

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Industrial

### Análisis de la detección e identificación de errores en los parámetros eléctricos de redes eléctricas

Autor: Joaquín de Ory Carreto

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

**Dpto. Ingeniería Eléctrica**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **Análisis de la detección e identificación de errores en los parámetros eléctricos de redes eléctricas**

Autor:

Joaquín de Ory Carreto

Tutor:

Antonio de la Villa Jaén

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera: Análisis de la detección e identificación de errores en los parámetros eléctricos de  
redes eléctricas

Autor: Joaquín de Ory Carreto

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

*A mi familia, profesores y amigos*





# Agradecimientos

---

A Don Antonio de la Villa Jaén por su tiempo y confianza en mí para desarrollar este trabajo.

A mi familia por su continuo apoyo y cariño.

*Joaquín de Ory Carreto*

*Sevilla, 2018*



La herramienta de Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia permite ser ampliada con la capacidad para poder evaluar la calidad de los parámetros eléctricos de líneas y transformadores de una red. Para ello, se empleará un estimador de estado que incorpora la metodología de ampliación del vector de estado. En esta metodología, los parámetros a estimar se incorporan como nuevas variables de estado al vector de estado.

Mediante la realización del presente trabajo se persigue acotar las condiciones que propician una adecuada detección e identificación de errores en este tipo de parámetros.



# Abstract

---

The State Power Systems Power Estimate tool allows to be expanded with the capacity to evaluate the quality of the electrical parameters of lines and transformers of a network. For this, a state estimator that incorporates the methodology of extension of the state vector will be used. In this methodology, the parameters to be estimated are incorporated as new state variables to the state vector.

By means of the realization of the present work, the aim is to limit the conditions that favor an adequate detection and identification of errors in this type of parameters.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xxvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xxix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Herramienta de análisis de la calidad de parámetros</b>	<b>5</b>
2.1. Descripción del programa de estimación de parámetros	5
2.2. Simulaciones de validación	7
<b>3 Estudio de valores de los parámetros eléctricos</b>	<b>11</b>
3.1 Plan de trabajo	11
3.1.1 Tipos de parámetros analizados	11
3.1.2 Niveles de tensión	11
3.1.3 Valores de los parámetros eléctricos	12
3.1.4 Nivel de carga de líneas y transformadores	12
3.1.5 Número de escenarios considerados	12
3.1.6 Topología de la rama	12
3.1.7 Redundancia de medidas	12
3.1.8 Peso de las medidas	13
3.2 Estudio de valores típicos en líneas y transformadores	13
3.2.1 Parámetros eléctricos en líneas para cada nivel de tensión	13
3.2.2 Parámetros eléctricos en transformadores en función de la potencia nominal	22
3.3 Estudio de ratios $R/X$ típicos por cada nivel de tensión	26
<b>4 Simulaciones en líneas</b>	<b>29</b>
4.1 Análisis de los parámetros eléctricos en ramas	29
4.1.1 Análisis de reactancia serie	30
4.1.1.1 Análisis del valor del parámetro eléctrico	31
4.1.1.2 Cuestión del nivel de carga de la línea	34
4.1.1.3 Cuestión de número de escenarios considerados	36
4.1.1.4 Cuestión de redundancia de medidas.	36
4.1.1.5 Cuestión de Factor de Potencia	37
4.1.1.6 Cuestión de comportamiento simétrico	37
4.1.1.7 Cuestión de nivel de tensión	40
4.1.1.8 Cuestión de topología de rama	42
4.1.2 Análisis de resistencia serie	44

4.1.2.1	Análisis del valor del parámetro eléctrico	45
4.1.2.2	Cuestión del nivel de carga de la línea	47
4.1.2.3	Cuestión del número de escenarios considerados	48
4.1.2.4	Cuestión de redundancia de medidas	49
4.1.2.5	Cuestión del factor de potencia	49
4.1.2.6	Cuestión de comportamiento simétrico	50
4.1.2.7	Cuestión de nivel de tensión	52
4.1.2.8	Cuestión de topología de rama	55
4.1.3	Análisis de susceptancia paralelo	56
4.1.3.1	Análisis del valor del parámetro eléctrico	58
4.1.3.2	Cuestión del nivel de carga de la línea	59
4.1.3.3	Cuestión del número de escenarios considerados	61
4.1.3.4	Cuestión de redundancia de medidas	61
4.1.3.5	Cuestión del factor de potencia	62
4.1.3.6	Cuestión de comportamiento simétrico	63
4.1.3.7	Cuestión de nivel de tensión	65
4.1.3.8	Cuestión de topología de rama	68
4.1.4	Análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie	69
4.1.4.1	Análisis del valor del parámetro eléctrico	72
4.1.4.2	Cuestión del nivel de carga de la línea	75
4.1.4.3	Cuestión del número de escenarios considerados	76
4.1.4.4	Cuestión de redundancia de medidas	77
4.1.4.5	Cuestión del factor de potencia	78
4.1.4.6	Cuestión de comportamiento simétrico	79
4.1.4.7	Cuestión de nivel de tensión	82
4.1.4.8	Cuestión de topología de rama	85
4.1.5	Análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie, y de susceptancia paralelo	86
4.1.5.1	Análisis del valor del parámetro eléctrico	89
4.1.5.2	Cuestión del nivel de carga de la línea	90
4.1.5.3	Cuestión del número de escenarios considerados	94
4.1.5.4	Cuestión de redundancia de medidas	94
4.1.5.5	Cuestión del factor de potencia	95
4.1.5.6	Cuestión de comportamiento simétrico	96
4.1.5.7	Cuestión de nivel de tensión	100
4.1.5.8	Cuestión de topología de rama	102
<b>5</b>	<b>Simulaciones en transformadores</b>	<b>105</b>
5.1	<i>Análisis de los parámetros eléctricos en transformadores</i>	105
5.1.1	Análisis de reactancia	105
5.1.1.1	Cuestión de potencia nominal	107
5.1.1.2	Cuestión de la relación de transformación	107
5.1.1.3	Cuestión de factor de potencia	110
5.1.1.4	Cuestión de topología	110
5.1.2	Análisis de resistencia	111
5.1.2.1	Cuestión de potencia nominal	112
5.1.2.2	Cuestión de la relación de transformación	113
5.1.2.3	Cuestión de factor de potencia	115
5.1.3	Análisis simultáneo de resistencia y reactancia	116
5.1.3.1	Cuestión de potencia nominal	117
5.1.3.2	Cuestión de la relación de transformación	118
5.1.3.3	Cuestión de factor de potencia	121
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>123</b>
	<b>Anexo A</b>	<b>127</b>



**Referencias**

**133**

**Glosario**

**135**



# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1-1: Influencia de la multiplicidad de escenarios</i>	3
<i>Tabla 2-1: Tipos de medidas en el software de análisis</i>	6
<i>Tabla 3-1: Desviaciones típicas de medidas de potencia activa/reactiva en función del nivel de tensión</i>	13
<i>Tabla 3-2: Parámetros eléctricos en líneas para cada nivel de tensión</i>	20
<i>Tabla 3-3: Parámetros eléctricos en transformadores con relación de transformación 400/220 kV</i>	23
<i>Tabla 3-4: Parámetros eléctricos en transformadores con relación de transformación 132/66 kV</i>	24
<i>Tabla 3-5: Parámetros eléctricos en transformadores con relación de transformación 45/15 kV</i>	25
<i>Tabla 3-6: Parámetros eléctricos en transformadores en función de la potencia nominal</i>	26
<i>Tabla 3-7: Ratios R/X habituales de las líneas por cada nivel de tensión</i>	27
<i>Tabla 4-1: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie bajo condiciones iniciales</i>	30
<i>Tabla 4-2: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 15 %</i>	31
<i>Tabla 4-3: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	31
<i>Tabla 4-4: Residuos normalizados asociados al valor medio de la reactancia serie erróneo</i>	32
<i>Tabla 4-5: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 20 %</i>	32
<i>Tabla 4-6: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	32
<i>Tabla 4-7: Residuos normalizados asociados al valor pequeño de la reactancia serie erróneo</i>	33
<i>Tabla 4-8: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 65 %</i>	33
<i>Tabla 4-9: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	33
<i>Tabla 4-10: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 5 %</i>	34
<i>Tabla 4-11: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 40 %</i>	34
<i>Tabla 4-12: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 50 %</i>	34
<i>Tabla 4-13: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 60 %</i>	34
<i>Tabla 4-14: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA</i>	35
<i>Tabla 4-15: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA</i>	35
<i>Tabla 4-16: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el número de escenarios considerados</i>	36
<i>Tabla 4-17: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar la redundancia de medidas</i>	36
<i>Tabla 4-18: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el factor de potencia</i>	37
<i>Tabla 4-19: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie con errores por exceso y defecto</i>	38
<i>Tabla 4-20: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 10%</i>	38

<i>Tabla 4-21: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por exceso del 10%</i>	38
<i>Tabla 4-22: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 10%</i>	39
<i>Tabla 4-23: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por defecto del 10%</i>	39
<i>Tabla 4-24: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie en una línea de 45 kV</i>	40
<i>Tabla 4-25: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	40
<i>Tabla 4-26: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 10 %</i>	41
<i>Tabla 4-27: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie en una línea de 400 kV</i>	41
<i>Tabla 4-28: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar la topología de rama</i>	43
<i>Tabla 4-29: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie bajo condiciones iniciales</i>	44
<i>Tabla 4-30: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 25 %</i>	44
<i>Tabla 4-31: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	45
<i>Tabla 4-32: Residuos normalizados asociados al valor medio de la resistencia serie erróneo</i>	45
<i>Tabla 4-33: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	46
<i>Tabla 4-34: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 45 %</i>	46
<i>Tabla 4-35: Residuos normalizados asociados al valor pequeño de la reactancia serie erróneo</i>	46
<i>Tabla 4-36: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA</i>	47
<i>Tabla 4-37: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA</i>	48
<i>Tabla 4-38: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el número de escenarios considerados</i>	48
<i>Tabla 4-39: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar la redundancia de medidas</i>	49
<i>Tabla 4-40: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el factor de potencia</i>	49
<i>Tabla 4-41: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie con errores por exceso y defecto</i>	50
<i>Tabla 4-42: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 10%</i>	51
<i>Tabla 4-43: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por exceso del 10%</i>	51
<i>Tabla 4-44: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 10%</i>	51
<i>Tabla 4-45: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por defecto del 10%</i>	51
<i>Tabla 4-46: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie en una línea de 45 kV</i>	53
<i>Tabla 4-47: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	53
<i>Tabla 4-48: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 10 %</i>	53

<i>Tabla 4-49: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie en una línea de 400 kV</i>	54
<i>Tabla 4-50: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar la topología de rama</i>	55
<i>Tabla 4-51: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo bajo condiciones iniciales</i>	57
<i>Tabla 4-52: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 50%</i>	57
<i>Tabla 4-53: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	57
<i>Tabla 4-54: Residuos normalizados asociados al valor medio erróneo de la susceptancia paralelo</i>	58
<i>Tabla 4-55: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	58
<i>Tabla 4-56: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 95 %</i>	59
<i>Tabla 4-57: Residuos normalizados asociados al valor pequeño erróneo de la susceptancia paralelo</i>	59
<i>Tabla 4-58: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA</i>	60
<i>Tabla 4-59: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 70 %</i>	60
<i>Tabla 4-60: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA</i>	60
<i>Tabla 4-61: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el número de escenarios considerados</i>	61
<i>Tabla 4-62: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar la redundancia de medidas</i>	62
<i>Tabla 4-63: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el factor de potencia</i>	62
<i>Tabla 4-64: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo con errores por exceso y defecto</i>	63
<i>Tabla 4-65: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 25%</i>	64
<i>Tabla 4-66: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error por exceso del 25%</i>	64
<i>Tabla 4-67: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 25%</i>	64
<i>Tabla 4-68: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error por defecto del 25%</i>	64
<i>Tabla 4-69: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo en una línea de 45 kV</i>	66
<i>Tabla 4-70: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	66
<i>Tabla 4-71: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 35 %</i>	66
<i>Tabla 4-72: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo en una línea de 400 kV</i>	67
<i>Tabla 4-73: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar la topología de rama</i>	69
<i>Tabla 4-74: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie bajo condiciones iniciales</i>	70
<i>Tabla 4-75: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	70
<i>Tabla 4-76: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 20 %</i>	70

<i>Tabla 4-77: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 20 %</i>	71
<i>Tabla 4-78: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	71
<i>Tabla 4-79: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 25 %</i>	71
<i>Tabla 4-80: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación</i>	72
<i>Tabla 4-81: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 25 %</i>	72
<i>Tabla 4-82: Residuos normalizados asociados al valor medio erróneo de la reactancia y resistencia serie</i>	73
<i>Tabla 4-83: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	73
<i>Tabla 4-84: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 55 %</i>	73
<i>Tabla 4-85: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación</i>	74
<i>Tabla 4-86: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 55 %</i>	74
<i>Tabla 4-87: Residuos normalizados asociados al valor pequeño erróneo de la reactancia y resistencia serie</i>	74
<i>Tabla 4-88: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA</i>	75
<i>Tabla 4-89: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA</i>	76
<i>Tabla 4-90: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el número de escenarios considerados</i>	76
<i>Tabla 4-91: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar la redundancia de medidas</i>	77
<i>Tabla 4-92: Máximos residuos normalizados obtenidos en la primera iteración al introducir un error del 15% con redundancia muy reducida</i>	77
<i>Tabla 4-93: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 15% con redundancia muy reducida</i>	78
<i>Tabla 4-94: Máximos residuos normalizados obtenidos en la primera iteración al introducir un error del 50% con redundancia muy reducida</i>	78
<i>Tabla 4-95: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 50% con redundancia muy reducida</i>	78
<i>Tabla 4-96: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el factor de potencia</i>	79
<i>Tabla 4-97: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia y reactancia serie con errores por exceso y defecto</i>	79
<i>Tabla 4-98: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 15%</i>	80
<i>Tabla 4-99: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por exceso del 15%</i>	80
<i>Tabla 4-100: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 15%</i>	80
<i>Tabla 4-101: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por exceso del 15%</i>	81
<i>Tabla 4-102: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 15%</i>	81
<i>Tabla 4-103: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por defecto del 15%</i>	81
<i>Tabla 4-104: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir</i>	

<i>un error por defecto del 15%</i>	81
<i>Tabla 4-105: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por defecto del 15%</i>	82
<i>Tabla 4-106: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie en una línea de 45 kV</i>	83
<i>Tabla 4-107: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	83
<i>Tabla 4-108: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 10 %</i>	84
<i>Tabla 4-109: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación</i>	84
<i>Tabla 4-110: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 10 %</i>	84
<i>Tabla 4-111: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie en una línea de 400 kV</i>	85
<i>Tabla 4-112: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar la topología de rama</i>	86
<i>Tabla 4-113: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo bajo condiciones iniciales</i>	87
<i>Tabla 4-114: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	87
<i>Tabla 4-115: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 10 %</i>	87
<i>Tabla 4-116: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	88
<i>Tabla 4-117: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 20 %</i>	88
<i>Tabla 4-118: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación</i>	88
<i>Tabla 4-119: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 20 %</i>	89
<i>Tabla 4-120: Residuos normalizados asociados al valor medio erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo</i>	89
<i>Tabla 4-121: Residuos normalizados asociados al valor pequeño erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo</i>	90
<i>Tabla 4-122: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA</i>	90
<i>Tabla 4-123: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	91
<i>Tabla 4-124: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 85 %</i>	91
<i>Tabla 4-125: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación</i>	91
<i>Tabla 4-126: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 85%</i>	92
<i>Tabla 4-127: Máximos residuos normalizados en la tercera iteración del proceso de estimación</i>	92
<i>Tabla 4-128: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 85%</i>	92
<i>Tabla 4-129: Resultados de la estimación de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir un error del 85% con 5 escenarios al 25% de carga</i>	92
<i>Tabla 4-130: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA</i>	93
<i>Tabla 4-131: Resultados de la estimación de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir un error del 85% con 5 escenarios con distintos niveles de carga</i>	93
<i>Tabla 4-132: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el número de escenarios considerados</i>	94
<i>Tabla 4-133: Resultados de la estimación de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir un error del 70% con 64 escenarios iguales</i>	94

<i>Tabla 4-134: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar la redundancia de medidas</i>	95
<i>Tabla 4-135: Resultados de la estimación de la reactancia serie, susceptancia paralelo y resistencia serie con un error de 50%, 70% y 90% respectivamente, con redundancia muy reducida</i>	95
<i>Tabla 4-136: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el factor de potencia</i>	95
<i>Tabla 4-137: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo con errores por exceso y defecto</i>	96
<i>Tabla 4-138: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 35%</i>	97
<i>Tabla 4-139: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por exceso del 35%</i>	97
<i>Tabla 4-140: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 35%</i>	98
<i>Tabla 4-141: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por exceso del 35%</i>	98
<i>Tabla 4-142: Máximos residuos normalizados en la tercera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 35%</i>	98
<i>Tabla 4-143: Resultado de la estimación de la susceptancia al introducir un error por exceso del 35%</i>	98
<i>Tabla 4-144: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 35%</i>	99
<i>Tabla 4-145: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por defecto del 35%</i>	99
<i>Tabla 4-146: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 35%</i>	99
<i>Tabla 4-147: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por defecto del 35%</i>	99
<i>Tabla 4-148: Máximos residuos normalizados en la tercera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 35%</i>	100
<i>Tabla 4-149: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error por defecto del 35%</i>	100
<i>Tabla 4-150: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo en una línea de 45 kV</i>	101
<i>Tabla 4-151: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo en una línea de 400 kV</i>	102
<i>Tabla 4-152: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar la topología de rama</i>	103
<i>Tabla 5-1: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia bajo condiciones iniciales</i>	106
<i>Tabla 5-2: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 25 %</i>	106
<i>Tabla 5-3: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	106
<i>Tabla 5-4: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %</i>	107
<i>Tabla 5-5: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia de un transformador de 132/66 kV con potencia nominal 31.5 MVA</i>	107
<i>Tabla 5-6: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %</i>	107



<i>Tabla 5-7: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia de un transformador de 400/220 kV</i>	108
<i>Tabla 5-8: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	108
<i>Tabla 5-9: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 25 %</i>	109
<i>Tabla 5-10: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia de un transformador de 45/15 kV</i>	109
<i>Tabla 5-11: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	109
<i>Tabla 5-12: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 10 %</i>	110
<i>Tabla 5-13: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia al cuestionar el factor de potencia</i>	110
<i>Tabla 5-14: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia al cuestionar la topología de rama</i>	111
<i>Tabla 5-15: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia bajo condiciones iniciales</i>	112
<i>Tabla 5-16: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %</i>	112
<i>Tabla 5-17: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 132/66 kV con potencia nominal 31.5 MVA</i>	112
<i>Tabla 5-18: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %</i>	113
<i>Tabla 5-19: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 400/220 kV</i>	113
<i>Tabla 5-20: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %</i>	114
<i>Tabla 5-21: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %</i>	114
<i>Tabla 5-22: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 45/15 kV</i>	114
<i>Tabla 5-23: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	115
<i>Tabla 5-24: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %</i>	115
<i>Tabla 5-25: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia al cuestionar el factor de potencia</i>	115
<i>Tabla 5-26: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 45/15 kV al cuestionar el factor de potencia</i>	116
<i>Tabla 5-27: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia bajo condiciones iniciales</i>	116
<i>Tabla 5-28: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %</i>	117
<i>Tabla 5-29: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %</i>	117
<i>Tabla 5-30: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 132/66 kV con potencia nominal 31.5 MVA</i>	117
<i>Tabla 5-31: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %</i>	118
<i>Tabla 5-32: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %</i>	118
<i>Tabla 5-33: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 400/220 kV</i>	118
<i>Tabla 5-34: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 25 %</i>	119
<i>Tabla 5-35: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 45/15 kV</i>	119
<i>Tabla 5-36: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación</i>	120

<i>Tabla 5-37: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 25 %</i>	120
<i>Tabla 5-38: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación</i>	120
<i>Tabla 5-39: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %</i>	120
<i>Tabla 5-40: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia al cuestionar el factor de potencia</i>	121
<i>Tabla 5-41: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 45/15 kV al cuestionar el factor de potencia</i>	121
<i>Tabla 6-1: Resultados de la detección de errores en la reactancia serie de líneas de distintos niveles de tensión, al introducir un error del 15%</i>	124
<i>Tabla A-1: Niveles de tensión de los nudos de la red mallada de 14 nudos</i>	128
<i>Tabla A-2: Valores de los parámetros eléctricos en la red mallada de 14 nudos</i>	129
<i>Tabla A-3: Niveles de tensión de los nudos de la red radial de 6 nudos</i>	130
<i>Tabla A-4: Valores de los parámetros eléctricos en la red radial de 6 nudos</i>	131

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura 2-1: Diagrama unifilar de la red IEEE de 14 nudos</i>	7
<i>Figura 2-2: Resultados de la simulación de validación sin errores en los parámetros</i>	8
<i>Figura 2-3: Resultados de la simulación de validación sin errores en los parámetros</i>	8
<i>Figura 3-1: Modelo pi de una línea</i>	14
<i>Figura 3-2: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 45 kV</i>	14
<i>Figura 3-3: Potencias nominales en líneas de 45 kV</i>	15
<i>Figura 3-4: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 66 kV</i>	15
<i>Figura 3-5: Potencias nominales en líneas de 66 kV</i>	16
<i>Figura 3-6: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 132 kV</i>	16
<i>Figura 3-7: Potencias nominales en líneas de 132 kV</i>	17
<i>Figura 3-8: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 220 kV</i>	17
<i>Figura 3-9: Potencias nominales en líneas de 220 kV</i>	18
<i>Figura 3-10: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 400 kV</i>	18
<i>Figura 3-11: Potencias nominales en líneas de 400 kV</i>	19
<i>Figura 3-12: Valores de R en líneas de distintos niveles de tensión</i>	21
<i>Figura 3-13: Valores de X en líneas de distintos niveles de tensión</i>	21
<i>Figura 3-14: Valores de B paralelo en líneas de distintos niveles de tensión</i>	22
<i>Figura 3-15: Potencias nominales en transformadores con relación de transformación 400/220 kV</i>	23
<i>Figura 3-16: Potencias nominales en transformadores con relación de transformación 132/66 kV</i>	23
<i>Figura 3-17: Potencias nominales en transformadores con relación de transformación 45/15 kV</i>	24
<i>Figura 3-18: Valores de R en transformadores con relación de transformación 45/15 kV</i>	25
<i>Figura 3-19: Valores de X en transformadores con relación de transformación 45/15 kV</i>	25
<i>Figura 3-20: Ratios R/X de las líneas por cada nivel de tensión</i>	27
<i>Figura 3-21: Ratios R/X de los transformadores con relación de transformación 45/15 kV</i>	28
<i>Figura 4-1: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación de la reactancia serie</i>	39
<i>Figura 4-2: Resultados de cuestionar el nivel de tensión de la rama en la estimación de la reactancia serie</i>	42
<i>Figura 4-3: Resultados de cuestionar la topología de rama en la estimación de la reactancia serie</i>	43
<i>Figura 4-4: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación de la resistencia serie</i>	52

<i>Figura 4-5: Resultados de cuestionar el nivel de tensión de la rama en la estimación de la resistencia serie</i>	54
<i>Figura 4-6: Resultados de cuestionar la topología de rama en la estimación de la resistencia serie</i>	56
<i>Figura 4-7: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación de la susceptancia paralelo</i>	65
<i>Figura 4-8: Resultados de cuestionar el nivel de tensión de la rama en la estimación de la susceptancia paralelo</i>	68
<i>Figura 4-9: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación simultánea de resistencia y reactancia serie</i>	82
<i>Figura 4-10: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación simultánea de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo</i>	97
<i>Figura 6-1: Resultados de la detección de errores en la reactancia serie de líneas de distintos niveles de tensión, al introducir un error del 15%</i>	125
<i>Figura 6-2: Resultados de la detección de errores en la reactancia serie (en ohmios) de líneas de distintos niveles de tensión, al introducir un error del 15%</i>	125
<i>Figura A-1: Esquema unifilar de la red mallada de ensayo en el estudio de parámetros</i>	127
<i>Figura A-2: Esquema unifilar de la red radial de ensayo en el estudio de parámetros</i>	130

# Notación

---

$m$	Número de medidas en la red
$z$	Vector de medidas de la red
$n$	Número de nudos del sistema
$\sigma$	Desviación típica o estándar
$e$	Error de la medida
$h(x)$	Función que relaciona la medida con el vector de estado
$W$	Matriz de pesos o de ponderación
$x$	Vector de estado
$P$	Potencia activa
$Q$	Potencia reactiva
$V$	Valor eficaz de la tensión
R.N.	Residuo normalizado
$pu$	valor por unidad
f.d.p.	Factor de potencia
[E]	Parámetro/Medida identificado como erróneo



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de la estimación de estado es estimar las tensiones complejas óptimas en todos los nudos de un sistema eléctrico de potencia. Para lograrlo, realiza un análisis matemático en base a los valores de los parámetros de diseño de los componentes de la red (resistencia, reactancia, susceptancia, tomas de transformadores, etc.), la información topológica y un conjunto de medidas de varios tipos:

- **Medidas ordinarias:** Entre las que se incluyen los módulos de las tensiones e inyecciones de potencia activa y reactiva en los nudos, y los flujos de potencia activa y reactiva en las líneas.
- **Pseudo-medidas:** Valores basados en datos históricos o predicciones. Son utilizados en zonas para mejorar la redundancia de medidas en aquellas en las que sea necesario.
- **Medidas virtuales:** Valores impuestos por restricciones de la propia red.

En una red de  $n$  nudos, el vector de estado posee  $2n$  elementos, por lo que las medidas se relacionan con el vector de estado mediante:

$$z = h(x) + e$$

Siendo:

- $z$ , vector de  $m$  medidas. A cada uno de sus componentes se le asigna un determinado *peso*  $w_i$  inversa de su varianza:

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

A través de él, damos mayor peso a las medidas más exactas, es decir, aquellas con menor desviación típica. El conjunto de pesos de las medidas forma la matriz  $W$ , denominada *matriz de pesos* o *matriz de ponderación*, inversa de la matriz de covarianza.

La matriz  $W$  es diagonal al considerar que los errores de las medidas son variables aleatorias independientes.

- $h(x)$ , la función que relaciona la medida  $i$  con el vector de estado.
- $e$ , el error asociado a la medida  $i$ .

Es imprescindible que se haya realizado un número suficiente de medidas y estén geográficamente bien distribuidas en la red. De esta forma es posible obtener el estado estimado y se dice que la red es *observable*.

Además del estado de la red, el estimador también obtiene valores estimados de las magnitudes medidas, por

lo que permite evaluar la exactitud con la que han sido tomadas. A la diferencia entre el valor medido y el estimado se conoce como *residuo de la medida*.

Es común que los distintos sistemas de medida se vean afectados por la inexactitud en la calibración, ruido aleatorio por el sistema de comunicaciones o defectos en los equipos, por lo que las medidas ordinarias siempre llevan asociado un cierto error. Las pseudo-medidas suelen ser mucho menos precisas que las anteriores, al contrario que las medidas virtuales, que se consideran libres de errores.

Antes de comenzar el proceso de estimación, se descartan los posibles errores no gaussianos o inconsistencias en el conjunto de medidas a partir de un filtrado previo. Sin embargo, es posible que éstos no sean lo suficientemente grandes como para ser detectados en el prefiltrado y que por tanto son necesarios identificar y eliminar. Con objeto de detectarlos, los residuos se usan para valorar la existencia o no de datos erróneos en las medidas.

Es condición indispensable la existencia de redundancia de medidas para poder detectar e identificar medidas erróneas. Se dice que hay redundancia cuando el número de medidas es mayor que el de variables de estado del sistema ( $m > 2n$ ). Es por ello que las medidas se pueden clasificar en dos grupos:

- **Críticas:** Cuya eliminación hace que el sistema no sea observable. Sus residuos son igual a cero y por tanto sus errores no pueden ser detectados ni identificados.
- **Redundantes:** Caso contrario al anterior.

Actualmente, la técnica convencional más empleada para detectar e identificar errores es el denominado “*Test del mayor residuo normalizado*”. En este procedimiento se utilizan los residuos normalizados, que poseen distribución normal con media nula y desviación típica unidad. Normalizando el residuo de una medida  $i$ :

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}}$$

donde  $\Omega_{ii}$ , es la varianza de la medida  $i$ .

Se considera que para  $|r_i^N| < 3$  los residuos tienen un valor aceptable de acuerdo a dicha distribución. En el caso de que el mayor residuo no cumpla lo anterior, se descarta la correspondiente medida, y se vuelve a repetir el proceso de estimación, identificación y eliminación hasta que todos los residuos cumplan  $|r_i^N| < 3$ .

Si hay una sola medida no crítica errónea, esta técnica garantiza que el mayor residuo normalizado corresponde a dicha medida.

Los algoritmos que se utilizan comúnmente para la estimación de estado, procesan el conjunto de medidas disponibles suponiendo que los parámetros de las líneas (resistencia, reactancia, susceptancia, etc.), transformadores (tomas) y el estado de los interruptores son conocidos.

Sin embargo, los parámetros anteriores pueden no ser exactos debido a diversas situaciones como:

- Una calibración defectuosa.
- La información dada por el fabricante puede ser errónea.
- Desigualdad entre la longitud de diseño y la real de la línea.
- Modificaciones de las tomas de transformadores que no consten en el centro de control.



Normalmente, los errores topológicos son fácilmente detectables, debido a las incoherencias producidas en las medidas estimadas. Por el contrario, los errores en las impedancias de las ramas o tomas son mucho menos visibles y pueden permanecer durante largos periodos de tiempo sin ser detectados.

Entre otras consecuencias, esto puede desencadenar en una mala detección de medidas erróneas que no lo son en la realidad (debido a su inconsistencia con los parámetros erróneos), o producir un efecto realmente nocivo a las actividades implicadas en la operación de la red.

De esta manera, es posible aprovechar el proceso de estimación de estado para estimar parámetros y evaluar su calidad. Para poder estimarlos, hay que realizar previamente una fase de identificación de parámetros sospechosos basándose fundamentalmente en el estudio de los residuos normalizados. Una vez identificados, se procede a su estimación.

Existen varios métodos de estimación de parámetros, de entre los cuáles, se ha empleado en este trabajo el método de “*ampliación del vector de estado*” [1].

Tal y como su nombre indica, en este método se incluyen en el vector de estado los parámetros identificados erróneos como variables independientes, por lo que se obtienen tanto el estado de la red como los parámetros estimados.

Como ya se sabe, para que se pueda realizar la estimación de estado en un sistema eléctrico de potencia, debe de existir redundancia, es decir,  $m > n$ . Ciertamente, si se aumenta el número de escenarios en el proceso de estimación, se incrementa el nivel de redundancia como se puede ver a continuación [1]:

	<i>Medidas</i>	<i>Variables de Estado</i>	
<i>1 escenario sin estimación de parámetros</i>	$m = n_z$	$n = 2N$	$m > n$
<i>1 escenario con estimación de parámetros</i>	$m' = n_z + n_p$	$n' = 2N + n_p$	$m' > n'$
<i>X escenarios con estimación</i>	$m' = x \cdot n_z + n_p$	$n' = x \cdot 2N + n_p$	$m' \gg n'$

*Tabla 1-1: Influencia de la multiplicidad de escenarios*

Por lo que, teniendo en cuenta que los valores en los parámetros son esencialmente permanentes para todos los escenarios, resulta de gran importancia tener múltiples escenarios, dado que aumentan significativamente la redundancia.

Finalmente, resumiendo: el alcance de este estudio se va a centrar en analizar qué condiciones permiten una adecuada detección e identificación de errores en los parámetros eléctricos de líneas y transformadores a través de la estimación de estado. Para ello, se utilizará un software informático dedicado a la estimación de estado y parámetros, y una metodología de trabajo, que se explicarán a continuación.



# 2 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE PARÁMETROS

---

Tal y como se ha dicho anteriormente, para realizar la estimación de estado y parámetros se va a utilizar como herramienta un software informático proporcionado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla. Mediante esta herramienta se va a poder analizar la detección e identificación de los errores en los valores de los parámetros, y por tanto evaluar si las condiciones en las que se encuentra la red objeto de estudio son favorables.

El objeto de este capítulo es doble:

- Describir de forma sucinta el software.
- Presentar una simulación de una red con unas condiciones determinadas que sirva como validación de esta herramienta.

## 2.1. Descripción del programa de estimación de parámetros

El funcionamiento del software se desarrolla en 3 fases:

- **Fase de configuración:** En ésta se concreta la red bajo estudio y sus correspondientes medidas disponibles a partir de ficheros *Matlab*, así como el número de escenarios que se van a estudiar. A través de la manipulación de estos archivos, se configuran las condiciones que van a ser objeto de análisis tras la detección e identificación de los errores en los parámetros. Éstas estarán de acuerdo a una serie de criterios que se establecerán más adelante. En el archivo red, se especifican los nudos, sus correspondientes niveles de tensión y los valores de los parámetros eléctricos de todas las ramas y transformadores que la componen. Estos valores serán modificados introduciendo deliberadamente los errores objeto de análisis cuando aplique. Por otro lado, el fichero de medidas se compondrá de las tensiones e inyecciones de potencia activa y reactiva en los nudos, y flujos de potencia activa y reactiva en las líneas y transformadores.

También se especifican los valores de los parámetros asociados al proceso de estimación, como el número máximo de iteraciones o el umbral del residuo normalizado, a partir del cuál, se considera una medida errónea o no.

- **Fase de selección de parámetros:** Una vez determinada la configuración, se realiza la selección de los parámetros de la red que serán estimados y analizados. Inicialmente, el programa realiza automáticamente una primera selección de parámetros a estimar, basándose en la observabilidad y la

fiabilidad de la estimación. Sin embargo, la aplicación permite editar manualmente la selección automática añadiendo o eliminando parámetros. Finalizada esta fase, se ejecuta el proceso de análisis de parámetros.

- **Fase de resultados del análisis:** En esta fase se desarrolla el proceso de estimación a partir de la información de los escenarios considerados. Durante él, se van eliminando tanto las medidas como los parámetros que se hayan identificado como erróneos.

Tras finalizar la etapa de identificación de información errónea, el software presenta los resultados obtenidos. Se incluyen las medidas/parámetros identificados como erróneos, especificando el valor original, estimado (ambos con sus correspondientes desviaciones típicas), y el residuo normalizado asociado.

También se muestra el resultado final de la estimación de los distintos escenarios de la red, así como las medidas/parámetros con mayor residuo normalizado que se han detectado durante la primera iteración. Para identificar cada uno de ellos, la aplicación utiliza la siguiente codificación:

<i>Software de análisis de la calidad de parámetros</i>	<i>Significado</i>
1	Magnitud de tensión
2	Fase de tensión
3	Flujo de potencia activa en rama
4	Flujo de potencia reactiva en rama
5	Flujo de intensidad al cuadrado en rama
6	Toma (inversa)
7	Inyección de potencia activa
8	Inyección de potencia reactiva
9	Intensidad al cuadrado en inyección
10	Intensidad por una rama
11	Intensidad en una inyección
50	Resistencia serie de rama
51	Reactancia serie de rama
52	$\frac{1}{2}$ Susceptancia total shunt de rama

*Tabla 2-1: Tipos de medidas en el software de análisis*

Esto último resulta de gran importancia para evaluar si se ha detectado e identificado el parámetro erróneo de forma satisfactoria.

