nudo 154	Nudo 155	Nudo 156
1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
Nudo 157	Nudo 158	Nudo 159	Nudo 160	Nudo 161	Nudo 162	Nudo 163	Nudo 164	Nudo 165	Nudo 166	Nudo 167	Nudo 168	Nudo 169
1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1
Nudo 170	Nudo 171	Nudo 172	Nudo 173	Nudo 174	Nudo 175	Nudo 176	Nudo 177	Nudo 178	Nudo 179	Nudo 180	Nudo 181	Nudo 182
1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Nudo 183	Nudo 184	Nudo 185	Nudo 186	Nudo 187	Nudo 188	Nudo 189	Nudo 190	Nudo 191	Nudo 192	Nudo 193	Nudo 194	Nudo 195
1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
Nudo 196	Nudo 197	Nudo 198	Nudo 199	Nudo 200	Nudo 201	Nudo 202	Nudo 203	Nudo 204	Nudo 205	Nudo 206	Nudo 207	Nudo 208
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Nudo 209	Nudo 210	Nudo 211	Nudo 212	Nudo 213	Nudo 214	Nudo 215	Nudo 216	Nudo 217	Nudo 218	Nudo 219	Nudo 220	Nudo 221
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
Nudo 222	Nudo 223	Nudo 224	Nudo 225	Nudo 226	Nudo 227	Nudo 228	Nudo 229	Nudo 230	Nudo 231	Nudo 232	Nudo 233	Nudo 234
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 235	Nudo 236	Nudo 237	Nudo 238	Nudo 239	Nudo 240	Nudo 241	Nudo 242	Nudo 243	Nudo 244	Nudo 245	Nudo 246	Nudo 247
1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
Nudo 248	Nudo 249	Nudo 250	Nudo 251	Nudo 252	Nudo 253	Nudo 254	Nudo 255	Nudo 256	Nudo 257	Nudo 258	Nudo 259	Nudo 260
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
Nudo 261	Nudo 262	Nudo 263	Nudo 264	Nudo 265	Nudo 266	Nudo 267	Nudo 268	Nudo 269	Nudo 270	Nudo 271	Nudo 272	Nudo 273
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Nudo 274	Nudo 275	Nudo 276	Nudo 277	Nudo 278	Nudo 279	Nudo 280	Nudo 281	Nudo 282	Nudo 283	Nudo 284	Nudo 285	Nudo 286
1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
Nudo 287	Nudo 288	Nudo 289	Nudo 290	Nudo 291	Nudo 292	Nudo 293	Nudo 294	Nudo 295	Nudo 296	Nudo 297	Nudo 298	Nudo 299
1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
Nudo 300	Nudo 301	Nudo 302	Nudo 303	Nudo 304	Nudo 305	Nudo 306	Nudo 307	Nudo 308	Nudo 309	Nudo 310	Nudo 311	Nudo 312
0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
Nudo 313	Nudo 314	Nudo 315	Nudo 316	Nudo 317	Nudo 318	Nudo 319	Nudo 320	Nudo 321	Nudo 322	Nudo 323	Nudo 324	Nudo 325
0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
Nudo 326	Nudo 327	Nudo 328	Nudo 329	Nudo 330	Nudo 331	Nudo 332	Nudo 333	Nudo 334	Nudo 335	Nudo 336	Nudo 337	Nudo 338
1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Nudo 339	Nudo 340	Nudo 341	Nudo 342	Nudo 343	Nudo 344	Nudo 345	Nudo 346	Nudo 347	Nudo 348	Nudo 349	Nudo 350	Nudo 351
0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1
Nudo 352	Nudo 353	Nudo 354	Nudo 355	Nudo 356	Nudo 357							
1	0	0	1	0	0							

Tabla D.6 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red EC-357.

