

Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Sistemas de Energía
Eléctrica

Mejoras en la Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia al Incorporar la Rama de Magnetización de Transformadores

Autor: Fernando Pérez Ramírez

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Sistemas de Energía Eléctrica

Mejoras en la Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia al Incorporar la Rama de Magnetización de Transformadores

Autor:

Fernando Pérez Ramírez

Tutor:

Antonio de la Villa Jaén

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Máster: Mejoras en la Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia al
Incorporar la Rama de Magnetización de Transformadores

Autor: Fernando Pérez Ramírez

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, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional y esfuerzo en todo momento. Sin ellos no me habría sido posible estudiar en Sevilla ni alcanzar mis objetivos como estudiante de ingeniería.

Agradecer a esa persona tan especial que siempre está ahí apoyándome, por muy lejos que esté siempre podré contar con ella. Siempre serás la mejor parte de mí.

Finalmente, a mi tutor del trabajo de fin de máster por su ayuda, dedicación y atención durante la realización del mismo.

Fernando Pérez Ramírez

Estudiante de Máster

Sevilla, 2019

Resumen

En el presente documento se recogen ensayos realizados en Matlab acerca de cómo afecta no considerar la rama de magnetización en transformadores de potencia en la estimación de estado en sistemas eléctricos. Para tal fin, se parte de un algoritmo que realiza la estimación de estado, basado en mínimos cuadrados, el cual permite incorporar los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético (R_{fe}) y reactancia de magnetización (X_{μ}) en aquellas ramas que sean transformadores. Sobre este algoritmo se realizarán modificaciones que permitan al estimador analizar el efecto de no considerar la rama de magnetización partiendo de medidas reales, las cuales sí tienen en cuenta las pérdidas en dicha rama.

El algoritmo resultante permite realizar la estimación de estado en la situación en la cual lo llevan a cabo las empresas de distribución de energía eléctrica actualmente: mediante un esquema de la red donde se no incluyen la resistencia ni la reactancia de la rama de magnetización de los transformadores, y con las medidas de la red tal y como se encuentren en la situación de explotación correspondiente. Por ello se toman las medidas obtenidas para el sistema afectado por las pérdidas en la rama magnetizante de los transformadores.

Por otro lado, se llevarán a cabo una serie de ensayos para determinar en qué casos la estimación de estado actual es más susceptible de discrepar, en cuanto a valores de los residuos normalizados se refiere, respecto a una estimación de estado que considera el efecto de la rama de magnetización en los transformadores del sistema.

También se recomendará unos valores para la resistencia del núcleo ferromagnético y para la reactancia de magnetización de los transformadores, según su potencia nominal y relación de transformación.

Finalmente, se analizará el efecto que tendría la rama de magnetización para detectar pérdidas no técnicas mediante la estimación de estado.

Objetivos

Con el presente trabajo de investigación se persigue:

- ❖ Crear un algoritmo que permita realizar la estimación de estado sin la rama de magnetización de los transformadores de la red y las medidas correspondientes para un sistema que sí tenga en cuenta las pérdidas que se producen en dicha rama. Se parte de un algoritmo de estimación de estado que permite incorporar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red.
- ❖ Llevar a cabo una serie de verificaciones que permitan determinar que el algoritmo funciona correctamente y que los valores obtenidos son correctos.
- ❖ Realizar un estudio cualitativo que, empleando el algoritmo anterior, evalúe el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en la estimación de estado y qué factores pueden afectar en mayor medida a una diferencia significativa en la obtención del estado estimado del sistema.
- ❖ Aproximar unos valores para la rama de magnetización de los transformadores según potencia y relación de transformación.
- ❖ Estudiar el efecto que tiene no considerar la rama de magnetización en el proceso de estimación de estado para detectar pérdidas no técnicas.

La finalidad del trabajo es analizar una situación lo más realista de posible de la estimación de estado que llevan a cabo las empresas de distribución de energía eléctrica, empleando un esquema de la red que no considera las pérdidas ocasionadas por la rama de magnetización de los transformadores de potencia, con respecto a una situación lo más próxima posible a lo que ocurre realmente. Es decir, las medidas tomadas por los elementos de medición considerando el efecto de dicha rama.

Alcance

El alcance del trabajo se limita a la elaboración de un algoritmo que permita evaluar el efecto de no considerar las pérdidas que se producen en la rama de magnetización de los transformadores de potencia en la estimación de estado. Además de investigar qué factores dan lugar a una diferencia significativa de los residuos normalizados con respecto a la estimación de estado que sí tuviera en cuenta dichas pérdidas.

Se supondrá en todo momento que se dispone de medidas de flujo de potencia activa y reactiva en ambos extremos de las líneas, si se tratan de redes de media tensión. Mientras que, si las líneas son de baja tensión, se dispondrá de menor redundancia en las medidas de flujo de potencia de la línea.

En este proyecto se analizará cualitativamente el efecto de no considerar la rama de magnetización utilizando el estimador de estado para generar pérdidas no técnicas en redes de baja tensión. Queda fuera del alcance del proyecto considerar ruido en las medidas durante el análisis de los ensayos.

Dado el carácter práctico del trabajo, todas las redes analizadas son reales, con un estado de carga real, dejando fuera de análisis aquellas redes de carácter didáctico que no reflejen la realidad de los sistemas eléctricos.

El proyecto analizará el efecto que tiene la rama de magnetización en centros de transformación de baja tensión, quedando fuera del alcance del proyecto analizar en detalle la red de distribución a nivel de las viviendas de usuarios. Dichas viviendas se agruparán en núcleos de consumo.

Se encuentra fuera del alcance del proyecto optimizar el algoritmo para que emplee el menor tiempo posible en llevar a cabo la estimación de estado, ya que las redes a analizar no son de gran dimensión. De igual forma, los valores de los parámetros de las líneas y de los transformadores también serán reales en cuanto a escala y orden de magnitud se refiere.

Como aspecto más práctico y actual, se plantea, además, comprobar el efecto que tiene la detección de pérdidas no técnicas mediante el estimador de estado cuando se consideran o no la rama de magnetización de los transformadores.

Agradecimientos	vii
Resumen	viii
Objetivos	ix
Alcance	x
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Ilustraciones	xvi
Notación	xvii
1 Estado del Arte	18
2 Análisis Previo	21
2.1. <i>Transformadores de Alta-Media Tensión</i>	22
2.1.1 Transformador de 220/132 kV y Potencia Nominal 120 MVA	22
2.1.2 Transformador de 220/66 kV y 75 MVA	24
2.2. <i>Transformadores de Media Tensión</i>	25
2.2.1 Transformador de Media Tensión de 132/20 kV y 40 MVA	25
2.2.2 Transformador de Media Tensión de 66/20 kV y 20 MVA	26
2.3. <i>Transformadores de Media-Baja Tensión con Bajo Nivel de Reactiva</i>	27
2.3.1 Transformador de 20/0.42 kV y Potencia Nominal 0.63 MVA	27
2.3.2 Transformador de 20/0,4 kV y Potencia Nominal 2.5 MVA	29
2.4. <i>Transformadores de Media-Baja Tensión con Mayor Nivel de Reactiva</i>	30
2.4.1 Transformador de 20/0.42 kV y Potencia Nominal 0.63 MVA	30
2.4.2 Transformador de 20/0.4 kV y Potencia Nominal 2.5 MVA	31
2.5. <i>Transformador en Vacío</i>	33
2.6. <i>Conclusiones Previas</i>	35
3 Algoritmo	37
3.1. <i>Función 'Eliminar_rama_mag'</i>	38
3.2. <i>Función 'Eliminar_fase'</i>	40
3.3. <i>Función 'RC'</i>	40
3.4. <i>Explicación y Secuencia de los Pasos del Algoritmo</i>	42
4 Validación del Algoritmo	43
5 Ensayos	45
5.1. <i>Efecto del Nivel de Tensión</i>	46
5.1.1 Redes de Alta-Media Tensión	46
5.1.2 Redes de Media Tensión	48
5.1.3 Redes de Baja Tensión	50
5.2. <i>Efecto del Nivel de Carga</i>	53
5.2.1 Redes de Alta-Media Tensión	53
5.2.2 Redes de Media Tensión	56
5.2.3 Redes de Baja Tensión	60

5.3.	<i>Efecto del Valor de Tensión</i>	64
5.3.1	Redes de Alta-Media Tensión	64
5.3.2	Redes de Media Tensión	65
5.3.3	Redes de Baja Tensión	68
5.4.	<i>Efecto del Valor de los Parámetros de la Rama de Magnetización</i>	69
5.4.1	Redes de Alta-media Tensión	69
5.4.2	Redes de Media Tensión	73
5.4.3	Redes de Baja Tensión	81
5.5.	<i>Efecto del Nivel de Potencia Reactiva en Redes de Media y Baja Tensión</i>	84
5.5.1	Redes de Media Tensión	84
5.5.2	Redes de Baja Tensión	87
5.6.	<i>Efecto de la Calidad de los Instrumentos de Medida</i>	89
5.6.1	Redes de Alta-Media Tensión	89
5.6.2	Redes de Media Tensión	91
5.6.3	Redes de Baja Tensión	94
5.7.	<i>Ensayos en Situaciones Desfavorables en Baja Tensión</i>	95
5.8.	<i>Efecto de la Generación Distribuida</i>	96
5.8.1	Descarga Puntual de Transformadores	97
5.8.2	Red sin Generación Distribuida	100
6	Conclusiones de los Ensayos	102
7	¿Cuándo es Conveniente que el Estimador de Estado Considere las Pérdidas en la Rama de Magnetización?	105
8	Recomendación de Valores para la Rama de Magnetización	106
8.1.	<i>Modificación del Algoritmo</i>	107
8.2.	<i>Red con Generación Distribuida</i>	108
8.3.	<i>Red1_BT_Sevilla</i>	111
9	Influencia en la Detección de Pérdidas No Técnicas	115
9.1.	<i>Identificación de Pérdidas no Técnicas en la Red con Generación Distribuida</i>	116
9.2.	<i>Identificación de Pérdidas no Técnicas en Redes de Baja Tensión</i>	120
10	Conclusiones sobre la Detección de Pérdidas No Técnicas	124
11	Conclusiones Finales y Futuras Líneas de Investigación	125
	Bibliografía	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: RN del transformador de 220/132 kV y $S_n=120$ MVA según el estado de carga.	23
Tabla 2: RN del transformador de 220/66 kV y $S_n=75$ MVA según el estado de carga.	25
Tabla 3: RN del transformador de 132/20 kV y $S_n=40$ MVA según el estado de carga.	26
Tabla 4: RN del transformador de 66/20 kV y $S_n=20$ MVA según el estado de carga.	26
Tabla 5: Potencia base y carga del sistema del transformador de 20/0.42 kV.	28
Tabla 6: RN del transformador de 20/0.42 kV y $S_n=0.63$ MVA según el estado de carga.	28
Tabla 7: Potencia base y carga del sistema del transformador de 20/0.42 kV.	29
Tabla 8: RN del transformador de 20/0.4 kV y $S_n=2.5$ MVA según el estado de carga.	29
Tabla 9: Potencia base y carga del sistema del transformador de 20/0.42 kV.	30
Tabla 10: RN del transformador de 20/0.42 kV y $S_n=0.63$ MVA según el estado de carga.	31
Tabla 11: RN del transformador de 20/0.4 kV y $S_n=2.5$ MVA según el estado de carga.	32
Tabla 12: RN del transformador de 20/0.4 kV y $S_n=2.5$ MVA según el estado de carga.	32
Tabla 13: RN para dos transformadores en vacío de alta y baja tensión.	34
Tabla 14: RN de la red IEEE14 a distinta potencia base.	44
Tabla 15: RN de las redes IEEE14, IEEE24 y Kundur.	48
Tabla 16: RN de las redes Red de transformadores MT_BT y Red MT con Generación Distribuida.	50
Tabla 17: RN Red1_BT_Sevilla y Red2_BT_Sevilla.	52
Tabla 18: RN de la red IEEE14 según nivel de carga.	54
Tabla 19: RN de la red IEEE24 según nivel de carga.	55
Tabla 20: RN de la red Kundur según nivel de carga.	56
Tabla 21: RN de una red MT-BT según niveles de carga.	57
Tabla 22: RN de la red MT Generación Distribuida según niveles de carga.	59
Tabla 23: RN de la red Red1_BT_Sevilla según niveles de carga.	61
Tabla 24: RN de la red Red2_BT_Sevilla según niveles de carga.	63
Tabla 25: RN de la red IEEE14 según valores de tensión de los nudos.	65
Tabla 26: RN de la red Red de Transformadores MT_BT según valores de tensión de los nudos.	66
Tabla 27: RN de la red Red con Generación Distribuida según valores de tensión de los nudos.	67
Tabla 28: RN de la red Red1_BT_Sevilla según valores de tensión de los nudos.	68
Tabla 29: RN de la red IEEE14 cuando se modifica R_{fe} y X_m .	70
Tabla 30: RN de la red IEEE14 cuando se modifica R_{fe} .	71
Tabla 31: RN de la red IEEE14 cuando se modifica X_m .	71
Tabla 32: Influencia de R_{fe} o X_m en la red IEEE14.	72
Tabla 33: RN de la red de Transformadores MT-BT cuando se modifica R_{fe} y X_m .	73
Tabla 34: RN de la red de Transformadores MT-BT cuando se modifica R_{fe} .	75
Tabla 35: RN de la red de Transformadores MT-BT cuando se modifica X_m .	75