## 2.2. Simulaciones de validación

La red objeto de estudio en esta simulación es la red IEEE de 14 nudos, cuyos valores de reactancia serie y estado se van a estimar:

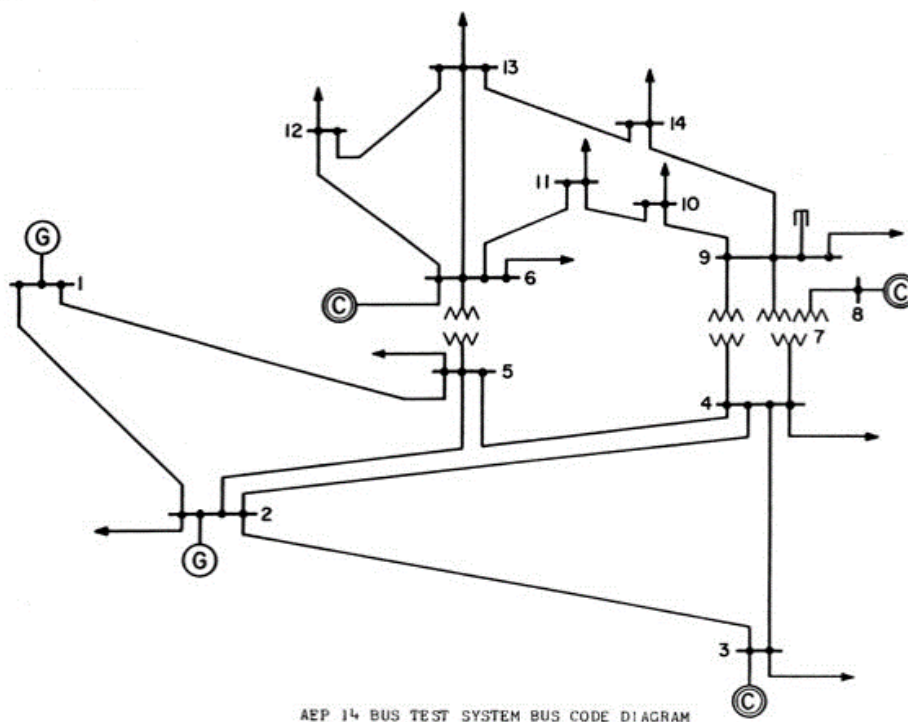


Figura 2-1: Diagrama unifilar de la red IEEE de 14 nudos

En primer lugar, se parte con el archivo red, que contiene la información de los distintos niveles de tensión de los nudos y los valores de los parámetros; y el archivo con todas las medidas de tensión e inyección de potencia activa y reactiva en los nudos, y flujos de potencia activa y reactiva en todas las ramas y transformadores de la red. En esta simulación sólo se va a estudiar un escenario.

Cabe destacar que el valor que se especifica en el fichero red para los parámetros de transformadores, es la impedancia serie conjunta. En la práctica, resulta de mayor utilidad el circuito equivalente simplificado del transformador. Además, en la mayoría de sistemas eléctricos de potencia en régimen permanente, se omite la impedancia de derivación debido a que su valor es muy elevado.

Una vez proporcionada la información de entrada al software (fase de configuración) y se seleccionan los parámetros, se ejecuta el proceso de estimación, finalizando con la fase de resultados:

## [4] \_\_PRESENTACIÓN DE RESULTADOS\_\_

Información sobre parámetros estimados

Identificación del segmento	original	desv.tp	estimado	desv.tp	Inc.r	R.N.
-----------------------------	----------	---------	----------	---------	-------	------

No hay resistencias serie estimadas

X ser(1 ) 132 kV 1 - (2 ) 132 kV 2	0	0.05917	0.00118	0.05917	0.00108 ( 4%)	0.0
X ser(1 ) 132 kV 1 - (5 ) 132 kV 5	0	0.22304	0.00446	0.22304	0.00355 ( 3%)	0.0
X ser(2 ) 132 kV 2 - (3 ) 132 kV 3	0	0.19797	0.00396	0.19797	0.00338 ( 3%)	0.0
X ser(2 ) 132 kV 2 - (4 ) 132 kV 4	0	0.17632	0.00353	0.17632	0.00305 ( 3%)	0.0
X ser(2 ) 132 kV 2 - (5 ) 132 kV 5	0	0.17388	0.00348	0.17388	0.00324 ( 4%)	0.0
X ser(3 ) 132 kV 3 - (4 ) 132 kV 4	0	0.17103	0.00342	0.17103	0.00336 ( 4%)	0.0
X ser(4 ) 132 kV 4 - (5 ) 132 kV 5	0	0.04211	0.00100	0.04211	0.00091 ( 4%)	0.0
X ser(4 ) 132 kV 4 - (9 ) 132 kV 9	0	0.55618	0.00278	0.55618	0.00274 ( 1%)	0.0
X ser(6 ) 33 kV 6 - (11 ) 33 kV 11	0	0.19890	0.00398	0.19890	0.00391 ( 4%)	0.0
X ser(6 ) 33 kV 6 - (12 ) 33 kV 12	0	0.25581	0.00512	0.25581	0.00491 ( 4%)	0.0
X ser(6 ) 33 kV 6 - (13 ) 33 kV 13	0	0.13027	0.00261	0.13027	0.00242 ( 4%)	0.0
X ser(9 ) 33 kV 9 - (10 ) 33 kV 10	0	0.08450	0.00169	0.08450	0.00168 ( 4%)	NaN
X ser(9 ) 33 kV 9 - (14 ) 33 kV 14	0	0.27038	0.00541	0.27038	0.00523 ( 4%)	0.0
X ser(10 ) 33 kV 10 - (11 ) 33 kV 11	0	0.19207	0.00384	0.19207	0.00383 ( 4%)	NaN
X ser(13 ) 33 kV 13 - (14 ) 33 kV 14	0	0.34802	0.00696	0.34802	0.00683 ( 4%)	0.0

No hay susceptancias estimadas

Figura 2-2: Resultados de la simulación de validación sin errores en los parámetros

Como se puede ver, la aplicación estima correctamente los valores de la reactancia de las líneas y transformadores que se hayan seleccionado en la fase correspondiente. Además, como es lógico, presenta el estado, las medidas y los parámetros de la red con residuo normalizado igual a 0.

Ahora se va a realizar una segunda simulación en la que se va a introducir deliberadamente un 25% de error en la reactancia serie de la rama 2-4, es decir:

$$X = 0.17632 \text{ pu}$$

$$X' = 0.17632 \cdot 1.25 = 0.2204 \text{ pu}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 2-3:

Identificación del segmento	original	desv.tp	estimado	desv.tp	Inc.r	R.N.
-----------------------------	----------	---------	----------	---------	-------	------

No hay resistencias serie estimadas

X ser(1 ) 132 kV 1 - (2 ) 132 kV 2	0	0.05917	0.00118	0.05917	0.00109 ( 4%)	0.0
X ser(1 ) 132 kV 1 - (5 ) 132 kV 5	0	0.22304	0.00446	0.22304	0.00363 ( 3%)	0.0
X ser(2 ) 132 kV 2 - (3 ) 132 kV 3	0	0.19797	0.00396	0.19797	0.00341 ( 3%)	0.0
X ser(2 ) 132 kV 2 - (4 ) 132 kV 4	0 E	0.22040	0.22040	0.17635	0.00608 ( 7%)	0.2
X ser(2 ) 132 kV 2 - (5 ) 132 kV 5	0	0.17388	0.00348	0.17388	0.00331 ( 4%)	0.0
X ser(3 ) 132 kV 3 - (4 ) 132 kV 4	0	0.17103	0.00342	0.17103	0.00337 ( 4%)	0.0
X ser(4 ) 132 kV 4 - (5 ) 132 kV 5	0	0.04211	0.00100	0.04211	0.00091 ( 4%)	0.0
X ser(6 ) 33 kV 6 - (11 ) 33 kV 11	0	0.19890	0.00398	0.19890	0.00391 ( 4%)	0.0
X ser(6 ) 33 kV 6 - (12 ) 33 kV 12	0	0.25581	0.00512	0.25581	0.00491 ( 4%)	0.0
X ser(6 ) 33 kV 6 - (13 ) 33 kV 13	0	0.13027	0.00261	0.13027	0.00242 ( 4%)	0.0
X ser(9 ) 33 kV 9 - (10 ) 33 kV 10	0	0.08450	0.00169	0.08450	0.00168 ( 4%)	NaN
X ser(9 ) 33 kV 9 - (14 ) 33 kV 14	0	0.27038	0.00541	0.27038	0.00523 ( 4%)	0.0
X ser(10 ) 33 kV 10 - (11 ) 33 kV 11	0	0.19207	0.00384	0.19207	0.00383 ( 4%)	NaN
X ser(13 ) 33 kV 13 - (14 ) 33 kV 14	0	0.34802	0.00696	0.34802	0.00683 ( 4%)	0.0

No hay susceptancias estimadas

Figura 2-3: Resultados de la simulación de validación sin errores en los parámetros

Se comprueba cómo la herramienta es capaz de identificar el parámetro erróneo y estimar el valor correcto.

Por tanto, en base a los resultados de las simulaciones, se valida el software como herramienta principal para analizar la calidad de los parámetros eléctricos en distintas condiciones.





# 3 ESTUDIO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

---

Hasta ahora se ha descrito el funcionamiento de la aplicación y ha sido validada para la consecución del objetivo de este estudio. En este capítulo se va a establecer un plan de trabajo que detalla los criterios en los que se van a basar todas las condiciones a evaluar.

También, con el propósito de que las simulaciones que se realicen sean lo más cercanas a la realidad posible, en este capítulo se desarrollará un estudio de valores típicos de los parámetros eléctricos en las líneas y transformadores. En el caso de las líneas, éstos estarán en consonancia con los habituales en cada nivel de tensión considerado en el plan de trabajo. En cuanto a los transformadores, se realizará el análisis de los valores más habituales por cada relación de transformación en función de la potencia nominal del transformador.

Para realizar este estudio se va a contar con bases de datos de redes reales de una compañía de distribución. Éstas serán proporcionadas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla.

## 3.1 Plan de trabajo

A continuación, se muestran los criterios que se van a tener en cuenta durante el desarrollo de este estudio:

### 3.1.1 Tipos de parámetros analizados

Los parámetros analizados serán: resistencia serie, reactancia serie y susceptancia paralelo. En el estudio se considerarán que el análisis de parámetros se puede realizar según los siguientes criterios:

1. Análisis de reactancias serie.
2. Análisis de resistencias serie.
3. Análisis de susceptancia paralelo.
4. Análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie.
5. Análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie, y de susceptancia paralelo.

### 3.1.2 Niveles de tensión

Para líneas se analizarán los siguientes niveles:

1. 400 kV
2. 220 kV
3. 132 kV
4. 66 kV
5. 45 kV

Para transformadores se analizarán las siguientes relaciones de transformación:

1. 400/220 kV
2. 132/66 kV
3. 45/15 kV

### 3.1.3 Valores de los parámetros eléctricos

En el posterior análisis se adoptarán como niveles de estudio (siempre que sea posible):

1. Mayores valores de los parámetros esperados.
2. Valores medios.
3. Valores pequeños.

### 3.1.4 Nivel de carga de líneas y transformadores

Se considerarán diferentes regímenes de carga en función de la potencia que circula por líneas y transformadores.

Para líneas se realizará un estudio de la potencia máxima a través de la línea y para los transformadores se considerará su potencia nominal. Los escenarios considerados tendrán aproximadamente:

1. 100% del valor máximo.
2. 75% del valor máximo.
3. 50% del valor máximo.
4. 25% del valor máximo.
5. 10% del valor máximo.

Se estudiará si el factor de potencia repercute en la identificación de errores de parámetros.

### 3.1.5 Número de escenarios considerados

Se realizará un estudio sobre el número de escenarios necesarios para identificar un error en un parámetro.

### 3.1.6 Topología de la rama

Se realizarán estudios para:

1. Rama aislada.
2. Rama en red mallada.
3. Ramas radiales.

### 3.1.7 Redundancia de medidas

Se analizarán diferentes redundancias.

1. Completa (tensiones e inyecciones en todos los nudos y flujos de potencia en ambos extremos de todas las ramas).
2. Reducida (tensiones e inyecciones en todos los nudos y flujos de potencia en un extremo de las ramas).
3. Muy reducida (tensiones en todos los nudos y flujos de potencia en un extremo de las ramas).

### 3.1.8 Peso de las medidas

Se considerarán las siguientes desviaciones típicas para las medidas:

- Medidas de tensión: 0.0052 p.u.
- Medidas de potencias activa/reactiva por nivel de tensión:

400 kV	0.1526 p.u.
220 kV	0.1526 p.u.
132kV	0.0238 p.u.
66 kV	0.0080 p.u.
45 kV	0.0042 p.u.
20 kV	0.0049 p.u.
15 kV	0.0156 p.u.*

Tabla 3-1: Desviaciones típicas de medidas de potencia activa/reactiva en función del nivel de tensión

Los valores anteriores están expresados en una potencia base de 100 MVA.

\* Este valor es anormalmente superior al indicado en el nivel de 20 kV debido a las características de los equipos de la cadena de medida en este nivel de tensión.

Estos valores se han tomado de las recomendaciones realizadas por la US.

## 3.2 Estudio de valores típicos en líneas y transformadores

El valor del parámetro es uno de los factores que se va a estudiar cómo afecta a la hora de detectar e identificar errores. Se pretende ver cómo influye la magnitud del parámetro en el tamaño del error a introducir para las condiciones dadas. Por tanto, antes se van a determinar valores máximos, medios y mínimos que sean característicos para líneas, en función de su nivel de tensión; y transformadores, dependiendo de su potencia nominal. Una vez determinados se podrán modelar los diferentes escenarios para realizar el estudio completo según los criterios anteriores.

### 3.2.1 Parámetros eléctricos en líneas para cada nivel de tensión

Como se mencionó anteriormente, la información necesaria para el estudio se ha obtenido de bases de datos de redes reales de una compañía de distribución. En ella, se especifican para cada rama el nudo origen y destino y sus correspondientes niveles de tensión, resistencia serie, reactancia serie, susceptancia paralelo y potencia nominal. Todos los datos de los parámetros se especifican en por unidad, utilizando como tensión base la correspondiente para cada rama y  $S_{base}=100$  MVA.

En este estudio se ha considerado el modelo en pi de una rama de parámetros concentrados, cuyo esquema se representa en la figura 3-1:

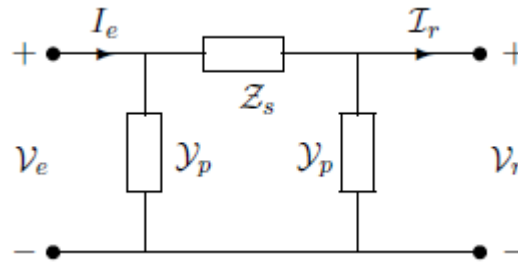


Figura 3-1: Modelo pi de una línea

si:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \text{ (\Omega/Km)}$$

$$Y_1 = G_1 + jB_c \text{ (S/Km)}$$

se tiene:

$$Z_s = Z_1 \cdot l$$

$$Y_p = \frac{Y_1 \cdot l}{2}$$

Conviene aclarar que los valores especificados de susceptancia paralelo hacen referencia al total. Sin embargo, la aplicación de análisis de calidad de los parámetros detecta e identifica errores en  $\frac{1}{2}$  de la susceptancia total de la línea, tal y como se indica en la tabla 2-1.

### 3.2.1.1 Líneas de 45 kV

Ordenando de forma descendente los valores de los parámetros dados, se ha obtenido la gráfica de la figura 3-2:

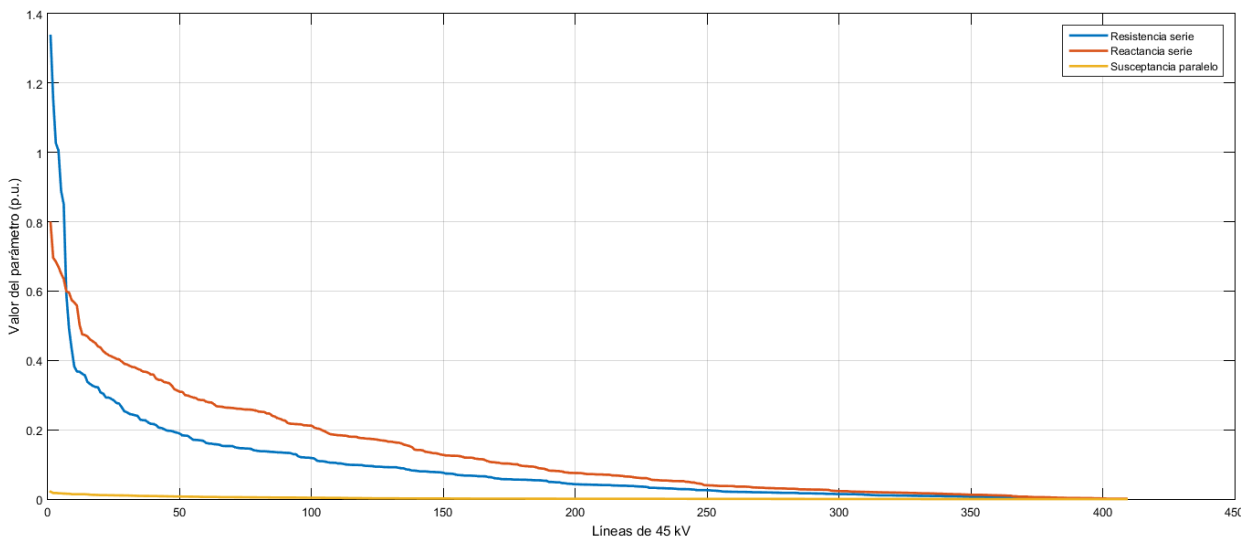


Figura 3-2: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 45 kV

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se consideran los siguientes valores de parámetros:

1. **Mayores valores esperados:** R=0.589 p.u. X=0.65 p.u. B=0.0213 p.u.
2. **Valores medios:** R=0.138 p.u. X=0.202 p.u. B=0.0045 p.u.
3. **Valores pequeños:** R=0.042 p.u. X=0.072 p.u. B=0.0012 p.u.

De forma análoga a la figura 3-2, se representa en la gráfica de la figura 3-3 los valores de potencia nominal en orden descendente de las líneas de 45 kV:

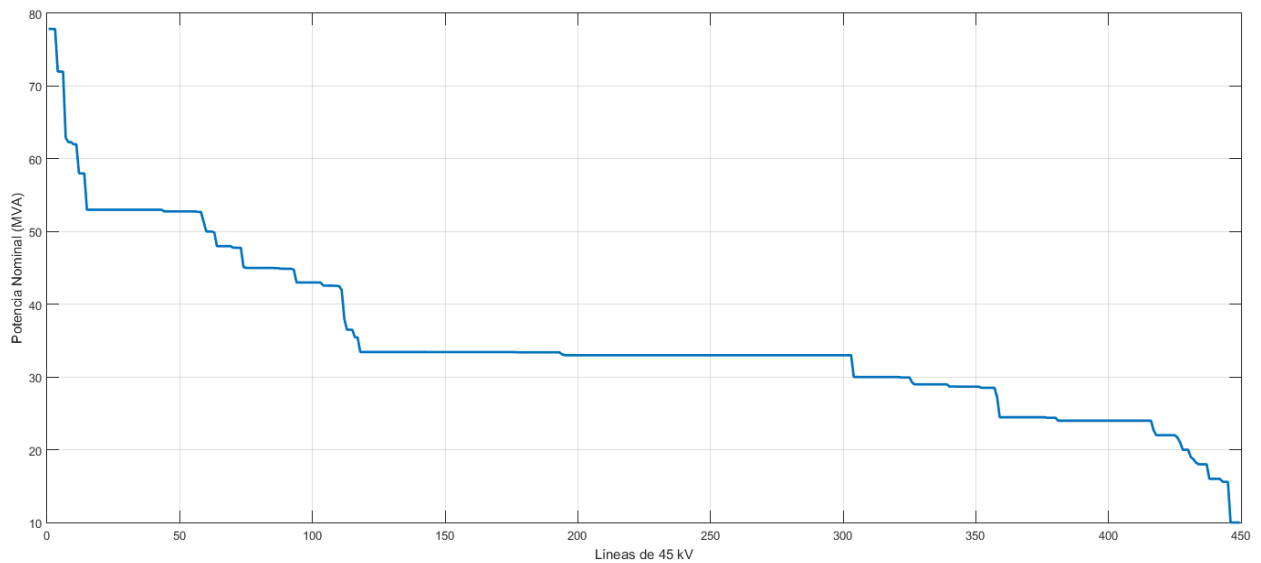


Figura 3-3: Potencias nominales en líneas de 45 kV

A raíz de los resultados de la gráfica anterior, se consideran representativas las potencias nominales:

1. 53 MVA
2. 33 MVA
3. 24 MVA

### 3.2.1.2 Líneas de 66 kV

En la figura 3-4 se representan en orden descendente los valores de los parámetros en líneas de 66 kV:

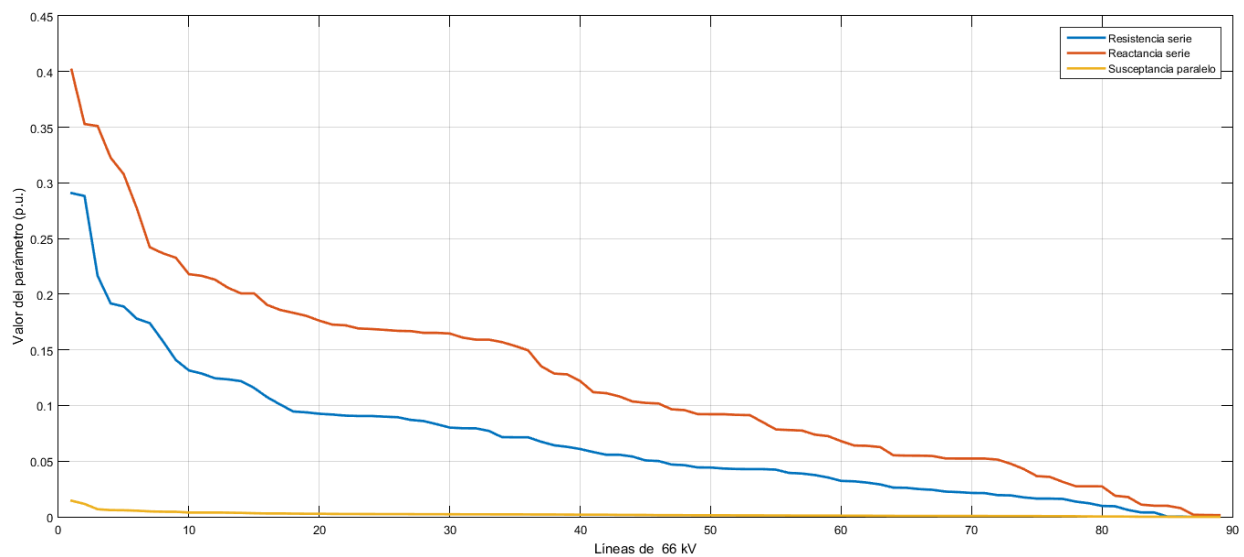


Figura 3-4: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 66 kV

Se toman como significativos los siguientes valores de parámetros:

1. **Mayores valores esperados:** R=0.1781 p.u. X=0.277 p.u. B=0.00552 p.u.

2. **Valores medios:**  $R=0.080$  p.u.  $X=0.161$  p.u.  $B=0.0023$  p.u.
3. **Valores pequeños:**  $R=0.0215$  p.u.  $X=0.052$  p.u.  $B=0.00076$  p.u.

En la figura 3-5 se representan en orden descendente los valores de potencia nominal en líneas de 66 kV:

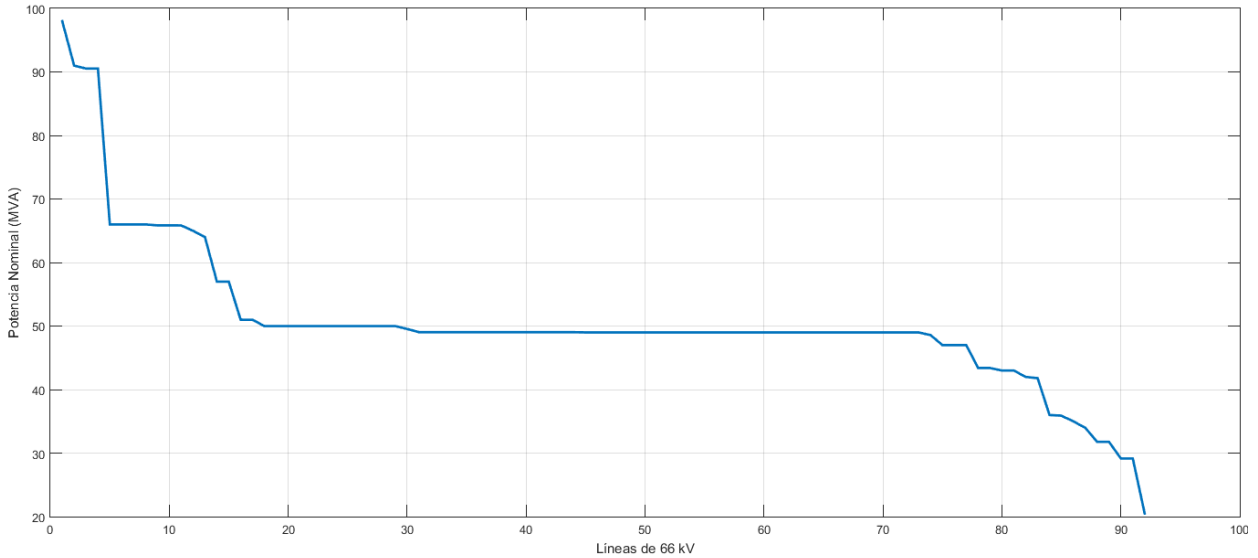


Figura 3-5: Potencias nominales en líneas de 66 kV

Se seleccionan las siguientes potencias máximas por las líneas:

1. 66 MVA
2. 50 MVA

### 3.2.1.3 Líneas de 132 kV

Se representan en orden descendente los valores de los parámetros en líneas de 132 kV en la figura 3-6:

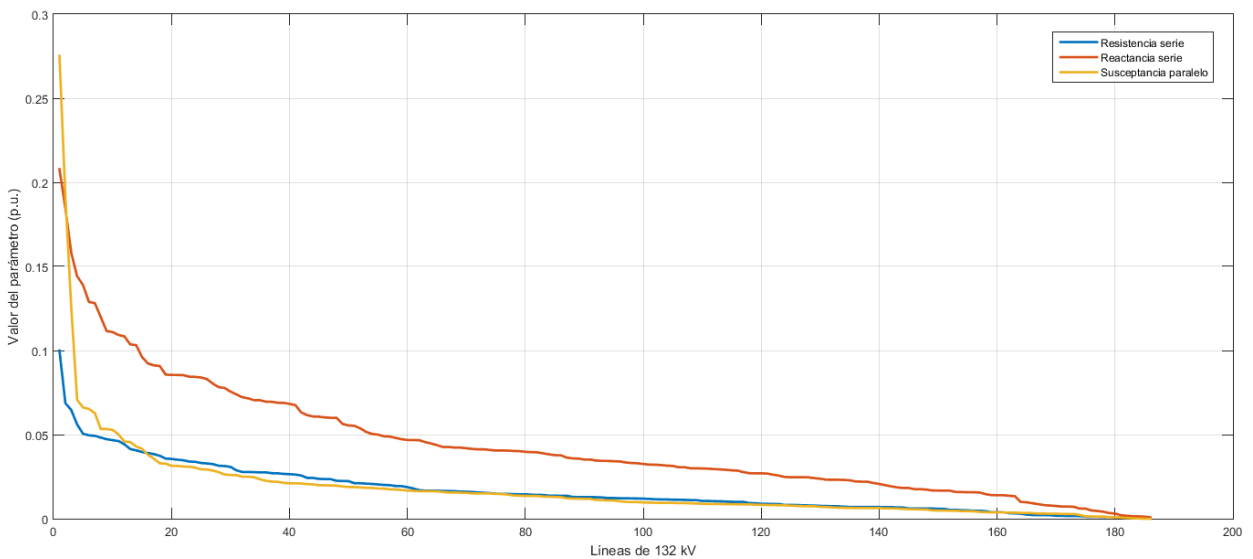


Figura 3-6: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 132 kV

Se eligen los siguientes valores de parámetros:

1. **Mayores valores esperados:**  $R=0.05379$  p.u.  $X=0.18988$  p.u.  $B=0.03667$  p.u.
2. **Valores medios:**  $R=0.03$  p.u.  $X=0.075$  p.u.  $B=0.02$  p.u.
3. **Valores pequeños:**  $R=0.015$  p.u.  $X=0.04$  p.u.  $B=0.01$  p.u.

En la figura 3-7 se representan en orden descendente los valores de potencia nominal en líneas de 132 kV:

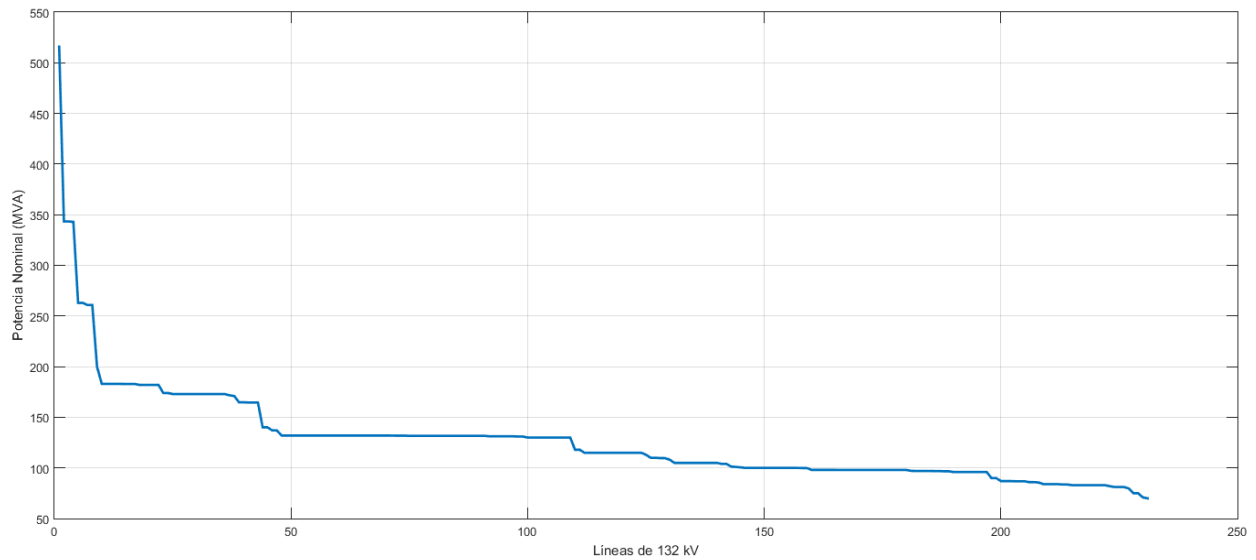


Figura 3-7: Potencias nominales en líneas de 132 k

Se seleccionan las siguientes potencias máximas por las líneas:

1. 173 MVA
2. 130 MVA
3. 100 MVA

### 3.2.1.4 Líneas de 220 kV

En la figura 3-8 se representan en orden descendente los valores de los parámetros en líneas de 220 kV:

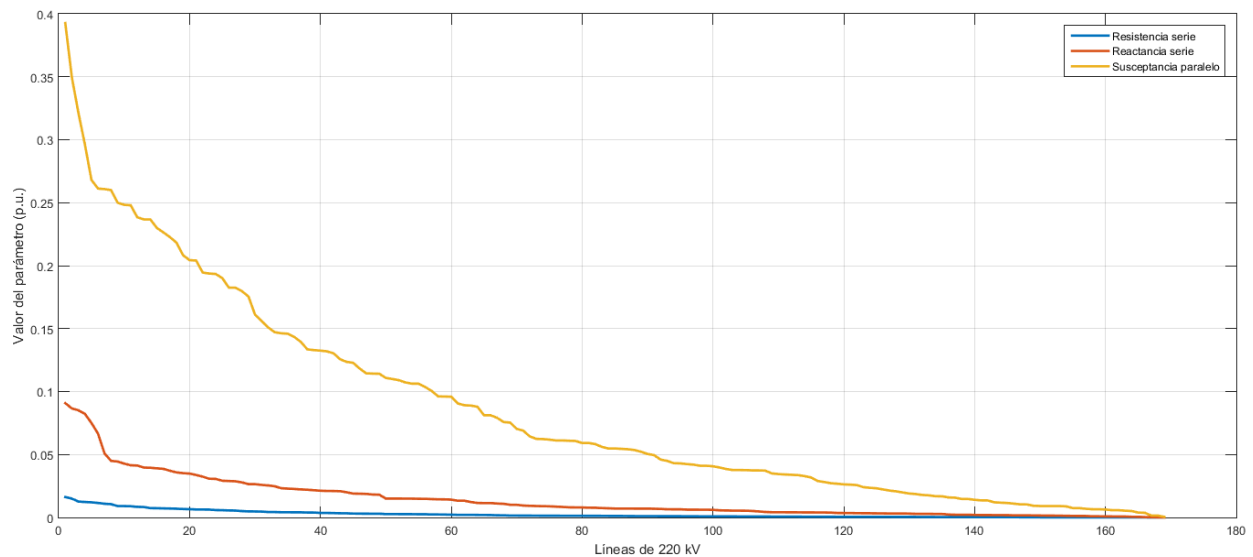


Figura 3-8: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 220 kV

Se consideran significativos los siguientes valores de parámetros:

1. **Mayores valores esperados:**  $R=0.00662$  p.u.  $X=0.0349$  p.u.  $B=0.2044$  p.u.
2. **Valores medios:**  $R=0.00144$  p.u.  $X=0.0091$  p.u.  $B=0.0625$  p.u.
3. **Valores pequeños:**  $R=0.00052$  p.u.  $X=0.00319$  p.u.  $B=0.0214$  p.u.