Localización óptima de medidores de la red EC-357 con un nivel de observabilidad del 95 % ($t < 0.9$ pu)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
Nudo 118	Nudo 119	Nudo 120	Nudo 121	Nudo 122	Nudo 123	Nudo 124	Nudo 125	Nudo 126	Nudo 127	Nudo 128	Nudo 129	Nudo 130
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
Nudo 131	Nudo 132	Nudo 133	Nudo 134	Nudo 135	Nudo 136	Nudo 137	Nudo 138	Nudo 139	Nudo 140	Nudo 141	Nudo 142	Nudo 143
0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
Nudo 144	Nudo 145	Nudo 146	Nudo 147	Nudo 148	Nudo 149	Nudo 150	Nudo 151	Nudo 152	Nudo 153	Nudo 154	Nudo 155	Nudo 156
1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
Nudo 157	Nudo 158	Nudo 159	Nudo 160	Nudo 161	Nudo 162	Nudo 163	Nudo 164	Nudo 165	Nudo 166	Nudo 167	Nudo 168	Nudo 169
1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
Nudo 170	Nudo 171	Nudo 172	Nudo 173	Nudo 174	Nudo 175	Nudo 176	Nudo 177	Nudo 178	Nudo 179	Nudo 180	Nudo 181	Nudo 182
1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Nudo 183	Nudo 184	Nudo 185	Nudo 186	Nudo 187	Nudo 188	Nudo 189	Nudo 190	Nudo 191	Nudo 192	Nudo 193	Nudo 194	Nudo 195
0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
Nudo 196	Nudo 197	Nudo 198	Nudo 199	Nudo 200	Nudo 201	Nudo 202	Nudo 203	Nudo 204	Nudo 205	Nudo 206	Nudo 207	Nudo 208
1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
Nudo 209	Nudo 210	Nudo 211	Nudo 212	Nudo 213	Nudo 214	Nudo 215	Nudo 216	Nudo 217	Nudo 218	Nudo 219	Nudo 220	Nudo 221
0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Nudo 222	Nudo 223	Nudo 224	Nudo 225	Nudo 226	Nudo 227	Nudo 228	Nudo 229	Nudo 230	Nudo 231	Nudo 232	Nudo 233	Nudo 234
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nudo 235	Nudo 236	Nudo 237	Nudo 238	Nudo 239	Nudo 240	Nudo 241	Nudo 242	Nudo 243	Nudo 244	Nudo 245	Nudo 246	Nudo 247
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
Nudo 248	Nudo 249	Nudo 250	Nudo 251	Nudo 252	Nudo 253	Nudo 254	Nudo 255	Nudo 256	Nudo 257	Nudo 258	Nudo 259	Nudo 260
0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Nudo 261	Nudo 262	Nudo 263	Nudo 264	Nudo 265	Nudo 266	Nudo 267	Nudo 268	Nudo 269	Nudo 270	Nudo 271	Nudo 272	Nudo 273
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1
Nudo 274	Nudo 275	Nudo 276	Nudo 277	Nudo 278	Nudo 279	Nudo 280	Nudo 281	Nudo 282	Nudo 283	Nudo 284	Nudo 285	Nudo 286
0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
Nudo 287	Nudo 288	Nudo 289	Nudo 290	Nudo 291	Nudo 292	Nudo 293	Nudo 294	Nudo 295	Nudo 296	Nudo 297	Nudo 298	Nudo 299
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1
Nudo 300	Nudo 301	Nudo 302	Nudo 303	Nudo 304	Nudo 305	Nudo 306	Nudo 307	Nudo 308	Nudo 309	Nudo 310	Nudo 311	Nudo 312
0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0
Nudo 313	Nudo 314	Nudo 315	Nudo 316	Nudo 317	Nudo 318	Nudo 319	Nudo 320	Nudo 321	Nudo 322	Nudo 323	Nudo 324	Nudo 325
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Nudo 326	Nudo 327	Nudo 328	Nudo 329	Nudo 330	Nudo 331	Nudo 332	Nudo 333	Nudo 334	Nudo 335	Nudo 336	Nudo 337	Nudo 338
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
Nudo 339	Nudo 340	Nudo 341	Nudo 342	Nudo 343	Nudo 344	Nudo 345	Nudo 346	Nudo 347	Nudo 348	Nudo 349	Nudo 350	Nudo 351
0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
Nudo 352	Nudo 353	Nudo 354	Nudo 355	Nudo 356	Nudo 357							
1	0	0	1	0	0							

D.1.1.4. Localización óptima de medidores de huecos con umbral $t < 0.7$ pu de la red EC-357

Tabla D.7 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 100 % de la red EC-357.