Tabla 36: Influencia de R_{fe} o X_m en la red de Transformadores MT-BT.	76
Tabla 37: RN de la red de Generación Distribuida MT cuando se modifica R_{fe} y X_m .	77
Tabla 38: RN de la red Red de Generación Distribuida MT cuando se modifica R_{fe} .	79
Tabla 39: RN de la red Red de Generación Distribuida MT cuando se modifica X_m .	79
Tabla 40: Influencia de R_{fe} o X_m en la red Red de Generación Distribuida MT.	80
Tabla 41: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando se modifica R_{fe} y X_m .	81
Tabla 42: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando se modifica R_{fe} .	82
Tabla 43: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando se modifica X_m .	82
Tabla 44: Influencia de R_{fe} o X_m en la red Red1_BT_Sevilla.	83
Tabla 45: RN de Red de Transformadores MT_BT según varía el factor de potencia.	85
Tabla 46: RN de Red con Generación Distribuida MT según varía el factor de potencia.	86
Tabla 47: RN de Red1_BT_Sevilla según el factor de potencia.	88
Tabla 48: RN de Red2_BT_Sevilla según el factor de potencia.	88
Tabla 49: RN de la red IEEE14 según el valor de la desviación típica.	90
Tabla 50: RN de la red IEEE14 para un 10% del nivel de carga y desviación típica 2% del valor medido.	91
Tabla 51: RN de la red de Transformadores MT_BT según el valor de la desviación típica.	92
Tabla 52: RN de la red con Generación Distribuida según el valor de la desviación típica.	93
Tabla 53: RN de la red 'Red1_BT_Sevilla' según el valor de la desviación típica.	94
Tabla 54: RN escenario desfavorable.	95
Tabla 55: Nivel de carga de los transformadores al 20% y RN de la red con Generación Distribuida.	98
Tabla 56: Nivel de carga de los transformadores al 15% y RN de la red con Generación Distribuida.	98
Tabla 57: RN de la red con Generación Distribuida cuando sólo el transformador 23-10 se encuentra al 10% de carga.	99
Tabla 58: RN con y sin generación distribuida.	100
Tabla 59: RN de la red de Generación Distribuida sin rama de magnetización y aproximándola para un nivel de carga normal.	109
Tabla 60: RN de la red de Generación Distribuida sin rama de magnetización y aproximándola para un nivel de carga bajo.	109
Tabla 61: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red con Generación Distribuida para un nivel de carga bajo 1.	110
Tabla 62: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red con Generación Distribuida para un nivel de carga bajo 2.	111
Tabla 63: RN de la red Red1 Sevilla_BT sin rama de magnetización y aproximándola para un nivel de carga normal.	112
Tabla 64: RN de la red Red1_BT_Sevilla de magnetización y aproximándola para un nivel de carga bajo.	112
Tabla 65: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red Red1_BT_Sevilla para un nivel de carga bajo 1.	113
Tabla 66: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red Red1_BT_Sevilla para un nivel de carga bajo 2.	113
Tabla 67: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es normal.	116

Tabla 68: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existe bajo nivel pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es normal.	117
Tabla 69: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es bajo.	118
Tabla 70: RN de la Red con Generación Distribuida cuando no existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es bajo.	119
Tabla 71: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es normal.	120
Tabla 72: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando no existen pérdidas no técnicas.	121
Tabla 73: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es bajo.	122

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Entradas y salidas de un estimador de estado.	18
Ilustración 2: Modelo exacto de un transformador referido al devanado primario.	19
Ilustración 3: Modelo equivalente aproximado de un transformador referido al devanado primario.	20
Ilustración 4: Rama simple de un transformador.	21
Ilustración 5: Esquema del Transformador 220/132 kV y 120 MVA.	23
Ilustración 6: Red de un transformador de baja tensión.	27
Ilustración 7: Diagrama de bloques del algoritmo.	37
Ilustración 8: Matriz de impedancia y leyenda de los términos.	38
Ilustración 9: Modelo del transformador con las diferentes posiciones de la rama de magnetización.	39
Ilustración 10: Modificación de los valores de desviación típica según la nueva potencia base.	41
Ilustración 11: Red IEEE14.	43
Ilustración 12: Criterio de relevancia de los RN en Estimación de Estado.	45
Ilustración 13: Red IEEE24.	47
Ilustración 14: Red Kundur.	47
Ilustración 15: Red de transformadores MT_BT.	49
Ilustración 16: Red MT Generación Distribuida.	49
Ilustración 17: Red1_BT_Sevilla.	51
Ilustración 18: Red2_BT_Sevilla.	51
Ilustración 19: Distribución del RN max según el nivel de carga de la red MT-BT.	58
Ilustración 20: Distribución del RN máx. según el nivel de carga de la red MT Generación Distribuida.	60
Ilustración 21: Distribución del RN máx. según el nivel de carga de la red Red1_BT_Sevilla.	62
Ilustración 22: Distribución del RN máx. según el nivel de carga de la red Red2_BT_Sevilla.	63
Ilustración 23: N° de medidas con un valor de RN en Red de Transformadores MT_BT según R_{fe} y X_m .	74
Ilustración 24: N° de medidas con un valor de RN en Red de Generación Distribuida MT según R_{fe} y X_m .	78
Ilustración 25: N° de medidas con un valor de RN en Red1_BT_Sevilla según R_{fe} y X_m .	81
Ilustración 26: N° de medidas con un valor de RN en Red de Transformadores MT_BT según el factor de potencia.	85
Ilustración 27: N° de medidas con un valor de RN en Red con Generación Distribuida MT según el factor de potencia.	87
Ilustración 28: N° de medidas con un valor de RN en el escenario realista.	96
Ilustración 29: Generadores modificados en la red de Generación Distribuida.	97
Ilustración 30: N° de medidas con un valor de RN para la red de Generación Distribuida activa y pasivada.	101
Ilustración 31: Valores de R_{fe} y X_m para transformadores de alta y media tensión según la potencia nominal.	106
Ilustración 32: Valores de R_{fe} y X_m para transformadores de baja tensión según la potencia nominal.	107
Ilustración 33: Diagrama de bloques del algoritmo que generada rama magnetización aproximada.	107

Notación

kV	Kilovoltio
P_i	Potencia activa inyectada o consumida en el nudo i
Q_i	Potencia reactiva inyectada o consumida en el nudo i
P_{ij}	Flujo de potencia activa entre los nudos i y j
Q_{ij}	Flujo de potencia reactiva entre los nudos i y j
S_n	Potencia nominal
S_b	Potencia base
RN	Residuos normalizados
V_i	Tensión del nudo i
Θ_i	Fase del nudo i
MW	Megavatio
Mvar	Megavar
MVA	Mega Voltio Amperio
kW	Kilovatio
kvar	Kilovar
kVA	Kilo Voltio Amperio
R_{fe}	Resistencia del núcleo ferromagnético de un transformador
X_m	Reactancia de magnetización de un transformador
Ohm	Ohmios
\geq	Mayor o igual
\leq	Menor o igual
=	Igual
σ	Desviación típica
R_1	Resistencia del devanado primario del transformador
X_1	Reactancia del devanado primario del transformador
R'_2	Resistencia del devanado secundario referido al primario del transformador
X'_2	Reactancia del devanado secundario referido al primario del transformador
R_{cc}	Resistencia de cortocircuito de un transformado.
X_{cc}	Reactancia de cortocircuito de un transformador
Z_{cc}	Impedancia de cortocircuito de un transformador
pu	Por unidad

1 ESTADO DEL ARTE

El estimador de estado es una herramienta utilizada por los centros de control de energía eléctrica para realizar una reconstrucción, en tiempo real, del modelo eléctrico del sistema a partir de la redundancia de medidas. Esto permite determinar un estado de operación con mayor precisión que los que se obtienen a partir de las medidas proporcionadas por los instrumentos destinados para tal fin. La importancia dada a la estimación del estado de los sistemas eléctricos ha creado la necesidad de nuevas metodologías de análisis que mejoren la confiabilidad y precisión.

La estimación de estado realiza un análisis matemático del sistema basándose en datos recolectados por medidores e información sobre los parámetros de los modelos de los componentes de la red. Esta recolección de información implica el análisis de mediciones muy grandes en la corriente y tensión, modelado de redes externas y detección errores en las mediciones de los parámetros que describen el estado de la red. Estos últimos se conocen con el nombre de errores grandes en los cuales, una función debe detectar las mediciones erróneas y eliminarlas o sustituirlas. Generalmente estos errores son causados por pérdida de comunicación con medidores o introducción de ruido en la medida, por mala calibración o por defectos en los equipos.

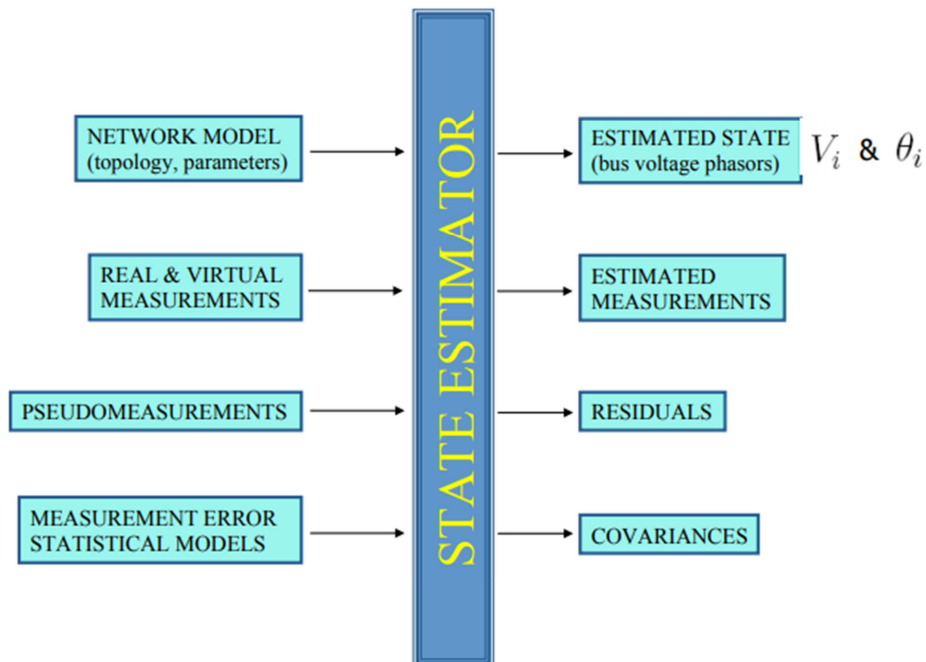


Ilustración 1: Entradas y salidas de un estimador de estado.

Como entradas del estimador de estado se requieren:

- Un modelo de la topología de la red que incluya parámetros y longitudes de las líneas. En este esquema de la red, los transformadores de potencias se definen a partir de su impedancia de cortocircuito.

- Un conjunto de medidas proporcionadas por los elementos de medición instalados en el sistema (medidas reales) y medidas de valor nulo (medidas virtuales), como pueden ser inyecciones de potencia activa y reactiva en un nodo de transición.
- Un conjunto de medidas de carácter histórico, que se introducen por falta de las primeras (pseudomedidas).
- Un modelo estadístico de la distribución de los errores de las medidas.

Tras aplicar el algoritmo de estimación de estado se obtiene:

- El estado estimado, es decir, V y Θ de cada nodo.
- Medidas estimadas para el estado correspondiente.
- Residuos de las medidas: diferencia entre las medidas reales y medidas estimadas.
- La covarianza de las medidas o la desviación típica.

Las medidas reales, que son tomadas por los elementos de medición instalados en las líneas y enviadas a los centros de control correspondientes, miden en qué estado se encuentran las líneas en unas condiciones de carga determinadas. De igual forma se procede con los transformadores de potencia.

Sin embargo, un transformador no se define exclusivamente por su impedancia serie, si no también, a partir de la resistencia y reactancia de la rama de magnetización del mismo, conocidas como resistencia del núcleo ferromagnético (R_{Fe}) y reactancia de magnetización (X_{μ}). Por tanto, un transformador se representa a partir del modelo exacto referido al devanado primario que se muestra en la *Ilustración 2*:

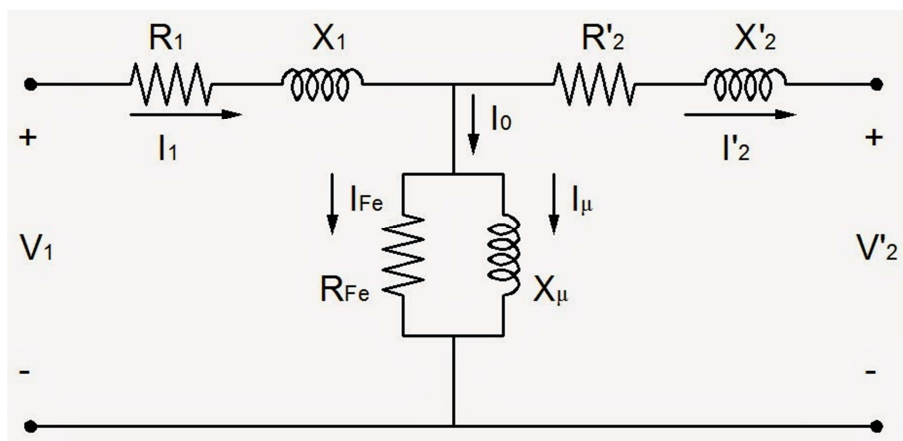


Ilustración 2: Modelo exacto de un transformador referido al devanado primario.