Los valores de potencia nominal en líneas de 220 kV se representan en orden descendente en la figura 3-9:

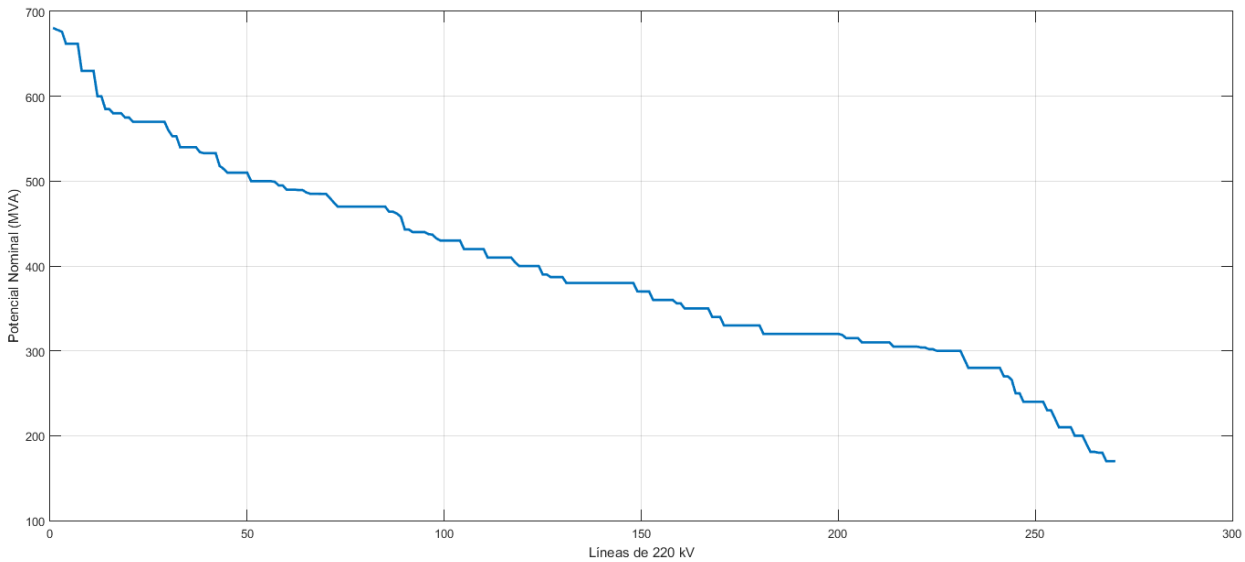


Figura 3-9: Potencias nominales en líneas de 220 kV

Se seleccionan las siguientes potencias máximas por las líneas:

1. 570 MVA
2. 380 MVA

### 3.2.1.5 Líneas de 400 kV

En la figura 3-10 se representan en orden descendente los valores de los parámetros en líneas de 400 kV:

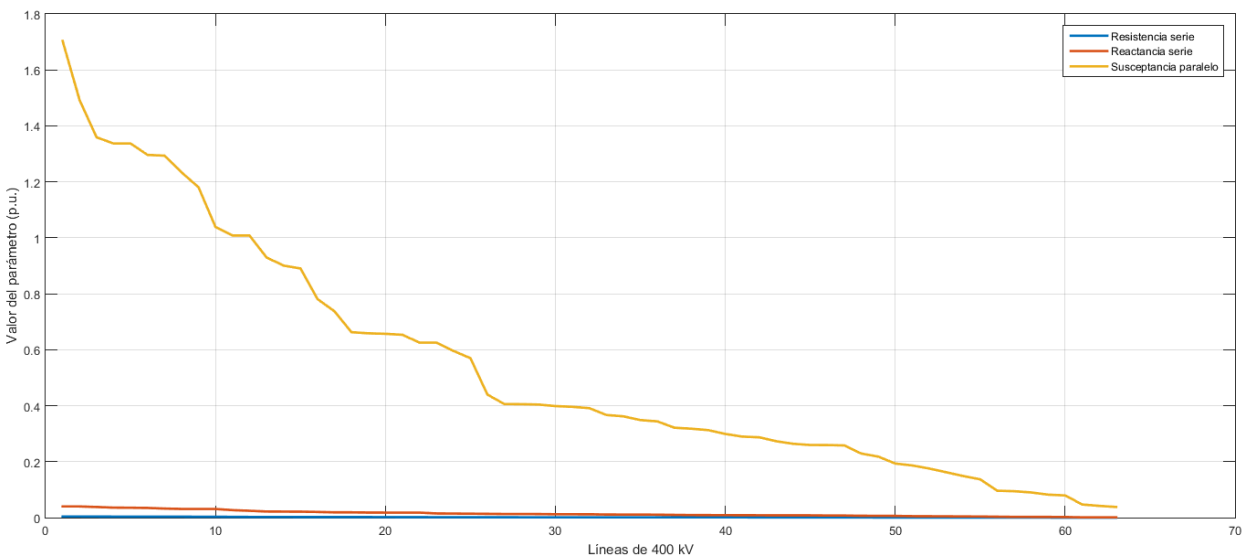


Figura 3-10: Valores de R, X y B paralelo en líneas de 400 kV



Se toman los siguientes valores de parámetros:

1. **Mayores valores esperados:**  $R=0.00325$  p.u.  $X=0.03105$  p.u.  $B=1.181$  p.u.
2. **Valores medios:**  $R=0.00143$  p.u.  $X=0.01307$  p.u.  $B=0.406$  p.u.
3. **Valores pequeños:**  $R=0.00077$  p.u.  $X=0.00773$  p.u.  $B=0.259$  p.u.

En la figura 3-11 se representan en orden descendente los valores de potencia nominal en líneas de 400 kV:

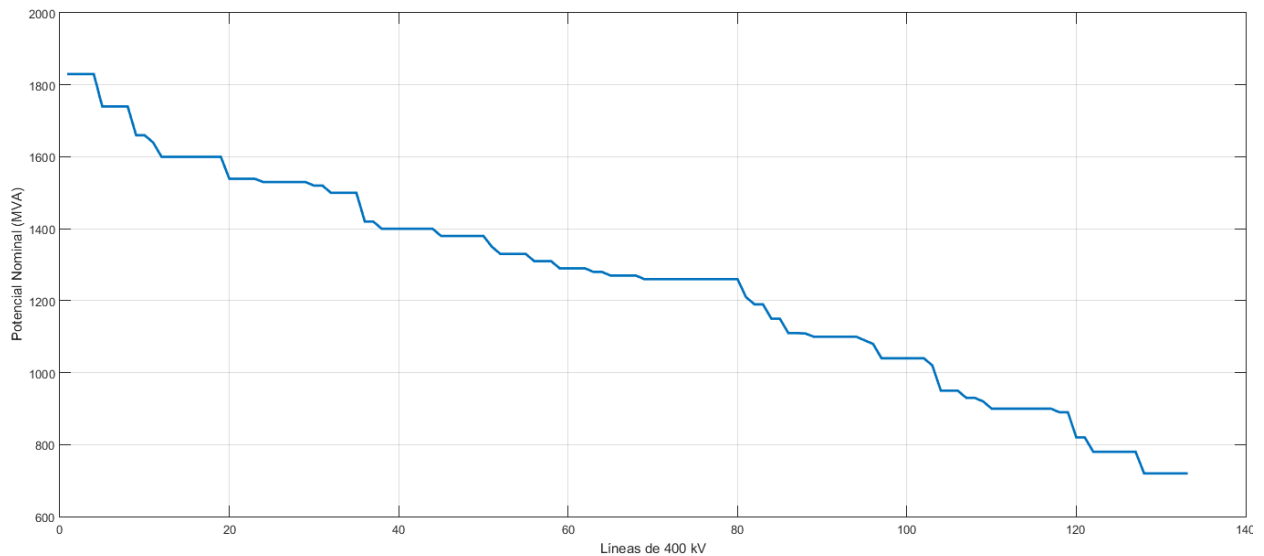


Figura 3-11: Potencias nominales en líneas de 400 kV

Se seleccionan las siguientes potencias máximas por las líneas:

1. 1600 MVA
2. 1260 MVA
3. 900 MVA

### 3.2.1.6 Variación de los valores de parámetros en líneas de distinto nivel de tensión

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores se resumen en la tabla 3-2:

	<b>LÍNEAS</b>				
	<b>NIVEL DE TENSIÓN (kV)</b>				
	<b>45</b>	<b>66</b>	<b>132</b>	<b>220</b>	<b>400</b>
<b>R (pu)</b>	0.589	0.1781	0.05379	0.00662	0.00325
	0.138	0.080	0.03	0.00144	0.00143
	0.042	0.0215	0.015	0.00052	0.00077
<b>X (pu)</b>	0.65	0.277	0.18988	0.0349	0.03105
	0.202	0.161	0.075	0.0091	0.01307
	0.072	0.052	0.04	0.00319	0.00773
<b>B sht (pu)</b>	0.0213	0.00552	0.03667	0.2044	1.181
	0.0045	0.0023	0.02	0.0625	0.406
	0.0012	0.00076	0.01	0.0214	0.259
<b>S<sub>n</sub> (MVA)</b>	53	66	173	570	1600
	33	50	130	380	1260
	24		100		900

Tabla 3-2: Parámetros eléctricos en líneas para cada nivel de tensión

En base a ello, se ha observado lo siguiente:

1. Los valores de la resistencia y reactancias serie, son mayores en líneas de menor nivel de tensión, tal y como se ve en las correspondientes Estudio de valores de los parámetros eléctricos figuras 3-12 y 3-13. Como se sabe, estos son los elementos serie de la línea, proporcionales a la longitud.

El valor de la resistencia serie depende fundamentalmente de la resistividad eléctrica del material, que se obtiene a partir de tablas dadas por fabricantes de conductores y varía con la temperatura. También, el uso de conductores magnéticos o el efecto de proximidad producen un aumento del valor de la resistencia serie. Esto se produce debido a las pérdidas por histéresis y a la distribución no homogénea de corriente en los conductores de ida y vuelta de la línea, respectivamente. Otro de los fenómenos que modifica este parámetro es el efecto pelicular o *skin*, debido a las diferencias de densidad de corriente en distintas zonas de la sección del conductor.

La reactancia originada en las líneas viene definida por una inductancia global. Ésta es producida los flujos magnéticos dentro y alrededor de los conductores, y su valor varía en función de su distribución geométrica.

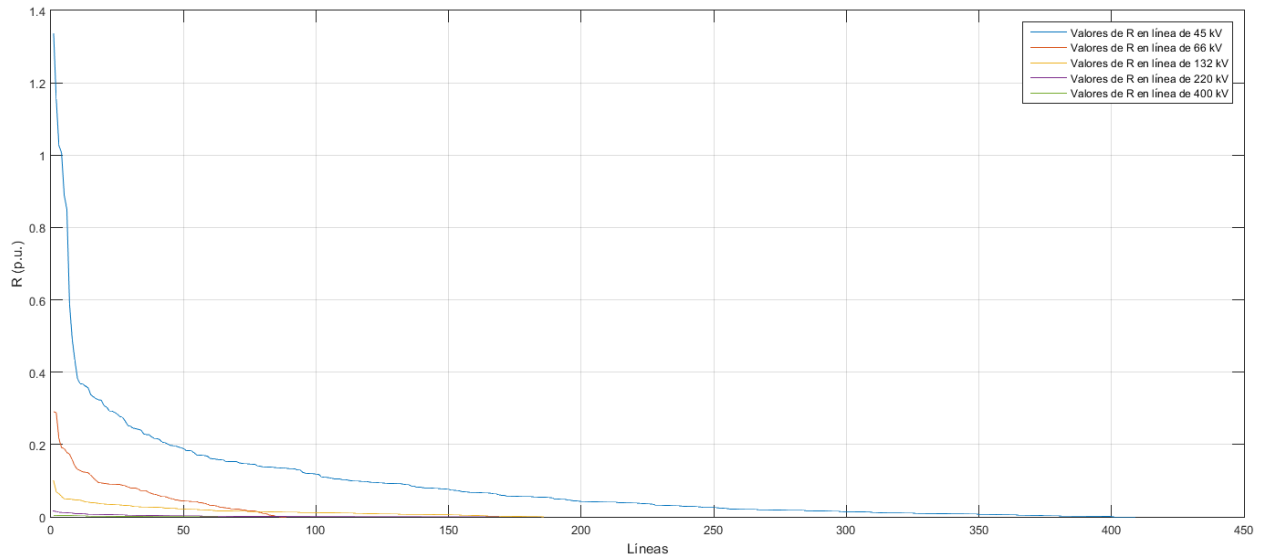


Figura 3-12: Valores de  $R$  en líneas de distintos niveles de tensión

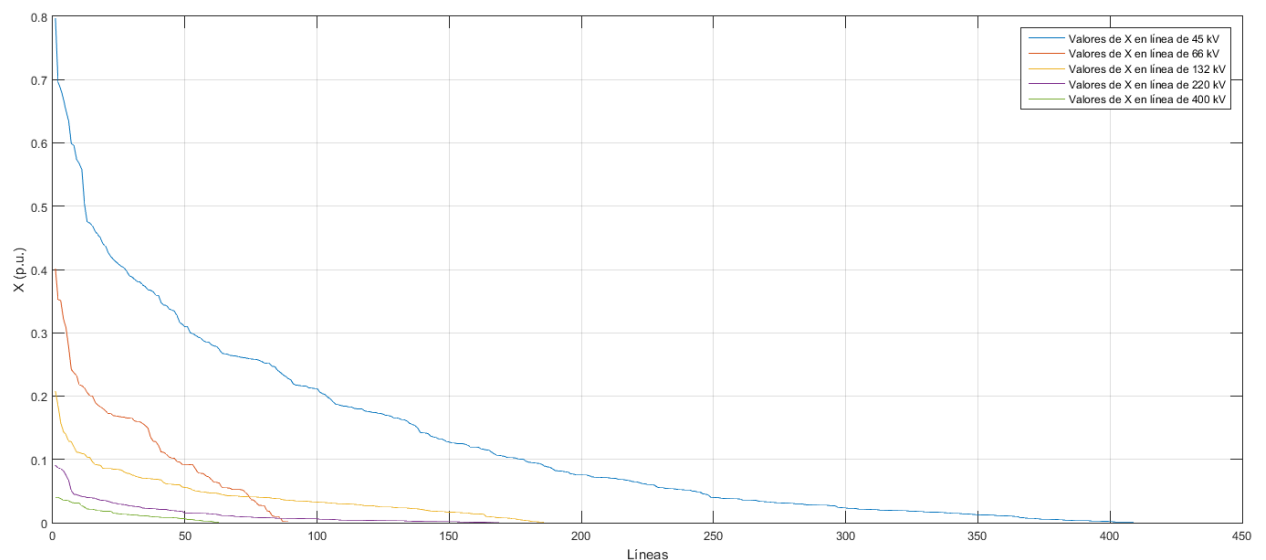


Figura 3-13: Valores de  $X$  en líneas de distintos niveles de tensión

- Los valores de la susceptancia paralelo son mayores en las líneas de mayor nivel de tensión, como se puede ver en la figura 3-14. Este parámetro depende de la capacitancia de la línea, producida por las diferencias de potencial entre conductores, y conductor y tierra.

La susceptancia se considera el parámetro dominante en los elementos paralelo de una línea, aquellos que modelan los caminos de fuga de la corriente. Esto es debido a que la conductancia representa un efecto mínimo en el comportamiento de las líneas en comparación con la resistencia y reactancia serie, y la susceptancia. Además, depende de múltiples factores como medioambientales o climatológicos, muy difíciles de predecir y no constantes a lo largo de la línea. Es por ello que no se va a incluir su estudio en este trabajo.

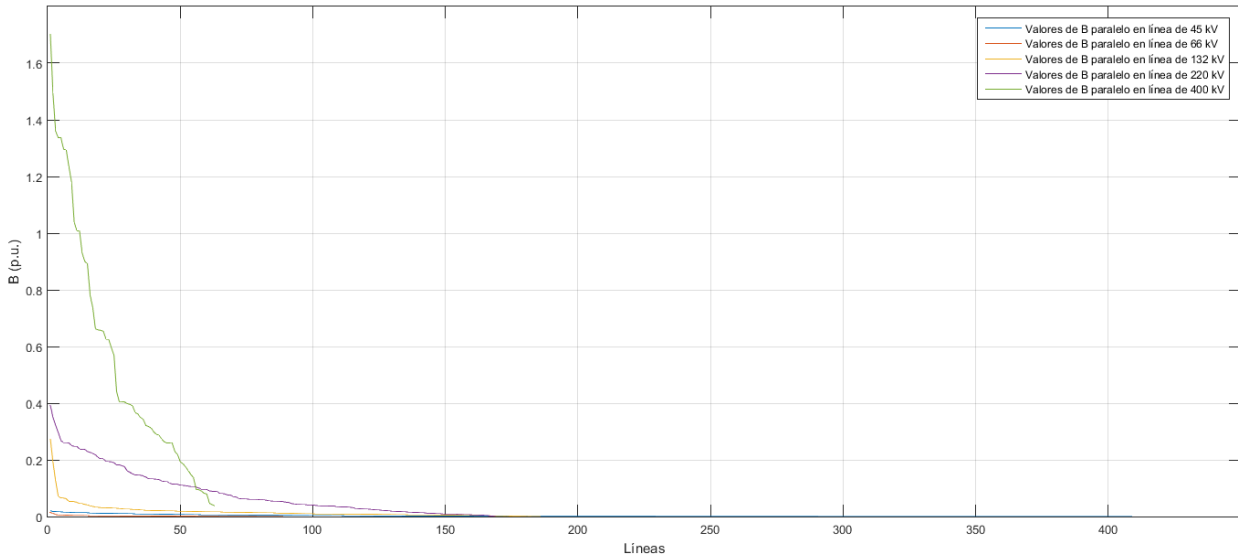


Figura 3-14: Valores de B paralelo en líneas de distintos niveles de tensión

- Tal y como se esperaba, las potencias nominales de las líneas son mayores en aquellas de nivel de tensión superior.

La potencia máxima que se puede transmitir depende principalmente de los parámetros serie y la tensión de servicio. Sin embargo, también existen otras causas que influyen en la capacidad de transporte para un mismo nivel de tensión, como el factor de potencia de la carga o el límite térmico de la línea.

### 3.2.2 Parámetros eléctricos en transformadores en función de la potencia nominal

Al igual que para las líneas, los parámetros eléctricos y potencia nominal de los transformadores se han obtenido de las bases de datos de redes reales mencionada anteriormente. El estudio se realizará por cada relación de transformación en función de la correspondiente potencia nominal. Conviene recordar en este apartado que en las bases de datos se especifica la impedancia conjunta.

#### 3.2.2.1 Relación de transformación: 400/220 kV

Los valores de potencia nominal en transformadores con esta relación de transformación, se representan en orden descendente en la gráfica de la figura 3-15:

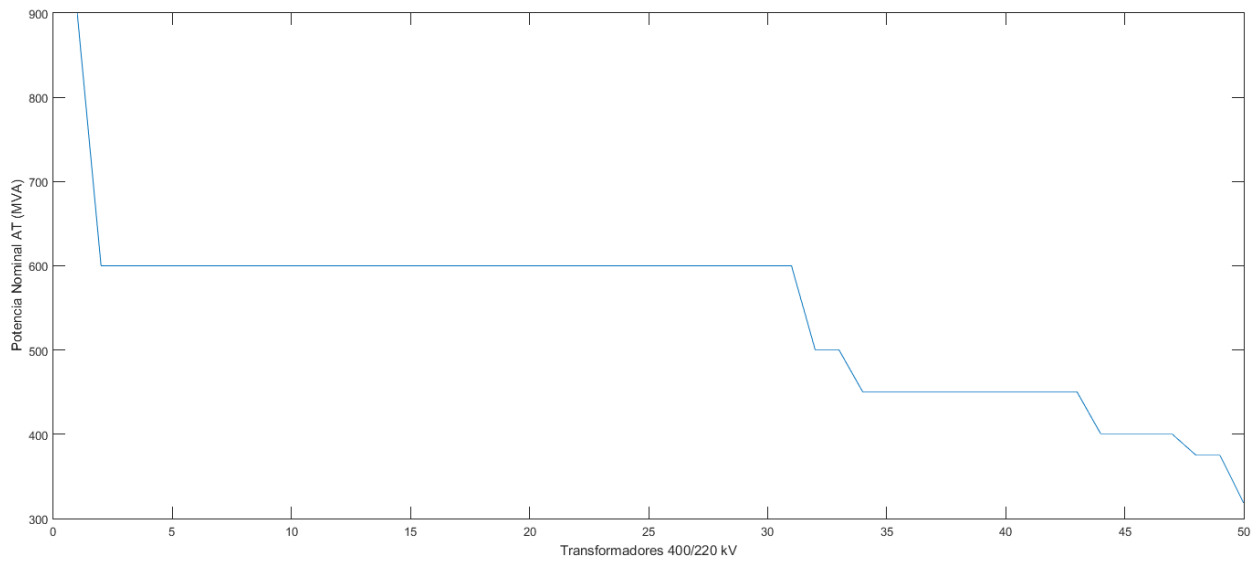


Figura 3-15: Potencias nominales en transformadores con relación de transformación 400/220 kV

Para el posterior análisis se tomará una potencia nominal de 600 MVA y los siguientes valores de la tabla 3-3 (únicos disponibles para la relación de transformación especificada):

$R_{cc}$ (p.u.)	$X_{cc}$ (p.u.)
0.000832	0.018789

Tabla 3-3: Parámetros eléctricos en transformadores con relación de transformación 400/220 kV

### 3.2.2.2 Relación de transformación: 132/66 kV

Se especifican los siguientes valores de potencia nominal, representados en orden descendente en la gráfica de la figura 3-16:

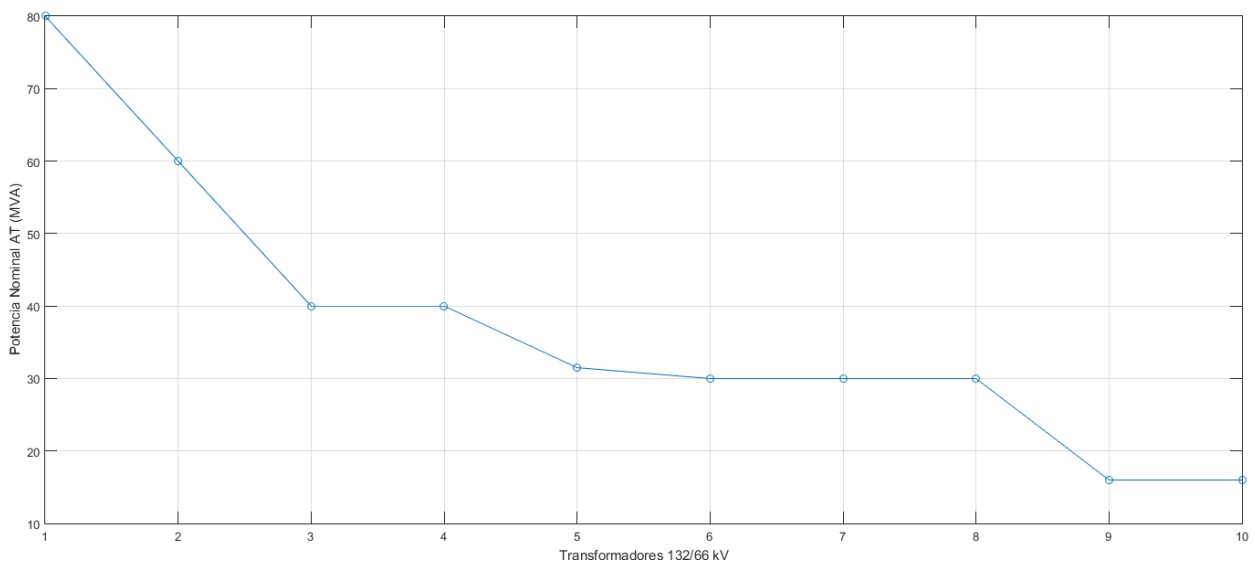


Figura 3-16: Potencias nominales en transformadores con relación de transformación 132/66 kV

A partir de la gráfica anterior se considerarán:

- 60 MVA
- 31.5 MVA

Respecto a los parámetros, se encuentran los especificados en la tabla 3-4:

$R_{cc}$ (p.u.)	$X_{cc}$ (p.u.)
0.013333	0.316667
0.01	0.193
0.013	0.196
0.0045	0.15125

Tabla 3-4: Parámetros eléctricos en transformadores con relación de transformación 132/66 kV

### 3.2.2.3 Relación de transformación: 45/15 kV

Se obtiene la gráfica de la figura 3-17 ordenando de forma descendente los valores de potencia nominal:

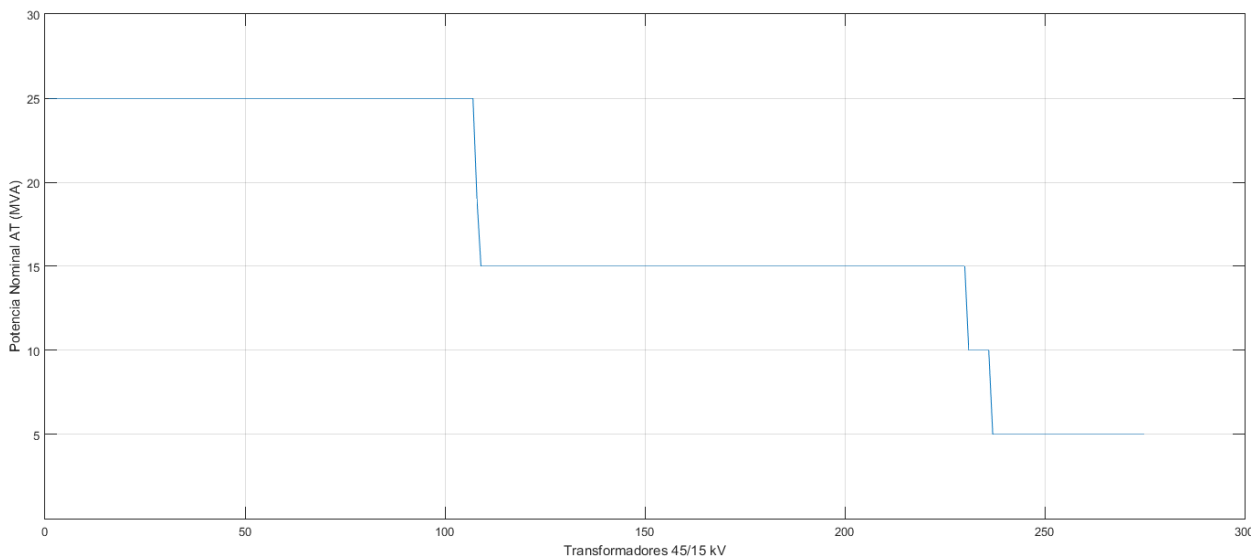


Figura 3-17: Potencias nominales en transformadores con relación de transformación 45/15 kV

Se adoptarán:

- 25 MVA
- 15 MVA
- 5 MVA

Para esta relación de transformación la base de datos dispone de un mayor número de valores de resistencia y reactancia, de tal modo que se representan respectivamente en orden descendente en las figuras 3-18 y 3-19:

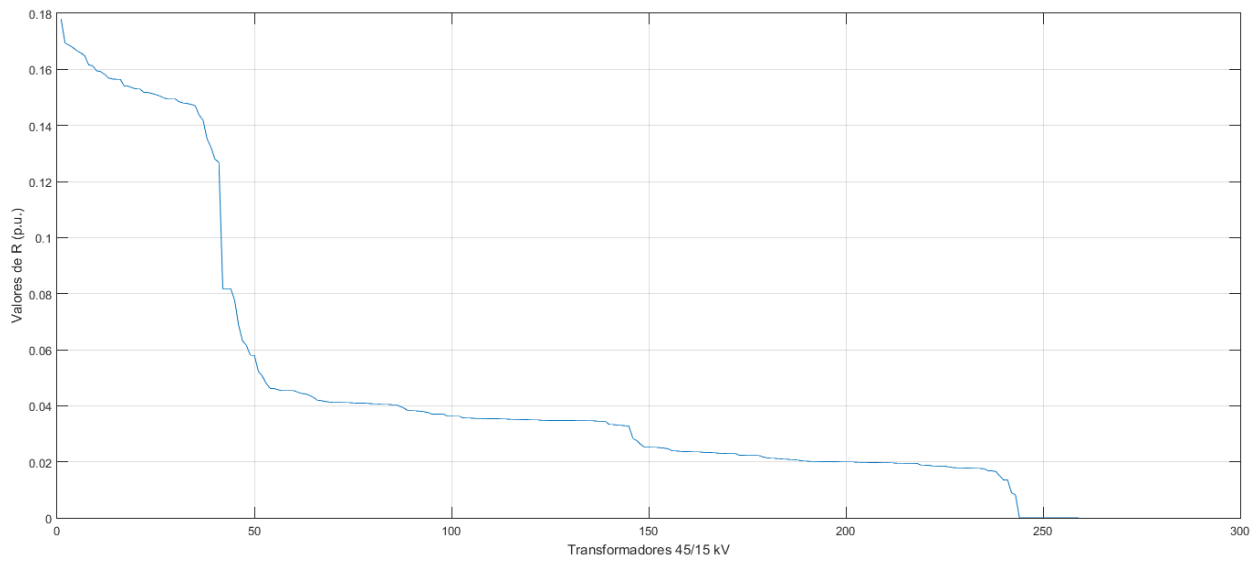


Figura 3-18: Valores de R en transformadores con relación de transformación 45/15 kV

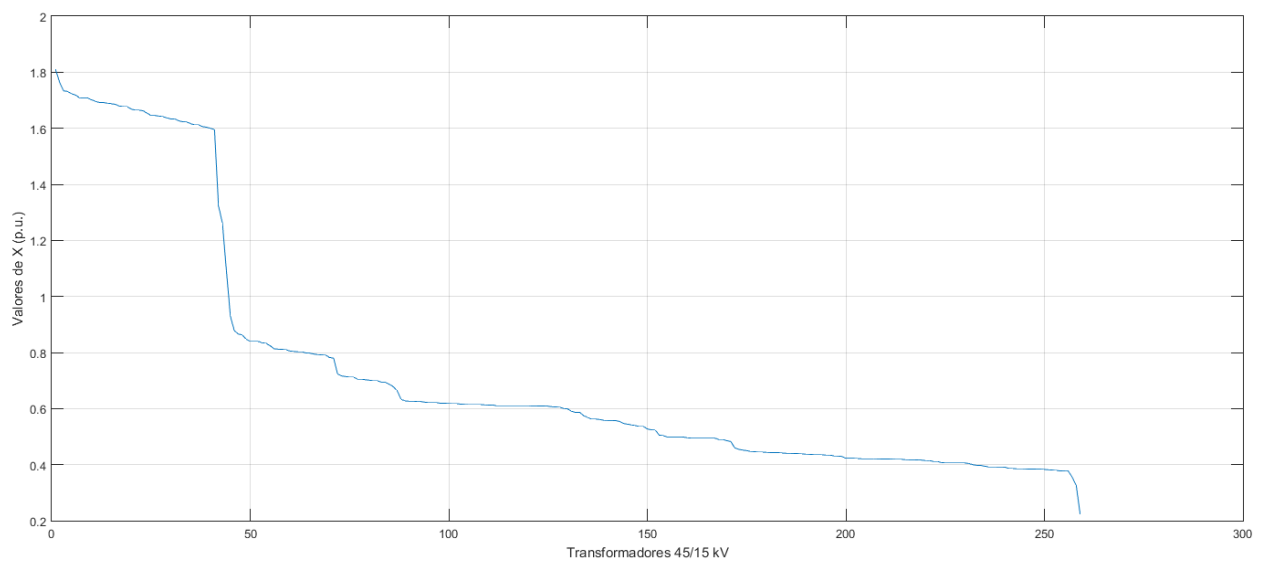


Figura 3-19: Valores de X en transformadores con relación de transformación 45/15 kV

A la vista de los resultados anteriores, se escogerán los valores representativos de la tabla 3-5 para el posterior análisis:

<i>R<sub>cc</sub></i> (p.u.)	<i>X<sub>cc</sub></i> (p.u.)
0.02	0.42
0.035	0.6
0.156	1.323

Tabla 3-5: Parámetros eléctricos en transformadores con relación de transformación 45/15 kV

### 3.2.2.4 Variación de los valores de parámetros en transformadores con distinta relación de transformación

En la tabla 3-6 se resumen los resultados obtenidos en los apartados anteriores:

<b>TRANSFORMADORES</b>			
<b>RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN (kV)</b>			
	<b>400/220</b>	<b>132/66</b>	<b>45/15</b>
<b><i>R (pu)</i></b>	<i>0.000832</i>	<i>0.01333</i> <i>0.013</i> <i>0.01</i> <i>0.0045</i>	<i>0.156</i> <i>0.035</i> <i>0.02</i>
<b><i>X (pu)</i></b>	<i>0.018789</i>	<i>0.316667</i> <i>0.196</i> <i>0.193</i> <i>0.15125</i>	<i>1.323</i> <i>0.6</i> <i>0.42</i>
<b><i>S<sub>n</sub> (MVA)</i></b>	<i>600</i>	<i>60</i> <i>31.5</i>	<i>25</i> <i>15</i> <i>5</i>

Tabla 3-6: Parámetros eléctricos en transformadores en función de la potencia nominal

Como se esperaba, los resultados son análogos a los obtenidos en el estudio sobre líneas. Los valores de resistencia y reactancia son mayores en transformadores con menor relación de transformación, en cambio, aquellos con mayor relación de transformación serán los de potencia nominal más elevada.

### 3.3 Estudio de ratios *R/X* típicos por cada nivel de tensión

A partir de las bases de datos mencionadas se ha calculado el ratio *R/X* en cada nivel de tensión tanto para líneas como para transformadores.