Localización óptima de medidores de la red EC-357 con un nivel de observabilidad del 100 % ($t < 0.7$ pu)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Nudo 118	Nudo 119	Nudo 120	Nudo 121	Nudo 122	Nudo 123	Nudo 124	Nudo 125	Nudo 126	Nudo 127	Nudo 128	Nudo 129	Nudo 130
1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
Nudo 131	Nudo 132	Nudo 133	Nudo 134	Nudo 135	Nudo 136	Nudo 137	Nudo 138	Nudo 139	Nudo 140	Nudo 141	Nudo 142	Nudo 143
1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1
Nudo 144	Nudo 145	Nudo 146	Nudo 147	Nudo 148	Nudo 149	Nudo 150	Nudo 151	Nudo 152	Nudo 153	Nudo 154	Nudo 155	Nudo 156
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Nudo 157	Nudo 158	Nudo 159	Nudo 160	Nudo 161	Nudo 162	Nudo 163	Nudo 164	Nudo 165	Nudo 166	Nudo 167	Nudo 168	Nudo 169
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Nudo 170	Nudo 171	Nudo 172	Nudo 173	Nudo 174	Nudo 175	Nudo 176	Nudo 177	Nudo 178	Nudo 179	Nudo 180	Nudo 181	Nudo 182
1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
Nudo 183	Nudo 184	Nudo 185	Nudo 186	Nudo 187	Nudo 188	Nudo 189	Nudo 190	Nudo 191	Nudo 192	Nudo 193	Nudo 194	Nudo 195
0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Nudo 196	Nudo 197	Nudo 198	Nudo 199	Nudo 200	Nudo 201	Nudo 202	Nudo 203	Nudo 204	Nudo 205	Nudo 206	Nudo 207	Nudo 208
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Nudo 209	Nudo 210	Nudo 211	Nudo 212	Nudo 213	Nudo 214	Nudo 215	Nudo 216	Nudo 217	Nudo 218	Nudo 219	Nudo 220	Nudo 221
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
Nudo 222	Nudo 223	Nudo 224	Nudo 225	Nudo 226	Nudo 227	Nudo 228	Nudo 229	Nudo 230	Nudo 231	Nudo 232	Nudo 233	Nudo 234
1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Nudo 235	Nudo 236	Nudo 237	Nudo 238	Nudo 239	Nudo 240	Nudo 241	Nudo 242	Nudo 243	Nudo 244	Nudo 245	Nudo 246	Nudo 247
1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Nudo 248	Nudo 249	Nudo 250	Nudo 251	Nudo 252	Nudo 253	Nudo 254	Nudo 255	Nudo 256	Nudo 257	Nudo 258	Nudo 259	Nudo 260
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Nudo 261	Nudo 262	Nudo 263	Nudo 264	Nudo 265	Nudo 266	Nudo 267	Nudo 268	Nudo 269	Nudo 270	Nudo 271	Nudo 272	Nudo 273
1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
Nudo 274	Nudo 275	Nudo 276	Nudo 277	Nudo 278	Nudo 279	Nudo 280	Nudo 281	Nudo 282	Nudo 283	Nudo 284	Nudo 285	Nudo 286
1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
Nudo 287	Nudo 288	Nudo 289	Nudo 290	Nudo 291	Nudo 292	Nudo 293	Nudo 294	Nudo 295	Nudo 296	Nudo 297	Nudo 298	Nudo 299
1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
Nudo 300	Nudo 301	Nudo 302	Nudo 303	Nudo 304	Nudo 305	Nudo 306	Nudo 307	Nudo 308	Nudo 309	Nudo 310	Nudo 311	Nudo 312