Este modelo puede simplificarse colocando la rama de magnetización a la izquierda, permitiendo combinar ambas resistencias y reactancias de los devanados primario y secundario, ya que la intensidad que circula por la rama de magnetización es muy pequeña en comparación con la que circula por los devanados. Este modelo equivalente aproximado da lugar a resultados aceptables, por lo que en muchos estudios se considera este modelo equivalente en vez del exacto. Ver *Ilustración 3*.

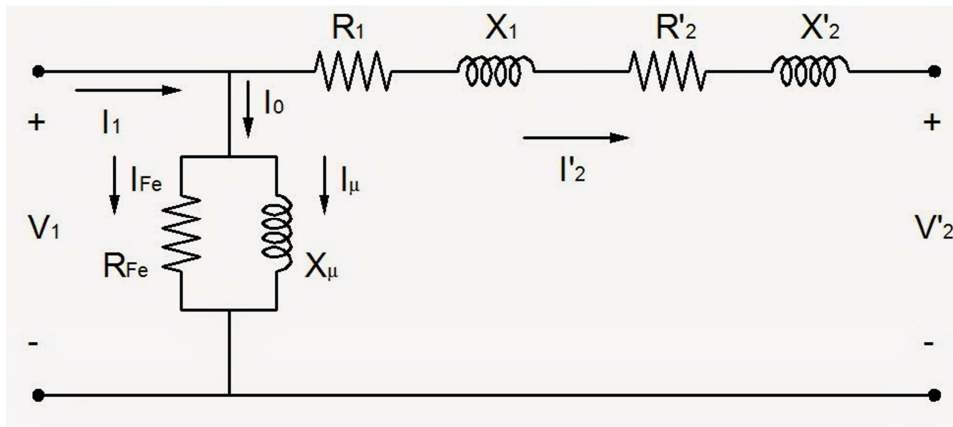


Ilustración 3: Modelo equivalente aproximado de un transformador referido al devanado primario.

Los estimadores de estado actuales sólo consideran la impedancia series (Z_{cc}) para definir un transformador en el modelo topológico de la red. No obstante, las medidas tomadas por los instrumentos de medición toman los valores bajo el efecto de la rama de magnetización que está presente en los transformadores. Es decir, parte de la potencia que entre en un transformador se pierde en la rama de magnetización, lo cual no se tiene en cuenta con el modelo topológico actual.

Nota: $Z_{cc} = R_{cc} + X_{cc}$

siendo $R_{cc} = R_1 + R'_2$ y $X_{cc} = X_1 + X'_2$

Por tanto, con este trabajo se pretende analizar el efecto que tiene no considerar la rama de magnetización en transformadores de potencia en la estimación de estado con respecto a la misma estimación si se considerara dicha rama.

2 ANÁLISIS PREVIO

En este apartado se pretende comprobar cómo afecta a los residuos normalizados (RN), obtenidos en la estimación de estado, no tener en cuenta los valores de la rama de magnetización de los transformadores considerando que las medidas disponibles sí consideran el efecto de las pérdidas en esta rama, tal y como hacen los instrumentos de medición en la realidad. Para poder analizar con mayor criterio este efecto, se considera que las medidas disponibles son exactas, sin incorporar ruido.

Cabe mencionar que la forma en la que se obtienen las medidas exactas es a partir de un reparto de cargas, para el cual se requiere el modelo topológico de la red y un conjunto de inyecciones de potencia activa y reactiva en los nudos del sistema, además de una tensión y una fase en el nudo de referencia (Slack). La red empleada para obtener las medidas exactas tiene en cuenta los valores de la resistencia y reactancia de la rama de magnetización.

Una vez obtenido el conjunto completo de medidas reales, se realiza una estimación de estado con estas medidas y la misma red sin los parámetros de la rama de magnetización, es decir, valores nulos. De esta forma se evaluará el efecto de no considerar dicha rama en el modelo topológico.

Por otro lado, para dotar al análisis de una mayor simplicidad, se analizará el efecto sobre una sola rama, la cual será un transformador, tal y como se muestra en la *Ilustración 4*.

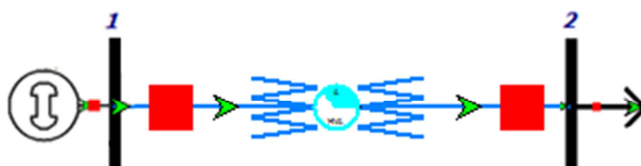


Ilustración 4: Rama simple de un transformador.

Para analizar el efecto de la rama de magnetización se tendrán en consideración transformadores tanto de alta-media tensión como de media-baja. Además, dentro de esta clasificación se discrimina según la potencia del transformador.

Esta diferenciación según niveles de tensión se debe, a priori, a la diferencia, en cuanto al orden de magnitud se refiere, de los parámetros de la rama de magnetización de transformadores de alta-media tensión con respecto a los de media-baja.

Un aspecto importante a tener en cuenta en el momento del fichero de red y de medidas mínimas necesarias

para realizar el reparto de carga es determinar cuál es la potencia base (S_b). Esto se debe a que al elegir una u otra da lugar a errores numéricos en el algoritmo de estimación debido al diferente orden de magnitud que pueden tener unos valores de los parámetros de la red y transformadores al transformarse de unidades ingenieriles al sistema en por unidad (pu).

Por tanto, el criterio a seguir es tomar una potencia base cuyo orden de magnitud sea acorde al valor de la potencia del transformador y el orden de magnitud de las cargas. En caso de que estos valores sean diferentes en cuanto a orden de magnitud, se tomará el orden de magnitud de aquella potencia de mayor valor.

Por ejemplo, si la potencia del transformador es de 1 MVA y el orden de las cargas es de 100 kVA, se tomará como potencia base 1 MVA. De esta forma se minimizan los errores numéricos, permitiéndose así, que el algoritmo converja.

Otro aspecto a considerar durante los ensayos es el valor que toma la desviación típica, siendo esta un 3% del valor medido para flujo de potencia activa y reactiva, para los valores de tensión tiene un valor de 0.0053 y para las medidas de inyección de potencia activa y reactiva disponen valores de 0.0194 y 0.0147 respectivamente.

2.1. Transformadores de Alta-Media Tensión

En este primer apartado se realizarán ensayos, tal y como se comentó en el apartado previo, sobre transformadores en alta-media tensión.

2.1.1 Transformador de 220/132 kV y Potencia Nominal 120 MVA

En este primer ensayo, se realiza una estimación de estado de la red de la *Ilustración 5*, donde se analiza el efecto de no considerar la rama de magnetización del transformador cuando se encuentra sometido a un estado de carga alto, con el transformador a un 85% de su potencia nominal, y un estado de carga bajo, el cual se define como un 10% del estado de carga alto.

Teniendo en cuenta el criterio descrito en el apartado anterior, la potencia base se toma igual a 100 MVA, ya que tanto la potencia del transformador como la de las cargas coinciden en orden de magnitud.

Las medidas empleadas en la estimación de estado son las tensiones y fases de los nudos, inyecciones de potencia activa y reactiva en los mismos y medidas de flujos de potencia en ambos extremos de la línea. Todas ellas con su correspondiente valor asignado de desviación típica.

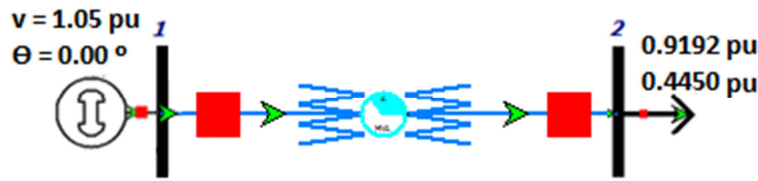


Ilustración 5: Esquema del Transformador 220/132 kV y 120 MVA.

Nota: La carga se encuentra definida en pu, por lo que, en función de la potencia base, la cual coincide en estos ensayos con la del transformador, tendrá un valor u otro, pero se asegura que el nivel de carga del transformador es el mismo.

Tras realizar el ensayo de la red de la *Ilustración 5* tal y como se explicó en el apartado previo, se obtuvieron los resultados mostrados en la *Tabla 1*:

Tabla 1: RN del transformador de 220/132 kV y Sn=120 MVA según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
Q1	0,0	Q1	0,6
Q1-2	0,0	Q1-2	0,6
Q2	0,0	Q2	0,5
Q2-1	0,0	Q2-1	0,5
P2	0,0	P2	0,1

La *Tabla 1* muestra los residuos normalizados de mayor valor cuando el estimador de estado no considera la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico del sistema. Las dos columnas de la izquierda representan las medidas y sus residuos normalizados cuando el transformador se encuentra sometido a un estado de carga elevado (el que se muestra en la *Ilustración 5*), mientras que, las columnas de la derecha, las medidas y residuos cuando esta red se encuentra sometida a un estado de carga un 10% de dicho estado de explotación.

El estimador de estado permite determinar qué medidas proporcionadas por los instrumentos de medición distan de la que estima dicha herramienta, asociando un residuo normalizado a cada una de las medidas. En caso de que las medidas sean exactas, el estimador asocia residuos normalizados nulos, suponiendo que no se tiene en cuenta el ruido en las medidas. Sin embargo, cuanto mayor es la diferencia entre una medida y el valor estimado, mayor es el residuo normalizado asociado.

Suponiendo que los errores de las medidas siguen una distribución Normal de media cero y desviación típica unidad, $N(0,1)$, una medida cuyo residuo normalizado sea mayor o igual a tres veces la desviación típica ($RN \geq 3$), implica que dicha medida es errónea.

Puede ocurrir que el valor del residuo normalizado asociado a una determinada medida se encuentre por

debajo de dicho límite, lo cual implicaría que la medida no es errónea. En los ensayos a realizar durante todo el estudio, se emplean medidas exactas, ya que provienen de un reparto de cargas. Por tanto, se establece que obtener medidas con residuos normalizados igual o superiores a la unidad introduce un elevado grado de contaminación en el estado estimado.

Tal y como puede apreciarse en la *Tabla 1*, el efecto de no considerar dicha rama es despreciable si el estado de carga es elevado, ya que el valor de los residuos normalizados es próximo a cero, es decir, el estado estimado sin considerar la rama de magnetización es muy próximo al real, que sí considera dicha rama. Por tanto, no existen diferencias significativas entre considerar o no las pérdidas que se producen en la rama de magnetización del transformador.

No obstante, cuando el transformador se encuentra sometido a un estado de explotación descargado, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama magnetizante empieza a ser más significativo, aunque continúa estando por debajo del umbral de medida errónea, es decir, las medidas presentan residuos normalizados por debajo de 3 veces la desviación típica (siendo en este caso igual a 1).

Se observa, además, en esta última situación que, los residuos normalizados más elevados oscilan entre 0.5 y 0.6, introduciendo cierto grado de contaminación en el estado estimado. Dado que éstos no son iguales o superiores a la unidad, se considera que dicho nivel de contaminación no es elevado y, por tanto, el efecto de no considerar la rama de magnetización no tiene un efecto relevante en la estimación de estado.

Nota: Los valores de los residuos normalizados representados en las tablas sólo presentan una cifra decimal significativa.

2.1.2 Transformador de 220/66 kV y 75 MVA

A continuación, se ensaya un transformador potencia nominal $S_n = 75$ MVA del mismo y los niveles de tensión de los nudos. La relación de transformación es de 220/66 kV.

Emplear un transformador diferente, implica que los valores de R_{fe} y X_{μ} varían. El valor de estos parámetros y el impacto que estos tienen sobre el valor de los residuos normalizados se tendrá en cuenta en apartados posteriores.

Por tanto, tras realizar la estimación de estado de este nuevo transformador en la red de la *Ilustración 1*, se obtienen resultados similares que se representan en la *Tabla 2*:

Tabla 2: RN del transformador de 220/66 kV y Sn=75 MVA según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
Q1	0,0	Q1	2,1
Q1-2	0,0	Q1-2	2,1
Q2	0,0	Q2	1,8
Q2-1	0,0	Q2-1	1,8
P2	0,0	P2	0,3

De igual forma que en el ensayo anterior, los resultados obtenidos siguen la misma tendencia (ver *Tabla 2*). Cuando se somete a un estado muy cargado, los residuos normalizados tienen valores no significativos, por tanto no existe diferencia apreciable entre considerar o no la rama de magnetización en el modelo topológico de la red en el estimador.

Además, al igual que en el caso anterior, al realizar la misma estimación con un nivel de carga mucho menor, los residuos normalizados son mayores. En este ensayo, los valores obtenidos son mucho más notables que en el caso anterior, donde no se superaba el valor de 0.6. Ahora, se llegan a máximos de 2.1 que, aún están por debajo del valor límite para considerar las medidas erróneas. No obstante, el grado de contaminación del estado estimado es elevado, ya que, se asignan residuos normalizados elevados a medidas que, a priori, son exactas. Estos valores de residuos normalizados podrían alcanzarse igualmente si se considerase cierto nivel de ruido, suponiendo que no hubiese ninguna otra fuente que generase distorsión de las medidas.