En la gráfica de la figura 3-20 se representan los ratios obtenidos para cada línea en función del nivel de tensión:



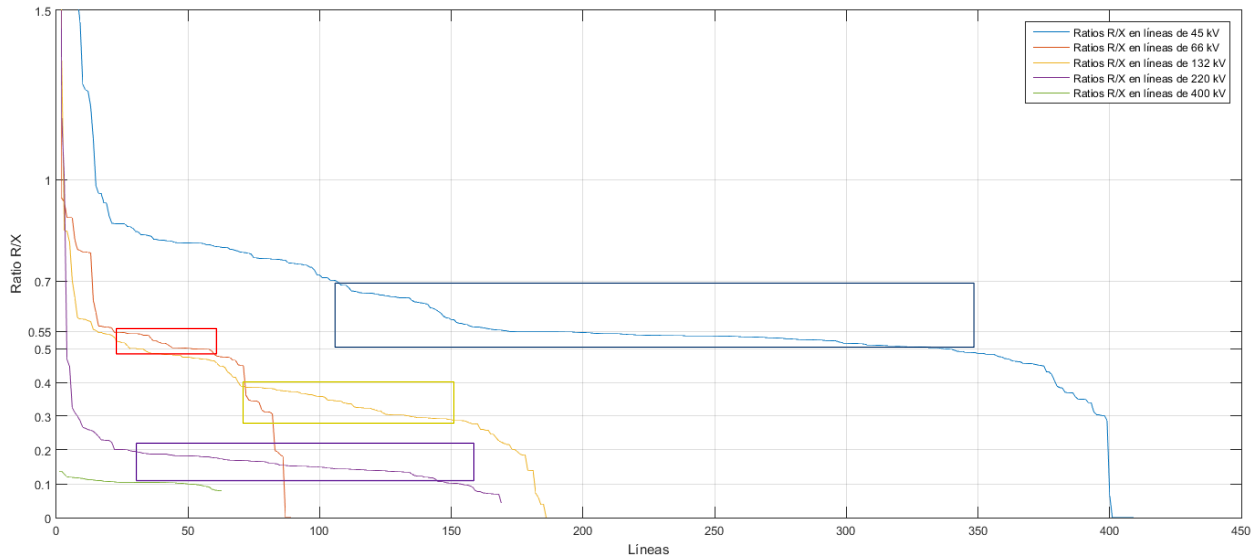


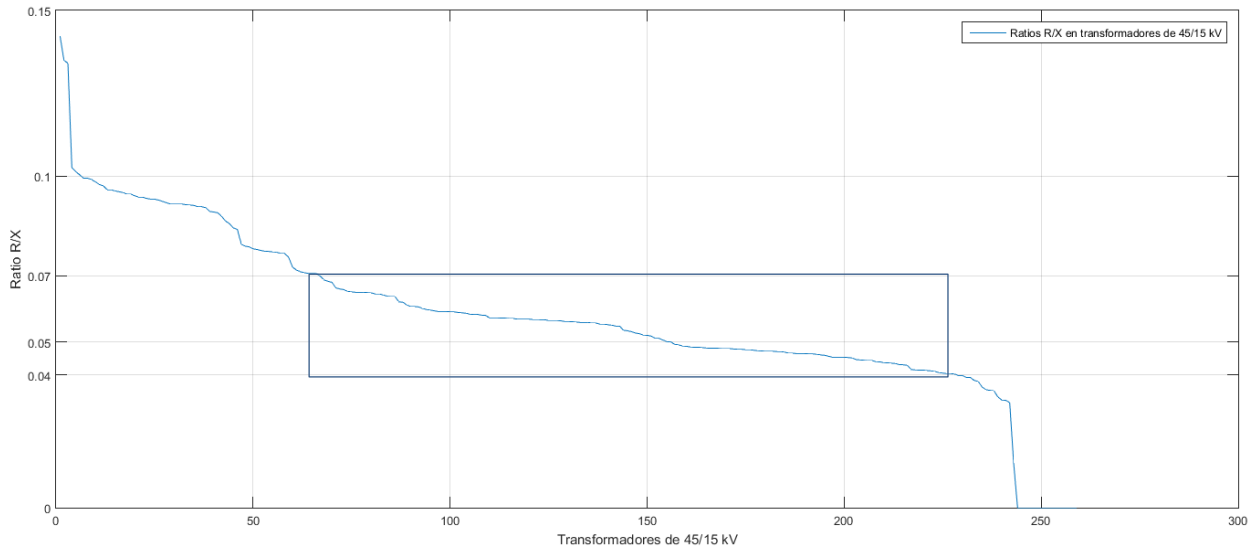
Figura 3-20: Ratios R/X de las líneas por cada nivel de tensión

Con estos resultados se pueden tomar los valores de ratios  $R/X$  más habituales en líneas por cada nivel de tensión, tal y como se presentan en la tabla 3-7:

<b>LÍNEAS</b>					
<b>NIVEL DE TENSIÓN (kV)</b>					
	<b>45</b>	<b>66</b>	<b>132</b>	<b>220</b>	<b>400</b>
<b>R/X</b>	[0.7-0.5]	[0.55-0.5]	[0.4-0.3]	[0.2-0.1]	0.1

Tabla 3-7: Ratios R/X habituales de las líneas por cada nivel de tensión

De forma general, se obtiene un resultado equivalente al estudio de los parámetros eléctricos en las líneas. Se puede ver que a medida que disminuye el nivel de tensión de la rama, es menor el valor del ratio  $R/X$ . Para transformadores con relación de transformación 45/15 kV, se muestran en la gráfica de la figura 3-21 los ratios  $R/X$  obtenidos para cada uno de ellos:



*Figura 3-21: Ratios R/X de los transformadores con relación de transformación 45/15 kV*

A partir de la gráfica anterior se puede comprobar que los valores de los ratios  $R/X$  más habituales en este tipo de transformador obedecen al intervalo  $[0.07-0.04]$ .

Respecto a los transformadores con relación de transformación 400/220 kV y 132/66kV, no se ha dispuesto de valores parámetros eléctricos suficientes en la base de datos como para realizar este estudio.

## 4 SIMULACIONES EN LÍNEAS

En el capítulo anterior se han seleccionado los valores típicos altos, medios y pequeños de los parámetros eléctricos de las líneas y transformadores en función del nivel de tensión y potencia nominal respectivamente. Esto va a permitir obtener los distintos escenarios de simulación siguiendo los criterios propuestos en dicho capítulo.

En este capítulo se va a desarrollar el objetivo principal del trabajo: analizar qué condiciones permiten una adecuada detección e identificación de errores en los parámetros eléctricos. Para ello se realizarán una serie de simulaciones sobre ramas en distintas redes con diferentes escenarios sobre los que se extraerán conclusiones generales.

### 4.1 Análisis de los parámetros eléctricos en ramas

Con objeto de presentar los ensayos de forma ordenada, se va a establecer una metodología para realizar las distintas simulaciones. En ella, cada uno de los parámetros eléctricos especificados en el apartado 3.1.1 del plan de trabajo se va a estudiar por separado, partiendo de las siguientes condiciones iniciales:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.
- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.
- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Niveles de tensión:** Línea de 132 kV
- **Topología de la rama:** Aislada.

Posteriormente, se irán cuestionando individualmente cada una de las hipótesis establecidas anteriormente con el objetivo de observar cómo influyen cada uno de ellos en la detección e identificación de parámetros erróneos. De esta forma el análisis de cada parámetro de estudio contará con el siguiente índice:

1. **Cuestión del valor del parámetro eléctrico.**
2. **Cuestión del nivel de carga de la línea.**
3. **Cuestión de número de escenarios considerados.**
4. **Cuestión de redundancia de medidas.**
5. **Cuestión de Factor de Potencia.**
6. **Cuestión de comportamiento simétrico.**
7. **Cuestión de nivel de tensión.**
8. **Cuestión de topología de rama.**

Para generar los conjuntos completos de medidas necesarias para realizar la estimación, se debe partir de la información de un reparto de cargas. En este reparto de cargas se deben colocar potencias que hagan circular la potencia deseada por la línea o transformador objeto de estudio. Para el caso de una rama aislada el reparto

tendrá la tensión y fase en un extremo de la rama, en el otro extremo la potencia inyectada activa y reactiva. Como tensión se considerará 1.05 p.u. (5% por encima del valor nominal) y un factor de potencia 0.9 que posteriormente se cuestionará.

Para realizar el reparto de cargas en tanto en red mallada como radial, se va a utilizar *el método del árbol*, que se resume en los siguientes pasos:

1. Se determina el nudo *slack* o de referencia.
2. Realizar el árbol, incluyendo la línea objeto de estudio.
3. Especificar los flujos de potencia activa y reactiva en los extremos de cada rama del árbol, no saturándolas excesivamente.

Con esta información, a través del programa *Crea\_conj\_complet\_medidas\_v13* (proporcionado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica) se generará el conjunto completo de medidas.

Por último, recordar que el software de análisis de la calidad de parámetros utiliza la codificación de la tabla 2-1 para identificar cada una de las medidas y parámetros de la red objeto de estudio.

#### 4.1.1 Análisis de reactancia serie

Se van a realizar ensayos introduciendo errores por exceso en el valor de la reactancia (el valor erróneo es superior al exacto) y partiendo del siguiente escenario inicial:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Niveles de tensión:** Línea de 132 kV
- **Topología de la rama:** Aislada.

En la tabla 4-1 se muestran los residuos normalizados (R.N.) obtenidos asociados al correspondiente parámetro erróneo:

R.N.	
Error	X= 0.18988 p.u.
+ 5%	1.5
+ 10%	3.0
+ 15%	4.3 [E]
+ 20%	5.7 [E]
+ 25%	6.9 [E]

Tabla 4-1: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie bajo condiciones iniciales

Con las condiciones anteriores se detecta e identifica el valor erróneo de la reactancia serie a partir de un error del 15% (se indica mediante [E] cuando el parámetro erróneo ha sido detectado e identificado) y estima correctamente el parámetro tal y como se presenta en la tabla 4-2. Lo elimina, y presenta la red estimada con todas las medidas con RN=0, dado que, al eliminar el parámetro erróneo, toda la información empleada por el estimador es exacta.

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.2184	0.0044	0.1899	4.3

Tabla 4-2: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 15 %

En la tabla 4-3 se muestran los resultados de máximos residuos normalizados en la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.218362	0.004367	1	4.3
1	2	1.185621	0.0053	0	1
1	4	1.185621	0.0053	0	1
1	6	1.185621	0.0053	0	1
1	8	1.185621	0.0053	0	1
4	0	-0.380325	0.0119	1	1

Tabla 4-3: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

El estimador identifica satisfactoriamente el parámetro erróneo. Las medidas de tensión en los nudos de la rama han sido las más afectadas por el error en el valor de la reactancia serie. Además, puede observarse una diferencia notable entre el mayor residuo normalizado asociado al parámetro erróneo y el resto de las medidas con residuos normalizados no nulos.

A medida que se introduce un error mayor (+20%, +25%), le resulta más fácil al sistema detectar e identificar, y por tanto estimarlo exactamente. En cambio, cuando se ha introducido los errores +5% y +10%, no detecta ni identifica el parámetro como erróneo ( $R.N < 3$ ) y se estima incorrectamente. Además, presenta la red estimada con residuo normalizado distinto de 0 en sus medidas, lo cuál justifica que en estas situaciones la función objetivo del estimador resulte un valor alejado de 0. Es decir, que al no detectarse el error en la fase de identificación de parámetros sospechosos, se ha contaminado la estimación de las medidas de los escenarios.

#### 4.1.1.1 Análisis del valor del parámetro eléctrico

A continuación, se va a ensayar otra rama con los valores de parámetros medios:

$$R=0.03 \text{ p.u. } X=0.075 \text{ p.u. } B=0.02 \text{ p.u.}$$

Y con valores de parámetros pequeños:

$$R=0.008 \text{ p.u. } X=0.025 \text{ p.u. } B=0.0075 \text{ p.u.}$$

- **Valor medio de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-4 se presenta el mayor valor de residuo normalizado obtenido para diferentes porcentajes de error en la reactancia:

R.N.	
Error	X= 0.075
+ 5%	0.8
+ 10%	1.7
+ 15%	2.5
+ 20%	3.3 [E]
+ 25%	4.1 [E]

Tabla 4-4: Residuos normalizados asociados al valor medio de la reactancia serie erróneo

Se detecta e identifica el valor erróneo de la reactancia serie a partir del 20%, obteniéndose los siguientes resultados de la tabla 4-5:

Parámetro	Valor	Desv std	Estimado	RN
X ser	0.09	0.0018	0.075	3.3

Tabla 4-5: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 20 %

Se puede ver que se estima correctamente el valor del parámetro. Lo elimina y presenta la red estimada con todas las medidas con RN=0.

A continuación se muestran los resultados de máximos residuos normalizados en la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv std	Nº Rama	RN
51	0	0.09	0.0018	1	3.3
1	8	1.118339	0.0053	0	0.9
1	2	1.118339	0.0053	0	0.9
1	4	1.118339	0.0053	0	0.9
1	6	1.118339	0.0053	0	0.9
4	0	-0.487984	0.0119	4	0.9

Tabla 4-6: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

El estimador identifica satisfactoriamente el parámetro erróneo.

- **Valor pequeño de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-7 se presenta el mayor valor de residuo normalizado obtenido para diferentes porcentajes de error en la reactancia:

R.N.	
Error	X= 0.025
+ 5%	NaN
+ 40%	NaN
+ 50%	NaN
+ 60%	NaN
+ 65%	4.2 [E]

Tabla 4-7: Residuos normalizados asociados al valor pequeño de la reactancia serie erróneo

No se ha detectado e identificado el parámetro erróneo hasta que se ha introducido un error muy alto (+ 65%). Lo elimina y presenta la red estimada con todas las medidas con RN=0. Estima correctamente el valor del parámetro tal como se presenta en la tabla 4-8:

Parámetro	Valor	Desv std	Estimado	Desv std	RN
X ser	0.0413	0.001	0.0251	0	4.2

Tabla 4-8: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 65 %

Los resultados de máximos residuos normalizados obtenidos en la primera iteración son los siguientes:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv std	Nº Rama	RN
51	0	0.04125	0.00100	1	4.2
4	0	-0.538213	0.0119	1	1.2
4	0	-0.538213	0.0119	2	1.2
4	0	-0.538213	0.0119	3	1.2
4	0	-0.538213	0.0119	4	1.2
1	2	1.071798	0.0053	0	1.1

Tabla 4-9: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

El estimador identifica satisfactoriamente el parámetro erróneo. En este caso, al introducir un error elevado en la reactancia serie, las medidas de flujo de potencia reactiva han sido las más afectadas.

Se puede ver que al disminuir el valor de la reactancia de la línea empeora la capacidad de detección e identificación del error en el parámetro. Además, en el caso de valores pequeños, el estimador presenta dificultades a la hora de calcular el residuo normalizado del parámetro estimado, dando como resultado *NaN* (*Not a Number*), debido a una indeterminación producida al realizar para el cálculo del residuo normalizado el cociente entre el residuo y su desviación típica. En las tablas 4-10, 4-11, 4-12, 4-13 se muestran los resultados de la estimación de los parámetros erróneos con residuo normalizado asociado *NaN*, presentados en la tabla 4-7. Se puede ver que en estos casos se estima un valor incorrecto de los parámetros:

#### **X\*1.05 (0.025\*1.05=0.02625)**

Parámetro	Valor	Desv std	Estimado	Desv std	RN
X ser	0.02625	0.001	0.02617	0.00097	NaN

*Tabla 4-10: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 5 %*

#### **X\*1.4 (0.025\*1.4=0.035)**

Parámetro	Valor	Desv std	Estimado	Desv std	RN
X ser	0.035	0.001	0.03435	0.00097	NaN

*Tabla 4-11: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 40 %*

#### **X\*1.5 (0.025\*1.5=0.0375)**

Parámetro	Valor	Desv std	Estimado	Desv std	RN
X ser	0.0375	0.001	0.03669	0.00097	NaN

*Tabla 4-12: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 50 %*

#### **X\*1.6 (0.025\*1.6=0.04)**

Parámetro	Valor	Desv std	Estimado	Desv std	RN
X ser	0.04	0.001	0.03902	0.00097	NaN

*Tabla 4-13: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 60 %*

#### **4.1.1.2 Cuestión del nivel de carga de la línea**

Hasta ahora, se han realizado los ensayos suponiendo que las líneas trabajan siempre a un régimen máximo de carga, es decir, a su potencia nominal. Sin embargo, la realidad no es así, ya que el estado de carga de las líneas varía durante la operación. Por tanto, se van a realizar simulaciones con 5 escenarios con los diferentes



regímenes de carga definidos en el apartado 3.1.4 del plan de trabajo, y se compararán los resultados con los obtenidos cuando por la línea circula la potencia nominal.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 130 MVA**

En la tabla 4-14 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 130 MVA:

R.N.		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 5%	1.6	1.1
+ 10%	3.1 [E]	2.2
+ 15%	4.6 [E]	3.2 [E]
+ 20%	6.0 [E]	4.3 [E]
+ 25%	7.3 [E]	5.3 [E]

*Tabla 4-14: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA*

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 100 MVA**

En la tabla 4-15 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 100 MVA:

R.N.		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 5%	1.3	0.8
+ 10%	2.5	1.7
+ 15%	3.7 [E]	2.5
+ 20%	4.9 [E]	3.3 [E]
+ 25%	6.0 [E]	4.0 [E]

*Tabla 4-15: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA*

A raíz de los resultados de las tablas 4-14 y 4-15, se comprueba que al disminuir la potencia nominal de la línea y al emplear 5 escenarios con distintos niveles de carga, se tienen peores condiciones para poder identificar errores en la reactancia serie.

#### 4.1.1.3 Cuestión de número de escenarios considerados

Ahora se van a realizar las simulaciones variando el número de escenarios considerados, con 1, 24, y 64 escenarios iguales al nivel máximo de potencia:

R.N.				
Error	1 escenario	4 escenarios	24 escenarios	64 escenarios
+ 5%	0.9	1.5	2.1	2.3
+ 10%	1.8	3.0	4.1 [E]	4.4 [E]
+ 15%	2.6	4.3 [E]	5.9 [E]	6.3 [E]
+ 20%	3.5 [E]	5.7 [E]	7.6 [E]	8.1 [E]
+ 25%	4.3 [E]	6.9 [E]	9.2 [E]	9.7 [E]

Tabla 4-16: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el número de escenarios considerados

Como se puede ver en la tabla 4-16, mejora la capacidad de detección de errores en los parámetros al aumentar el número de escenarios. Con un sólo escenario es necesario un 20% de error en el parámetro para que el error sea identificado con un residuo normalizado de 3.5. Sin embargo, empleando 64 escenarios solamente con un 10% de error es identificado con un valor de residuo normalizado de 4.4.

#### 4.1.1.4 Cuestión de redundancia de medidas.

Los resultados de las siguientes simulaciones se obtienen al modificar la redundancia de medidas según los criterios establecidos en el apartado 3.1.7 del plan de trabajo:

R.N.			
Error	Completa	Reducida	Muy reducida
+ 5%	1.5	1.3	0.8
+ 10%	3.0	2.6	1.5
+ 15%	4.3 [E]	3.8 [E]	2.2
+ 20%	5.7 [E]	4.9 [E]	2.9
+ 25%	6.9 [E]	6.1 [E]	3.5 [E]

Tabla 4-17: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar la redundancia de medidas

Disminuye la capacidad de detección e identificación de errores en la reactancia serie. Como se observa en la tabla 4-17, se detecta el parámetro erróneo con un error del 15% y residuo normalizado 4.3 con redundancia completa, mientras que con redundancia muy reducida no se detecta e identifica el error hasta que introduce un 25%.

#### 4.1.1.5 Cuestión de Factor de Potencia

En la tabla 4-18 se presentan los resultados obtenidos al variar el factor de potencia:

Error	R.N.			
	f.d.p.=1	f.d.p.= 0.9	f.d.p.= 0.8	f.d.p.= 0.7
+ 5%	1.5	1.5	1.6	1.7
+ 10%	2.9	3.0	3.1 [E]	3.3 [E]
+ 15%	4.3 [E]	4.3 [E]	4.6 [E]	4.8 [E]
+ 20%	5.6 [E]	5.7 [E]	6.0 [E]	6.3 [E]
+ 25%	6.9 [E]	6.9 [E]	7.4 [E]	7.7 [E]

Tabla 4-18: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar el factor de potencia

Al disminuir el factor de potencia se produce una mejora de las condiciones de detección e identificación de errores en el valor de la reactancia serie. Como se puede ver en la tabla 4-18, cuando el factor de potencia es 0.7 se detecta e identifica el valor erróneo de la reactancia serie con un error del 10% y residuo normalizado 3.3, mientras que cuando el factor de potencia es 1 o 0.9 se detecta el error a partir de un 15% y residuo normalizado 4.3.

#### 4.1.1.6 Cuestión de comportamiento simétrico

Se va a realizar un ensayo con aquellas condiciones que permiten una adecuada detección e identificación del parámetro erróneo, teniendo en cuenta los resultados anteriores. Se introducirán errores por exceso y por defecto en el valor del parámetro (valor erróneo superior e inferior al valor exacto respectivamente) con objeto de evaluar si el estimador posee un comportamiento simétrico en cuanto a la detección e identificación de errores en el parámetro.

Se ensayarán las siguientes condiciones:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.  
 $R=0.05379$  p.u.  $X=0.18988$  p.u.  $B=0.03667$  p.u.
- Nivel de carga: 100% del valor máximo (130 MVA).
- Número de escenarios considerados: 24 escenarios iguales.
- Redundancia: Completa.
- Factor de Potencia: 0.7.

Los máximos residuos normalizados asociados a los valores erróneos de la reactancia serie de una línea de 132 kV bajo las condiciones anteriores se muestran en la tabla 4-19:

R.N.		
Error	Por exceso	Por defecto
5%	2.2	2.4
10%	4.2 [E]	5.0 [E]
15%	6.1 [E]	7.9 [E]
20%	7.9 [E]	11.0 [E]
25%	9.5 [E]	14.5 [E]

Tabla 4-19: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie con errores por exceso y defecto

Se detecta e identifica correctamente el valor erróneo cuando se introduce un 10% de error por exceso y por defecto (tablas 4-20 y 4-22 respectivamente), estimándolo correctamente (tablas 4-21 y 4-23). Se elimina y el software presenta la red estimada con todas las medidas con R.N.=0 en ambos casos:

• **Resultados cuando se introduce un error por exceso de +10%:**

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.208868	0.004177	1	4.2
1	2	1.232420	0.0053	0	0.3
1	4	1.232420	0.0053	0	0.3
1	6	1.232420	0.0053	0	0.3
1	8	1.232420	0.0053	0	0.3
1	10	1.232420	0.0053	0	0.3

Tabla 4-20: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 10%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.2089	0.0042	0.1899	4.2

Tabla 4-21: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por exceso del 10%

• **Resultados cuando se introduce un error por defecto de - 10%:**

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.170892	0.003418	1	5.0
1	2	1.232420	0.0053	0	0.4
1	4	1.232420	0.0053	0	0.4
1	6	1.232420	0.0053	0	0.4
1	8	1.232420	0.0053	0	0.4
1	10	1.232420	0.0053	0	0.4

Tabla 4-22: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 10%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.1709	0.0034	0.1899	5.0

Tabla 4-23: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por defecto del 10%

A partir de los resultados anteriores y de la gráfica de la figura 4-1, se puede ver que bajo las condiciones especificadas no se ha detectado un comportamiento simétrico.

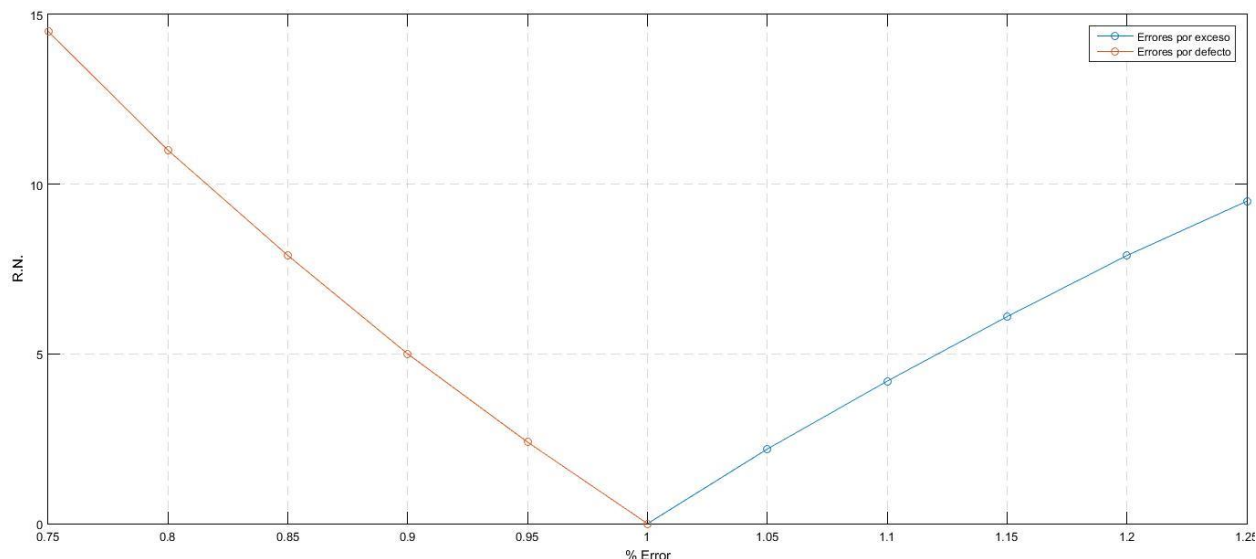


Figura 4-1: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación de la reactancia serie

Cuando se produce un error por defecto, se ha observado que mejora la detección e identificación de errores a medida que aumenta el error introducido. Es decir, que los residuos normalizados obtenidos son cada vez mayores respecto a los que se obtienen al introducir un error por exceso. Además, hay que destacar que en el caso de errores por defecto la diferencia con respecto al segundo residuo normalizado es mayor que cuando se introducen errores por exceso, tal y como se puede ver en las tablas 4-22 y 4-20 respectivamente. Por tanto, se mejora también la identificación de error en el parámetro desde este aspecto.

#### 4.1.1.7 Cuestión de nivel de tensión

En este apartado se va a evaluar la hipótesis de la tensión de la línea. Hasta ahora se han realizado las simulaciones en una rama de 132 kV. A continuación se va a ver qué ocurre en una línea de 400 kV y 45 kV, con objeto de comprobar como influye el nivel de tensión en la capacidad de detección e identificación de errores en el parámetro de estudio.

- **Nivel de tensión: 45 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.5896 \text{ p.u. } X=0.65 \text{ p.u. } B=0.0213 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=53 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la reactancia serie de una línea de 45 kV se presentan en la tabla 4-24:

R.N.	
Error	X= 0.65 pu
+ 5%	1.9
+ 10%	3.7 [E]
+ 15%	5.4 [E]
+ 20%	6.9 [E]
+ 25%	8.4 [E]

Tabla 4-24: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie en una línea de 45 kV

Detecta e identifica el error satisfactoriamente a partir de un error del 10%:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.715	0.0143	1	3.7
4	0	-0.161790	0.0025	1	0.8
4	0	-0.161790	0.0025	2	0.8
4	0	-0.161790	0.0025	3	0.8
4	0	-0.161790	0.0025	4	0.8
4	0	0.231	0.0025	-4	0.7

Tabla 4-25: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Y se estima por tanto correctamente:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.715	0.0143	0.65	3.7

Tabla 4-26: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 10 %

- **Nivel de tensión: 400 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.00325 \text{ p.u. } X=0.03105 \text{ p.u. } B=1.181 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=1600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la reactancia serie de una línea de 400 kV se presentan en la tabla 4-27:

R.N.	
Error	X=0.03105 pu
+ 5%	0.9
+ 10%	1.8
+ 15%	2.7
+ 20%	3.6 [E]
+ 25%	4.5 [E]

Tabla 4-27: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie en una línea de 400 kV

Para cada nivel de tensión se han tomado condiciones análogas, como mayores de los valores esperados, nivel de carga 100% del valor máximo, 4 escenarios iguales y redundancia completa. De modo que se van a comparar los resultados y observar cómo afecta el nivel de tensión a través de la siguiente gráfica de la figura 4-2:

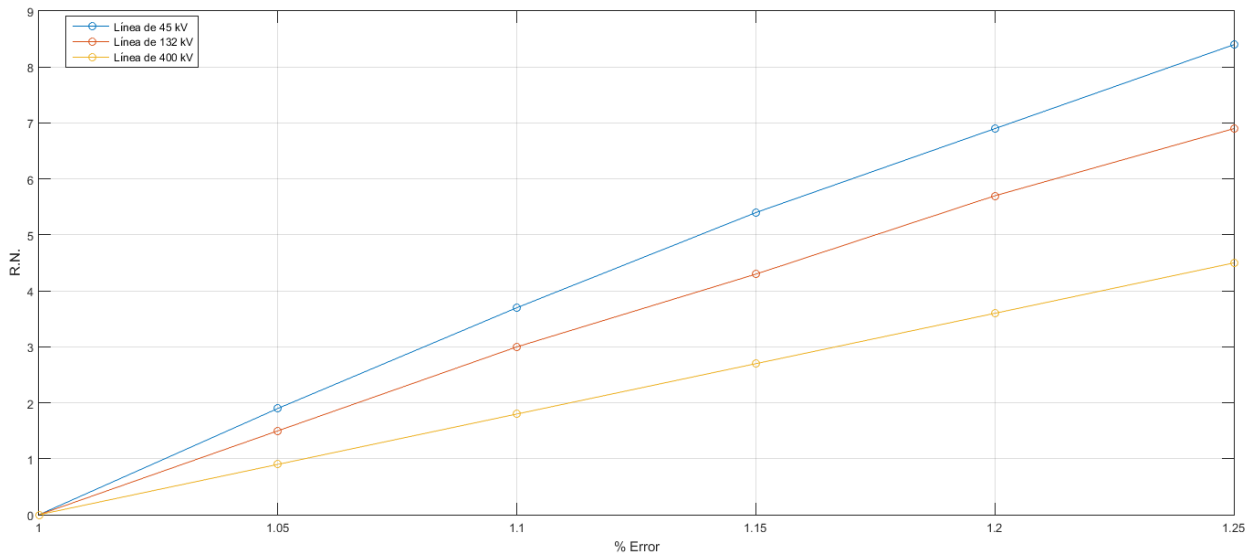


Figura 4-2: Resultados de cuestionar el nivel de tensión de la rama en la estimación de la reactancia serie

Se detecta una mejoría de la capacidad de detección e identificación de errores en la reactancia serie en la línea de menor nivel de tensión. En ella, el estimador detecta e identifica satisfactoriamente el error en el parámetro a partir de un 10%, mientras que en las líneas de 132 kV y 400 kV lo hace para 15% y 20% respectivamente. En todos los casos, desde que se detecta el parámetro erróneo, se estima correctamente el valor.

#### 4.1.1.8 Cuestión de topología de rama

En esta sección se va a analizar cómo influye la topología de la rama en la estimación de los parámetros, comprobando en qué casos favorece una adecuada detección e identificación de errores.

Para ello, se va a tomar la línea de 132 kV estudiada hasta ahora, para formar parte la red mallada IEEE de 14 nudos y otra radial de 6 nudos. El diagrama unifilar y valores de los parámetros de las redes radial y mallada ensayadas se encuentran en el [anexo A](#). Cabe recordar, que el reparto de cargas se ha realizado con el método del árbol tal y como se desarrolló en la introducción.

Los siguientes ensayos se han realizado considerando las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.

Los resultados de las simulaciones al introducir errores por exceso en la reactancia serie de la línea de 132 kV se muestran en la tabla 4-28, en función de cada tipo de topología:



<b>R.N.</b>			
<b>TOPOLOGÍA DE RAMA</b>			
<b>Error</b>	<b>Aislada</b>	<b>Radial</b>	<b>Mallada</b>
+ 5%	1.5	1.7	2.3
+ 10%	3.0	3.2 [E]	4.4 [E]
+ 15%	4.3 [E]	4.7 [E]	5.9 [E]
+ 20%	5.7 [E]	6.2 [E]	8.0 [E]
+ 25%	6.9 [E]	7.5 [E]	9.7 [E]

Tabla 4-28: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia serie al cuestionar la topología de rama

Comparando los resultados de los distintos tipos de topología analizados, se comprueba en la tabla 4-28 que la red mallada es la que más favorece la detección e identificación de errores en la reactancia serie. Como se puede ver, para esta topología se detecta e identifica la reactancia serie errónea con residuo normalizado 4.4, al introducir un 10% de error. Sin embargo, en topología radial para un error del 10% se identifica con residuo normalizado 3.2, y en caso de rama de aislada no llegar a detectarlo.

Todos los errores detectados han sido identificados satisfactoriamente, estimando el valor correcto del parámetro. Una vez eliminado el parámetro erróneo, se muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 en todos estos casos.

Por otro lado, también se puede observar en los resultados de la tabla 4-28 que en red radial la calidad de la detección e identificación es similar a la de rama aislada. Esta pequeña diferencia puede deberse a que en red radial hay mayor redundancia en el nudo que conecta con el resto de la red.

Los resultados de la tabla 4-28 se representa en la gráfica de la figura 4-3:

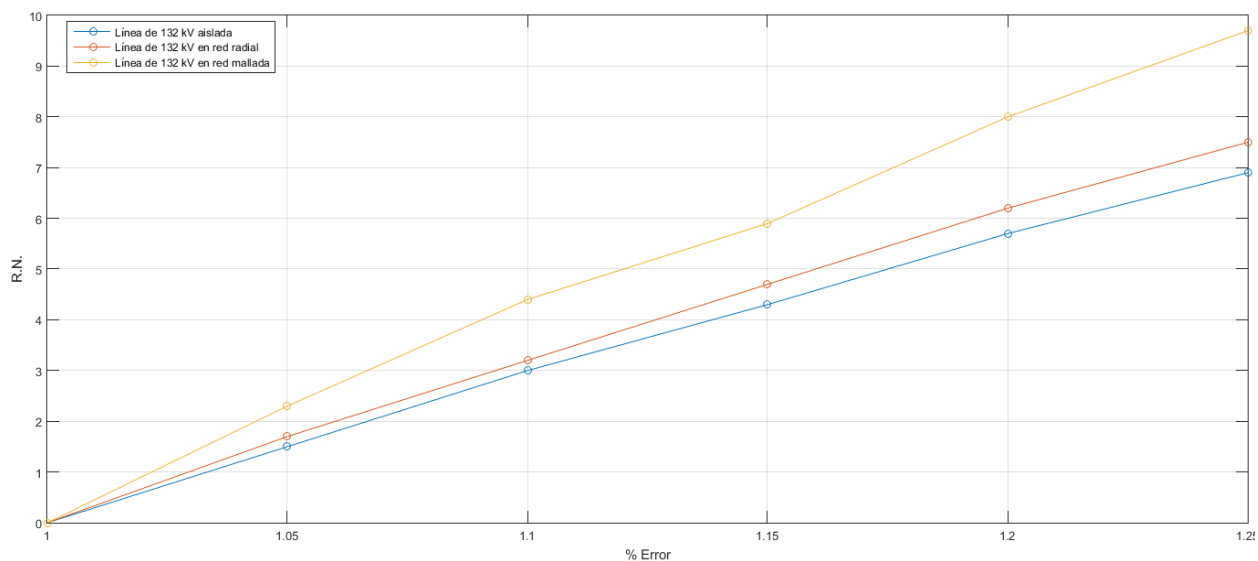


Figura 4-3: Resultados de cuestionar la topología de rama en la estimación de la reactancia serie

#### 4.1.2 Análisis de resistencia serie

Se van a realizar ensayos introduciendo errores por exceso en el valor de la resistencia y partiendo del siguiente escenario inicial:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Niveles de tensión:** Línea de 132 kV
- **Topología de la rama:** Aislada.

En la tabla 4-29 se muestran los residuos normalizados (R.N.) obtenidos asociados al correspondiente parámetro erróneo:

R.N.	
Error	R=0.05379 pu
+ 5%	NaN
+ 10%	NaN
+ 15%	2.2
+ 20%	2.9
+ 25%	3.6 [E]

Tabla 4-29: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie bajo condiciones iniciales

Cuando se introduce un error del 25%, estima correctamente el valor del parámetro tal y como se representa en la tabla 4-30. Detecta e identifica el parámetro erróneo, lo elimina y presenta la red estimada con todas las medidas con RN=0.

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0672	0.0013	0.0538	3.6

Tabla 4-30: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 25 %

A continuación se muestran los resultados de máximos residuos normalizados en la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.067237	0.001345	1	3.6
1	8	1.185621	0.0053	0	1.6
1	2	1.185621	0.0053	0	1.6
1	4	1.185621	0.0053	0	1.6
1	6	1.185621	0.0053	0	1.6
1	7	1.05	0.0053	0	1.6

Tabla 4-31: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Mientras que el valor erróneo de la resistencia serie ha sido detectado con un 25% de error con un residuo normalizado de 3.6, en el apartador anterior la reactancia serie errónea fue detectada con un 15% de error y un residuo normalizado asociado de 4.3.