0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Nudo 313	Nudo 314	Nudo 315	Nudo 316	Nudo 317	Nudo 318	Nudo 319	Nudo 320	Nudo 321	Nudo 322	Nudo 323	Nudo 324	Nudo 325
0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
Nudo 326	Nudo 327	Nudo 328	Nudo 329	Nudo 330	Nudo 331	Nudo 332	Nudo 333	Nudo 334	Nudo 335	Nudo 336	Nudo 337	Nudo 338
1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
Nudo 339	Nudo 340	Nudo 341	Nudo 342	Nudo 343	Nudo 344	Nudo 345	Nudo 346	Nudo 347	Nudo 348	Nudo 349	Nudo 350	Nudo 351
0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1
Nudo 352	Nudo 353	Nudo 354	Nudo 355	Nudo 356	Nudo 357							
1	1	1	1	1	0							

Tabla D.8 – Vector de localización óptima de medidores de huecos de tensión con observabilidad del 95 % de la red EC-357.

Localización óptima de medidores de la red EC-357 con un nivel de observabilidad del 95 % ($t < 0.7$ pu)												
Nudo 1	Nudo 2	Nudo 3	Nudo 4	Nudo 5	Nudo 6	Nudo 7	Nudo 8	Nudo 9	Nudo 10	Nudo 11	Nudo 12	Nudo 13
1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1
Nudo 14	Nudo 15	Nudo 16	Nudo 17	Nudo 18	Nudo 19	Nudo 20	Nudo 21	Nudo 22	Nudo 23	Nudo 24	Nudo 25	Nudo 26
0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
Nudo 27	Nudo 28	Nudo 29	Nudo 30	Nudo 31	Nudo 32	Nudo 33	Nudo 34	Nudo 35	Nudo 36	Nudo 37	Nudo 38	Nudo 39
0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1
Nudo 40	Nudo 41	Nudo 42	Nudo 43	Nudo 44	Nudo 45	Nudo 46	Nudo 47	Nudo 48	Nudo 49	Nudo 50	Nudo 51	Nudo 52
1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Nudo 53	Nudo 54	Nudo 55	Nudo 56	Nudo 57	Nudo 58	Nudo 59	Nudo 60	Nudo 61	Nudo 62	Nudo 63	Nudo 64	Nudo 65
0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Nudo 66	Nudo 67	Nudo 68	Nudo 69	Nudo 70	Nudo 71	Nudo 72	Nudo 73	Nudo 74	Nudo 75	Nudo 76	Nudo 77	Nudo 78
1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
Nudo 79	Nudo 80	Nudo 81	Nudo 82	Nudo 83	Nudo 84	Nudo 85	Nudo 86	Nudo 87	Nudo 88	Nudo 89	Nudo 90	Nudo 91
0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
Nudo 92	Nudo 93	Nudo 94	Nudo 95	Nudo 96	Nudo 97	Nudo 98	Nudo 99	Nudo 100	Nudo 101	Nudo 102	Nudo 103	Nudo 104
1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1
Nudo 105	Nudo 106	Nudo 107	Nudo 108	Nudo 109	Nudo 110	Nudo 111	Nudo 112	Nudo 113	Nudo 114	Nudo 115	Nudo 116	Nudo 117
0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
Nudo 118	Nudo 119	Nudo 120	Nudo 121	Nudo 122	Nudo 123	Nudo 124	Nudo 125	Nudo 126	Nudo 127	Nudo 128	Nudo 129	Nudo 130
1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
Nudo 131	Nudo 132	Nudo 133	Nudo 134	Nudo 135	Nudo 136	Nudo 137	Nudo 138	Nudo 139	Nudo 140	Nudo 141	Nudo 142	Nudo 143
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1
Nudo 144	Nudo 145	Nudo 146	Nudo 147	Nudo 148	Nudo 149	Nudo 150	Nudo 151	Nudo 152	Nudo 153	Nudo 154	Nudo 155	Nudo 156