No obstante, en la situación descargada, muchas medidas presentan un valor de los residuos normalizados altos, por lo que se contamina en gran medida los resultados de la estimación de estado. Es decir, el efecto de no considerar la rama de magnetización empieza a ser más significativo.

2.2. Transformadores de Media Tensión

A continuación, se plantea realizar los mismos ensayos que en los apartados anteriores con transformadores de media tensión, es decir, que el valor de tensión de uno de sus devanados sea 20 kV. De igual forma, el criterio de selección de la potencia base del sistema irá acorde a las cargas y la potencia nominal del transformador, ya que una mala elección daría lugar a errores numéricos que impidan la convergencia de la estimación de estado.

2.2.1 Transformador de Media Tensión de 132/20 kV y 40 MVA

En primer lugar, se realiza la estimación de estado del sistema de la *Ilustración 5* para cuantificar el efecto de no considerar la rama de magnetización en un transformador de media tensión de 132/20 kV, potencia nominal de 40 MVA y el nivel de carga del transformador en estado de carga normal es del 63% de su máxima potencia. Por lo que elegir una potencia base de 40 MVA asegura que no haya errores numéricos.

Tras realizar la estimación de estado, se obtienen los residuos normalizados que se muestran en la *Tabla 3*:

Tabla 3: RN del transformador de 132/20 kV y Sn=40 MVA según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
V2	0,1	Q1	2,0
V1	0,1	Q1-2	2,0
P2	0,1	Q2	1,8
P2-1	0,1	Q2-1	1,8
Q1	0,0	P2	0,6

Si se observan los resultados obtenidos en la *Tabla 3*, se aprecia la misma tendencia que en los ensayos anteriores. Los residuos normalizados son prácticamente nulos cuando el estado de cargas es elevado, mientras que si el transformador está sustancialmente más descargado, el efecto de no considerar la rama de magnetización es mucho más relevante. En este último caso, los residuos son algo mayores, llegado al valor de 2.0, aunque no superan el límite de medida errónea (RN=3). No obstante, en la situación descargada, muchas medidas presentan un valor de los residuos normalizados altos, por lo que se contamina en gran medida los resultados de la estimación de estado.

Además, parece ser que no existe ninguna relación en cuanto al nivel de tensión de los transformadores se refiere, y el valor de los residuos normalizados. El hecho de que algunos residuos sean más elevados en algunos transformadores con respecto a otros puede deberse a los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y a la reactancia de magnetización. Este fenómeno se estudiará en apartados posteriores.

2.2.2 Transformador de Media Tensión de 66/20 kV y 20 MVA

Finalmente, se realiza el mismo ensayo de la *Ilustración 5* con un transformador de menores niveles de tensión: 66/20 kV y una potencia nominal de 20 MVA. Igualmente, el nivel de carga del transformador en el estado normal de carga es un 63% de su máxima potencia nominal, por lo que la potencia base elegida para el sistema es de 20 MVA. Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla 4*:

Tabla 4: RN del transformador de 66/20 kV y Sn=20 MVA según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
Q1	0,1	Q1	0,9
Q1-2	0,1	Q1-2	0,9
P2	0,0	Q2	0,9
Q2-1	0,0	Q2-1	0,9
Q2	0,0	P2	0,3

Los resultados reflejan, una vez más que, para un estado de carga alto, no existe diferencia alguna entre el estado estimado considerando o no la rama de magnetización. Por otro lado, cuando el sistema se encuentra descargado, las diferencias son mínimas, ya que se obtienen residuos normalizados de valor máximo igual a 0.9. Dichos residuos, aunque se encuentran por debajo del límite de medida errónea, están próximos a la unidad, lo cual da lugar a que se introduzca cierto grado de contaminación en el estado estimado.

2.3. Transformadores de Media-Baja Tensión con Bajo Nivel de Reactiva

En este apartado, de igual forma que en el *apartado 2.1*, se procede a realizar una serie de ensayos en la que se analiza el efecto de no considerar la rama de magnetización en transformadores de baja tensión. Por simplicidad del análisis, la red a tratar consta de un solo generador conectado a un transformador de baja tensión y una carga, tal y como se aprecia en la *Ilustración 6*:

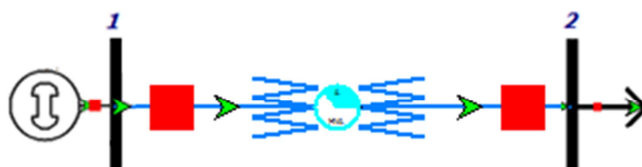


Ilustración 6: Red de un transformador de baja tensión.

La potencia base y la carga a conectar irá determinada en función de cada uno de los transformadores con los que se ensayen. Se define la potencia base del sistema igual a la potencia nominal de cada transformador, y la carga, definida en el sistema por unidad será 0.9 para la potencia activa y 0.1 para la reactiva.

En este tipo de situaciones consideradas, aunque el nivel de carga es alto, la potencia reactiva que circula es baja, de forma que el factor de potencia igual a 0.994. En apartados posteriores se ensayarán con un nivel de reactiva más acorde a una situación real.

Por otro lado, al igual que en el apartado anterior, se analizará el mismo transformador sometido a un nivel de carga mucho menor, siendo este un 10% del estado de carga definido en el presente apartado.

2.3.1 Transformador de 20/0.42 kV y Potencia Nominal 0.63 MVA

Teniendo en cuenta el criterio definido para la potencia base y la carga del sistema definido anteriormente, los valores se muestran en la *Tabla 5*:

Tabla 5: Potencia base y carga del sistema del transformador de 20/0.42 kV.

$S_n = 0,63$ MVA	$S_b = 0,63$ MVA
$P_i = 0,9$ pu	$P_i = 0,567$ MW
$Q_i = 0,1$ pu	$Q_i = 0,063$ Mvar

En dicha tabla se observa que la potencia del transformador es 0.63 MVA, por tanto, la potencia base considerada en el sistema es 0.63 MVA. Por otro lado, si la potencia activa representa un 90% de la base (0.9 en pu), el valor de la misma en unidades del sistema ingenieril es 0.567 MW. De igual forma, con la potencia reactiva, un 10% de la base (0.1 en pu) se corresponde con 0.063 Mvar.

Cabe destacar, que el análisis a realizar es genérico, por tanto, los valores que toman tanto la resistencia como la reactancia de la rama de magnetización no son sujeto de análisis en este apartado. Los valores considerados son los obtenidos del ensayo de vacío proporcionado por catálogos de los fabricantes.

Nota: En apartados posteriores se analizará el efecto que tiene el valor de estos parámetros de la rama magnetizante.

Realizado el ensayo, tanto para un estado de carga elevado (al 90% del nivel de la capacidad máxima del transformador), como para un estado descargado (un 10% del estado de carga alto), se obtienen los resultados que se reflejan en la *Tabla 6*.

Tabla 6: RN del transformador de 20/0.42 kV y $S_n=0.63$ MVA según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
Q1	1,9	Q1	15,3
Q1-2	1,9	Q1-2	15,3
Q2	1,5	Q2	8,7
Q2-1	1,5	Q2-1	8,7
P2	0,5	P2	0,7

En este ensayo se observa que en un estado de carga elevado los residuos normalizados resultantes de no considerar la rama de magnetización de los transformadores tienen un valor elevado, ya que aunque no superan el valor límite de medida errónea, desde el punto de vista de la contaminación producida en el estado estimado, introducen un elevado grado de contaminación, ya que superan el valor unidad.

Por otro lado, como ocurría en los transformadores de media tensión, al disminuir el estado de carga, el efecto de no considerar dicha rama es mucho más importante. Los residuos normalizados son tres veces más grande del límite de medida errónea, por lo que, parece indicar que al disminuir el nivel de carga el efecto de no tener en cuenta la rama de magnetización en transformadores de media-baja tensión aumenta. Es decir, se consideran erróneas ciertas medidas que realmente no lo son, además de introducir un elevado grado de contaminación en el estado estimado.

2.3.2 Transformador de 20/0,4 kV y Potencia Nominal 2.5 MVA

A continuación, se repite el ensayo anterior pero con un transformador de mayor potencia (ver *Ilustración 6*). De igual forma, se muestran los valores de la potencia base y la carga en la *Tabla 7*:

Tabla 7: Potencia base y carga del sistema del transformador de 20/0.42 kV.

$S_n = 2,5 \text{ MVA}$	$S_b = 2,5 \text{ MVA}$
$P_i = 0,9 \text{ pu}$	$P_i = 2,25 \text{ MW}$
$Q_i = 0,1 \text{ pu}$	$Q_i = 0,25 \text{ Mvar}$

En este ensayo, la potencia base del sistema es 2.5 MVA mientras que la potencia activa y reactiva de la carga son 2.25 MW y 0.25 Mvar.

Al realizar el ensayo, los resultados obtenidos se reflejan en la *Tabla 8*:

Tabla 8: RN del transformador de 20/0.4 kV y $S_n=2.5 \text{ MVA}$ según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
Q1	0,8	Q1	8,1
Q1-2	0,8	Q1-2	8,1
Q2	0,6	Q2	6,1
Q2-1	0,6	Q2-1	6,1
P2	0,2	P2	0,4

Los resultados obtenidos siguen la misma tendencia que en el ensayo anterior; para un nivel de carga elevado, el efecto de no considerar la rama de magnetización no es significativo desde el punto de vista de la validez del estado estimado, ya que los residuos obtenidos son del orden de los que se obtendrían si se considerase ruido en las medidas. Aunque, desde el punto de vista del grado de contaminación del estado estimado, los residuos normalizados son cercanos a la unidad, por lo que el efecto de considerar la rama de magnetización es significativo en cuanto a la validez del estado estimado.

Por otro lado, al disminuir el nivel de carga, los residuos normalizados aumentan considerablemente, siendo el efecto mencionado mucho más notable. Se observa que cuando el nivel de carga de la red es bajo, el efecto de no considerar la rama de magnetización en los transformadores en el estimador de estado es importante, ya que, los residuos normalizados doblan el valor del límite de medida errónea, contaminando considerablemente el estado estimado.

Por tanto, el efecto más significativo se produce cuando el nivel de carga del transformador es bajo, siendo menos relevante en escenarios de mayor carga. Aunque sí parece evidente que el grado de contaminación del estado estimado es importante al no considerar la rama de magnetización.

Se observa, además, que aquellas medidas que presentan mayores valores de los residuos normalizados son los flujos e inyecciones de potencia reactiva.

2.4. Transformadores de Media-Baja Tensión con Mayor Nivel de Reactiva

Hasta ahora, en los ensayos realizados con transformadores de baja tensión han tenido un bajo nivel de reactiva, dando lugar al comportamiento de los residuos normalizados que se reflejan en los dos apartados previos. En esta nueva situación también se definirá la potencia base igual a la nominal de los transformadores. La potencia activa tendrá un valor de 0.8 pu, con la diferencia que, ahora, la potencia reactiva será 0.39 pu, lo que corresponde a un factor de potencia igual a 0.9.

La red a aplicar en estos ensayos es la que se muestra en la *Ilustración 6*.

2.4.1 Transformador de 20/0.42 kV y Potencia Nominal 0.63 MVA

Teniendo en cuenta el criterio definido para la potencia base y la carga del sistema definido anteriormente, los valores se muestran en la *Tabla 9*. Dicho estado se corresponde con el de nivel de carga alto.

Tabla 9: Potencia base y carga del sistema del transformador de 20/0.42 kV.

$S_n = 0,63 \text{ MVA}$	$S_b = 0,63 \text{ MVA}$
$P_i = 0,8 \text{ pu}$	$P_i = 0,504 \text{ MW}$
$Q_i = 0,39 \text{ pu}$	$Q_i = 0,246 \text{ Mvar}$

En la *Tabla 9*, se observa que, tomando la potencia base 0.63 MVA, los valores de potencia activa y reactiva la carga son 0.504 MW y 0.246 Mvar. De esta forma el factor de potencia de la red será aproximadamente 0.9. De igual forma que en apartados anteriores, el estado descargado se define como un 10% del estado cuyo nivel de carga es elevado.

Tras realizar en ensayo correspondiente, los resultados de los residuos normalizados se muestran en la *Tabla 10*:

Tabla 10: RN del transformador de 20/0.42 kV y Sn=0.63 MVA según el estado de carga.

	Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)
	RN		RN
Q1	0,5	Q1	4,8
Q1-2	0,5	Q1-2	4,8
Q2	0,5	Q2	4,1
Q2-1	0,5	Q2-1	4,1
P2	0,1	P2	0,4

Una vez más se observa que, el efecto de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red del estimador de estado en transformadores de media-baja tensión no es tan significativo si el nivel de carga es alto con respecto al ensayo en el que éste se encuentra descargado. Los residuos normalizados obtenidos en un estado de cargas elevado no son superiores al límite de consideración de medida errónea, mientras que en el escenario de bajo nivel de carga, sí.

Si se observan las columnas de la izquierda, cuando el estado de carga es alto, es decir, el descrito en este apartado, los residuos normalizados llegan a un máximo de 0.5, lo cual es muy inferior al citado límite. Por otro lado, al disminuir el nivel de carga, aumenta el valor de los residuos normalizados máximos, superando el límite de medida errónea (RN=3), tal y como se muestran en las columnas de la derecha de la *Tabla 10*.