#### 4.1.2.1 Análisis del valor del parámetro eléctrico

A continuación, se va a ensayar la rama con los valores medios:

$$R=0.03 \text{ p.u. } X=0.075 \text{ p.u. } B=0.02 \text{ p.u.}$$

Y con los valores pequeños:

$$R=0.008 \text{ p.u. } X=0.025 \text{ p.u. } B=0.0075 \text{ p.u.}$$

- **Valor medio de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-32 se presenta el mayor valor de residuo normalizado obtenido para diferentes porcentajes de error en la resistencia:

R.N.	
Error	R= 0.03
+ 5%	NaN
+ 10%	NaN
+ 15%	NaN
+ 20%	NaN
+ 25%	NaN
+ 35%	NaN
+ 45%	3.9 [E]

Tabla 4-32: Residuos normalizados asociados al valor medio de la resistencia serie errónea

Para  $R=0.03$ , se detecta a partir de un error del 45% con los siguientes resultados:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.0435	0.001	1	3.9
1	8	1.118339	0.0053	0	1.8
1	2	1.118339	0.0053	0	1.8
1	4	1.118339	0.0053	0	1.8
1	6	1.118339	0.0053	0	1.8
1	7	1.05	0.0053	0	1.7

Tabla 4-33: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0435	0.001	0.0301	3.9

Tabla 4-34: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 45 %

Se detecta e identifica satisfactoriamente el parámetro erróneo como muestra la tabla 4-33, y se estima el valor correcto de la resistencia serie en la tabla 4-34. Finalmente se elimina, y presenta la red estimada con todos los residuos normalizados asociados igual a 0.

- **Valor pequeño de parámetros de una línea de 132 kV:**

En la tabla 4-35 se presentan los resultados obtenidos para diferentes porcentajes de error en la resistencia:

R.N.	
Error	R= 0.008
+ 25%	NaN
+ 50%	NaN
+ 70%	NaN
+ 90%	NaN

Tabla 4-35: Residuos normalizados asociados al valor pequeño de la reactancia serie erróneo

El estimador no es capaz de detectar el valor erróneo de la resistencia serie, obteniéndose en todos los casos residuo normalizado *NaN*, y por tanto una estimación errónea de cada uno de ellos.

A la vista de los resultados se observa que para mayor valor de la resistencia serie, mejoran las condiciones de

detección e identificación de errores en el parámetro.

#### 4.1.2.2 Cuestión del nivel de carga de la línea

Se van a realizar simulaciones con 5 escenarios con los diferentes regímenes de carga definidos en el apartado 3.1.4 del plan de trabajo, y se compararán los resultados con los obtenidos cuando por la línea circula la potencia nominal.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 130 MVA**

En la tabla 4-36 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 130 MVA:

R.N.		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 5%	NaN	NaN
+ 10%	1.6	NaN
+ 15%	2.4	NaN
+ 20%	3.2 [E]	NaN
+ 25%	3.9 [E]	NaN
+ 30%	4.7 [E]	3.0 [E]
+ 40%	6.1 [E]	4.0 [E]

*Tabla 4-36: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA*

Se ha comprobado como al emplear 5 escenarios al 100% se identifica mejor los errores que empleando 5 escenarios con régimen de carga en general inferior al 100%. Por lo tanto, se identifica una mejoría en las condiciones de detección de errores en los valores de la resistencia serie cuanto mayor sea el régimen de carga de la línea.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 100 MVA**

En la tabla 4-37 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 100 MVA:

R.N.		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 5%	NaN	NaN
+ 10%	NaN	NaN
+ 15%	NaN	NaN
+ 20%	NaN	NaN
+ 25%	3.1 [E]	NaN
+ 30%	3.7 [E]	NaN
+ 40%	4.9 [E]	3.1 [E]

*Tabla 4-37: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA*

Al disminuir la potencia nominal de la línea se observa que empeoran las condiciones de detección e identificación de errores en la resistencia serie.

#### 4.1.2.3 Cuestión del número de escenarios considerados

Se van a realizar simulaciones variando el número de escenarios considerados, con 1, y 24 escenarios iguales al nivel máximo de potencia:

R.N.			
Error	1 escenario	4 escenarios	24 escenarios
+ 5%	NaN	NaN	1.5
+ 10%	NaN	NaN	2.9
+ 15%	NaN	2.2	4.3 [E]
+ 20%	NaN	2.9	5.6 [E]
+ 25%	NaN	3.6 [E]	6.8 [E]
+ 35%	NaN	4.9 [E]	9.2 [E]
+ 45%	3.3 [E]	6.3 [E]	11.4 [E]

*Tabla 4-38: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el número de escenarios considerados*

Como se puede ver en la tabla 4-38, mejora la capacidad de detección de errores en los parámetros al aumentar el número de escenarios. Mientras que con un escenario se detecta el valor erróneo de la resistencia serie con un error del 45% y residuo normalizado 3.3, cuando se dispone de 24 escenarios se detecta con un error del 15% y residuo normalizado 4.3.

#### 4.1.2.4 Cuestión de redundancia de medidas

Se obtienen los siguientes resultados al variar la redundancia de medidas según los criterios del apartado 3.1.7 del plan de trabajo:

R.N.			
Error	Completa	Reducida	Muy reducida
+ 5%	NaN	NaN	NaN
+ 10%	NaN	NaN	NaN
+ 15%	2.2	2.1	NaN
+ 20%	2.9	2.8	2.7
+ 25%	3.6 [E]	3.5 [E]	3.3 [E]

Tabla 4-39: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar la redundancia de medidas

Disminuye la capacidad de detección e identificación de errores en la resistencia serie al reducir la redundancia de medidas. Cuando se introduce un error del 25% en el parámetro, se puede ver en la tabla 4-39 que con redundancia completa el residuo normalizado asociado es de 3.6, mientras que con redundancia muy reducida es de 3.3.

#### 4.1.2.5 Cuestión del factor de potencia

Al variar el factor de potencia se obtienen los resultados de la tabla 4-40:

R.N.				
Error	f.d.p.=1	f.d.p.= 0.9	f.d.p.= 0.8	f.d.p.= 0.7
+ 5%	NaN	NaN	NaN	NaN
+ 10%	1.6	NaN	NaN	NaN
+ 15%	2.5	2.2	NaN	NaN
+ 20%	3.2 [E]	2.9	2.6	NaN
+ 25%	4.0 [E]	3.6 [E]	3.2 [E]	2.8
+ 35 %	5.6 [E]	4.9 [E]	4.4 [E]	3.9 [E]

Tabla 4-40: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar el factor de potencia

Teniendo en cuenta la tabla 4-40 se comprueba que para mayor factor de potencia de la carga, se tienen mejores condiciones para detectar e identificar errores en el valor de la resistencia serie. Justo al contrario ocurría con la reactancia serie, que como se vió en el apartado 4.1.1.5, a menor factor de potencia mejoraban las condiciones para detectar e identificar el valor erróneo de dicho parámetro.

#### 4.1.2.6 Cuestión de comportamiento simétrico

A continuación se va a realizar un ensayo con aquellas condiciones que permiten una adecuada detección e identificación del parámetro erróneo, teniendo en cuenta los resultados anteriores. Se introducirán errores por exceso y por defecto con objeto de evaluar si el estimador posee un comportamiento simétrico.

Se ensayarán las siguientes condiciones:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.  
R=0.05379 p.u. X=0.18988 p.u. B=0.03667 p.u.
- Nivel de carga: 100% del valor máximo (130 MVA).
- Número de escenarios considerados: 24 escenarios iguales.
- Redundancia: Completa.
- Factor de Potencia: 1.

Los máximos residuos normalizados asociados a los valores erróneos de la resistencia serie de una línea de 132 kV bajo las condiciones anteriores se muestran en la tabla 4-41:

R.N.		
Error	Por exceso	Por defecto
5%	1.6	1.7
10%	3.1 [E]	3.4 [E]
15%	4.6 [E]	5.1 [E]
20%	6.0 [E]	6.7 [E]
25%	7.3 [E]	8.4 [E]

*Tabla 4-41: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie con errores por exceso y defecto*

Se detecta e identifica correctamente el valor erróneo cuando se introduce un 10% de error por exceso y por defecto (tablas 4-42 y 4-44 respectivamente), y se estima el valor correcto (tablas 4-43 y 4-45). Se elimina y presenta la red estimada con todas las medidas con R.N.=0 en ambos casos:



• **Resultados cuando se introduce un error por exceso de + 10%:**

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.059	0.001183	1	3.1
1	2	1.09344	0.0053	0	0.4
1	4	1.09344	0.0053	0	0.4
1	6	1.09344	0.0053	0	0.4
1	8	1.09344	0.0053	0	0.4
1	10	1.09344	0.0053	0	0.4

Tabla 4-42: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 10%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0592	0.0012	0.0538	3.1

Tabla 4-43: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por exceso del 10%

• **Resultados cuando se introduce un error por defecto de - 10%:**

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.048411	0.001	1	3.4
1	2	1.09344	0.0053	0	0.5
1	4	1.09344	0.0053	0	0.5
1	6	1.09344	0.0053	0	0.5
1	8	1.09344	0.0053	0	0.5
1	10	1.09344	0.0053	0	0.5

Tabla 4-44: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 10%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0484	0.001	0.0538	3.4

Tabla 4-45: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por defecto del 10%

Se representan gráficamente los resultados anteriores en la figura 4-4:

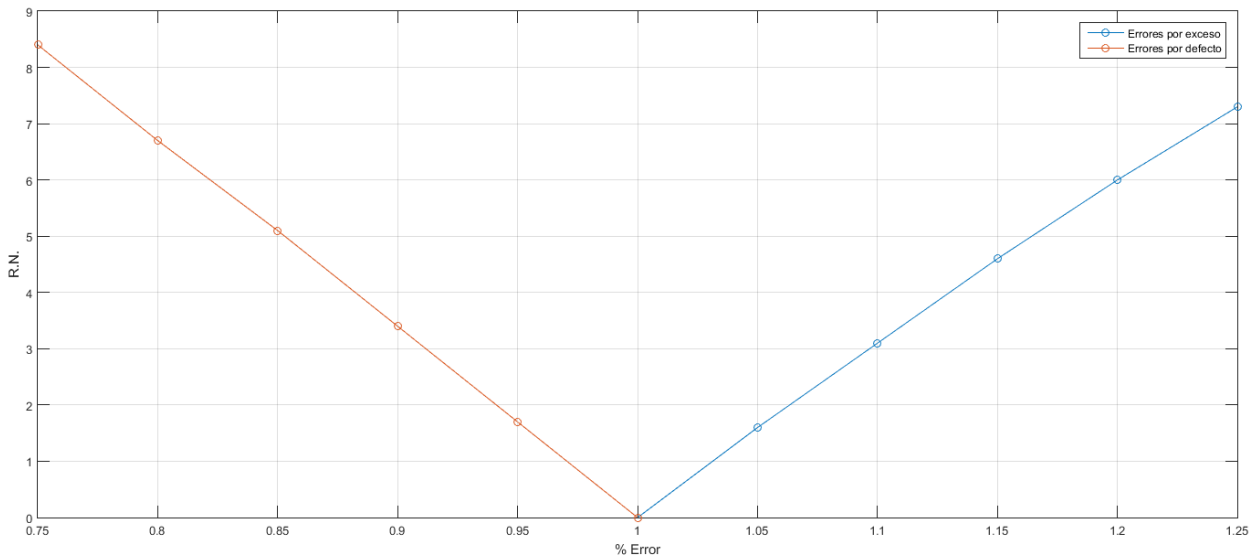


Figura 4-4: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación de la resistencia serie

El estimador no presenta un comportamiento simétrico en cuanto a la detección e identificación de errores en el valor de la resistencia serie, obteniendo mejores resultados cuando los errores introducidos son por defecto. Este resultado es equivalente al obtenido en el estudio de la reactancia en el apartado 4.1.1.6. Sin embargo, en el estudio de este último parámetro se detectaron e identificaron los errores por exceso y defecto con mayores residuos normalizados, lo que refleja una mayor sensibilidad de la reactancia serie al proceso de estimación de parámetros. Además, el comportamiento resulta más asimétrico en la estimación de la reactancia serie que en la resistencia, ya que la diferencia de residuos normalizados por exceso y defecto es mayor.

Finalmente, al igual que con la reactancia serie, se puede ver que mejora la identificación del valor erróneo de la resistencia al introducir errores por defecto en que la diferencia respecto al segundo residuo normalizado en las tablas 4-42 y 4-44, es mayor al introducir errores por defecto.

#### 4.1.2.7 Cuestión de nivel de tensión

A continuación se va a ver qué ocurre en una línea de 400 kV y 45 kV, con objeto de comprobar como influye el nivel de tensión en la capacidad de detección e identificación de errores en el parámetro de estudio.

- **Nivel de tensión: 45 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.5896 \text{ p.u. } X=0.65 \text{ p.u. } B=0.0213 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=53 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia serie de una línea de 45 kV se presentan en la tabla 4-46:

R.N.	
Error	R= 0.5896 p.u.
+ 5%	1.9
+ 10%	3.6 [E]
+ 15%	5.3 [E]
+ 20%	6.9 [E]
+ 25%	8.4 [E]

Tabla 4-46: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie en una línea de 45 kV

Detecta e identifica el error satisfactoriamente a partir de un error del 10%:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.64856	0.012971	1	3.6
1	8	1.368087	0.0053	0	1.0
1	2	1.368087	0.0053	0	1.0
1	4	1.368087	0.0053	0	1.0
1	6	1.368087	0.0053	0	1.0
1	7	1.05	0.0053	0	0.9

Tabla 4-47: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Y se estima por tanto correctamente:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.6486	0.013	0.5896	3.6

Tabla 4-48: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 10 %

- **Nivel de tensión: 400 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.00325 \text{ p.u. } X=0.03105 \text{ p.u. } B=1.181 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

S=1600 MVA

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia serie de una línea de 400 kV se presentan en la tabla 4-49:

R.N.	
Error	R=0.03105 p.u.
+ 5%	0.1
+ 10%	0.2
+ 15%	0.4
+ 20%	0.5
+ 25%	0.6

Tabla 4-49: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie en una línea de 400 kV

Para cada nivel de tensión se han tomado de nuevo condiciones análogas, de tal manera que se van a comparar los resultados para observar cómo afecta el nivel de tensión a través de la gráfica de la figura 4-5:

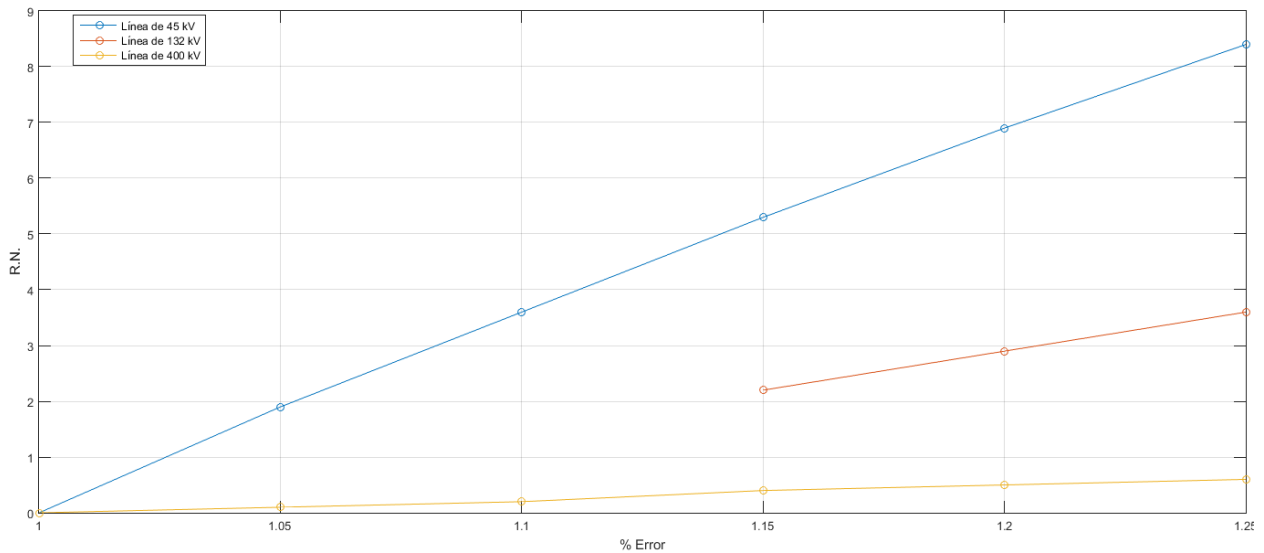


Figura 4-5: Resultados de cuestionar el nivel de tensión de la rama en la estimación de la resistencia serie

El resultado es similar al del análisis de la reactancia serie, se produce una mejoría de la capacidad de detección e identificación de errores en la resistencia serie en la línea de menor nivel de tensión. En este caso detecta e identifica satisfactoriamente el valor erróneo a partir de un 10%, mientras que para la línea de nivel de tensión 132 kV se detecta a partir de un 25%. En ambos casos se estima correctamente el parámetro. Respecto a la línea de 400 kV, el estimador no es capaz de detectar el parámetro erróneo.

#### 4.1.2.8 Cuestión de topología de rama

En esta sección se va a analizar cómo influye la topología de la rama en la estimación de los parámetros, comprobando en qué casos favorece una adecuada detección e identificación de errores.

Para ello, al igual que en el estudio de la reactancia serie, se va a tomar la línea de 132 kV estudiada hasta ahora, para formar parte la red mallada IEEE de 14 nudos y otra radial de 6 nudos. El diagrama unifilar y valores de los parámetros de las redes radial y mallada ensayadas se encuentran en el [anexo A](#).

Los siguientes ensayos se han realizado considerando las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.

- **Redundancia de medidas:** Completa.

En función de cada tipo de topología considerado en el apartado 3.1.6., se obtienen los resultados de la tabla 4-50 al introducir los errores indicados en la resistencia serie de una línea de 132 kV:

<i>Error</i>	<b>R.N.</b>		
	<b>TOPOLOGÍA DE RAMA</b>		
	<i>Aislada</i>	<i>Radial</i>	<i>Mallada</i>
+ 5%	NaN	1.0	1.6
+ 10%	NaN	1.9	3.1 [E]
+ 15%	2.2	2.8	4.6 [E]
+ 20%	2.9	3.8 [E]	5.9 [E]
+ 25%	3.6 [E]	4.7 [E]	7.3 [E]

Tabla 4-50: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia serie al cuestionar la topología de rama

En la tabla 4-50 se puede ver que para un error del 10% en la resistencia serie, sólo se detecta e identifica el parámetro erróneo con residuo normalizado 3.1 en topología de red mallada. Por lo que este tipo de topología es la que más favorece la detección e identificación de errores en la resistencia serie, al igual que se vió en el estudio de la reactancia serie (apartado 4.1.1.8).

Cabe destacar que en la tabla 4-28 se obtuvieron para cada tipo de topología mayores residuos normalizados que los presentados en la 4-50, lo que indica de nuevo una mayor sensibilidad de la reactancia serie al proceso de estimación de parámetros.

En red radial también mejora la calidad de la detección e identificación, pero en menor medida.

Todos los errores detectados han sido identificados satisfactoriamente, estimando el valor correcto del parámetro. Una vez eliminado el parámetro erróneo, se muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 en todos estos casos.

En la gráfica de la figura 4-6 se representan los resultados de la tabla 4-50:

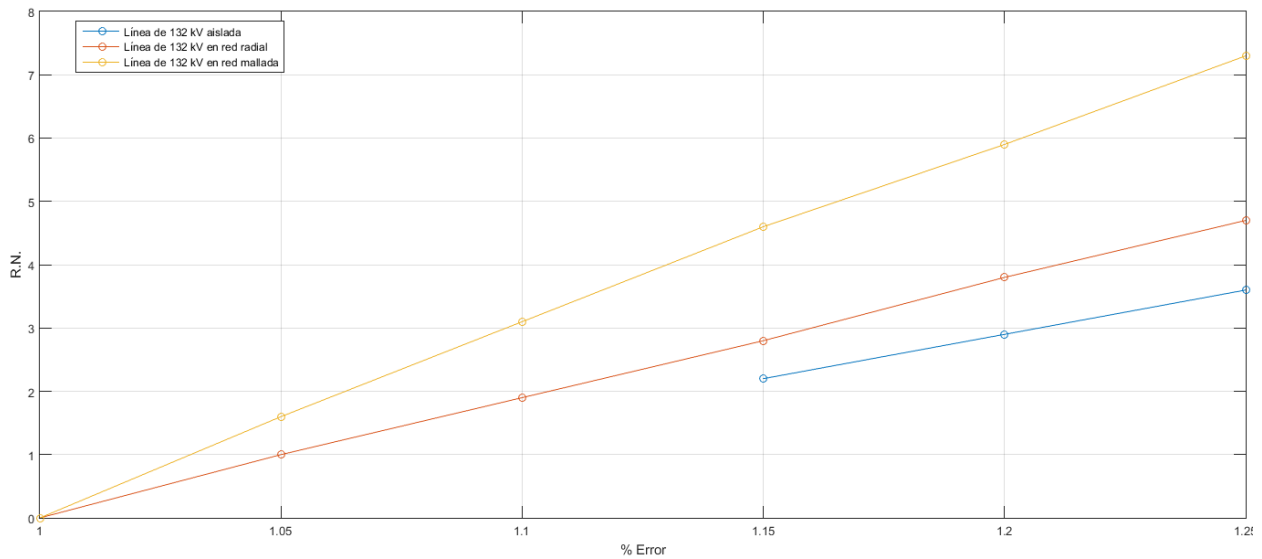


Figura 4-6: Resultados de cuestionar la topología de rama en la estimación de la resistencia serie

#### 4.1.3 Análisis de susceptancia paralelo

Se van a realizar ensayos introduciendo errores por exceso en el valor de la susceptancia paralelo y partiendo del siguiente escenario inicial:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Niveles de tensión:** Línea de 132 kV
- **Topología de la rama:** Aislada.

A continuación en la tabla 4-51 se muestran los residuos normalizados obtenidos asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo:

R.N.	
Error	$\frac{1}{2} B=0.018335$ p.u.
+ 5%	NaN
+ 10%	NaN
+ 15%	NaN
+ 20%	NaN
+ 25%	NaN
+50%	3.1 [E]

Tabla 4-51: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo bajo condiciones iniciales

Cuando se introduce un error del 50%, estima correctamente el valor del parámetro tal y como se ve en la tabla 4-52. Detecta e identifica el parámetro erróneo, lo elimina y presenta la red estimada con todas las medidas con  $RN=0$ .

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0275	0.0010	0.0184	3.1

Tabla 4-52: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 50%

A continuación se muestran los resultados de máximos residuos normalizados en la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.027502	0.001	1	3.1
4	0	-0.380325	0.0119	4	0.9
4	0	-0.380325	0.0119	1	0.9
4	0	-0.380325	0.0119	2	0.9
4	0	-0.380325	0.0119	3	0.9
4	0	0.566656	0.0119	-1	0.9

Tabla 4-53: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Comparando con los parámetros estudiados anteriormente, bajo las condiciones iniciales el estimador ha mostrado mayor dificultad para detectar e identificar correctamente la susceptancia paralelo. Como se puede ver, ésta ha sido detectada con un con error de 50% y residuo normalizado 3.1. Sin embargo, bajo estas

mismas condiciones, la reactancia ha sido detectada con un error del 15% y residuo normalizado 4.3; y la resistencia serie con un error del 25% y residuo normalizado 3.6.

#### 4.1.3.1 Análisis del valor del parámetro eléctrico

A continuación se va a ensayar la rama con los valores medios:

$$R=0.03 \text{ p.u. } X=0.075 \text{ p.u. } B=0.02 \text{ p.u.}$$

Y con los valores pequeños:

$$R=0.008 \text{ p.u. } X=0.025 \text{ p.u. } B=0.0075 \text{ p.u.}$$

- **Valor medio de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-54 se presenta el mayor valor de residuo normalizado obtenido para diferentes porcentajes de error en la susceptancia paralelo:

R.N.	
Error	$\frac{1}{2} B= 0.01$
+ 35%	NaN
+ 45%	NaN
+ 55%	NaN
+ 65%	NaN
+ 75%	NaN
+ 85%	NaN
+ 95%	3.2 [E]

Tabla 4-54: Residuos normalizados asociados al valor medio erróneo de la susceptancia paralelo

Para  $B=0.02$ , se detecta a partir de un error del 95% con los siguientes resultados:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.0195	0.001	1	3.2
4	0	-0.487984	0.0119	1	1.0
4	0	-0.487984	0.0119	2	1.0
4	0	-0.487984	0.0119	3	1.0
4	0	-0.487984	0.0119	4	1.0
4	0	0.566656	0.0119	-4	1.0

Tabla 4-55: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación



Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0195	0.001	0.01	3.2

Tabla 4-56: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 95 %

Se detecta e identifica satisfactoriamente el parámetro erróneo como muestra la tabla 4-55, y se estima el valor correcto de la susceptancia paralelo en la tabla 4-56. Finalmente se elimina, y presenta la red estimada con todos los residuos normalizados asociados igual a 0.

- **Valor pequeño de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-57 se va a presentar el mayor valor de residuo normalizado obtenido para diferentes porcentajes de error en la susceptancia paralelo:

R.N.	
Error	$\frac{1}{2} B = 0.00375$
+ 25%	NaN
+ 50%	NaN
+ 70%	NaN
+ 90%	NaN

Tabla 4-57: Residuos normalizados asociados al valor pequeño erróneo de la susceptancia paralelo

El estimador no es capaz de detectar el valor erróneo de la susceptancia paralelo, obteniéndose en todos los casos residuo normalizado *NaN*, y por tanto una estimación incorrecta de cada uno de ellos.

A partir de los resultados se observa que para mayor valor de la susceptancia paralelo, mejoran las condiciones de detección e identificación de errores.

#### 4.1.3.2 Cuestión del nivel de carga de la línea

Se van a realizar simulaciones con 5 escenarios con los diferentes regímenes de carga definidos en el apartado 3.1.4 del plan de trabajo, y se compararán los resultados con los obtenidos cuando por la línea circula la potencia nominal.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 130 MVA**

En la tabla 4-58 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 130 MVA:

R.N.		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 25%	NaN	NaN
+ 30%	NaN	NaN
+ 40%	2.7	NaN
+ 45%	3.1 [E]	3.0 [E]
+ 50%	3.4 [E]	3.4 [E]
+ 70%	4.7 [E]	4.7 [E]

Tabla 4-58: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA

No se identifica una mejoría significativa en las condiciones de detección de errores en los valores de la susceptancia paralelo cuanto mayor sea el régimen de carga de la línea. Los resultados obtenidos en ambos casos cuando se introduce un error de 70% son idénticos:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0312	0.0010	0.0184	4.7

Tabla 4-59: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 70 %

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 100 MVA**

En la tabla 4-60 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 100 MVA:

R.N.			
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga	5 escenarios con régimen de carga 25%
+ 25%	NaN	NaN	NaN
+ 30%	NaN	NaN	NaN
+ 40%	2.7	NaN	NaN
+ 45%	3.1 [E]	3.0 [E]	3.0
+ 50%	3.4 [E]	3.4 [E]	3.3 [E]
+ 70%	4.8 [E]	4.7 [E]	4.6 [E]

Tabla 4-60: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA

Se comprueba que el régimen de carga de la línea tiene muy poca influencia en la detección e identificación de errores en los valores de la susceptancia paralelo.

#### 4.1.3.3 Cuestión del número de escenarios considerados

Se van a realizar las simulaciones variando el número de escenarios considerados con 1 y 24 escenarios iguales al nivel máximo de potencia:

R.N.			
Error	1 escenario	4 escenarios	24 escenarios
+ 5%	NaN	NaN	0.6
+ 10%	NaN	NaN	1.2
+ 15%	NaN	NaN	1.8
+ 20%	NaN	NaN	2.4
+ 25%	NaN	NaN	3.0 [E]
+ 50%	NaN	3.1 [E]	6.0 [E]
+ 70%	NaN	4.3 [E]	8.4 [E]

*Tabla 4-61: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el número de escenarios considerados*

Al igual que en el estudio de la reactancia y resistencia serie, en la tabla 4-61 se puede ver que mejora en gran medida la capacidad de detección de errores en los valores de la susceptancia paralelo al aumentar el número de escenarios. Cuando se ha considerado un solo escenario se ha obtenido para todos los casos de error en el parámetro residuo normalizado *NaN*, y por consiguiente estimación errónea de cada uno de ellos. Sin embargo, con 24 escenarios se ha detectado e identificado satisfactoriamente el valor erróneo de la susceptancia paralelo con un error del 25% y residuo normalizado 3.0, y por tanto se ha estimado el valor correcto del parámetro.

#### 4.1.3.4 Cuestión de redundancia de medidas

Se obtienen los siguientes resultados de la tabla 4-62 al variar la redundancia de medidas según el apartado 3.1.7 del plan de trabajo:

R.N.			
Error	Completa	Reducida	Muy reducida
+ 5%	NaN	NaN	NaN
+ 10%	NaN	NaN	NaN
+ 15%	NaN	NaN	NaN
+ 20%	NaN	NaN	NaN
+ 25%	NaN	NaN	NaN
+ 50%	3.1 [E]	NaN	NaN
+ 70%	4.3 [E]	NaN	NaN
+ 80 %	4.9 [E]	3.9 [E]	NaN
+ 90 %	5.5 [E]	4.4 [E]	NaN

Tabla 4-62: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar la redundancia de medidas

Se deterioran las condiciones de detección de errores en el valor de la susceptancia paralelo al reducir la redundancia de medidas, al igual que con la resistencia y reactancia serie. En la tabla 4-62 se comprueba que con redundancia muy reducida se obtiene residuo normalizado NaN en todos los casos, estimándose erróneamente el valor de la susceptancia paralelo. En cambio, con redundancia completa se detecta e identifica el parámetro erróneo y se estima correctamente a partir de un error del 50%.

#### 4.1.3.5 Cuestión del factor de potencia

Se obtienen los resultados de la tabla 4-63 correspondientes al variar el factor de potencia:

R.N.				
Error	f.d.p.=1	f.d.p.= 0.9	f.d.p.= 0.8	f.d.p.= 0.7
+ 25%	NaN	NaN	NaN	NaN
+ 50%	NaN	3.1 [E]	3.2 [E]	3.2 [E]
+ 70%	3.9 [E]	4.3 [E]	4.4 [E]	4.5 [E]
+ 80 %	4.5 [E]	4.9 [E]	5.1 [E]	5.2 [E]
+ 90 %	5.0 [E]	5.5 [E]	5.7 [E]	5.8 [E]

Tabla 4-63: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar el factor de potencia

Al disminuir el factor de potencia se produce una leve mejoría de las condiciones de detección e identificación

de errores en este parámetro eléctrico. Mientras que con factor de potencia igual a 1 se obtiene residuo normalizado  $NaN$ , y por tanto estimándose incorrectamente el valor de la susceptancia paralelo, para un error del 50%; para este mismo error se detecta e identifica satisfactoriamente con residuo normalizado 3.2 el parámetro erróneo con factor de potencia 0.7. En este caso, se estima el valor correcto de la susceptancia paralelo.

#### 4.1.3.6 Cuestión de comportamiento simétrico

A continuación se va a realizar un ensayo con aquellas condiciones que permiten una adecuada detección e identificación del parámetro erróneo, teniendo en cuenta los resultados anteriores. Se introducirán errores por exceso y por defecto con objeto de evaluar si el estimador posee un comportamiento simétrico.

Se ensayarán las siguientes condiciones:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.  
 $R=0.05379$  p.u.  $X=0.18988$  p.u.  $B=0.03667$  p.u. ( $1/2 B \text{ sht}= 0.018335$ )
- Nivel de carga: 100% del valor máximo (130 MVA).
- Número de escenarios considerados: 24 escenarios iguales.
- Redundancia: Completa.
- Factor de Potencia: 0.9.

En la tabla 4-64 se muestran los máximos residuos normalizados asociados a los valores erróneos de la susceptancia paralelo de una línea de 132 kV bajo las condiciones anteriores:

R.N.		
Error	Por exceso	Por defecto
5%	0.6	0.6
10%	1.2	1.2
15%	1.8	1.8
20%	2.4	2.4
25%	3.0 [E]	3.0 [E]
30 %	3.6 [E]	3.6 [E]

Tabla 4-64: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo con errores por exceso y defecto

Se detecta e identifica correctamente el valor erróneo cuando se introduce un 25% de error por exceso y por defecto (tablas 4-65 y 4-67 respectivamente), estimándolo correctamente (tablas 4-66 y 4-68). Se elimina y presenta la red estimada con todas las medidas con  $R.N.=0$  en ambos casos:

- **Resultados cuando se introduce un error por exceso de + 25%:**

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.022919	0.001	1	3.0
4	0	-0.380325	0.0119	1	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	2	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	3	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	4	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	5	0.3

Tabla 4-65: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 25%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0229	0.001	0.0183	3.0

Tabla 4-66: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error por exceso del 25%

• **Resultados cuando se introduce un error por defecto de - 25%:**

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.013751	0.001	1	3.0
4	0	-0.380325	0.0119	24	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	1	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	2	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	3	0.3
4	0	-0.380325	0.0119	4	0.3

Tabla 4-67: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 25%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0138	0.001	0.0183	3.0

Tabla 4-68: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error por defecto del 25%

A partir de los resultados obtenidos se puede ver un comportamiento simétrico a la hora de detectar el valor erróneo de la susceptancia paralelo, que se representa en la gráfica de la figura 4-7:

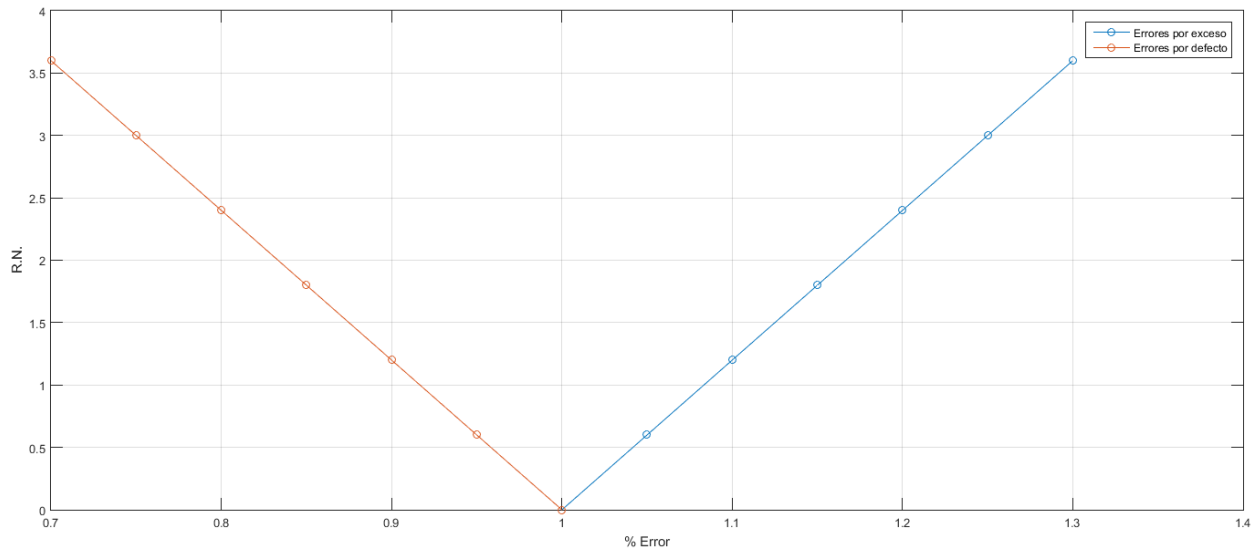


Figura 4-7: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación de la susceptancia paralelo

Al contrario, en los estudios de la resistencia y reactancia serie, se produjo un comportamiento asimétrico en la detección e identificación de errores por exceso y defecto en estos parámetros.