0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
Nudo 157	Nudo 158	Nudo 159	Nudo 160	Nudo 161	Nudo 162	Nudo 163	Nudo 164	Nudo 165	Nudo 166	Nudo 167	Nudo 168	Nudo 169
1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
Nudo 170	Nudo 171	Nudo 172	Nudo 173	Nudo 174	Nudo 175	Nudo 176	Nudo 177	Nudo 178	Nudo 179	Nudo 180	Nudo 181	Nudo 182
1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0
Nudo 183	Nudo 184	Nudo 185	Nudo 186	Nudo 187	Nudo 188	Nudo 189	Nudo 190	Nudo 191	Nudo 192	Nudo 193	Nudo 194	Nudo 195
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
Nudo 196	Nudo 197	Nudo 198	Nudo 199	Nudo 200	Nudo 201	Nudo 202	Nudo 203	Nudo 204	Nudo 205	Nudo 206	Nudo 207	Nudo 208
0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0
Nudo 209	Nudo 210	Nudo 211	Nudo 212	Nudo 213	Nudo 214	Nudo 215	Nudo 216	Nudo 217	Nudo 218	Nudo 219	Nudo 220	Nudo 221
1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
Nudo 222	Nudo 223	Nudo 224	Nudo 225	Nudo 226	Nudo 227	Nudo 228	Nudo 229	Nudo 230	Nudo 231	Nudo 232	Nudo 233	Nudo 234
1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Nudo 235	Nudo 236	Nudo 237	Nudo 238	Nudo 239	Nudo 240	Nudo 241	Nudo 242	Nudo 243	Nudo 244	Nudo 245	Nudo 246	Nudo 247
0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Nudo 248	Nudo 249	Nudo 250	Nudo 251	Nudo 252	Nudo 253	Nudo 254	Nudo 255	Nudo 256	Nudo 257	Nudo 258	Nudo 259	Nudo 260
1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
Nudo 261	Nudo 262	Nudo 263	Nudo 264	Nudo 265	Nudo 266	Nudo 267	Nudo 268	Nudo 269	Nudo 270	Nudo 271	Nudo 272	Nudo 273
1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
Nudo 274	Nudo 275	Nudo 276	Nudo 277	Nudo 278	Nudo 279	Nudo 280	Nudo 281	Nudo 282	Nudo 283	Nudo 284	Nudo 285	Nudo 286
0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0
Nudo 287	Nudo 288	Nudo 289	Nudo 290	Nudo 291	Nudo 292	Nudo 293	Nudo 294	Nudo 295	Nudo 296	Nudo 297	Nudo 298	Nudo 299
0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
Nudo 300	Nudo 301	Nudo 302	Nudo 303	Nudo 304	Nudo 305	Nudo 306	Nudo 307	Nudo 308	Nudo 309	Nudo 310	Nudo 311	Nudo 312
0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1
Nudo 313	Nudo 314	Nudo 315	Nudo 316	Nudo 317	Nudo 318	Nudo 319	Nudo 320	Nudo 321	Nudo 322	Nudo 323	Nudo 324	Nudo 325
0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Nudo 326	Nudo 327	Nudo 328	Nudo 329	Nudo 330	Nudo 331	Nudo 332	Nudo 333	Nudo 334	Nudo 335	Nudo 336	Nudo 337	Nudo 338
1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
Nudo 339	Nudo 340	Nudo 341	Nudo 342	Nudo 343	Nudo 344	Nudo 345	Nudo 346	Nudo 347	Nudo 348	Nudo 349	Nudo 350	Nudo 351
0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
Nudo 352	Nudo 353	Nudo 354	Nudo 355	Nudo 356	Nudo 357							
1	0	1	1	1	0							