Por tanto, al igual que en los casos anteriores, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en el modelo topológico de la red es más significativo cuando el transformador se encuentra prácticamente descargado.

Se observa que aquellas medidas que presentan mayores valores de los residuos normalizados son los flujos e inyecciones de potencia reactiva.

Resulta de interés comparar los residuos normalizados obtenidos en las *Tablas 6 y 10*. En ambas, se recoge información del mismo transformador con distinto factor de potencia. Cuanto mayor es el nivel de reactiva que circula por el transformador, menor sensibilidad tiene el estimador de estado a la no consideración de la rama de magnetización. En apartados posteriores, se desarrollará esta línea de ensayos con redes más complejas.

2.4.2 Transformador de 20/0.4 kV y Potencia Nominal 2.5 MVA

A continuación, se repite el ensayo anterior con otro transformador diferente con objeto de comprobar si se repite la misma tendencia.

En este caso, la potencia base será 2.5 MVA y, siguiente el criterio definido, la potencia activa y reactiva de la carga 2.0 MW y 0.97 Mvar respectivamente, tal y como se observa en la *Tabla 11*:

Tabla 11: RN del transformador de 20/0.4 kV y $S_n=2.5$ MVA según el estado de carga.

$S_n = 2,5$ MVA	$S_b = 2,5$ MVA
$P_i = 0,8$ pu	$P_i = 2,0$ MW
$Q_i = 0,39$ pu	$Q_i = 0,97$ Mvar

Tras realizar la estimación de estado correspondiente, los resultados reflejan la misma tendencia que en el apartado anterior (ver *Tabla 12*).

Tabla 12: RN del transformador de 20/0.4 kV y $S_n=2.5$ MVA según el estado de carga.

Estado Carga Alto		Estado Descargado (x0,1)	
	RN		RN
Q1	0,2	Q1	2,1
Q1-2	0,2	Q1-2	2,1
Q2	0,2	Q2	2,0
Q2-1	0,2	Q2-1	2,0
P2	0,0	P2	0,2

Una vez más, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de transformadores de media-baja tensión en la estimación de estado no es significativo cuando el estado de carga es elevado. Los residuos normalizados no se acercan al límite de 3 para considerar las medidas erróneas, por tanto, el efecto no es relevante.

Sin embargo, en este ensayo cuando el estado de carga es mucho menor al estado considerado en este apartado, los residuos normalizados aumentan, pero no se supera el límite de medida errónea.

No obstante, desde el punto de vista del grado de contaminación del estado estimado, este último ensayo refleja que ante un bajo nivel de carga los residuos normalizados superan en gran medida la unidad, llegando incluso a doblarla. Por lo que puede concluirse que si el nivel de carga del transformador es bajo el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores será importante en la herramienta de estimación de estado.

Se observa que aquellas medidas que presentan mayores valores de los residuos normalizados son los flujos e inyecciones de potencia reactiva.

De igual forma, si se comparan los resultados del mismo transformador cuando circula mayor nivel de reactiva (*Tablas 8 y 12*), se aprecia que los residuos normalizados disminuyen al circular mayor cantidad de potencia reactiva.

2.5. Transformador en Vacío

Hasta ahora se ha comprobado que el estado de carga del transformador tiene una gran importancia en el efecto que tiene sobre el estimador de estado no considerar la rama de magnetización. En este apartado se analizará qué efecto tiene sobre dicha herramienta el hecho de que el transformador de los apartados 2.1.1 y 2.4.1 se encuentren en vacío. Es decir, se compara el ensayo de vacío de un transformador de alta-media tensión con uno de baja.

Si el transformador se encuentra en vacío, la potencia que circulará por esa rama ha de ser nula si no se considera la rama de magnetización. Sin embargo, dado que las medidas reales se obtienen a partir de un modelo en el que dicha rama sí es tenida en cuenta, el flujo de potencia activa y reactiva que circulará no será cero. De hecho, cabe esperar que circule una potencia igual a las pérdidas en el núcleo ferromagnético y en la reactancia de magnetización.

Los valores que toman las desviaciones de las medidas de tensión y fase se mantienen en los mismos valores de los apartados anteriores: 0.0053 y 0.004, respectivamente. De igual forma ocurre con las desviaciones de las medidas de inyección de potencia activa y reactiva, cuyos valores son: 0.0291 y 0.0146, respectivamente.

Por otro lado, dado que en la situación en la que el transformador se encuentra en vacío implica inyecciones potencias nulas, los flujos de potencia activa y reactiva que circularán tendrán un valor nulo o próximo a cero (debido a la inclusión de la rama de magnetización), por lo que si la desviación típica de estos flujos se define como un 3% del valor, estableciendo 0.0001 como valor mínimo, existe un elevado número de medidas con desviaciones muy pequeñas, lo cual origina que en ensayos de vacío existan problemas para asignar residuos normalizados. Por tanto, para resolver este error, se modifica el valor mínimo de la desviación típica a 0.0005.

Nota: Esta modificación se lleva a cabo exclusivamente para la situación de vacío.

Al igual que en los apartados anteriores, se parte de un fichero de medidas mínimas para poder realizar un reparto de carga en un transformador en el que sí se considera la rama de magnetización. Con este conjunto completo de medidas y el mismo fichero de red para el transformador, sin la rama de magnetización, se realiza la estimación de estado para analizar el efecto de que estos transformadores se encuentren operando en vacío.

El transformador de alta-media tensión tiene una relación de transformación de 220/132 kV y una potencia nominal de 120 MVA, mientras que el transformador de baja 20/0.4 kV y 0.63 MVA. La *Tabla 13* recoge los resultados de no considerar la rama de magnetización en los transformadores en estimación de estado cuando se someten a una situación de vacío.

Tabla 13: RN para dos transformadores en vacío de alta y baja tensión.

Escenario de Vacío			
Trafo 220/132 kV y Sn=120 MVA		Trafo 20/0,4 kV y Sn=0,63 MVA	
	RN		RN
Q1	0,5	Q1	8,5
Q1-2	0,5	Q1-2	8,5
Q2	0,5	Q2	8,5
Q2-1	0,5	Q2-1	8,5
P1	0,3	P1	2,3
P1-2	0,3	P1-2	2,3

La *Tabla 13* recoge los residuos normalizados resultantes de no considerar la rama de magnetización de los transformadores cuando estos, además, se encuentran operando en vacío. En esta situación extrema cabe esperar que los valores de dichos residuos sean más elevados, ya que como se observa en los apartados anteriores, cuanto menor es el nivel de carga, mayor es la sensibilidad del estimador a esta no consideración.

En dicha tabla, las dos primeras columnas muestran las medidas y sus correspondientes residuos normalizados cuando el transformador de alta-media tensión opera en vacío, mientras que las dos siguientes, corresponden al transformador de baja.

Se puede observar que la estimación de estado en ambos transformadores presenta residuos normalizados distintos de cero, lo cual implica el efecto de no considerar la rama de magnetización. No obstante, se destaca la notable diferencia de dichos valores entre un caso y otro. Cuando el transformador es de alta-media tensión, el efecto es mínimo, ya que los residuos normalizados máximos oscilan en torno a 0.5, sin embargo, cuando el transformador es de baja tensión, los residuos normalizados superan en más del doble el límite de medida errónea.

Por tanto, a juzgar por estos resultados, resulta evidente que no sólo existe una mayor sensibilidad del estimador de estado cuando no considera la rama de magnetización ante un menor nivel de carga, sino que los transformadores de baja tensión aumentan notablemente esta sensibilidad. Esto se debe en gran medida al valor que toman la resistencia del núcleo ferromagnético y la reactancia de magnetización.

En apartados posteriores se analizará con mayor detalle el valor de estos parámetros y qué orden de magnitud tienen conforme al nivel de tensión y potencia nominal del transformador.

Finalmente, cabe mencionar que los tipos de medidas que presenta mayor sensibilidad ante la no consideración de la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado son los flujos e inyecciones de potencia reactiva, lo cual indica que el valor de la reactancia de magnetización tiene un mayor efecto sobre la estimación de estado.

2.6. Conclusiones Previas

Tras realizar estos ensayos previos, puede concluirse que, existen algunas circunstancias bajo las cuales podría tener relevancia no tener en cuenta la rama de magnetización en el modelo topológico de la red de la herramienta de estimación.

- En redes de transporte, donde el nivel de tensión es elevado, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en los transformadores es prácticamente despreciable, independientemente del nivel de tensión o potencia del transformador, siempre que el nivel de carga sea alto.
- En redes de transporte con un nivel de carga bajo, no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico del estimador de estado presenta residuos normalizados distintos de cero. Aunque los valores se encuentran por debajo del límite de medida errónea, puede existir alguna situación en la que dichos residuos superen el valor unidad, contaminando notablemente el estado estimado.
- En redes de distribución, el efecto de no considerar dicha rama es más notable que en alta-media tensión. En general, no se llega a superar el límite de medida errónea, sea cual sea el nivel de carga de los transformadores.
- En redes de distribución, al disminuir el nivel de carga hasta el punto de que la red quede prácticamente descargada, el efecto de no considerar la rama de magnetización en los transformadores es más relevante, aunque no se supera el límite de medida errónea, sí da lugar a que los valores de los residuos contaminen en gran medida la veracidad del estado estimado.
- En redes de distribución con un nivel de carga elevado, los residuos normalizados, consecuencia de no considerar la rama de magnetización, generan residuos normalizados distintos de cero aunque inferior a la unidad, por lo que el grado de contaminación del estado estimado se considera aceptable.
- En redes de baja tensión, no considerar la rama de magnetización tiene mucha importancia cuando el estado de la red es casi descargado. Mientras que si la red se encuentra en un estado de mayor carga el efecto disminuye notablemente.
- Dependiendo de cuanta potencia reactiva circule por el transformador, la influencia de aumentar o disminuir el estado de carga del sistema será mayor.
- En redes de baja tensión, con bajo nivel de reactiva ($\cos(\varphi)=0.99$), al disminuir el estado de carga, aumenta considerablemente el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en la estimación de estado. Es decir, los residuos normalizados aumentan, superando del límite de medida errónea.
- Con un nivel de reactiva algo mayor ($\cos(\varphi)=0.9$), al disminuir el estado de carga, aumenta el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en la estimación de estado. Sin embargo, no siempre dará lugar a residuos normalizados que superen el límite de medida errónea.
- Cuanto mayor es el nivel de reactiva que circula por los transformadores, menor es la sensibilidad del estimador a la no consideración de las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores.
- En redes de baja tensión, no considerar la rama de magnetización tiene un efecto mucho más relevante, ya que el grado de contaminación del estado estimado es más notable al superar los residuos normalizados el valor unidad.
- Cuanto más se asemejen las condiciones de operación de un transformador a las de vacío, mayores serán los residuos normalizados consecuencia de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado y, por tanto, más notable será el grado de contaminación del estado estimado.
- Los transformadores de media-baja tensión presentan mucha más sensibilidad ante esta no

consideración que los transformadores de alta-media tensión. Ello se traduce en que el efecto de no considerar la rama de magnetización en estimación de estado sea más acusado en el primer grupo de transformadores.

Dadas las conclusiones obtenidas antes de realizar el estudio en mayor profundidad, el efecto de no considerar la rama de magnetización puede llegar a ser importante en redes cuyos transformadores sean de media-baja tensión. Sin embargo, en transformadores de alta-media, el efecto es menor.

Cabe destacar que, esta mayor influencia en los transformadores de baja tensión puede deberse, en gran medida, al valor de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización de los transformadores que, son mucho menores en los de media-baja tensión. Este fenómeno se analizará en próximos apartados.

3 ALGORITMO

En este apartado se plantea un algoritmo en Matlab que dada de manera automática la estimación de estado planteada en los apartados previos. El objetivo es que, dada una red que incluye las ramas de magnetización de los transformadores, a partir de un conjunto de medidas mínimo para realizar un reparto de cargas, se obtenga un conjunto completo de medidas. Estas medidas serían las que proporcionan los instrumentos de medidas en una situación lo más próximo a la realidad.

Dado que la función que realiza el reparto de cargas obtiene todas las medidas de fase de los nudos, es necesario una función que elimine todas las fases a excepción de la del nudo Slack. Es decir, se supone que no hay instalado analizadores de redes que permitan obtener dichas fases.

Por otro lado, es necesario obtener una copia de la red en la cual no se tenga en cuenta la rama de magnetización de los transformadores, poniendo a cero los campos reservados para los parámetros de la rama de magnetización, R_{fe} y X_{μ} .

Finalmente, se realiza una estimación de estado con el modelo de red que no tiene en cuenta la rama de magnetización y las medidas obtenidas de un reparto de cargas de una red que sí la tiene en consideración. De esta manera se evaluará el impacto que tiene sobre la estimación de estado no considerar las pérdidas en esta rama.

Para un mejor entendimiento de en qué consiste el algoritmo, se refleja el mismo en un diagrama de bloques (ver *Ilustración 7*).