#### 4.1.3.7 Cuestión de nivel de tensión

A continuación, se va a examinar qué ocurre en una línea de 400 kV y 45 kV, con objeto de comprobar como influye el nivel de tensión en la capacidad de detección e identificación de errores en el parámetro de estudio.

- **Nivel de tensión: 45 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.5896 \text{ p.u. } X=0.65 \text{ p.u. } B=0.0213 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=53 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la susceptancia paralelo de una línea de 45 kV se presentan en la tabla 4-69:

R.N.	
Error	$\frac{1}{2} B_{sht} = 0.01065$
+ 5%	0.5
+ 10%	0.9
+ 15%	1.4
+ 20%	1.8
+ 25%	2.3
+ 30%	2.8
+ 35%	3.2 [E]
+ 50%	4.6 [E]

Tabla 4-69: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo en una línea de 45 kV

Detecta e identifica el error satisfactoriamente a partir de un error del 35%:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.014378	0.001	1	3.2
4	0	-0.16179	0.0025	1	0.7
4	0	-0.16179	0.0025	2	0.7
4	0	-0.16179	0.0025	3	0.7
4	0	-0.16179	0.0025	4	0.7
4	0	0.231	0.0025	-1	0.6

Tabla 4-70: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Y se estima por tanto correctamente:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0144	0.001	0.0107	3.2

Tabla 4-71: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 35 %



- **Nivel de tensión: 400 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.00325 \text{ p.u. } X=0.03105 \text{ p.u. } B=1.181 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=1600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.

- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la susceptancia paralelo de una línea de 400 kV se presentan en la tabla 4-72:

R.N.	
Error	$\frac{1}{2} B \text{ sht} = 0.5905$
+ 5%	2.3
+ 10%	4.5 [E]
+ 15%	6.4 [E]
+ 20%	8.2 [E]
+ 25%	9.9 [E]
+ 30%	11.4 [E]
+ 35%	12.8 [E]
+ 50%	16.5 [E]

*Tabla 4-72: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo en una línea de 400 kV*

Para cada nivel de tensión se han tomado condiciones análogas, como mayores de los valores esperados, nivel de carga 100% del valor máximo, 4 escenarios iguales y redundancia completa. De tal manera que se van a comparar los resultados y observar cómo afecta el nivel de tensión en la gráfica de la figura 4-8:

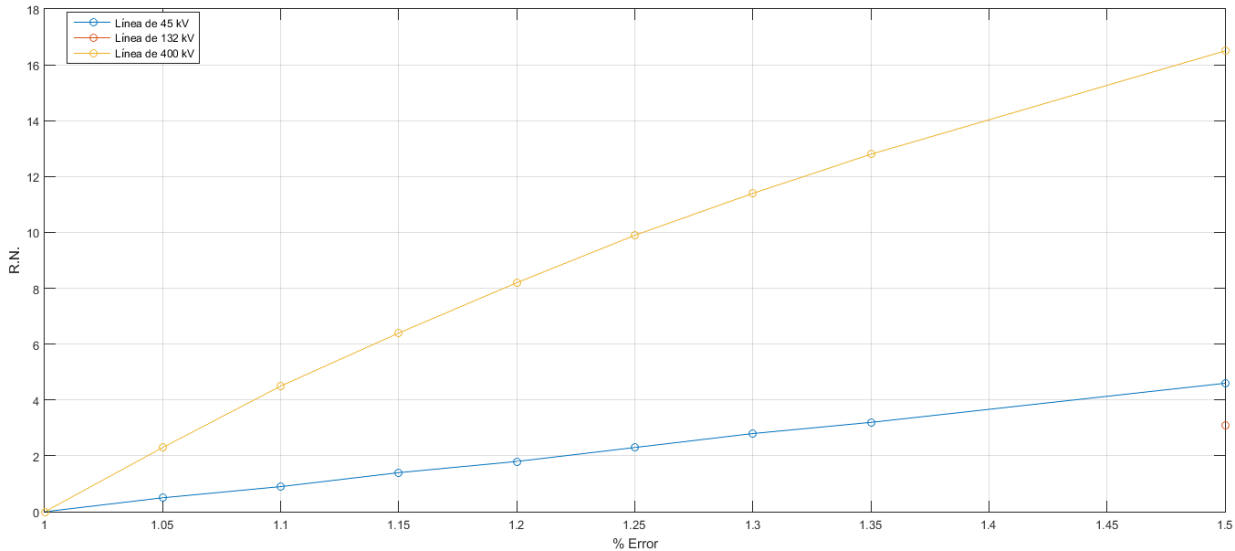


Figura 4-8: Resultados de cuestionar el nivel de tensión de la rama en la estimación de la susceptancia paralelo

Al contrario que en el análisis de la reactancia y resistencia serie, mejoran las condiciones de detección e identificación de errores en la susceptancia paralelo en la línea de mayor nivel de tensión. En dicha línea el estimador detecta e identifica correctamente el error del parámetro a partir de un error del 10%, mientras que en las líneas de 45 kV y 132 kV a partir de un 35% y 50% respectivamente. Cabe decir que en el instante que se detecta el error, se estima exactamente el valor del parámetro para todos los casos.

#### 4.1.3.8 Cuestión de topología de rama

En esta sección se va a analizar cómo influye la topología de la rama en la estimación de los parámetros, comprobando en qué casos favorece una adecuada detección e identificación de errores.

Para ello se va a tomar la línea de 132 kV estudiada hasta ahora, para formar parte de la red mallada IEEE de 14 nudos y otra radial de 6 nudos. El diagrama unifilar y valores de los parámetros de las redes radial y mallada ensayadas se encuentran en el [anexo A](#).

Los siguientes ensayos se han realizado considerando las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.

Los resultados de las simulaciones al introducir errores por exceso en la susceptancia paralelo de la línea de 132 kV se muestran en la tabla 4-73, en función de cada tipo de topología:

<b>R.N.</b>			
<b>TOPOLOGÍA DE RAMA</b>			
<b><i>Error</i></b>	<b><i>Aislada</i></b>	<b><i>Radial</i></b>	<b><i>Mallada</i></b>
+ 5%	NaN	NaN	NaN
+ 10%	NaN	NaN	NaN
+ 15%	NaN	NaN	NaN
+ 20%	NaN	NaN	NaN
+ 25%	NaN	NaN	NaN
+ 50%	3.1 [E]	NaN	NaN
+ 60%	3.7 [E]	NaN	3.4 [E]
+ 70%	4.3 [E]	NaN	4.0 [E]

Tabla 4-73: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la susceptancia paralelo al cuestionar la topología de rama

En la tabla 4-73 se puede ver que en la topología de rama aislada se obtienen resultados levemente mejores que en red mallada. En el caso de red radial, el estimador no ha sido capaz de detectar los parámetros erróneos, y los estima incorrectamente.

Los resultados de estas simulaciones presentan un caso atípico, que requerirá futuros estudios de análisis.

De nuevo, los errores en rama aislada y red mallada, han sido detectados e identificados satisfactoriamente, estimando el valor correcto del parámetro. Una vez eliminado el parámetro erróneo, se muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 en todos estos casos.

#### 4.1.4 Análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie

Se realizan los ensayos introduciendo los mismos errores por exceso en el valor de la reactancia y resistencia serie, partiendo inicialmente de las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Niveles de tensión:** Línea de 132 kV
- **Topología de la rama:** Aislada.

En la tabla 4-74 se muestran los residuos normalizados asociados a la resistencia y reactancia serie al

introducir distintos errores:

R.N.		
Error	R=0.05379 p.u.	X=0.18988 p.u.
+ 5%	NaN	1.8
+ 10%	NaN	3.4 [E]
+ 15%	NaN	5.0 [E]
+ 20%	2.6	6.6 [E]
+ 25%	3.2 [E]	8.0 [E]

Tabla 4-74: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie bajo condiciones iniciales

Se puede observar en la tabla 4-74 que cuando hay un error conjunto en la resistencia y reactancia serie el estimador presenta más dificultades para detectar los valores erróneos de la resistencia.

En el caso de error del 20%, el estimador sólo es capaz de detectarlo en la reactancia serie. Los máximos residuos normalizados detectados en la primera iteración se presentan en la tabla 4-75:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.227856	0.004557	1	6.6
50	0	0.064548	0.001291	1	4.7
1	8	1.185621	0.0053	0	2.4
1	2	1.185621	0.0053	0	2.4
1	4	1.185621	0.0053	0	2.4
1	6	1.185621	0.0053	0	2.4

Tabla 4-75: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Efectivamente, identifica valor erróneo de la reactancia serie, lo estima, y lo elimina:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. Std	R.N.
X ser	0.2279	0.0046	0.1867	0	6.6

Tabla 4-76: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 20 %

Sin embargo, en las siguientes iteraciones el estimador no es capaz de detectar el valor erróneo de la resistencia serie, quedando finalmente con residuo normalizado 2.6, y por consiguiente estimándolo erróneamente como refleja la tabla 4-77:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	Desv. Std	R.N.
R ser	0.06455	0.00129	0.06352	0.00123	2.6

Tabla 4-77: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 20 %

Cuando se introduce un error del 25%, el estimador es capaz de detectar ambos parámetros erróneos. En la primera iteración se obtiene:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.23735	0.004747	1	8.0
50	0	0.067237	0.001345	1	5.7
1	2	1.185621	0.0053	0	2.9
1	4	1.185621	0.0053	0	2.9
1	6	1.185621	0.0053	0	2.9
1	8	1.185621	0.0053	0	2.9

Tabla 4-78: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

El estimador detecta e identifica el valor erróneo de la reactancia serie estimándolo correctamente, y lo elimina:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.2374	0.0047	0.1899	8.0

Tabla 4-79: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 25 %

En la siguiente iteración, también detecta e identifica el valor erróneo de la resistencia serie (tabla 4-80) estimándolo correctamente (tabla 4-81), y lo elimina:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.067237	0.001345	1	3.2
1	1	1.05	0.0053	0	1.3
1	3	1.05	0.0053	0	1.3
1	5	1.05	0.0053	0	1.3
1	7	1.05	0.0053	0	1.3
1	2	1.185621	0.0053	0	1.3

Tabla 4-80: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0672	0.0013	0.0538	3.2

Tabla 4-81: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 25 %

Cabe destacar que en el ensayo del error del 20% el valor de la función objetivo al finalizar el proceso de estimación es muy elevado (6.617). Esto es indicativo de que la estimación resultante no posee un grado de exactitud satisfactorio. Al contrario, en el ensayo en el que se introdujo el error del 25%, el valor de la función objetivo es 0.08. Como se puede ver en las tablas 4-79 y 4-81, en este caso las estimaciones de los parámetros son correctas.

#### 4.1.4.1 Análisis del valor del parámetro eléctrico

A continuación se va a ensayar la rama con los valores medios:

$$R=0.03 \text{ p.u. } X=0.075 \text{ p.u. } B=0.02 \text{ p.u.}$$

Y con los valores pequeños:

$$R=0.008 \text{ p.u. } X=0.025 \text{ p.u. } B=0.0075 \text{ p.u.}$$

- **Valor medio de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-82 se presentan los mayores valores de residuo normalizado obtenidos para diferentes porcentajes de error en la reactancia y resistencia serie:

R.N.	
Error	R=0.03 / X=0.075
+ 25%	NaN / 5.0 [E]
+ 50%	NaN / 9.7 [E]
+ 55%	4.2 [E] / 10.5 [E]

Tabla 4-82: Residuos normalizados asociados al valor medio erróneo de la reactancia y resistencia serie

A partir un error del 55%, se detecta conjuntamente para los valores R=0.03 y X=0.075. Se obtienen los siguientes resultados en la primera iteración del proceso de estimación:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.116250	0.002325	1	10.5
50	0	0.0465	0.001	1	8.2
1	8	1.118339	0.0053	0	4.2
1	2	1.118339	0.0053	0	4.2
1	4	1.118339	0.0053	0	4.2
1	6	1.118339	0.0053	0	4.2

Tabla 4-83: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

En la tabla 4-83 se comprueba que se detecta e identifica la reactancia serie errónea en la primera iteración de forma satisfactoria, y se estima el valor correcto en la tabla 4-84:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
X ser	0.1162	0.0023	0.0750	10.5

Tabla 4-84: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 55 %

En la segunda iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.0465	0.001	1	4.2
1	7	1.05	0.0053	0	1.7
1	1	1.05	0.0053	0	1.7
1	3	1.05	0.0053	0	1.7
1	5	1.05	0.0053	0	1.7
1	8	1.118339	0.0053	0	1.6

Tabla 4-85: *Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación*

De nuevo se detecta e identifica satisfactoriamente la resistencia serie en la tabla 4-85, y se estima el valor correcto del parámetro, como se muestra en la tabla 4-86:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0465	0.001	0.0301	4.2

Tabla 4-86: *Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 55 %*

- **Valor pequeño de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-87 se van a presentar los mayores valores de residuo normalizado obtenidos para diferentes porcentajes de error en la reactancia y resistencia:

R.N.	
Error	R=0.008 / X=0.025
+ 25%	NaN / NaN
+ 50%	NaN / NaN
+ 70%	NaN / 5.2 [E]
+ 90 %	NaN / 6.7 [E]

Tabla 4-87: *Residuos normalizados asociados al valor pequeño erróneo de la reactancia y resistencia serie*

Introduciendo los errores anteriores a los valores de los parámetros de resistencia y reactancia serie especificados, el estimador sólo es capaz de detectar el error de la reactancia serie.

A partir de los resultados anteriores, se puede ver que para mayores valores de resistencia y reactancia serie, se mejoran las condiciones para detectar e identificar errores simultáneamente en ambos parámetros.



#### 4.1.4.2 Cuestión del nivel de carga de la línea

Se van a realizar simulaciones con 5 escenarios con los diferentes regímenes de carga definidos en el plan de trabajo, y se compararán los resultados con los obtenidos cuando por la línea circula la potencia nominal.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 130 MVA**

En la tabla 4-88 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 130 MVA:

R.N. (R / X)		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 5%	NaN / 1.9	NaN / 1.4
+ 10%	NaN / 3.6 [E]	NaN / 2.7
+ 15%	2.1 / 5.3 [E]	NaN / 3.9 [E]
+ 20%	2.8 / 6.9 [E]	NaN / 5.2 [E]
+ 25%	3.5 [E] / 8.5 [E]	NaN / 6.4 [E]
+ 30 %	4.2 [E] / 9.9 [E]	NaN / 7.6 [E]
+ 40 %	5.6 [E] / 12.6 [E]	3.4 [E] / 9.8 [E]
+ 70%	9.4 [E] / 19.3 [E]	5.9 [E] / 15.8 [E]

*Tabla 4-88: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA*

Al igual que en el correspondiente análisis individual de la reactancia y resistencia serie, se comprueba que al emplear 5 escenarios al 100% se identifica mejor los errores que empleando 5 escenarios con régimen de carga en general inferior al 100%. Es decir, se produce una mejoría en las condiciones de detección simultánea de errores en los valores de la resistencia y reactancia serie cuanto mayor sea el régimen de carga de la línea.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 100 MVA**

En la tabla 4-89 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 100 MVA:

R.N. (R / X)		
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga
+ 5 %	NaN / 1.6	NaN / 1.1
+ 10%	NaN / 3.1 [E]	NaN / 2.1
+ 15%	NaN / 4.6 [E]	NaN / 3.2 [E]
+ 20%	NaN / 6.0 [E]	NaN / 4.2 [E]
+ 25%	NaN / 7.4 [E]	NaN / 5.2 [E]
+ 30%	3.1 [E] / 8.7 [E]	NaN / 6.2 [E]
+ 40%	4.1 [E] / 11.2 [E]	NaN / 8.1 [E]
+ 70%	7.0 [E] / 17.7 [E]	4.1 [E] / 13.3 [E]

*Tabla 4-89: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA*

Se comprueba a la luz de los resultados de las tablas 4-88 y 4-89 que al disminuir la potencia nominal de la línea se produce una desmejoría en las condiciones de detección e identificación de errores simultáneos en la resistencia y reactancia serie.

#### 4.1.4.3 Cuestión del número de escenarios considerados

Se van a realizar las simulaciones variando el número de escenarios considerados con 1, 24, y 64 escenarios iguales al nivel máximo de potencia:

R.N. (R / X)			
Error	1 escenario	4 escenarios	24 escenarios
+ 5%	NaN / 1.1 [E]	NaN / 1.8	1.8 / 2.4
+ 10%	NaN / 2.1 [E]	NaN / 3.4 [E]	2.7 / 4.6 [E]
+ 15%	NaN / 3.1 [E]	NaN / 5.0	3.9 [E] / 6.6 [E]
+ 20%	NaN / 4.1 [E]	2.6 / 6.6 [E]	5.2 [E] / 8.4 [E]
+ 25%	NaN / 5.1 [E]	3.2 [E] / 8.0 [E]	6.4 [E] / 10.1 [E]
+ 50%	3.3 [E] / 9.6 [E]	6.3 [E] / 14.4 [E]	11.7 [E] / 17.0 [E]

*Tabla 4-90: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el número de escenarios considerados*

Como se puede ver, mejora en gran medida la capacidad de detección de errores al aumentar el número de escenarios considerados. Con 24 escenarios, se detecta e identifica el error simultáneo en la resistencia y reactancia serie con un 15% de error, y se estiman correctamente. Sin embargo, cuando se tiene 1 sólo escenario no se detectan e identifican simultáneamente los errores en ambos parámetros hasta un error del 50%.

#### 4.1.4.4 Cuestión de redundancia de medidas

Variando la redundancia de medidas según los criterios del apartado 3.1.7 del plan de trabajo, se obtienen los resultados de la tabla 4-91:

R.N. (R / X)			
Error	Completa	Reducida	Muy reducida
+ 5%	NaN / 1.8	NaN / 1.6	NaN / 1.4
+ 10%	NaN / 3.4 [E]	NaN / 3.1 [E]	NaN / 2.7
+ 15%	NaN / 5.0 [E]	NaN / 4.6 [E]	4.0 [E] / NaN
+ 20%	2.6 / 6.6 [E]	NaN / 6.0 [E]	NaN / 5.2 [E]
+ 25%	3.2 [E] / 8.0 [E]	3.0 / 7.4 [E]	6.4 [E] / NaN
+ 50%	6.3 [E] / 14.4 [E]	5.8 [E] / 13.4 [E]	NaN / 12.0 [E]

Tabla 4-91: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar la redundancia de medidas

Las condiciones de detección e identificación de errores no mejoran al disminuir la redundancia de medidas. Con redundancia completa y reducida se detectan e identifican correctamente ambos parámetros erróneos a partir de un error del 25 %, sin embargo, con redundancia muy reducida el estimador sólo es capaz de detectar error en uno de los parámetros, estimándolos erróneamente. Esto se puede ver en los siguientes casos:

- Al introducir error del 15 % cuando se tiene redundancia muy reducida de medidas, en la primera iteración se obtienen los siguientes resultados:

Medida	RN
50	4.0
51	4.0
1	1.8
1	1.8
1	1.8
1	1.8

Tabla 4-92: Máximos residuos normalizados obtenidos en la primera iteración al introducir un error del 15% con redundancia muy reducida

Detecta error en ambos parámetros, descartando en primer lugar la resistencia serie y estimándolo erróneamente:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0619	0.0012	0.0451	4.0

Tabla 4-93: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 15% con redundancia muy reducida

En posteriores iteraciones no detecta error en la reactancia serie y por tanto la estimación es errónea.

- Cuando se introduce un error del 50 % con redundancia completa y reducida, se estiman correctamente ambos parámetros. En cambio, al disminuirla a muy reducida ocurre una situación similar a la anterior:

Medida	RN
51	12.0
50	12.0
1	5.4
1	5.4
1	5.4
1	5.4

Tabla 4-94: Máximos residuos normalizados obtenidos en la primera iteración al introducir un error del 50% con redundancia muy reducida

Se detectan como erróneos ambos parámetros y se descarta en primer lugar la reactancia serie, estimándola erróneamente:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
X ser	0.2848	0.0057	0.1178	12.0

Tabla 4-95: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 50% con redundancia muy reducida

En las iteraciones sucesivas no detecta el error en la resistencia serie, proporcionando una estimación errónea.

#### 4.1.4.5 Cuestión del factor de potencia

Al variar el factor de potencia, se obtienen los resultados de la tabla 4-96 para los distintos errores indicados:

R.N. (R / X)				
Error	f.d.p.=1	f.d.p.= 0.9	f.d.p.= 0.8	f.d.p.= 0.7
+ 25%	4.0 [E] / 6.4 [E]	3.2 [E] / 8.0 [E]	NaN / 8.6 [E]	NaN / 8.8 [E]
+ 50%	7.7 [E] / 11.5 [E]	6.3 [E] / 14.4 [E]	5.1 [E] / 15.3 [E]	4.2 [E] / 15.6 [E]
+ 70%	10.4 [E] / 14.9 [E]	8.6 [E] / 18.6 [E]	7.0 [E] / 19.7 [E]	5.9 [E] / 20.0 [E]

Tabla 4-96: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar el factor de potencia

Como se ha visto los apartados anteriores en los que se han analizado individualmente la reactancia y resistencia serie, al aumentar el factor de potencia se mejoran las condiciones de detección e identificación de errores en la resistencia serie, y viceversa para la reactancia serie.

#### 4.1.4.6 Cuestión de comportamiento simétrico

A continuación se va a realizar un ensayo con aquellas condiciones que permiten una adecuada detección e identificación del parámetro erróneo, teniendo en cuenta los resultados anteriores. Se introducirán errores por exceso y por defecto con objeto de evaluar si el estimador posee un comportamiento simétrico.

Se ensayarán las siguientes condiciones:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.  
 $R=0.05379$  p.u.  $X=0.18988$  p.u.  $B=0.03667$  p.u. ( $1/2 B \text{ sht}= 0.018335$ )
- Nivel de carga: 100% del valor máximo (130 MVA).
- Número de escenarios considerados: 24 escenarios iguales.
- Redundancia: Completa.
- Factor de Potencia: 0.9.

En la tabla 4-97 se muestran los máximos residuos normalizados asociados a los valores erróneos de la resistencia y reactancia serie de una línea de 132 kV bajo las condiciones anteriores:

R.N. (R / X)		
Error	Por exceso	Por defecto
5%	1.8 / 2.4	1.9 / 2.6
10%	2.7 / 4.6 [E]	2.8 / 5.4 [E]
15%	3.9 [E] / 6.6 [E]	4.2 [E] / 8.4 [E]
20%	5.2 [E] / 8.4 [E]	5.6 [E] / 11.4 [E]
25%	6.4 [E] / 10.1 [E]	7.0 [E] / 15.3 [E]

Tabla 4-97: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia y reactancia serie con errores por exceso y defecto

Se detecta e identifica correctamente los valores erróneos cuando se introduce un 15% de error por exceso (tablas 4-98 y 4-100) y por defecto (tablas 4-102 y 4-104), estimándolos correctamente como se presentan en las tablas 4-99, 4-101, 4-103 y 4-105. Se eliminan y se presenta la red estimada con todas las medidas con R.N.=0 en ambos casos:

- **Resultados cuando se introduce un error por exceso de +15%:**

En la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.218362	0.004367	1	6.6
50	0	0.061858	0.001237	1	5.0
1	48	1.185621	0.0053	0	0.7
1	5	1.185621	0.0053	0	0.7
1	4	1.185621	0.0053	0	0.7
1	6	1.185621	0.0053	0	0.7

*Tabla 4-98: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 15%*

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.2184	0.0044	0.1899	6.6

*Tabla 4-99: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por exceso del 15%*

En la segunda iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.061858	0.001237	1	3.9
1	1	1.05	0.0053	0	0.6
1	3	1.05	0.0053	0	0.6
1	5	1.05	0.0053	0	0.6
1	7	1.05	0.0053	0	0.6
1	9	1.05	0.0053	0	0.6

*Tabla 4-100: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 15%*

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0619	0.0012	0.0538	3.9

Tabla 4-101: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por exceso del 15%

• **Resultados cuando se introduce un error por defecto de -15%:**

En la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.161398	0.003228	1	8.4
50	0	0.045721	0.001	1	6.0
1	2	1.185621	0.0053	0	1.0
1	4	1.185621	0.0053	0	1.0
1	6	1.185621	0.0053	0	1.0
1	8	1.185621	0.0053	0	1.0

Tabla 4-102: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 15%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.1614	0.0032	0.1899	8.4

Tabla 4-103: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por defecto del 15%

En la segunda iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.045721	0.001	1	4.2
1	1	1.05	0.0053	0	0.6
1	3	1.05	0.0053	0	0.6
1	5	1.05	0.0053	0	0.6
1	7	1.05	0.0053	0	0.6
1	9	1.05	0.0053	0	0.6

Tabla 4-104: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 15%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0457	0.001	0.0538	4.2

Tabla 4-105: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por defecto del 15%

A partir de los resultados obtenidos no se observa un comportamiento simétrico a la hora de detectar simultáneamente errores en la resistencia y reactancia serie, como se puede ver en la gráfica de la figura 4-9. Al igual que en el análisis de cada uno de estos parámetros individualmente, al introducir errores por defecto mejoran las condiciones de detección e identificación de errores.

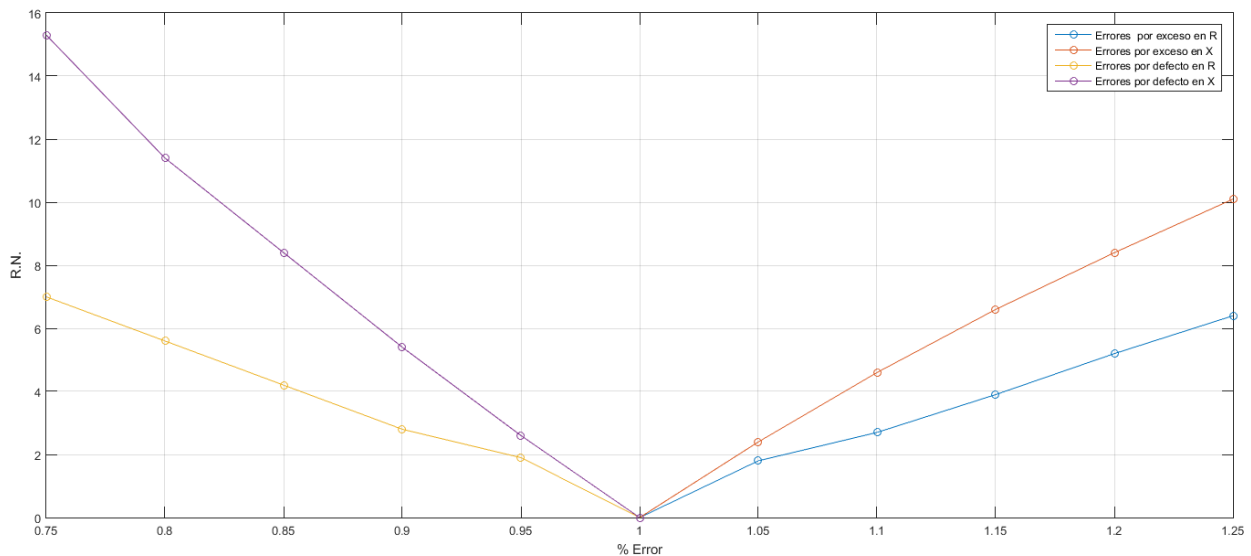


Figura 4-9: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación simultánea de resistencia y reactancia serie

También se puede apreciar de nuevo que la reactancia serie presenta una mayor sensibilidad al proceso de estimación en comparación con la resistencia serie.

#### 4.1.4.7 Cuestión de nivel de tensión

En este apartado se va a evaluar la hipótesis de la tensión de la línea. Hasta ahora se han realizado las simulaciones en una rama de 132 kV. A continuación, se va a ver qué ocurre en una línea de 400 kV y 45 kV, con objeto de comprobar como influye el nivel de tensión en la capacidad de detección e identificación de errores en el parámetro de estudio.

- **Nivel de tensión: 45 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.5896 \text{ p.u. } X=0.65 \text{ p.u. } B=0.0213 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.



S=53 MVA

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso tanto en la reactancia como en la resistencia serie de una línea de 45 kV se presentan en la tabla 4-106:

R.N.		
Error	R=0.5896	X=0.65
+ 5%	2.1	2.1
+ 10%	3.6 [E]	4.0 [E]
+ 15%	5.2 [E]	5.8 [E]
+ 20%	6.8 [E]	7.5 [E]
+ 25%	8.3 [E]	9.0 [E]

Tabla 4-106: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie en una línea de 45 kV

Se detecta e identifica correctamente los valores erróneos cuando se introduce un 10% de error (tablas 4-107 y 4-109), estimándolos correctamente en las tablas 4-108 y 4-110. Se eliminan y se presenta la red estimada con todas las medidas con R.N.=0 en ambos casos:

En la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.715	0.0143	1	4.0
50	0	0.64856	0.012971	1	4.0
1	2	1.368087	0.0053	0	1.4
1	4	1.368087	0.0053	0	1.4
1	6	1.368087	0.0053	0	1.4
1	8	1.368087	0.0053	0	1.4

Tabla 4-107: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.715	0.0143	0.65	4.0

Tabla 4-108: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 10 %

En la segunda iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.64856	0.012971	1	3.6
1	1	1.05	0.0053	0	0.9
1	3	1.05	0.0053	0	0.9
1	5	1.05	0.0053	0	0.9
1	7	1.05	0.0053	0	0.9
1	2	1.368087	0.0053	0	0.9

Tabla 4-109: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.6486	0.013	0.5896	3.6

Tabla 4-110: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 10 %

- **Nivel de tensión: 400 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.00325 \text{ p.u. } X=0.03105 \text{ p.u. } B=1.181 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=1600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso tanto en el valor de la reactancia como de la resistencia serie de

una línea de 400 kV se presentan en la tabla 4-111:

R.N.		
Error	R=0.00325	X=0.03105
+ 5%	0.2	0.9
+ 10%	0.4	1.8
+ 15%	0.6	2.7
+ 20%	0.5	3.6 [E]
+ 25%	0.6	4.5 [E]

Tabla 4-111: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie en una línea de 400 kV

Para cada nivel de tensión se han tomado condiciones análogas para realizar los ensayos, con el objetivo de comparar los resultados y observar cómo afecta el nivel de tensión. Se produce una mejoría en la detección e identificación simultánea de errores en los parámetros de resistencia y reactancia serie en la línea de menor nivel de tensión (45 kV). En ella se detectan e identifican correctamente ambos parámetros a partir de un error del 10%, mientras que en la de 132 kV se produce a partir de un 25%. Además, se estima el valor correcto de ambos parámetros.

En la línea de 400 kV ha ocurrido de forma semejante al estudio individual de la resistencia serie, en la que el estimador no ha sido capaz de detectar el parámetro erróneo, y por tanto estimando un valor incorrecto de la reactancia y resistencia serie.

#### 4.1.4.8 Cuestión de topología de rama

En esta sección se va a analizar cómo influye la topología de la rama en la estimación de los parámetros, comprobando en qué casos favorece una adecuada detección e identificación de errores.

Para ello, se va a tomar la línea de 132 kV estudiada hasta ahora, para formar parte la red mallada IEEE de 14 nudos y otra radial de 6 nudos. El diagrama unifilar y valores de los parámetros de las redes radial y mallada ensayadas se encuentran en el [anexo A](#).

Los siguientes ensayos se han realizado considerando las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.

Para cada tipo de topología considerado en el apartado 3.1.6., se obtienen los resultados de la tabla 4-112 al introducir los errores indicados en la resistencia serie de una línea de 132 kV:

	R.N. (R / X)		
	TOPOLOGÍA DE RAMA		
<i>Error</i>	<i>Aislada</i>	<i>Radial</i>	<i>Mallada</i>
+ 5%	NaN / 1.8	1.4 / 1.9	1.1 / 2.0
+ 10%	NaN / 3.4 [E]	1.8 / 3.7 [E]	2.8 / 3.9 [E]
+ 15%	NaN / 5.0 [E]	2.6 / 5.4 [E]	4.1 [E] / 5.6 [E]
+ 20%	2.6 / 6.6 [E]	3.5 [E] / 7.1 [E]	5.3 [E] / 7.3 [E]
+ 25%	3.2 [E] / 8.0 [E]	4.3 [E] / 8.6 [E]	6.6 [E] / 8.8 [E]

Tabla 4-112: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie al cuestionar la topología de rama

En red mallada se obtienen los mejores resultados de detección e identificación simultánea de reactancia y resistencia serie, al igual que en el estudio individual de cada uno de ellos en los apartados 4.1.1.8 y 4.1.2.8.

Cuando se han detectado los errores en ambos parámetros, han sido identificados satisfactoriamente, estimando el valor correcto de ellos. Una vez eliminados los parámetros erróneos, se muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 en todos estos casos.

También hay que señalar que en los ensayos en los que únicamente se ha detectado el error en la reactancia serie, la identificación ha sido satisfactoria, pero la estimación del valor del parámetro no ha sido correcta.

#### 4.1.5 Análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie, y de susceptancia paralelo

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ p.u. } X=0.18988 \text{ p.u. } B=0.03667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Niveles de tensión:** Línea de 132 kV
- **Topología de la rama:** Aislada.

En la tabla 4-113 se muestran los residuos normalizados asociados a la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir los errores indicados:

R.N.			
Error	R=0.05379 p.u.	X=0.18988 p.u.	½ B=0.018335 p.u.
+ 5%	NaN	1.5	NaN
+ 10%	NaN	3.0 [E]	NaN
+ 15%	NaN	4.4 [E]	NaN
+ 20%	3.2 [E]	5.8 [E]	NaN
+ 25%	3.9 [E]	7.0 [E]	NaN
+ 50%	7.7 [E]	12.7 [E]	NaN
+ 80%	12.0 [E]	18.0 [E]	NaN
+ 85%	12.7 [E]	18.7 [E]	NaN

Tabla 4-113: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo bajo condiciones iniciales

El valor erróneo de la reactancia serie se detecta e identifica con un error menor que la resistencia serie. En cambio, el parámetro erróneo de la susceptancia paralelo no ha sido detectado.

Cuando sólo se ha detectado la reactancia serie al introducir un error del 10%, se han obtenido los siguientes resultados en la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.208868	0.004177	1	3.0
1	2	1.185621	0.0053	0	1.3
1	4	1.185621	0.0053	0	1.3
1	6	1.185621	0.0053	0	1.3
1	8	1.185621	0.0053	0	1.3
1	7	1.05	0.0053	0	1.1

Tabla 4-114: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
X ser	0.2089	0.0042	0.189	3.0

Tabla 4-115: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 10 %

Estima correctamente el valor del parámetro en la tabla 4-115 y lo elimina. En las siguientes iteraciones no detecta error en el resto de parámetros, por lo que presenta finalmente la red estimada con los residuos normalizados de las medidas distintos a 0.