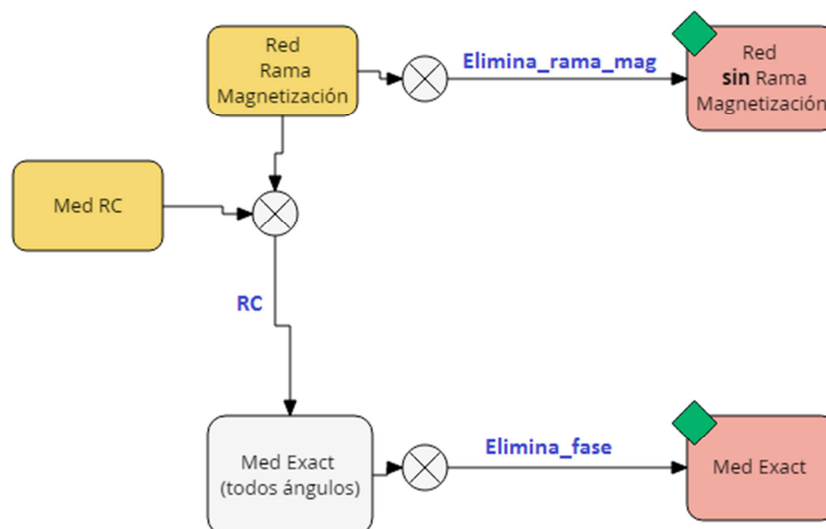


Ilustración 7: Diagrama de bloques del algoritmo.

Nota: En la *Ilustración 7* se muestran los ficheros de partida y obtenidos en el algoritmo, además de las funciones pertinentes.

En los siguientes apartados se explicará con mayor detalle en qué consiste cada una de las funciones a utilizar.

3.1. Función 'Eliminar_rama_mag'

Como antes se comentó, esta función tiene por objeto hacer una copia de la red eliminando la rama de magnetización de los transformadores para, posteriormente, poder realizar la estimación de estado empleando dicha red. Esta función requiere el fichero de red con la rama de magnetización como datos de entrada y devuelve el nombre del fichero en el que crea el conjunto completo de medidas sólo con la fase del nudo de referencia.

Para entender mejor cómo actúa esta función, será necesario conocer cada uno de los campos de la matriz de impedancia del fichero de red. Por ello, en la *Ilustración 8*, se muestra un ejemplo con una leyenda explicativa.

```

% (1) nudo origen
% (2) nudo final
% (3) circuito
% (4) resistencia serie
% (5) reactancia serie
% (6) susceptancia paralelo total
% (7) tipo de rama 1=linea o trafa sin toma 2=trafo con toma sin estimar 3= trafa con toma a estimar
% (8) valor de la toma si existe
% (9) conductancia paralelo nudo origen.
% (10) susceptancia paralelo nudo origen.
% (11) conductancia paralelo nudo destino.
% (12) susceptancia paralelo nudo destino.

imp=[
1 2 0 0.01938 0.05917 0.05280 1 0 0 0 0 0 %1
1 5 0 0.05403 0.22304 0.04920 1 0 0 0 0 0 %2
2 3 0 0.04699 0.19797 0.04380 1 0 0 0 0 0 %3
2 4 0 0.05811 0.17632 0.03740 1 0 0 0 0 0 %4
2 5 0 0.05695 0.17388 0.03400 1 0 0 0 0 0 %5
3 4 0 0.06701 0.17103 0.03460 1 0 0 0 0 0 %6
4 5 0 0.01335 0.04211 0.01280 1 0 0 0 0 0 %7
4 6 0 0.00000 0.20912 0.00000 2 0.97800 1/rfe_47 -1/xm_47 0 0 %8
4 6 0 0.00000 0.55618 0.00000 2 0.96900 1/rfe_49 -1/xm_49 0 0 %9
]

```

Ilustración 8: Matriz de impedancia y leyenda de los términos.

Tal y como se observa en la *Ilustración 8*, una matriz de impedancia se define por tantas filas como líneas tenga la red en cuestión y, doce columnas. Así, los dos primeros términos (columnas 1 y 2) corresponden a los nudos origen y destino que definen las ramas de una red. La tercera columna se corresponde con el número del circuito, es decir, en caso de haber más de una línea entre los mismos nudos, se requiere un identificador diferencial para cada una.

Por otro lado, las tres siguientes columnas se corresponden con la resistencia, reactancia y susceptancia del modelo en pi de las líneas. El séptimo término hace referencia a la distinción entre líneas/transformador sin toma, transformador con toma sin estimar y transformador con toma a estimar. Siendo así el octavo término el que hace referencia al valor de dicha toma en caso de ser conocida.

Nota: No es necesario discernir entre línea o transformador sin toma ya que, en aspectos prácticos, de cara al estimador de estado ni tiene ninguna diferencia.

Los siguientes cuatro términos hacen mención a la rama de magnetización de los transformadores, definidos a partir de la conductancia de pérdidas en el hierro y la susceptancia de magnetización: $1/R_{Fe}$ y $-1/X_{\mu}$, respectivamente. Según en qué posición se defina la rama de magnetización, se colocarán estos valores en los términos noveno y décimo o undécimo y duodécimo.

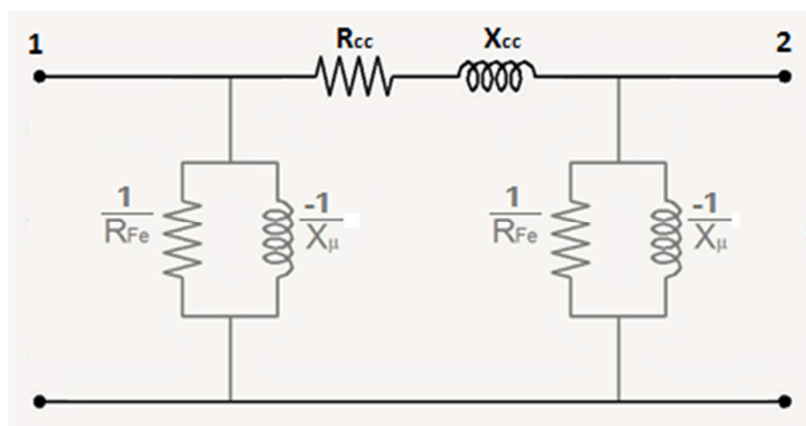


Ilustración 9: Modelo del transformador con las diferentes posiciones de la rama de magnetización.

Según se muestra en la *Ilustración 9*, si se define la rama de magnetización de forma próxima al nodo origen (1), en la matriz de impedancia se ocupan los valores noveno y décimo, mientras que si se coloca cerca del nodo destino (2), se sitúan en las posiciones undécimo y duodécimo. El criterio tomado durante los ensayos es definir los parámetros de dicha rama próximos al nudo origen.

En aquellas ramas que sean líneas no tiene sentido definir estos últimos cuatro valores, por tanto, se asigna valor nulo.

Una vez que se conoce la estructura que de la matriz de impedancia y donde se definen los parámetros de la rama de magnetización, la función 'Elimina_rama_mag' leerá el fichero de red, hará una copia en otro fichero asignando un cero a todos los elementos de las columnas 9, 10, 11 y 12. De esta forma, sin necesidad de identificar qué rama es un transformador y cual una línea, se elimina la rama de magnetización.

3.2. Función 'Eliminar_fase'

La función que realiza un reparto de cargas, permitiendo obtener un conjunto completo de medidas, devuelve tanto las medidas de tensión como de fase, además de las inyecciones y flujos de potencia activa y reactiva en los nudos y ramas respectivamente. Dado que para realizar una estimación de estado sólo se requiere una fase y no se contempla la implantación de analizadores de red que permitan obtener a tiempo real la fase de cada nudo, será necesario eliminar todas las medidas de fase proporcionadas salvo la del nudo considerado como referencia de fase.

Esta función tiene como datos de entrada:

- El fichero de medidas con todas las fases.
- El fichero de medidas mínimas necesarias para el reparto de carga. Con este fichero se determina cuál de los nudos es el Slack.
- Fichero de red con ramas de magnetización. De este fichero sólo será necesario el nombre que tenga para definir un nombre que contenga la misma raíz, añadiéndole al nombre un prefijo 'Med_'

Nota: Estos nombres deben tener estrictamente la misma raíz para que el programa realice la estimación correspondiente de forma automática sin confundir ficheros de otras redes.

Como salida de la función devuelve el nombre del fichero en el que crea el conjunto completo de medidas sólo con la fase del nudo de referencia.

La forma de proceder de la función consiste en cargar el contenido del fichero de medidas mínimas para el reparto de cargas para identificar qué nudo es el de referencia. A continuación, hace una copia de las matrices contenidas en el fichero de medidas completas con todas las fases y elimina todas las medidas de fase salvo la del nudo Slack.

Finalmente, guarda el nombre del fichero de red en una variable, genera el fichero con ese nombre añadiendo el prefijo 'Med_' y guarda las matrices en ese fichero. De esta forma, el fichero nuevo tiene exactamente el mismo formato que el fichero del conjunto completo de medidas con todas las fases.

3.3. Función 'RC'

La función que realiza la estimación de estado y el reparto de carga es la misma. La única diferencia reside en el fichero de medidas, el cual dispone de un mayor número en el primero.

Esta función, 'EE_WLS_20171029', es proporcionada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la universidad, por tanto, ya se dispone de la misma. Sin embargo, para poder aplicarla al proyecto en cuestión, hay que realizar una serie de modificaciones.

El estimador de estado proporciona a cada medida una serie de valores para la desviación típica, los cuales están establecidos para una potencia base de 100 MVA. Emplear una potencia base u otra tiene un efecto muy relevante, ya que elegir una que no sea adecuada puede dar lugar a errores numéricos y, como consecuencia, que la estimación de estado no converja. Tal y como se definió en los apartados anteriores, la potencia base del sistema no siempre tomará dicho el valor, por lo que será necesario modificar el valor de dichas desviaciones típicas para que el orden de magnitud esté acorde a la variación del valor de la potencia base.

Para conseguir este objetivo, será necesario modificar las entradas de la función que permite la obtención del conjunto completo de medidas dentro de la función de estimación de estado. Se define pues una nueva entrada que aporte el valor de la potencia base del sistema a esta función.

Una vez se dispone de esta nueva variable, se corrige el valor de las desviaciones típicas asignadas, multiplicando, multiplicando por 10^7 (valor de la potencia base 100 MVA en VA), y dividiendo por el nuevo valor de la potencia base del sistema. De esta forma, se asignarán valores de desviación típica acordes a la nueva potencia base, (ver *Ilustración 10*).

```
sigma_Pij_132=0.0138*100e6/S_base;  
sigma_Qij_132=0.0059*100e6/S_base;  
sigma_Pi_132=0.0191*100e6/S_base;  
sigma_Qi_132=0.0066*100e6/S_base;  
sigma_Pij_33=0.0050*100e6/S_base;  
sigma_Qij_33=0.0025*100e6/S_base;  
sigma_Pi_33=0.0094*100e6/S_base;  
sigma_Qi_33=0.0047*100e6/S_base;
```

Ilustración 10: Modificación de los valores de desviación típica según la nueva potencia base.

Tal y como está definida la función de crear un conjunto completo de medidas, requiere unos valores de desviaciones típicas, entre otros, para construir una matriz de medidas del sistema.

Con objeto de analizar en apartados posteriores cómo afecta el valor de la desviación típica al valor de los residuos normalizados, cuando no se tiene en cuenta la rama de magnetización, se decide asignar el valor de la desviación típica en las medidas como un 2-4% del valor medido [2]. Es decir, una vez construida la matriz, se modifica el valor de la desviación típica asignando para los ensayos posteriores un 3% del valor medido. En apartados posteriores, se modificará este porcentaje para analizar el efecto antes mencionado.

Puede ocurrir, que el valor asignado a la desviación típica mediante este nuevo método de lugar a un valor muy próximo a cero, hecho que no refleja la realidad, ya que los instrumentos de medidas siempre tienen un mínimo de incertidumbre en el valor proporcionado. Por ello, se establece que en aquellos casos en los que la desviación típica de las medidas sea inferior a 0.0001, se asigne dicho valor como desviación.

3.4. Explicación y Secuencia de los Pasos del Algoritmo

En primer lugar, se requiere indicar al programa cuales son los ficheros de red y el fichero de medidas mínimas para poder realizar un reparto de carga. Tal y como se podía apreciar en la Ilustración 8, este fichero de red sí dispone de datos referentes a la rama de magnetización de los transformadores. Además, será necesario definir la potencia base (S_b) del sistema para que se modifiquen correctamente las desviaciones típicas (ver *apartado 3.3*).

A continuación, se realiza un flujo de carga y se crea el conjunto completo de medidas, entre las cuales se encuentran las fases de todos los nudos. Dado que consideramos que la red real no dispondrá de analizadores de redes para obtener dicho dato, será necesario eliminar estas fases, a excepción de la del nudo de referencia. Para ello, se utiliza la función, antes definida, 'Elimina_fase'. El conjunto completo de medidas resultante representa las medidas que proporcionan los instrumentos de medidas de la forma más realista posible, desde el enfoque del proyecto. Es decir, la rama de magnetización de los transformadores forman parte de estos elementos, por tanto, los dispositivos de medición toman las medidas tal cual se encuentran los elementos de la red.

El siguiente paso del algoritmo, consiste en eliminar la rama de magnetización del fichero de red empleando la función 'Elimina_rama_mag', para ello hace una copia del fichero y modifica las columnas de la matriz correspondiente, tal y como se explica en el *apartado 3.1*.

Finalmente, con el conjunto completo de medidas sólo con la fase del nudo Slack y con el fichero que muestra la topología de la red sin tener en cuenta la rama de magnetización, se realiza una estimación de estado. Esto permite comparar el efecto de no considerar las pérdidas que se producen en dicha rama y el impacto que tiene sobre la fiabilidad del algoritmo.

4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO

En este apartado se describen una serie de verificaciones que se llevan a cabo para comprobar que el algoritmo presentado funciona correctamente y que no da lugar a estimaciones de estados erróneas. En primer lugar, se realiza una estimación de estado de la red IEEE 14 cuando la potencia base es de 100 MVA y cuando se cambia a 10 MVA. Si el algoritmo funciona correctamente, debería devolver los mismos valores de residuo normalizado para ambas estimaciones cuando no se contempla la rama de magnetización de los transformadores.

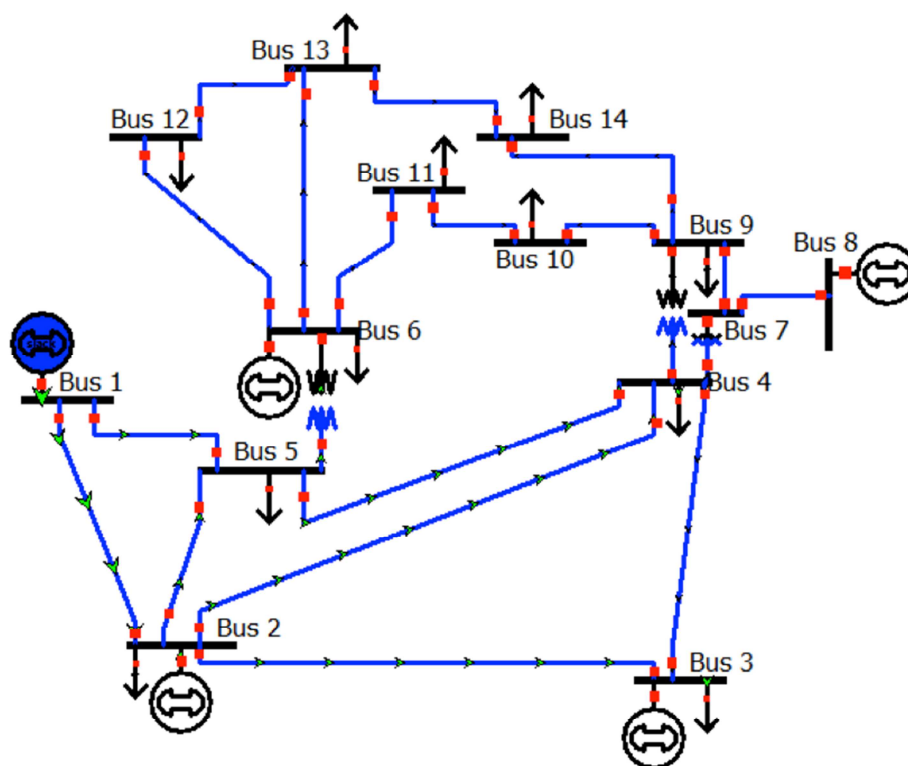


Ilustración 11: Red IEEE14.

La *Ilustración 11* muestra la red IEEE14 sobre la cual se realiza la comprobación del algoritmo.

Destacamos que los valores de dicha red son los proporcionados por IEEE [1], sin embargo, los valores de la rama de magnetización se toman de una base de datos disponibles donde se muestran algunos ejemplos de transformadores según potencia y valores de tensión.

A continuación, en la *Tabla 14*, se muestran los valores de los ensayos realizados de forma comparativa.

Tabla 14: RN de la red IEEE14 a distinta potencia base.

Red IEEE14 Sb=100 MVA		Red IEEE14 Sb=10 MVA	
	RN		RN
Q9-4	0,4	Q9-4	0,4
Q5	0,3	Q5	0,3
Q6	0,3	Q6	0,3
P6	0,2	P6	0,2
Q4-9	0,2	Q4-9	0,2
Q4	0,2	Q4	0,2

La *Tabla 14* refleja claramente que para distinta potencia base, los residuos normalizados de las medidas al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores son los mismos independientemente de la potencia base que se tome. Por tanto, tras realizar esta comprobación, se concluye que el algoritmo funciona correctamente y, se podrá proceder a realizar los ensayos del estudio.

5 ENSAYOS

En los siguientes apartados, se llevarán a cabo una serie de ensayos en los que se evaluará el efecto de no considerar la rama de magnetización en redes reales bajo distintas circunstancias, tratando así de determinar cuándo es necesario incluir la rama de magnetización en el modelo topológico de la red.

Tal y como se ha planteado en *el apartado 3*, se parte de un modelo de red que considera la rama de magnetización y un conjunto de medidas mínimo para poder realizar un reparto de cargas. De esta forma se obtendría un conjunto completo de medidas que simulan las medidas que proporcionan los instrumentos de medida de la red. Estas medidas se consideran exactas ya que no se tiene en cuenta el nivel de ruido. A continuación, se elimina la rama de magnetización de los transformadores de la red a analizar y se realiza la estimación de estado con este último modelo de red y el conjunto completo de medidas obtenido del reparto de cargas, con el fin de simular la situación en la que actúa el estimador de estado actual.

Durante estos ensayos, el valor de la desviación típica de las medidas de flujo de potencia activa y reactiva es un 3% del valor medido, mientras que los valores de tensión tienen un valor de 0.0053. Las inyecciones de potencia activa y reactiva disponen valores de 0.0194 y 0.0147 respectivamente.

Antes de realizar el análisis de los ensayos, es conveniente definir un criterio de relevancia para poder evaluar qué efecto tiene sobre la estimación de estado considerar o no la rama de magnetización de los transformadores. La *Ilustración 12* recoge el criterio seguido para analizar dichas consecuencias en función del valor de los residuos normalizados.

Efecto	RN	Consecuencia
Muy relevante	≥ 3	Medidas exactas son consideradas erróneas. El estado estimado elimina medidas que son exactas.
Relevante	[2-3)	Medidas exactas con RN muy elevado. El estado estimado presenta un elevado grado de contaminación.
Importante	(2-0,8]	Medidas exactas con RN alto. El estado estimado empieza a presentar un elevado grado de contaminación.
Reducido	$< 0,8$	Medidas exactas con RN pequeño. El estado estimado presenta ligeras diferencias con respecto al estado real de la red.

Ilustración 12: Criterio de relevancia de los RN en Estimación de Estado.

Tal y como se observa en la *Ilustración 12*, cuanto mayor es el valor de los residuos normalizados, mayor es la importancia de no considerar la rama de magnetización de los transformadores.

5.1. Efecto del Nivel de Tensión

Al igual que se llevó a cabo en el *apartado 2* del presente documento, se pretende analizar el impacto que tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en la estimación de estado para transformadores de alta-media tensión y para media-baja. La diferencia respecto a los ensayos anteriores reside en que en este apartado se ensaya con redes reales, sin aislar el transformador.

5.1.1 Redes de Alta-Media Tensión

Las redes a evaluar en este apartado son algunas que se definen en la asociación IEEE, ya que no sólo se basan en redes reales, sino que, además, se disponen de los valores y parámetros de las mismas. Por ello, las redes a evaluar son: IEEE14 (132-33 kV), IEEE24 (138-230 kV) y la red de Kundur (20-230 kV). El estado de cargas que presenta cada una de las redes es el que define la asociación IEEE [1], por tanto, en este apartado, no es susceptible de ser modificado.

Dado que el nivel de carga parece tener un efecto significativo en el valor de los residuos normalizados consecuencia de la no consideración de las pérdidas de la rama de magnetización, se observó el nivel de carga de cada uno de los transformadores de las diferentes redes. Estos se encuentran operando en un rango del 50-65% de la potencia nominal.

El hecho de que se hayan elegido estas tres redes para el análisis se debe a que éstas representan los distintos niveles de tensión dentro de la alta y media tensión.

A continuación, las *Ilustraciones 13 y 14* muestran la topología de las dos últimas redes mencionadas. En el apartado 4, se dispone de la *Ilustración 11* correspondiente a la red IEEE14.

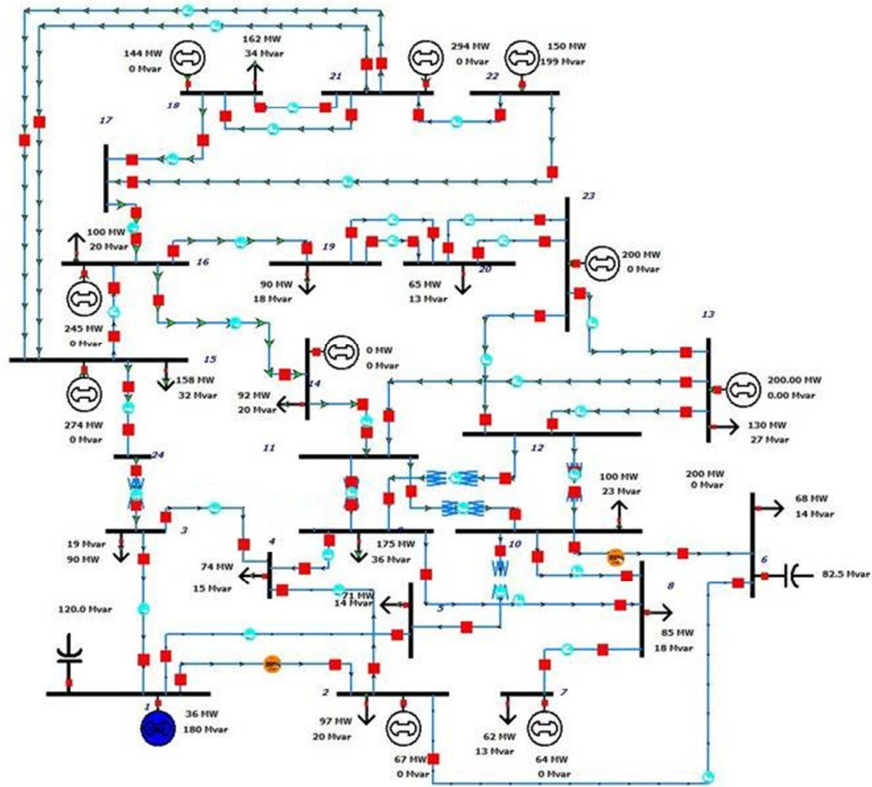


Ilustración 13: Red IEEE24.

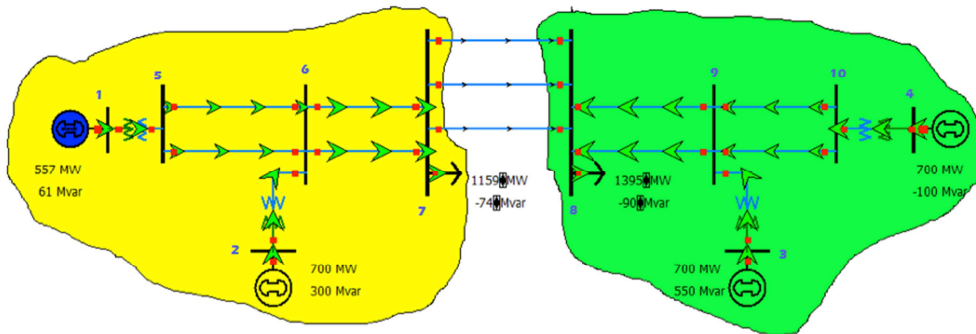


Ilustración 14: Red Kundur.

Una vez se han creado los ficheros topológicos y de medidas mínimas correspondientes a las tres redes, se ejecuta el algoritmo para cada una de ellas, obteniéndose los resultados reflejados en la *Tabla 15*:

Tabla 15: RN de las redes IEEE14, IEEE24 y Kundur.

33-132 KV		138-230 KV		20-230 KV	
Red IEEE14		Red IEEE24		Red Kundur	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,4	Q3	0,2	Q4	0,3
Q5	0,3	Q15	0,2	Q4-10	0,3
Q6	0,3	Q3-24	0,2	Q9-10,0	0,1
P6	0,2	P10	0,1	Q9-10,1	0,1
Q4-9	0,2	P3	0,1	Q1	0,1
Q4	0,2	Q24-3	0,1	Q1-5	0,1

Tal y como se aprecia, en ninguna de las redes parece reseñable el efecto de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red en la estimación de estado. Aunque se pueden observar algunas medidas con ciertos valores de residuos normalizados, ninguno se acerca al límite de medida errónea.

La red IEEE14 presenta residuos normalizados mayores que las otras dos, llegando a un máximo de 0.4. Por su parte, la red IEEE24 tiene un máximo de 0.2, mientras que en la red de Kundur el máximo residuo es 0.3. Estos valores se podrían obtener en caso de que se considerase el efecto del ruido en las medidas, por tanto, a priori, parece ser que en transformadores de alta-media tensión no considerar la rama de magnetización no tiene un efecto relevante.

Cabe destacar, que al no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red en estimación de estado, las medidas con los residuos normalizados más altos consecuencia de ello, son las de flujo e inyección de potencia reactiva.

5.1.2 Redes de Media Tensión

En este apartado resulta de interés analizar si el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador de estado tiene un impacto importante cuando la red de media tensión tiene en consideración los transformadores de media-baja tensión.