Al partir de un error del 20%, se detectan e identifican los valores erróneos de la resistencia y reactancia serie. En la primera iteración el valor del parámetro de la reactancia serie posee el mayor residuo normalizado:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.227856	0.004557	1	5.8
50	0	0.064548	0.001291	1	5.1
1	2	1.185621	0.0053	0	2.5
1	4	1.185621	0.0053	0	2.5
1	6	1.185621	0.0053	0	2.5
1	8	1.185621	0.0053	0	2.5

*Tabla 4-116: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación*

En la tabla 4-117 se muestra la estimación correcta del valor de la reactancia serie:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
X ser	0.2279	0.0046	0.1968	5.8

*Tabla 4-117: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 20 %*

En la segunda iteración se detecta e identifica satisfactoriamente la resistencia serie (tabla 4-118), se estima el valor correcto (tabla 4-119) y se elimina:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.064548	0.001291	1	3.2
1	1	1.05	0.0053	0	1.3
1	3	1.05	0.0053	0	1.3
1	5	1.05	0.0053	0	1.3
1	7	1.05	0.0053	0	1.3
1	2	1.185621	0.0053	0	1.2

*Tabla 4-118: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación*

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0645	0.0013	0.0511	3.2

Tabla 4-119: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 20 %

#### 4.1.5.1 Análisis del valor del parámetro eléctrico

A continuación se va a ensayar la rama con los valores medios:

$$R=0.03 \text{ p.u. } X=0.075 \text{ p.u. } B=0.02 \text{ p.u.}$$

Y con los valores pequeños:

$$R=0.008 \text{ p.u. } X=0.025 \text{ p.u. } B=0.0075 \text{ p.u.}$$

- **Valor medio de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-120 se presentan los mayores valores de residuo normalizado obtenidos para diferentes porcentajes de error en la reactancia, resistencia y susceptancia paralelo:

R.N.	
Error	R=0.03 / X=0.075 / $\frac{1}{2}$ B=0.01
+ 25%	NaN / 4.3 [E] / NaN
+ 50%	4.6 [E] / 8.3 [E] / NaN
+ 75%	6.9 [E] / 11.9 [E] / NaN
+ 90%	8.2 [E] / 13.9 [E] / NaN

Tabla 4-120: Residuos normalizados asociados al valor medio erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo

Introduciendo los errores anteriores a los valores de los parámetros de resistencia y reactancia serie y susceptancia paralelo especificados, el estimador sólo es capaz de detectar el error de la resistencia y reactancia serie.

- **Valor pequeño de parámetros de una línea de 132 kV:**

A continuación, en la tabla 4-121 se van a presentar los mayores valores de residuo normalizado obtenidos para diferentes porcentajes de error en la reactancia, resistencia y susceptancia paralelo:

R.N.	
Error	R=0.008 / X=0.025 / ½ B=0.00375
+ 25%	NaN / NaN / NaN
+ 50%	NaN / NaN / NaN
+ 75%	NaN / NaN / NaN
+ 90%	NaN / NaN / NaN

Tabla 4-121: Residuos normalizados asociados al valor pequeño erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo

El estimador no es capaz de detectar simultáneamente los errores anteriores para los valores de los parámetros especificados, y por tanto los estima erróneamente.

Se puede deducir a luz de los resultados de las tablas 4-120 y 4-121 que a mayor valor de los parámetros se mejoran las condiciones de detección e identificación de errores.

#### 4.1.5.2 Cuestión del nivel de carga de la línea

Se van a realizar simulaciones con 5 escenarios con los diferentes regímenes de carga definidos en apartado 3.1.4 del plan de trabajo, y se compararán los resultados con los obtenidos cuando por la línea circula la potencia nominal.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 130 MVA**

En la tabla 4-122 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 130 MVA:

R.N. (R / X / B)			
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga	5 escenarios con régimen de carga 25 %
+ 5%	NaN / 1.6 / NaN	NaN / 1.2 / NaN	
+ 10%	NaN / 3.2 [E] / NaN	NaN / 2.3 / NaN	
+ 15%	2.6 / 4.7 [E] / NaN	NaN / 3.4 [E] / NaN	
+ 20%	3.5 [E] / 6.1 [E] / NaN	NaN / 4.5 [E] / NaN	
+ 25%	4.3 [E] / 7.4 [E] / NaN	NaN / 5.6 [E] / NaN	
+ 30 %	5.2 [E] / 8.7 [E] / NaN	3.4 [E] / 6.6 [E] / NaN	NaN / 3.0 [E] / NaN
+ 85 %	13.8 [E] / 19.3 [E] / NaN	9.4 [E] / 16.0 [E] / 4.1 [E]	10.0 [E] / NaN / 3.2 [E]
+ 90%	14.5 [E] / 20.0 [E] / NaN	9.9 [E] / 16.7 [E] / 4.3 [E]	10.5 [E] / NaN / 3.4 [E]

Tabla 4-122: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 130 MVA



Se observa que un elevado nivel de carga de la línea favorece la detección e identificación de errores en los valores de la reactancia y resistencia serie, siendo en mayor medida en el primer parámetro. Sin embargo, al disminuir el nivel de carga en los escenarios se mejoran las condiciones para detectar el valor erróneo de la susceptancia paralelo, empeorándolas para la reactancia y resistencia serie. Concretamente, para un error del 85 % y los 5 escenarios con distintos regímenes de carga, el estimador ha sido capaz de detectar e identificar simultáneamente los errores en los tres parámetros.

En la primera iteración detecta e identifica el error en la reactancia serie, que hasta ahora se está deduciendo que es el parámetro más susceptible al proceso de estimación:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.351278	0.007026	1	16.0
50	0	0.099512	0.00199	1	15.4
1	2	1.185621	0.0053	0	10.9
1	1	1.05	0.0053	0	8.5
1	4	1.157304	0.0053	0	8.1
1	3	1.05	0.0053	0	7.4

Tabla 4-123: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Estima correctamente el valor:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
X ser	0.3513	0.007	0.19	16.0

Tabla 4-124: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 85 %

En la segunda iteración detecta e identifica la resistencia serie errónea:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.099512	0.00199	1	9.4
52	0	0.03392	0.001	1	8.2
1	1	1.05	0.0053	0	5.8
1	2	1.185621	0.0053	0	5.3
1	3	1.05	0.0053	0	4.3
1	4	1.157304	0.0053	0	3.8

Tabla 4-125: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación

Y también estima correctamente el valor:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0995	0.002	0.0539	9.4

Tabla 4-126: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error del 85%

Por último detecta e identifica el error de la susceptancia paralelo en la 3° iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.03392	0.001	1	4.1
4	0	0.05666	0.0119	-5	1.6
4	0	-0.094575	0.0119	5	1.6
4	0	-0.165855	0.0119	4	1.5
4	0	0.141660	0.0119	-4	1.5
8	9	-0.094575	0.0146	0	1.2

Tabla 4-127: Máximos residuos normalizados en la tercera iteración del proceso de estimación

Estima correctamente el valor:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
B sht	0.0339	0.001	0.0184	4.1

Tabla 4-128: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error del 85%

Una vez eliminados los parámetros erróneos, presenta la red estimada con todas sus medidas con residuo normalizado igual a 0.

No obstante, al reducir excesivamente el nivel de carga en todos los escenarios por igual empeoran las condiciones de detección de errores en los parámetros. Se comprueba que introduciendo de nuevo el error del 85 % pero con los 5 escenarios al 25 % de carga se obtienen los siguientes resultados:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0995	0.002	-0.0293	10.0
B sht	0.0339	0.001	0.025	3.2

Tabla 4-129: Resultados de la estimación de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir un error del 85% con 5 escenarios al 25% de carga

Se detectan e identifican error en los valores de resistencia serie y susceptancia paralelo pero se estima un valor muy alejado del correcto.

De tal modo, a la luz de los resultados, para escenarios con nivel de carga elevado o muy bajo no mejoran las condiciones de detección simultánea de errores en los parámetros de estudio.

- **Potencia nominal de la línea de 132 kV: 100 MVA**

En la tabla 4-130 se muestran los resultados obtenidos en una línea de potencia nominal 100 MVA:

R.N.			
Error	5 escenarios con régimen de carga 100%	5 escenarios con distintos regímenes de carga	5 escenarios con régimen de carga 25 %
+ 20%	NaN / 5.1 [E] / NaN	NaN / 3.6 [E] / NaN	NaN / 1.6 / NaN
+ 25%	6.3 [E] / 3.5 [E] / NaN	4.6 [E] / 1.9 / NaN	NaN / 2.0 / NaN
+ 30 %	7.5 [E] / 4.2 [E] / NaN	5.5 [E] / 2.3 / NaN	NaN / 2.4 / NaN
+ 85 %	18.2 [E] / 10.4 [E] / NaN	14.2 [E] / 6.0 [E] / 4.1 [E]	8.1 [E] / NaN / 4.1 [E]
+ 90%	19.0 [E] / 10.9 [E] / NaN	14.9 [E] / 6.3 [E] / 4.3 [E]	8.6 [E] / NaN / 4.4 [E]

*Tabla 4-130: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el régimen de carga de la línea de 100 MVA*

Al disminuir la potencia nominal de la línea de estudio, se ha observado que valor erróneo de la resistencia serie resulta más sensible al proceso de estimación (se detecta el error con un mayor R.N.), al contrario que con la reactancia serie, que se detecta con un valor menor de residuo normalizado. La susceptancia paralelo se ha visto muy poco afectada.

De nuevo a partir del error de un 85 % se detectan e identifican satisfactoriamente los parámetros erróneos de forma simultánea sólo para 5 escenarios con distintos niveles de carga. Todos ellos se estiman correctamente en la tabla 4-131:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0995	0.002	0.054	14.2
X ser	0.3513	0.007	0.1899	6.0
B sht	0.0339	0.001	0.0184	4.1

*Tabla 4-131: Resultados de la estimación de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir un error del 85% con 5 escenarios con distintos niveles de carga*

#### 4.1.5.3 Cuestión del número de escenarios considerados

Se van a realizar las simulaciones variando el número de escenarios considerados con 1, 24, y 64 escenarios iguales al nivel máximo de potencia:

R.N. (R / X / B)				
Error	1 escenario	4 escenarios	24 escenarios	64 escenarios
+ 25%	NaN / 4.5 [E] / NaN	3.9 [E] / 7.0 [E] / NaN	9.5 [E] / 7.0 [E] / NaN	10.9 [E] / 7.5 [E] / NaN
+ 50%	4.1 [E] / 8.5 [E] / NaN	7.7 [E] / 12.7 [E] / NaN	16.7 [E] / 12.2 [E] / NaN	18.6 [E] / 12.8 [E] / NaN
+ 70%	5.8 [E] / 11.3 [E] / NaN	10.6 [E] / 16.4 [E] / NaN	21.3 [E] / 15.4 [E] / NaN	23.4 [E] / 16.1 [E] / 3.6 [E]

*Tabla 4-132: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el número de escenarios considerados*

Como se puede ver en la tabla 4-132, con 64 escenarios y un error del 70 %, se detectan e identifican los tres parámetros erróneos simultáneamente, estimándose cada uno de ellos correctamente en la tabla 4-133:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
R ser	0.0914	0.0018	0.0538	23.4
X ser	0.3228	0.0065	0.19	16.1
B sht	0.0312	0.001	0.0184	3.6

*Tabla 4-133: Resultados de la estimación de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo al introducir un error del 70% con 64 escenarios iguales*

Por ello el número de escenarios contribuye favorablemente a la detección e identificación de errores simultánea en la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo.

#### 4.1.5.4 Cuestión de redundancia de medidas

Al cuestionar la hipótesis de redundancia según el apartado 3.1.7 se obtienen los resultados de la tabla 4-134:

R.N.			
Error	Completa	Reducida	Muy reducida
+ 25%	3.9 [E] / 7.0 [E] / NaN	3.7 [E] / 6.7 [E] / NaN	NaN / 6.7 [E] / NaN
+ 50%	7.7 [E] / 12.7 [E] / NaN	7.3 [E] / 12.2 [E] / NaN	NaN / 12.6 [E] / NaN
+ 70%	10.6 [E] / 16.4 [E] / NaN	10.0 [E] / 15.8 [E] / NaN	NaN / NaN / 4.0 [E]
+ 90 %	13.4 [E] / 19.4 [E] / NaN	12.6 [E] / 19.0 [E] / NaN	20.5 [E] / NaN / NaN

Tabla 4-134: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar la redundancia de medidas

Se puede ver que se produce un deterioro de las condiciones de detección e identificación simultánea de errores en los parámetros de estudio. Cabe destacar que al igual que en el análisis simultáneo de resistencia y reactancia serie, para redundancia muy reducida se obtienen resultados muy mediocres:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. Std	Estimado	R.N.
X ser (+ 50%)	0.2848	0.0057	0.1147	12.6
B sht (+ 70%)	0.0312	0.05	-0.1749	4.0
R ser (+ 90%)	0.1022	0.002	0.0091	20.5

Tabla 4-135: Resultados de la estimación de la reactancia serie, susceptancia paralelo y resistencia serie con un error de 50%, 70% y 90% respectivamente, con redundancia muy reducida

#### 4.1.5.5 Cuestión del factor de potencia

Los resultados correspondientes al variar el factor de potencia se presentan en la tabla 4-136:

R.N. (R / X / B)				
Error	f.d.p.=1	f.d.p.= 0.9	f.d.p.= 0.8	f.d.p.= 0.7
+ 25%	3.0 / 2.0 / 5.7 [E]	3.9 [E] / 7.0 [E] / NaN	3.5 [E] / 7.8 [E] / NaN	NaN / 8.2 [E] / NaN
+ 50%	5.8 [E] / 1.3 / 10.4 [E]	7.7 [E] / 12.7 [E] / NaN	7.0 [E] / 13.0 [E] / NaN	6.3 [E] / 14.5 [E] / NaN
+ 70%	7.9 [E] / 1.9 / 13.6 [E]	10.6 [E] / 16.4 [E] / NaN	9.6 [E] / 17.9 [E] / NaN	8.7 [E] / 18.5 [E] / NaN

Tabla 4-136: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar el factor de potencia

A partir de los resultados de la tabla anterior, no se detecta una mejoría en las condiciones para detectar e identificar simultáneamente errores en la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo variando el factor de potencia.

**4.1.5.6 Cuestión de comportamiento simétrico**

A continuación, se va a realizar un ensayo con aquellas condiciones que permiten una adecuada detección e identificación del parámetro erróneo, teniendo en cuenta los resultados anteriores. Se introducirán errores por exceso y por defecto con objeto de evaluar si el estimador posee un comportamiento simétrico.

Se ensayarán las siguientes condiciones:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.  
 $R=0.05379 \text{ pu}$   $X=0.18988 \text{ pu}$   $B=0.03667 \text{ pu}$  ( $1/2 B \text{ sht}= 0.018335$ )
- Nivel de carga: 100% del valor máximo (130 MVA).
- Número de escenarios considerados: 25 escenarios (5 para cada nivel de carga considerado en el plan de trabajo).
- Redundancia: Completa.
- Factor de Potencia: 0.9.

Los resultados obtenidos al introducir distintos errores por exceso y defecto se muestran en la tabla 4-137:

R.N. (R / X / B)		
Error	Por exceso	Por defecto
5%	1.8 / 1.9 / 0.1	NaN / 2.1 / 0.1
10%	2.2 / 3.8 [E] / 1.8	NaN / 4.2 [E] / 1.8
15%	3.2 [E] / 5.5 [E] / 1.4	3.3 [E] / 6.5 [E] / 1.4
20%	4.3 [E] / 7.1 [E] / 1.9	4.4 [E] / 8.9 [E] / 1.9
25%	5.3 [E] / 8.6 [E] / 2.4	5.5 [E] / 11.4 [E] / 2.4
30%	6.3 [E] / 10.0 [E] 2.9	6.6 [E] 14.1 [E] / 2.9
35%	7.3 [E] / 11.3 [E] / 3.3 [E]	7.7 [E] / 16.8 [E] / 3.3 [E]
40 %	8.3 [E] / 12.6 [E] / 3.8 [E]	8.8 [E] / 19.7 [E] / 3.8 [E]

*Tabla 4-137: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo con errores por exceso y defecto*

A la luz de estos resultados de la tabla 4-137, se puede advertir de nuevo un comportamiento simétrico del estimador a la hora de detectar errores en la susceptancia paralelo. En cambio al igual que para los análisis individuales, se detecta un comportamiento no simétrico por parte del estimador en el caso de la resistencia y reactancia serie, ya que los residuos normalizados obtenidos por errores son mayores por defecto que por exceso. Cabe destacar que la reactancia serie es el parámetro más sensible de todos y con mayor asimetría. Esto se puede contemplar en la siguiente gráfica de la figura 4-10:

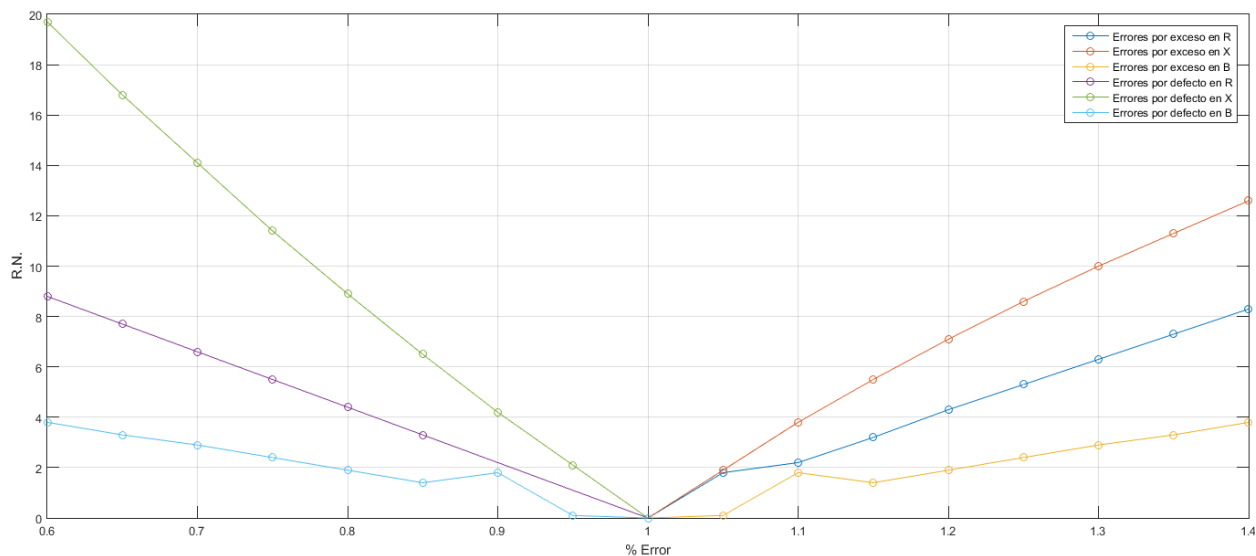


Figura 4-10: Resultados de cuestionar el comportamiento simétrico en la estimación simultánea de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo

El estimador detecta e identifica correctamente los valores erróneos a partir de un 35% de error por exceso y por defecto, y los estima correctamente tal y como se presenta en las tablas 4-139, 4-141, 4-143, 4-145, 4-147 y 4-149. Se eliminan y se presenta la red estimada con todas las medidas con R.N.=0 en ambos casos:

• **Resultados cuando se introduce un error por exceso de +35%:**

En la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.256338	0.005127	1	11.3
50	0	0.072617	0.001452	1	11.0
1	2	1.185621	0.0053	0	2.8
1	4	1.185621	0.0053	0	2.8
1	6	1.185621	0.0053	0	2.8
1	8	1.185621	0.0053	0	2.8

Tabla 4-138: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 35%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.2563	0.0051	0.1899	11.3

Tabla 4-139: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por exceso del 35%

En la segunda iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.072617	0.001452	1	7.3
52	0	0.024752	0.001	1	6.1
1	1	1.05	0.0053	0	1.7
1	3	1.05	0.0053	0	1.7
1	5	1.05	0.0053	0	1.7
1	7	1.05	0.0053	0	1.7

Tabla 4-140: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 35%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.0726	0.0015	0.0538	7.3

Tabla 4-141: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por exceso del 35%

En la tercera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.024752	0.001	1	3.3
4	0	0.05666	0.0119	-21	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-22	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-23	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-24	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-25	0.5

Tabla 4-142: Máximos residuos normalizados en la tercera iteración del proceso de estimación al introducir un error por exceso del 35%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0248	0.001	0.0183	3.3

Tabla 4-143: Resultado de la estimación de la susceptancia al introducir un error por exceso del 35%



- **Resultados cuando se introduce un error por defecto de -35%:**

En la primera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.123422	0.002468	1	16.8
50	0	0.034964	0.001	1	15.3
1	2	1.185621	0.0053	0	4.4
1	4	1.185621	0.0053	0	4.4
1	6	1.185621	0.0053	0	4.4
1	8	1.185621	0.0053	0	4.4

Tabla 4-144: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 35%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.1234	0.0025	0.1898	16.8

Tabla 4-145: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error por defecto del 35%

En la segunda iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.034964	0.001	1	7.7
52	0	0.011918	0.001	1	6.4
1	1	1.05	0.0053	0	1.9
1	3	1.05	0.0053	0	1.9
1	5	1.05	0.0053	0	1.9
1	7	1.05	0.0053	0	1.9

Tabla 4-146: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 35%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R ser	0.035	0.001	0.0538	7.7

Tabla 4-147: Resultado de la estimación de la resistencia serie al introducir un error por defecto del 35%

En la tercera iteración:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
52	0	0.011918	0.001	1	3.3
4	0	0.05666	0.0119	-21	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-22	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-23	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-24	0.5
4	0	0.05666	0.0119	-25	0.5

Tabla 4-148: Máximos residuos normalizados en la tercera iteración del proceso de estimación al introducir un error por defecto del 35%

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
B sht	0.0119	0.001	0.0183	3.3

Tabla 4-149: Resultado de la estimación de la susceptancia paralelo al introducir un error por defecto del 35%

#### 4.1.5.7 Cuestión de nivel de tensión

En este apartado se va a evaluar la hipótesis de la tensión de la línea. Hasta ahora se han realizado las simulaciones en una rama de 132 kV. A continuación se va a ver qué ocurre en una línea de 400 kV y 45 kV, con objeto de comprobar como influye el nivel de tensión en la capacidad de detección e identificación de errores en el parámetro de estudio.

- **Nivel de tensión: 45 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.5896 \text{ p.u. } X=0.65 \text{ p.u. } B=0.0213 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=53 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo de una línea de 45 kV se presentan en la tabla 4-150:

R.N.			
Error	R=0.5896	X=0.65	B=0.0213
+ 5%	2.4	1.8	0.3
+ 10%	4.6 [E]	2.0	1.6
+ 15%	6.7 [E]	3.0	2.3
+ 20%	8.6 [E]	3.9 [E]	NaN
+ 25%	10.4 [E]	4.8 [E]	NaN
+ 50%	17.9 [E]	8.8 [E]	NaN
+ 80%	24.4 [E]	12.9 [E]	2.9
+ 85%	25.2 [E]	13.5 [E]	3.1 [E]

Tabla 4-150: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo en una línea de 45 kV

Se detecta e identifica correctamente los valores erróneos cuando se introduce un 85% de error, estimándolos correctamente. Se eliminan y se presenta la red estimada con todas las medidas con R.N.=0.

- **Nivel de tensión: 400 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.00325 \text{ pu} \quad X=0.03105 \text{ pu} \quad B=1.181 \text{ pu}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=1600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo de una línea de 400 kV se presentan en la tabla 4-151:

R.N.			
Error	R=0.00325	X=0.03105	$\frac{1}{2} B_{sh} = 0.5905$
+ 5%	0.2	NaN	2.2
+ 10%	0.4	NaN	4.1 [E]
+ 15%	0.7	NaN	5.9 [E]
+ 20%	0.9	NaN	7.6 [E]
+ 25%	1.1	NaN	9.1 [E]
+ 50%	1.2	5.2 [E]	15.3 [E]
+ 80%	1.9	8.3 [E]	20.5 [E]
+ 85%	2.0	8.7 [E]	21.2 [E]

Tabla 4-151: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo en una línea de 400 kV

En cada nivel de tensión analizado, se han tomado condiciones análogas para realizar los ensayos con el objetivo de comparar los resultados y observar cómo afecta el nivel de tensión.

Se produce una mejoría en la detección e identificación simultánea de errores en los parámetros de resistencia y reactancia serie, y susceptancia paralelo en la línea de menor nivel de tensión (45 kV). En ella se detectan e identifican correctamente los parámetros a partir de un error del 85%, y se estima el valor correcto de cada uno de ellos.

En las líneas de 132 kV y 400 kV el estimador no ha sido capaz de detectar simultáneamente los parámetros erróneos, de modo que la calidad de la estimación no es exacta.

Es interesante comprobar que para la línea de mayor nivel de tensión se han obtenido mayores residuos normalizados a la hora de detectar e identificar el error en la susceptancia paralelo, mientras que para la reactancia y resistencia serie han sido mucho menores; no detectándose incluso el error en la resistencia serie. En la línea de menor nivel de tensión ha sucedido la situación inversa.

#### 4.1.5.8 Cuestión de topología de rama

En esta sección se va a analizar cómo influye la topología de la rama en la estimación de los parámetros, comprobando en qué casos favorece una adecuada detección e identificación de errores.

Para ello, al igual que en el estudio de la reactancia serie, se va a tomar la línea de 132 kV estudiada hasta ahora, para formar parte la red mallada IEEE de 14 nudos y otra radial de 6 nudos. El diagrama unifilar y valores de los parámetros de las redes radial y mallada ensayadas se encuentran en el [anexo A](#).

Los siguientes ensayos se han realizado considerando las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.05379 \text{ pu} \quad X=0.18988 \text{ pu} \quad B=0.03667 \text{ pu}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.

$$S=130 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.

En la tabla 4-152 se muestran los residuos normalizados de los valores de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo erróneas identificados para cada tipo de topología:

<b>R.N. (R / X / B sht)</b>			
<b>TOPOLOGÍA DE RAMA</b>			
<b>Error</b>	<b>Aislada</b>	<b>Radial</b>	<b>Mallada</b>
+ 5%	NaN / 1.5 / NaN	1.5 / 1.8 / NaN	1.1 / 2.0 / NaN
+ 10%	NaN / 3.0 [E] / NaN	2.0 / 3.5 [E] / NaN	2.8 / 3.9 [E] / NaN
+ 15%	NaN / 4.4 [E] / NaN	3.0 [E] / 5.0 [E] / NaN	4.1 [E] / 5.6 [E] / NaN
+ 20%	3.2 [E] / 5.8 [E] / NaN	4.0 [E] / 6.6 [E] / NaN	5.3 [E] / 7.2 [E] / NaN
+ 25%	3.9 [E] / 7.0 [E] / NaN	4.9 [E] / 8.0 [E] / NaN	6.5 [E] / 8.7 [E] / NaN
+ 50%	7.7 [E] / 12.7 [E] / NaN	9.5 [E] / 14.0 [E] / NaN	11.9 [E] / 14.9 [E] / NaN
+ 60%	9.2 [E] / 14.6 [E] / NaN	11.2 [E] / 16.0 [E] / NaN	13.8 [E] / 16.9 [E] / 3.4 [E]
+ 70%	10.6 [E] / 16.4 [E] / NaN	12.8 [E] / 17.8 [E] / NaN	15.6 [E] / 18.7 [E] / 3.9 [E]
+ 80%	12.0 [E] / 18.0 [E] / NaN	14.4 [E] / 19.5 [E] / NaN	17.2 [E] / 20.3 [E] / 4.5 [E]

*Tabla 4-152: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo al cuestionar la topología de rama*

Se observa en la tabla 4-152, que en red mallada se obtienen los mejores resultados de detección e identificación simultánea de reactancia y resistencia serie, y susceptancia paralelo. En red radial también mejora la calidad de detección de errores en la resistencia y reactancia serie respecto a la rama aislada, pero no detecta simultáneamente los tres parámetros.

Cuando se han detectado en la red mallada los errores en los parámetros, han sido identificados satisfactoriamente por iteración, estimando el valor correcto de cada uno de ellos. Una vez eliminados los parámetros erróneos, se muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 en todos estos casos.

En los ensayos en los que únicamente se ha detectado el error en la reactancia serie, o la resistencia y reactancia simultáneamente, la identificación ha sido satisfactoria, pero tal y como se ha producido hasta ahora, la estimación del valor del parámetro no ha sido correcta.



## 5 SIMULACIONES EN TRANSFORMADORES

Contando con los resultados del capítulo anterior, se realizarán simulaciones sobre transformadores en distintas redes, con diferentes escenarios. Para ello, de nuevo se tendrán en cuenta los valores de parámetros y los criterios del plan de trabajo del capítulo 3.

### 5.1 Análisis de los parámetros eléctricos en transformadores

Al igual que en el capítulo anterior, se va a seguir con la misma metodología para realizar el estudio de los parámetros de los transformadores.

Se considerarán las siguientes condiciones iniciales:

- **Relación de transformación:** 132/66 kV
- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.
- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.
- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Topología de la rama:** Aislada.

Cada una de ellas se irá evaluando individualmente cómo afecta a la capacidad de detección e identificación de errores en los parámetros. De esta forma, el análisis de los parámetros de estudio (reactancia y resistencia) se desarrollará en base al siguiente índice:

1. Cuestión de potencia nominal
2. Cuestión de la relación de transformación
3. Cuestión de factor de potencia
4. Cuestión de topología

#### 5.1.1 Análisis de reactancia

Los ensayos se van a realizar al igual que en el caso de la reactancia serie de una línea, introduciendo errores por exceso en el valor de la reactancia y partiendo del siguiente escenario inicial:

- **Relación de transformación:** 132/66 kV
- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.01 \text{ p.u. } X=0.193 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.

$$S_n=60 \text{ MVA}$$

- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.

- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Topología de la rama:** Aislada.

En la tabla 5-1 se muestran los residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia al introducir los errores indicados:

R.N.	
Error	X= 0.193 pu
+ 10%	NaN
+ 25%	NaN
+ 45 %	NaN
+ 50%	7.4 [E]

*Tabla 5-1: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia bajo condiciones iniciales*

Se puede ver que el estimador presenta dificultades para detectar el error en el parámetro. Por ejemplo, al introducir un error del 25% no es capaz de detectarlo y presenta las medidas estimadas de la red con residuos normalizados distintos de 0. Además, realiza una estimación incorrecta del parámetro, como se puede ver en la tabla 5-2:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
X ser	0.24125	0.00121	0.24083	0.00120	NaN

*Tabla 5-2: Resultado de la estimación de la reactancia serie al introducir un error del 25 %*

A partir de un error del 50% es cuando detecta e identifica satisfactoriamente el valor erróneo, según se puede ver en la tabla 5-3:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.2895	0.001448	1	7.4
1	2	1.096928	0.0053	0	2.5
1	4	1.096928	0.0053	0	2.5
1	6	1.096928	0.0053	0	2.5
1	8	1.096928	0.0053	0	2.5
4	0	-0.204217	0.0119	1	2.2

*Tabla 5-3: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación*



Sin embargo, el valor de la función objetivo ha sido de 1.726 (alejado de 0), lo cual explica que la estimación no sea exacta:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X ser	0.2895	0.0014	0.1958	7.4

Tabla 5-4: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %

### 5.1.1.1 Cuestión de potencia nominal

Se va a cuestionar la hipótesis de la potencia nominal del transformador de 132/66 kV. Teniendo en cuenta los resultados del apartado 3.2.2.2, se ensayarán las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.01333 \text{ p.u. } X=0.316667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.

$$S_n=31.5 \text{ MVA}$$

En la tabla 5-5 se muestran los resultados obtenidos en el transformador bajo las condiciones anteriores:

R.N.	
Error	X= 0.316667 pu
+ 10%	NaN
+ 25%	NaN
+ 50%	NaN

Tabla 5-5: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia de un transformador de 132/66 kV con potencia nominal 31.5 MVA

Las condiciones para la detección de errores en la reactancia empeoran. En el caso de un error del 50% se obtiene el siguiente resultado de la tabla 5-6:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
X	0.47501	0.00238	0.47421	0.00237	NaN

Tabla 5-6: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %

### 5.1.1.2 Cuestión de la relación de transformación

En este apartado se va a cuestionar la relación de transformación con el objetivo de ver como influye en las condiciones de detección de errores de los parámetros. Para ello se ensayarán transformadores de relación de

transformación 400/220 kV y 45/15 kV.

- **Relación de transformación: 400/220 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.000832 \text{ p.u. } X=0.018789 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la reactancia de un transformador de 400/220 kV bajo las condiciones anteriores, se presentan en la tabla 5-7:

R.N.	
Error	X=0.018789 pu
+ 10%	1.9
+ 25%	4.7 [E]
+ 50%	9.4 [E]

*Tabla 5-7: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia de un transformador de 400/220 kV*

Se detecta e identifica el parámetro erróneo satisfactoriamente al introducir un 25% de error, como se puede ver en la tabla 5-8:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.023486	0.001	1	4.7
4	0	-2.050950	0.0025	4	0.1
4	0	-2.050950	0.0025	1	0.1
4	0	-2.050950	0.0025	2	0.1
4	0	-2.050950	0.0025	3	0.1
1	2	1.095049	0.0053	0	0.1

*Tabla 5-8: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación*

Estima correctamente el parámetro (tabla 5-9), lo elimina y presenta la red estimada con todos los R.N.=0.

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X	0.0235	0.001	0.0188	4.7

Tabla 5-9: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 25 %

• **Relación de transformación: 45/15 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.035 \text{ p.u. } X=0.6 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=15 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

De nuevo, al introducir errores por exceso en el valor de la reactancia de un transformador de 45/15 kV bajo las condiciones anteriores, se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 5-10:

R.N.	
Error	X=0.6 pu
+ 10%	14.5 [E]
+ 25%	33.1 [E]
+ 50%	57.8 [E]

Tabla 5-10: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia de un transformador de 45/15 kV

Para todos los casos, el estimador detecta e identifica el parámetro erróneo satisfactoriamente, estimando el valor exacto. Lo elimina y presenta la red estimada con todos los R.N.=0.

Al introducirse un error del 10% se obtuvieron los siguientes resultados de las tablas 5-11 y 5-12:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.66	0.0033	1	14.5
1	8	1.18396	0.0053	0	3.0
1	2	1.18396	0.0053	0	3.0
1	4	1.18396	0.0053	0	3.0
1	6	1.18396	0.0053	0	3.0
1	7	1.05	0.0053	0	2.7

Tabla 5-11: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X	0.6600	0.0033	0.6000	14.5

Tabla 5-12: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 10 %

### 5.1.1.3 Cuestión de factor de potencia

En este apartado se va a cuestionar la hipótesis del factor de potencia. En la tabla 5-13 se muestran los resultados obtenidos la introducir los errores especificados:

R.N.		
Error	f.d.p.=0.9	f.d.p.=0.7
+ 10%	NaN	NaN
+ 25%	NaN	NaN
+ 35%	NaN	7.1 [E]
+ 45%	NaN	9.1 [E]
+ 50%	7.4 [E]	10.0 [E]

Tabla 5-13: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia al cuestionar el factor de potencia

Como se puede ver en la tabla 5-13, con factor de potencia 0.9, se detecta e identifica el valor erróneo de la reactancia con un 50% de error, mientras que con factor de potencia 0.7 se detecta e identifica la reactancia errónea con residuo normalizado 7.1 al introducir un 35% de error. Por tanto, se comprueba que al disminuir el factor de potencia mejora la detección e identificación de errores en la reactancia de un transformador.

Los parámetros erróneos detectados, han sido identificados satisfactoriamente y se ha estimado el correspondiente valor correcto.

### 5.1.1.4 Cuestión de topología

Se va comprobar cómo afecta la topología de la red en la calidad de detección e identificación de errores en los parámetros de transformadores. Para ello, se va a tomar la rama del transformador de 132/33 kV de las redes radial y mallada consideradas en el capítulo anterior. El diagrama unifilar y valores de los parámetros de las redes ensayadas se encuentran en el [anexo A](#).

Se partirá de las siguientes condiciones:

- **Relación de transformación:** 132/33 kV
- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.  
X=0.25202 p.u.
- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.

- **Redundancia de medidas:** Completa.

En la tabla 5-14 se presentan los residuos normalizados asociados a la reactancia errónea del transformador en una rama aislada, una red radial y una red mallada:

<i>Error</i>	<b>R.N.</b>		
	<b>TOPOLOGÍA DE RAMA</b>		
	<i>Aislada</i>	<i>Radial</i>	<i>Mallada</i>
+ 5%	NaN	NaN	5.0 [E]
+ 10%	NaN	NaN	9.8 [E]
+ 15%	NaN	NaN	14.3 [E]
+ 20%	NaN	NaN	18.7 [E]
+ 25%	NaN	NaN	22.9 [E]
+ 30%	NaN	5.3 [E]	26.9 [E]
+ 50%	NaN	8.9 [E]	41.6 [E]

Tabla 5-14: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia al cuestionar la topología de rama

De forma análoga a los resultados del capítulo anterior, se puede ver en la tabla 5-14 que en red mallada se obtienen los mejores resultados. Los errores detectados han sido identificados satisfactoriamente en la reactancia, estimando el valor correcto del parámetro. Una vez eliminado el parámetro erróneo, se muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 en todos estos casos.

### 5.1.2 Análisis de resistencia

De nuevo, las siguientes simulaciones se van a realizar introduciendo errores por exceso en el valor de la resistencia y partiendo del siguiente escenario inicial:

- **Relación de transformación:** 132/66 kV
- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.  
R=0.01 p.u. X=0.193 p.u.
- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.  
S<sub>n</sub>=60 MVA
- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Topología de la rama:** Aislada.

En la tabla 5-15 se muestran los residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia al introducir los errores indicados:

R.N.	
Error	R= 0.01 pu
+ 10%	NaN
+ 25%	NaN
+ 50 %	NaN

Tabla 5-15: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia bajo condiciones iniciales

El estimador no es capaz de detectar el parámetro erróneo, dando como resultado residuo normalizado *NaN*, y por tanto, estimándolo incorrectamente. Por ejemplo, para un error del 50% se obtienen los resultados de la tabla 5-16:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
X ser	0.015	0.001	0.01491	0.00099	NaN

Tabla 5-16: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %

### 5.1.2.1 Cuestión de potencia nominal

Se va a cuestionar la hipótesis de la potencia nominal del transformador de 132/66 kV. Teniendo en cuenta los resultados del apartado 3.2.2.2, se ensayarán las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.01333 \text{ p.u. } X=0.316667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.

$$S_n=31.5 \text{ MVA}$$

En la tabla 5-17 se muestran los resultados obtenidos en el transformador bajo las condiciones anteriores:

R.N.	
Error	R=0.01333 pu
+ 10%	NaN
+ 25%	NaN
+ 50%	NaN

Tabla 5-17: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 132/66 kV con potencia nominal 31.5 MVA

Se puede ver que las condiciones para la detección e identificación de errores en la resistencia no mejoran. El estimador sigue teniendo problemas estimando incorrectamente el parámetro, como en el caso de un error del 50% que se representa en la tabla 5-18:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
R	0.01999	0.001	0.01996	0.001	NaN

Tabla 5-18: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %

### 5.1.2.2 Cuestión de la relación de transformación

En este apartado se va a cuestionar la relación de transformación con el objetivo de ver como influye en las condiciones de detección de errores de los parámetros. Para ello se ensayarán transformadores de relación de transformación 400/220 kV y 45/15 kV.

- **Relación de transformación: 400/220 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.000832 \text{ p.u. } X=0.018789 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia de un transformador de 400/220 kV bajo las condiciones anteriores, se presentan en la tabla 5-19:

R.N.	
Error	R=0.000832
+ 10%	0.1
+ 25%	0.2
+ 50%	0.4
+ 80%	0.7

Tabla 5-19: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 400/220 kV

El estimador es capaz de calcular el residuo normalizado asociado a los parámetros pero no detecta e identifica el parámetro erróneo. Sin embargo realiza una estimación muy aproximada de ellos (tablas 5-20 y 5-21):

- Al introducir un error del 25%:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
R	0.00104	0.001	0.00083	0.0001	0.2

Tabla 5-20: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %

- Al introducir un error del 80%:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
R	0.0015	0.001	0.00084	0.0001	0.7

Tabla 5-21: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %

Cabe destacar que en ambos casos los residuos normalizados de las medidas de la red estimada han sido 0, y los valores de la función objetivo 0.043 y 0.438 respectivamente.

- **Relación de transformación: 45/15 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.035 \text{ p.u. } X=0.6 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=15 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia de un transformador de 45/15 kV bajo las condiciones anteriores, se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 5-22:

R.N.	
Error	R= 0.035 p.u.
+ 10%	1.8
+ 25%	4.5 [E]
+ 50%	9.0 [E]

Tabla 5-22: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 45/15 kV



Detecta e identifica el parámetro erróneo satisfactoriamente con un 25% de error en la resistencia. Los resultados obtenidos en la primera iteración del proceso de estimación se presentan en la tabla 5-23:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.04375	0.001	1	4.5
3	0	1.35	0.005	-1	1.3
3	0	1.35	0.005	-2	1.3
3	0	1.35	0.005	-3	1.3
3	0	1.35	0.005	-4	1.3
3	0	-1.293822	0.005	1	1.2

Tabla 5-23: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Estima correctamente el parámetro (tabla 5-24), lo elimina y presenta la red estimada con todos los R.N.=0.

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R	0.0438	0.001	0.035	4.5

Tabla 5-24: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %

### 5.1.2.3 Cuestión de factor de potencia

En la tabla 5-25 se presentan los resultados al cuestionar la hipótesis del factor de potencia.

R.N.		
<i>Error</i>	<i>f.d.p.=0.9</i>	<i>f.d.p.=0.7</i>
+ 10%	NaN	NaN
+ 25%	NaN	NaN
+ 50%	NaN	NaN

Tabla 5-25: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia al cuestionar el factor de potencia

A partir de los resultados de la tabla 5-25, no se detecta mejoría en la detección e identificación de errores en la resistencia al disminuir el factor de potencia.

Anteriormente en el apartado 5.1.2.2 se ha comprobado que para relaciones de transformación de menor nivel de tensión se tienen mejores condiciones de detección e identificación de errores en la resistencia. Por ello se

van a comparar los resultados para factor de potencia 0.9 y 0.7 en un transformador con relación de transformación 45/15 kV bajo las condiciones especificadas en dicho apartado:

R.N.		
Error	f.d.p.=0.9	f.d.p.=0.7
+ 10%	1.8	NaN
+ 25%	4.5 [E]	1.3
+ 50%	9.0 [E]	6.7 [E]

Tabla 5-26: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la resistencia de un transformador de 45/15 kV al cuestionar el factor de potencia

Se puede observar en la tabla 5-26 que a menor factor de potencia empeoran las condiciones de detección e identificación de errores en la resistencia. Sin embargo, en la tabla 5-13 correspondiente al estudio de la reactancia del transformador se obtuvo el resultado contrario, en el que con menor factor de potencia se tuvieron mejores condiciones para detectar e identificar errores en el parámetro. Estos resultados son equivalentes a los correspondientes del estudio de parámetros eléctricos de una rama.

### 5.1.3 Análisis simultáneo de resistencia y reactancia

Finalmente, se va a realizar el análisis simultáneo de resistencia y reactancia de un transformador introduciendo errores por exceso en los parámetros, y teniendo en cuenta las siguientes condiciones iniciales:

- **Relación de transformación:** 132/66 kV
- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.  
R=0.01 p.u. X=0.193 p.u.
- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.  
Sn=60 MVA
- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Topología de la rama:** Aislada.

Los residuos normalizados asociados a los valores erróneos de la reactancia y resistencia se muestran en la tabla 5-27:

R.N.		
Error	R= 0.01 p.u.	X= 0.193
+ 10%	NaN	NaN
+ 25%	NaN	NaN
+ 50%	NaN	7.8 [E]

Tabla 5-27: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia bajo condiciones iniciales

Se comprueba en la tabla 5-27 que el estimador tiene problemas para detectar simultáneamente el error en ambos parámetros. Únicamente capta e identifica satisfactoriamente el error de la reactancia. Sin embargo la estimación no es del todo exacta (el valor de la función objetivo ha sido 2.211) como se puede ver en la tabla 5-28:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X	0.2895	0.0014	0.1909	7.8

Tabla 5-28: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %

En cuanto al valor erróneo de la resistencia, no ha sido detectado y se ha estimado erróneamente tal como representa la tabla 5-29:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
R	0.015	0.001	0.01492	0.00099	NaN

Tabla 5-29: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %

### 5.1.3.1 Cuestión de potencia nominal

Se va a cuestionar la hipótesis de la potencia nominal del transformador de 132/66 kV. Teniendo en cuenta los resultados del apartado 3.2.2.2, se ensayarán las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:** Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.01333 \text{ p.u. } X=0.316667 \text{ p.u.}$$

- **Nivel de carga:** 100% del valor de la potencia nominal.

$$S=31.5 \text{ MVA}$$

En la tabla 5-30 se muestran los resultados obtenidos en el transformador bajo las condiciones anteriores:

R.N.		
Error	R= 0.01333	X= 0.316667 p.u.
+ 10%	NaN	NaN
+ 25%	NaN	NaN
+ 50%	NaN	NaN

Tabla 5-30: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 132/66 kV con potencia nominal 31.5 MVA

Se puede deducir de la tabla 5-30 que las condiciones de detección simultánea de ambos parámetros erróneos

no mejoran en transformadores de menor potencia nominal. Incluso no se detecta el error en la reactancia como en el ensayo anterior (tabla 5-27). A continuación, en las tablas 5-31 y 5-32 se muestran los resultados cuando se ha introducido un error del 50%, en la que las estimaciones realizadas han sido incorrectas:

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
R	0.01999	0.001	0.01969	0.001	NaN

Tabla 5-31: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 50 %

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	Desv. std	R.N.
X	0.47501	0.00238	0.47415	0.00237	NaN

Tabla 5-32: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 50 %

### 5.1.3.2 Cuestión de la relación de transformación

En este apartado se va a cuestionar la relación de transformación con el objetivo de ver como influye en las condiciones de detección de errores de los parámetros. Para ello se ensayarán transformadores de relación de transformación 400/220 kV y 45/15 kV.

- **Relación de transformación: 400/220 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.000832 \text{ p.u. } X=0.018789 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=600 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Los resultados al introducir errores por exceso en el valor de la resistencia y de la reactancia de un transformador de 400/220 kV bajo las condiciones anteriores, se presentan en la tabla 5-33:

R.N.		
Error	R=0.000832	X=0.018789
+ 10%	0.1	1.9
+ 25%	0.2	4.7 [E]
+ 50%	0.4	9.4 [E]

Tabla 5-33: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 400/220 kV

El estimador no es capaz de detectar e identificar simultáneamente el error en ambos parámetros, detectándolo únicamente en la reactancia. Es interesante ver que en estos casos se estima correctamente el valor de la reactancia, como al introducir un 25% de error (5-34), en la que la función objetivo resulta 0.052.

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X	0.0235	0.001	0.0188	4.7

Tabla 5-34: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 25 %

Además, presenta la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0 excepto en la resistencia.

- **Relación de transformación: 45/15 kV**

Se van a realizar los ensayos partiendo del siguiente escenario:

- Valores de los parámetros eléctricos: Mayores valores de los parámetros esperados.

$$R=0.035 \text{ p.u. } X=0.6 \text{ p.u.}$$

- Nivel de carga: 100% del valor máximo.

$$S=15 \text{ MVA}$$

- Número de escenarios considerados: 4 escenarios iguales.
- Redundancia de medidas: Completa.

Introduciendo errores por exceso en el valor de la resistencia y de la reactancia de un transformador de 45/15 kV bajo las condiciones anteriores, se obtienen los resultados de la tabla 5-35:

Error	R.N.	
	R= 0.035 p.u.	X= 0.6 p.u.
+ 10%	1.8	14.4 [E]
+ 25%	4.5 [E]	33.0 [E]
+ 50%	9.0 [E]	57.5 [E]

Tabla 5-35: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 45/15 kV

Se detectan e identifican satisfactoriamente ambos parámetros erróneos con un error del 25% (tablas 5-36 y 5-38), y se estima el valor correcto de cada uno de ellos (tablas 5-37 y 5-38). Se eliminan y muestra la red estimada con todos los residuos normalizados igual a 0.

En la primera iteración se detecta e identifica la reactancia:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
51	0	0.75	0.00375	1	33.0
1	2	1.18396	0.0053	0	7.4
1	4	1.18396	0.0053	0	7.4
1	6	1.18396	0.0053	0	7.4
1	8	1.18396	0.0053	0	7.4
1	1	1.05	0.0053	0	5.1

Tabla 5-36: Máximos residuos normalizados en la primera iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
X	0.75	0.0037	0.6	33.0

Tabla 5-37: Resultado de la estimación de la reactancia al introducir un error del 25 %

En la segunda iteración la resistencia:

Medida	Nudo origen	Valor medido	Desv Std	Nº Rama	RN
50	0	0.04375	0.001	1	4.5
3	0	-1.293822	0.005	1	1.3
3	0	-1.293822	0.005	2	1.3
3	0	-1.293822	0.005	3	1.3
3	0	-1.293822	0.005	4	1.3
3	0	1.35	0.005	-4	1.2

Tabla 5-38: Máximos residuos normalizados en la segunda iteración del proceso de estimación

Medidas Erróneas	Valor	Desv. std	Estimado	R.N.
R	0.0438	0.001	0.035	4.5

Tabla 5-39: Resultado de la estimación de la resistencia al introducir un error del 25 %

### 5.1.3.3 Cuestión de factor de potencia

En este apartado se va a cuestionar la hipótesis del factor de potencia, obteniéndose los resultados de la tabla 4-194 para los distintos errores:

<b>R.N. (R / X)</b>		
<b>Error</b>	<b>f.d.p.=0.9</b>	<b>f.d.p.=0.7</b>
+ 10%	NaN / NaN	NaN / NaN
+ 25%	NaN / NaN	NaN / NaN
+ 50%	NaN / 7.8 [E]	NaN / 10.4 [E]

*Tabla 5-40: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia al cuestionar el factor de potencia*

A partir de estos resultados se puede ver que con menor factor de potencia se tienen mejores condiciones para detectar e identificar el valor erróneo de la reactancia. No obstante, el estimador no es capaz de detectar simultáneamente el error en ambos parámetros. A continuación, se van a realizar los mismos ensayos en un transformador de relación de transformación 45/15 kV con las condiciones especificadas en el apartado 5.1.3.2:

<b>R.N. (R / X)</b>		
<b>Error</b>	<b>f.d.p.=0.9</b>	<b>f.d.p.=0.7</b>
+ 10%	1.8 / 14.4 [E]	NaN / 14.6 [E]
+ 25%	4.5 [E] / 33.0 [E]	3.3 [E] / 33.3 [E]
+ 50%	9.0 [E] / 57.5 [E]	6.7 [E] / 58.0 [E]

*Tabla 5-41: Residuos normalizados asociados al valor erróneo de la reactancia y resistencia de un transformador de 45/15 kV al cuestionar el factor de potencia*

Como era de esperar, para esta relación de transformación el estimador es capaz de detectar e identificar satisfactoriamente el error en ambos parámetros. Los estima correctamente y los eliminan presentando la red estimada con todos los residuos normalizados asociados a las medidas igual a 0.

Se puede comprobar que se obtienen resultados análogos al estudio de cada parámetro individualmente, a menor factor de potencia se tienen mejores resultados en errores asociados a la reactancia, y viceversa en la resistencia.





## 6 CONCLUSIONES

Rescapitulando, se ha comenzado con unas páginas a modo de introducción a la estimación de estado. En ellas se ha indicado en qué consiste y qué elementos intervienen en el proceso, así como que los parámetros eléctricos de las líneas (resistencia, reactancia, susceptancia paralelo) y transformadores pueden tener valores erróneos en las bases de datos de las compañías eléctricas por diversas situaciones. Esto puede conllevar malas consecuencias en la operación de la red o en el proceso de estimación de estado. Es por ello que se recurre a la “*ampliación del vector de estado*” como método de estimación de parámetros para evaluar su calidad.

Para aplicar este tipo de estimador, se ha utilizado como herramienta de análisis de la calidad de los parámetros un software proporcionado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica. En el capítulo dos se ha descrito el funcionamiento del programa y se ha realizado un ensayo a través del cual se ha validado para la consecución de los objetivos propuestos.

Posteriormente, en el tercer capítulo se ha desarrollado el plan de trabajo que resume todos los criterios que se han analizado en las simulaciones realizadas. Por otro lado, se han estudiado los valores típicos de los parámetros y potencia en líneas y transformadores a partir de una base de datos con valores reales. Esto ha permitido que los ensayos tengan un carácter más real dependiendo del nivel de tensión de la línea o la relación de transformación del transformador.

Tras esto, en el cuarto capítulo se han realizado distintos ensayos de acuerdo con los criterios anteriores para cumplir con el objetivo principal de este estudio: limitar qué factores influyen en la detección e identificación de errores en los parámetros eléctricos.

De los resultados obtenidos en las simulaciones se han deducido las siguientes conclusiones generales:

- En los ensayos en los que se han detectado errores en los parámetros, se han identificado satisfactoriamente y se ha estimado el valor correcto de cada uno de ellos.
- La reactancia es el parámetro más sensible al proceso de estimación y detección e identificación de errores.
- Para valores reducidos de los parámetros hay peores condiciones para poder detectar e identificar parámetros erróneos.
- Cuanto mayor sea el nivel de carga y potencia nominal de la línea o transformador, mejor se detectan errores en los parámetros. Es mejor emplear escenarios históricos donde el régimen de carga sea el más elevado posible.
- Con redundancia completa de medidas y a mayor número de escenarios mejoran las condiciones de detección e identificación de parámetros.
- Respecto a la cuestión del factor de potencia, a mayor valor mejora la detección e identificación de errores en la resistencia serie; mientras que a menor valor se detectan mejor los errores en la reactancia serie y susceptancia paralelo.
- El estimador presenta un comportamiento asimétrico en la detección de errores en la resistencia y reactancia serie, obteniéndose mejores resultados con errores por defecto (valor erróneo del parámetro inferior al exacto). Sin embargo, la detección de errores en la susceptancia paralelo ha resultado ser simétrica.
- El nivel de tensión de la rama y la relación de transformación de los transformadores influye en la detección e identificación de errores en los parámetros. En ramas de menor nivel de tensión se tienen mejores condiciones de detección e identificación de errores en la resistencia y reactancia serie;

mientras que aquellas de mayor nivel de tensión favorecen la detección e identificación de errores en el valor de susceptancia paralelo. Esta conclusión es equivalente a la cuestión de la relación de transformación en transformadores.

Este resultado guarda relación con los valores de los parámetros. Como se vió en el estudio del capítulo 3, los mayores valores de resistencia y reactancia corresponden a líneas y transformadores de menor nivel de tensión; y los mayores valores de susceptancia paralelo en ramas de mayor nivel de tensión.

- En cuanto a la topología de la rama, se deduce que en red mallada se tienen mejores condiciones para la detección e identificación de errores en los parámetros de las líneas y transformadores.

A modo ilustrativo se representan en la figura 6-1 los resultados de la detección de valores erróneos de reactancia serie correspondientes a las líneas de 400 kV, 132 kV y 45 kV, al introducir un error del 15% bajo las siguientes condiciones:

- **Valores de los parámetros eléctricos:**
  - Línea de 45 kV: Mayor valor del parámetro esperado.
  - Línea de 132 kV: Mayor valor del parámetro esperado, medio y pequeño.
  - Línea de 400 kV: Mayor valor del parámetro esperado.
- **Nivel de carga:** 100% del valor máximo.
- **Número de escenarios considerados:** 4 escenarios iguales.
- **Redundancia de medidas:** Completa.
- **Topología de la rama:** Aislada.

Los valores ensayados se presentan en la tabla 6-1:

<i>Nivel de tensión de la línea (kV)</i>	<i>S<sub>n</sub> (MVA)</i>	<i>X (pu)</i>	<i>X<sub>e</sub>=X*1.15 (pu)</i>	<i>X<sub>e</sub> (Ω)</i>	<i>R.N.</i>
45	53	0.65	0.7475	151.368	5.4 [E]
132	130	0.18988	0.2184	38.054	4.3 [E]
		0.075	0.0862	15.019	2.5
		0.025	0.02875	5.009	NaN
400	1600	0.03105	0.0357	5.712	2.7

*Tabla 6-1: Resultados de la detección de errores en la reactancia serie de líneas de distintos niveles de tensión, al introducir un error del 15%*

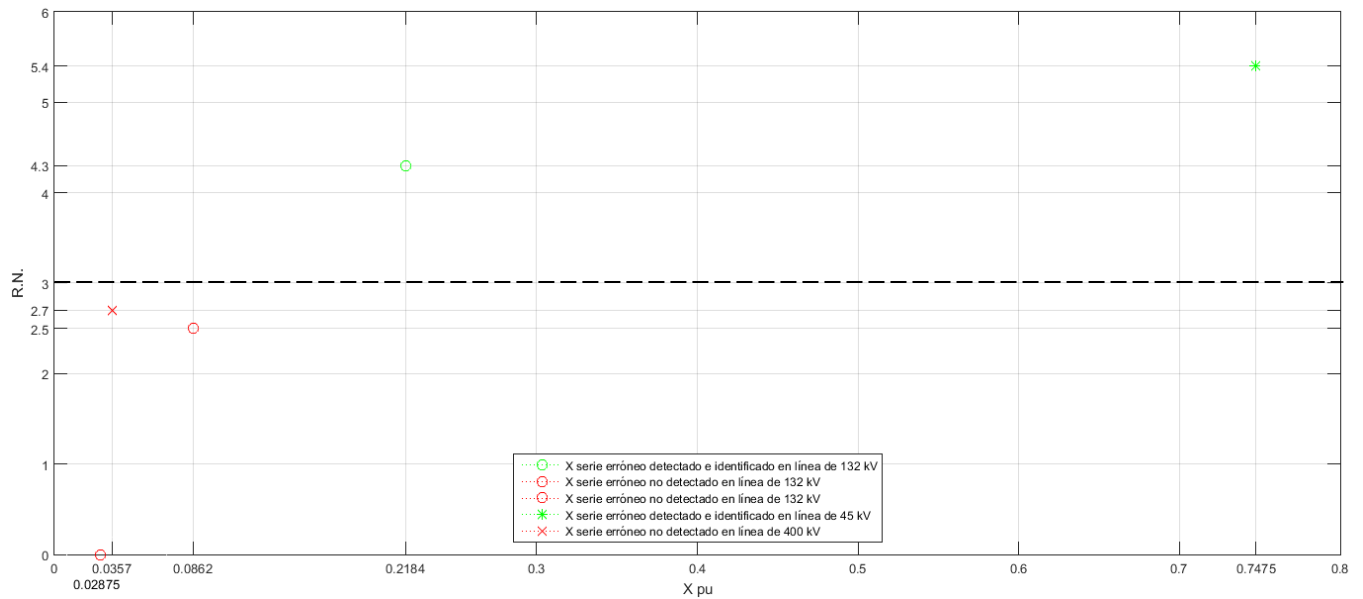


Figura 6-1: Resultados de la detección de errores en la reactancia serie de líneas de distintos niveles de tensión, al introducir un error del 15%

En la figura 6-1, se puede observar la influencia del nivel de tensión de la rama en la calidad de la detección e identificación de error en la reactancia, obteniéndose el mejor resultado en el caso de 45 kV (R.N.= 5.4). Por otro lado, se han ensayado distintos valores de reactancia serie de la rama de 132 kV, detectando e identificando satisfactoriamente el error en el mayor valor esperado con residuo normalizado 4.3, y obteniéndose peores resultados para los valores medio y pequeño (2.5 y NaN).

Finalmente, en la figura 6-2 se presenta la misma gráfica anterior, pero con los valores en unidades de ingeniería:

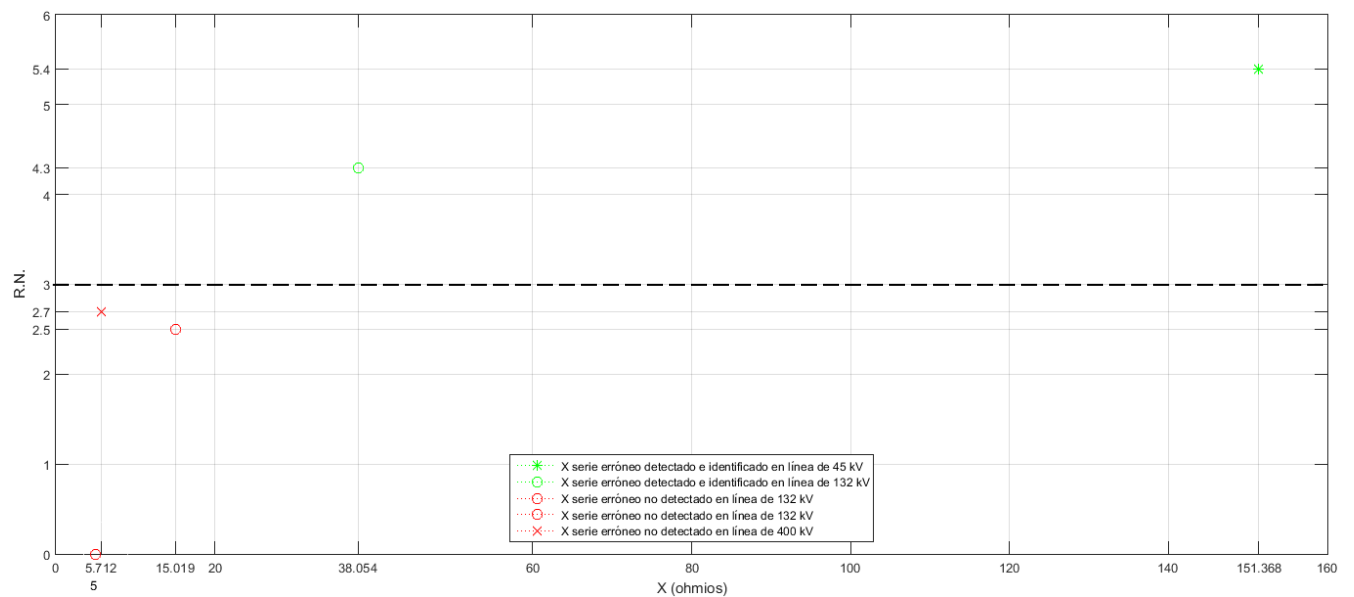


Figura 6-2: Resultados de la detección de errores en la reactancia serie (en ohmios) de líneas de distintos niveles de tensión, al introducir un error del 15%



# ANEXO A

En los apartados 4.1.1.8, 4.1.2.8, 4.1.3.8, 4.1.4.8 y 4.1.5.8 y 5.1.1.4 correspondientes al estudio de parámetros eléctricos de una línea y transformador, en los que se cuestiona la topología de la rama, se han ensayado las siguientes redes:

- Red mallada de 14 nudos:

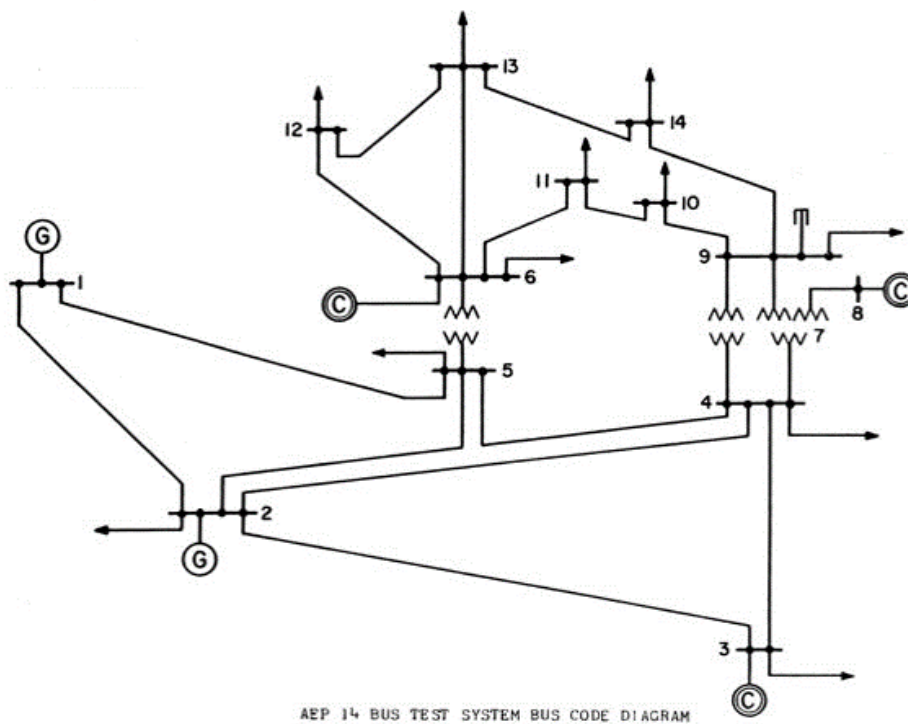


Figura A-1: Esquema unifilar de la red mallada de ensayo en el estudio de parámetros

Los datos correspondientes se muestran en las tablas A-1 y A-2:

<i>Nudos</i>	<i>Nivel de tensión (kV)</i>
1	132
2	132
3	132
4	132
5	132
6	33
7	1
8	33
9	33
10	33
11	33
12	33
13	33
14	33

*Tabla A-1: Niveles de tensión de los nudos de la red mallada de 14 nudos*

<i>Parámetros eléctricos</i>				
<i>Nudo origen</i>	<i>Nudo final</i>	<i>Resistencia serie</i>	<i>Reactancia serie</i>	<i>Susceptancia paralelo</i>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0.05379</b>	<b>0.18988</b>	<b>0.03667</b>
1	5	0.05403	0.22304	0.04920
2	3	0.04699	0.19797	0.04380
2	4	0.05811	0.17632	0.03740
2	5	0.05696	0.17388	0.03400
3	4	0.06701	0.17103	0.03460
4	5	0.01335	0.04211	0.01280
4	7	0.00000	0.20912	0.00000
4	9	0.00000	0.55618	0.00000
<b>5</b>	<b>6</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.25202</b>	<b>0.00000</b>
6	11	0.09498	0.19890	0.00000
6	12	0.12291	0.25581	0.00000
6	13	0.06615	0.13027	0.00000
7	8	0.00000	0.17615	0.00000
7	9	0.00000	0.11001	0.00000
9	10	0.03181	0.08450	0.00000
9	14	0.12711	0.27038	0.00000
10	11	0.08205	0.19207	0.00000
12	13	0.22092	0.19988	0.00000
13	14	0.17093	0.34802	0.00000

*Tabla A-2: Valores de los parámetros eléctricos en la red mallada de 14 nudos*

- **Red radial de 6 nudos:**

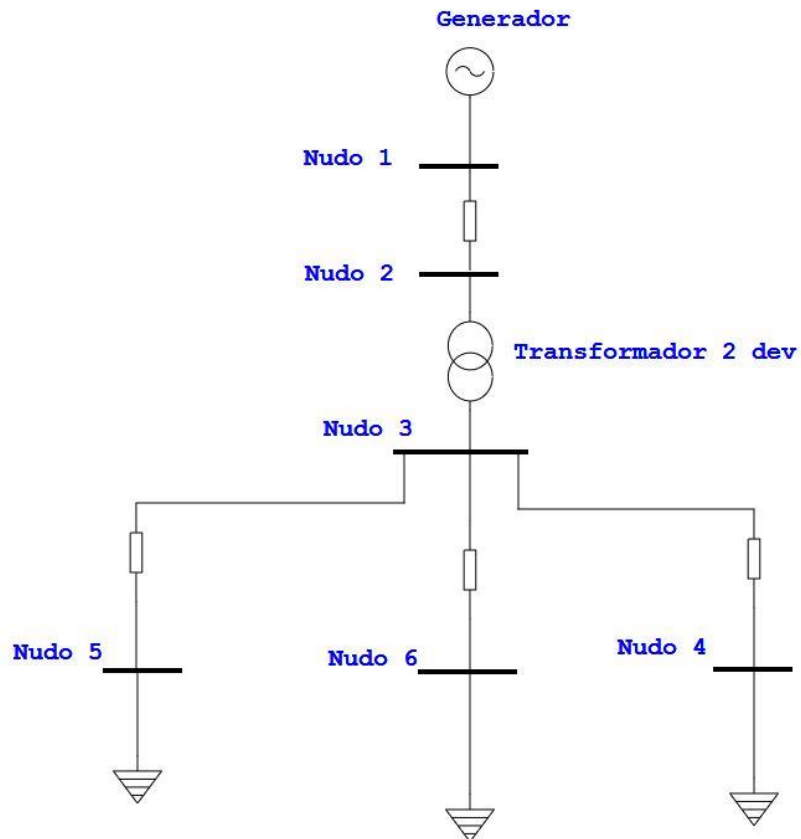


Figura A-2: Esquema unifilar de la red radial de ensayo en el estudio de parámetros

Los datos correspondientes se muestran en las tablas A-3 y A-4:

<i>Nudos</i>	<i>Nivel de tensión (kV)</i>
1	132
2	132
3	33
4	33
5	33
6	33

Tabla A-3: Niveles de tensión de los nudos de la red radial de 6 nudos



<i>Parámetros eléctricos</i>				
<i>Nudo origen</i>	<i>Nudo final</i>	<i>Resistencia serie</i>	<i>Reactancia serie</i>	<i>Susceptancia paralelo</i>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0.05379</b>	<b>0.18988</b>	<b>0.03667</b>
<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.25202</b>	<b>0.00000</b>
3	4	0.09498	0.19890	0.00000
3	5	0.12291	0.25581	0.00000
3	6	0.06615	0.13027	0.00000

*Tabla A-4: Valores de los parámetros eléctricos en la red radial de 6 nudos*



## REFERENCIAS

---

- [1] Pedro Javier Zarco Perrián, Antonio Gómez Expósito, «Estimación de estado en redes eléctricas» 1999.
- [2] Antonio Gómez Expósito, Ali Abur «Estimación de estado», pp 195-237



## GLOSARIO

---

<b>Varianza:</b> es una medida de cómo esta dispersa la variable aleatoria.	1
<b>Covarianza:</b> Relación existente entre dos variables aleatorias.	1
<b>Árbol:</b> Parte de un grafo formado por ramas que contengan todos los nudos sin que se formen lazos	27