Para realizar este análisis, se emplea una red que contempla un transformador de alta-media tensión de 220/20 kV de 20 MVA. Este alimentará a dos feeders del que parten varios centros de transformación (CT), los cuales disponen de un transformador de 20/0.42 kV y 2 MVA. Cada una de las cargas asociadas a los diferentes centros de transformación serán de 0.829 MW y 0.445 Mvar. Dicha red se representa en la *Ilustración 15*, Red de Transformadores MT_BT.

Dado que esta red es muy representativa del sistema eléctrico de distribución español, se propone una red con idéntica topología, con la diferencia de que los transformadores y las cargas son de distinta potencia y parámetros. El transformador principal es de 200/20 kV y 10 MVA, mientras que los de los CTs son de 20/0.4 kV y 1 MVA. Por otro lado, las cargas de cada uno de los centros presentan valores de 0.460 MW y 0.346 Mvar, Red de Transformadores MT_BT 2.

Tabla 16: RN de las redes Red de transformadores MT_BT y Red MT con Generación Distribuida.

Red de Transformadores MT_BT		Red de Transformadores MT_BT 2		Red MT Generación Distribuida	
	RN		RN		RN
Q22	0,8	Q22	0,6	Q9-32	0,9
Q22-21	0,8	Q22-21	0,6	Q26	0,9
Q20	0,8	Q20	0,6	Q26-17	0,9
Q20-19	0,8	Q20-19	0,6	Q6-30	0,8
Q18	0,6	Q10-20	0,5	Q18	0,8
Q18-10	0,6	Q10	0,5	Q4-28	0,7

La *Tabla 16* recoge para cada una de las redes propuestas, las medidas y los residuos normalizados consecuencia efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en los transformadores. Tras observar los resultados, se observa que en redes de media tensión que consideran los transformadores de media-baja tensión, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización empieza a ser significativo, ya que algunos de los escenarios presentan residuos normalizados ≥ 0.8 . Aunque existe algún escenario en el que no supera dicho límite, se comprueba que no considerar la rama de magnetización de los transformadores empieza a tener efecto en el estado estimado.

En los casos analizados, los residuos normalizados resultantes de esta no consideración, dan lugar a valores que no superan el límite de medida errónea, aunque existen algunos escenarios en los que los residuos normalizados obtenidos dan lugar a que el grado de contaminación de la estimación de estado sea elevado.

Por tanto, se podría concluir que a este nivel de tensión no considerar dicha rama en los transformadores no tiene, a priori, un efecto muy relevante en la estimación de estado, aunque empieza a existir una mayor diferencia entre el estado estimado y el real.

Se destaca que las medidas que presentan mayores residuos normalizados son los flujos e inyecciones de potencia reactiva en aquellas ramas correspondientes a transformadores.

5.1.3 Redes de Baja Tensión

Tras haber analizado el impacto que tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en redes alta y media tensión, se procede a evaluar, siguiente el mismo criterio, redes de menor nivel de tensión. En este apartado se evalúan dos redes de distribución analizando desde el transformador del centro de transformación del que parten cada una de las líneas de alimentación de los núcleos urbanos.

Estas redes corresponden a dos núcleos urbanos de Sevilla. Se destaca que tanto la estructura radial como el valor de los parámetros reflejan, a efectos prácticos, las características de este tipo de redes de distribución. Los niveles de tensión de los nudos son 20 kV para el nudo 1, el primario del transformador, y 400 V para el resto de nudos. Las redes a evaluar son: Red1_BT_Sevilla y Red2_BT_Sevilla, las cuales se muestran en las *Ilustraciones 17 y 18*.

Dichas redes muestran la estructura de las líneas de distribución aguas abajo del centro de transformación que distribuye la potencia a cada núcleo de viviendas. Dado que son zonas residenciales, los valores de los consumos serán más elevados entre las 21:00 y 00:00 horas, sin embargo, estos serán prácticamente nulos entre las 00:00 y las 06:00 horas.

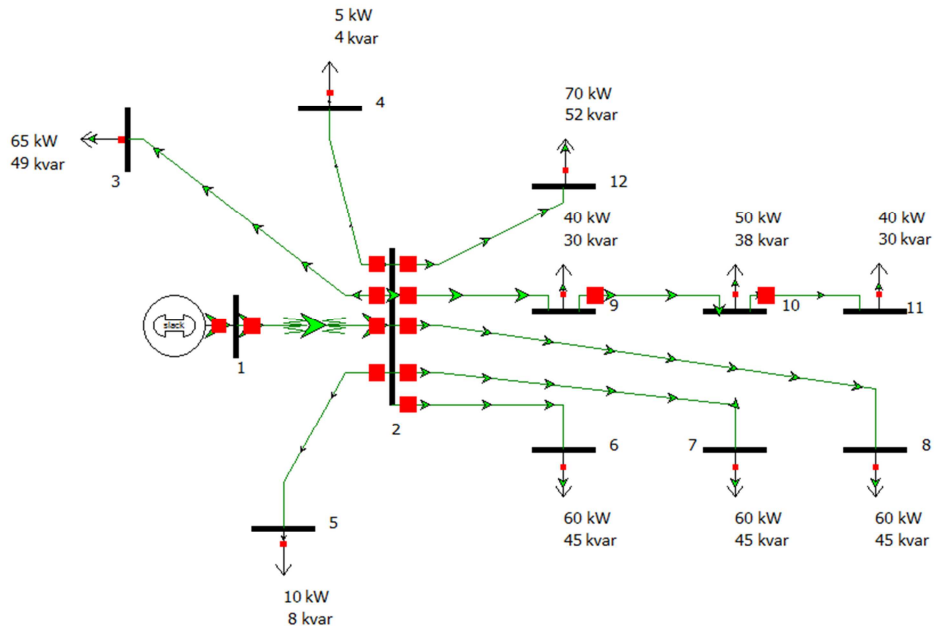


Ilustración 17: Red1_BT_Sevilla.

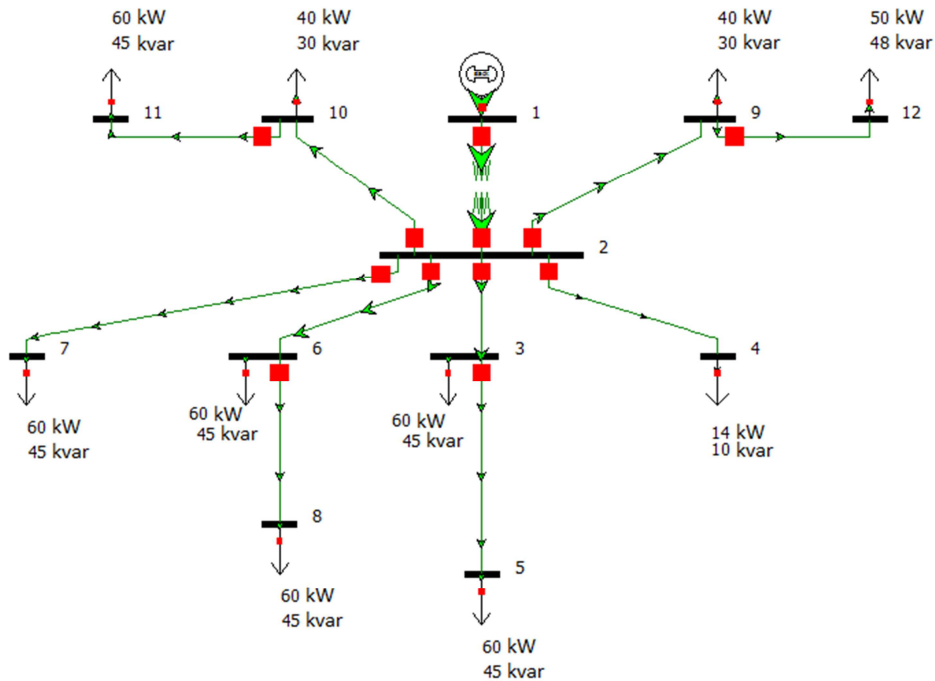


Ilustración 18: Red2_BT_Sevilla.

Se observa en ambas ilustraciones no sólo la estructura radial propia de las redes de distribución, sino además, que en las ramas de baja tensión sólo se dispone de medidas de flujo de potencia activa y reactiva en uno de los extremos. Esto se observa en las ilustraciones ya que cada línea de baja tensión dispone de cuadrado rojo en uno sólo de los extremos de las líneas, indicando que se dispone de medidas de flujo de potencia activa y reactiva en el extremo donde se sitúe dicha figura. Cabe destacar, que con el fin de representar la realidad con mayor exactitud, el transformador dispone de dichas medidas en ambos extremos.

Por otro lado, aunque la estructura de ambas redes son prácticamente idénticas, la principal diferencia entre ambas reside en el valor de los parámetros resistivos e inductivos de las líneas, en torno a 0.015Ω y 0.0089Ω respectivamente.

Finalmente, se realizan los ensayos siguiendo la misma pauta que en apartados anteriores, obteniéndose los resultados que se muestran en la *Tabla 17*. En estos escenarios, el nivel de carga de los transformadores se encuentra entre a un 55% y 60 %, respectivamente de su potencia nominal máxima.

Tabla 17: RN Red1_BT_Sevilla y Red2_BT_Sevilla.

Red1_BT_Sevilla		Red2_BT_Sevilla	
	RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,4
Q1-2	0,6	Q1-2	0,4
Q9	0,2	Q6	0,1
Q10	0,1	Q3	0,1
Q12	0,1	Q10	0,1
Q2-12	0,1	Q9	0,1

La *Tabla 17* recoge las medidas de las redes con mayores residuos normalizados resultantes de la estimación de estado de cada una de las redes. Las dos primeras columnas hacen referencia a las medidas y sus correspondientes residuos para la red 'Red1_BT_Sevilla', mientras que las dos siguientes, a la red 'Red2_BT_sevilla'.

Al igual que ocurre con las redes de alta-media tensión, los residuos normalizados, obtenidos de las pertinentes estimaciones, presentan residuos normalizados del mismo orden de magnitud, no superando el límite de 0.8. Por ello, en baja tensión, el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores tiene un impacto reducido sobre la herramienta de estimación, al menos para un nivel de carga que no sea bajo.

Por otro lado, cabe destacar que las medidas con mayor residuo normalizado están relacionadas con la rama en la que se encuentra el transformador donde no se han considerado las pérdidas en la rama de magnetización, Q1 y Q1-2 en ambas redes. Por tanto, a priori, parece que las medidas más sensibles a este efecto están relacionadas con la rama del transformador y con la potencia reactiva, ya sean flujo o inyecciones.

5.2. Efecto del Nivel de Carga

Hasta ahora, tras los resultados obtenidos en los ensayos previos, todo parece indicar que independientemente del tipo de red, las pérdidas en la rama de magnetización no presentan un efecto considerable en la estimación de estado. Es decir, los valores de los residuos normalizados obtenidos tienen un orden de magnitud similar a los que se obtendrían si se considerase ruido en las medidas, siempre que el nivel de carga de los transformadores se encuentre entre un 50-65% de su potencia nominal.

No obstante, ¿puede existir algún estado de carga en el dichas redes presenten residuos normalizados que excedan el límite de medida errónea?

El objetivo de este apartado es evaluar las redes previstas en el apartado anterior, sujetas a modificaciones en los estados de carga. Estos estados toman como referencia el estado normal de carga establecido por la organización IEEE, definiendo un 10% del estado normal como un estado prácticamente descargado y, un 50% superior al estado normal de carga como un escenario muy cargado.

En el estado de carga normal, la potencia que circula por los transformadores es entre un 50-65% la potencia nominal de los mismos.

5.2.1 Redes de Alta-Media Tensión

Al igual que el apartado anterior, las redes a evaluar según los diferentes niveles de carga son las redes IEEE14, IEEE24 y la red de Kundur, correspondientes a las *Ilustraciones 11, 13 y 14*.

5.2.1.1 Red IEEE14

En primer lugar, se evaluará en la red IEEE14 de forma comparativa el efecto que tiene variar el nivel de carga, aumentándolo un 50% y disminuyéndolo hasta un 10% del estado de carga normal definido por la organización IEEE. De esta forma, se podrá verificar si en casos extremos pudiera tener alguna relevancia no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de red en estimación de estado.

Tabla 18: RN de la red IEEE14 según nivel de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q5	0,2	Q9-4	0,4	Q4	2,4
Q9-4	0,2	Q5	0,3	Q6	2,3
P6	0,2	Q6	0,3	Q5-2	2,0
Q6	0,2	P6	0,2	Q9	1,9
Q4-2	0,1	Q4-9	0,2	Q10	1,7
P9	0,1	Q4	0,2	Q2	1,7

La *Tabla 18* refleja los resultados obtenidos de las tres estimaciones de estado; las dos primeras columnas muestran las medidas y sus residuos normalizados consecuencia de no considerar la rama de magnetización para el estado de carga elevado, las dos siguientes para el estado normal de carga definido por IEEE y, finalmente, las dos últimas para el estado de carga bajo.

Los resultados reflejan una tendencia ascendente de los valores de los residuos conforme disminuye el nivel de carga. Esto es, cuando la red está muy cargada, es menos sensible al efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, mientras que, cuando el estado de carga es bajo, los residuos son más significativos.

Cuando el nivel de carga de la red es un 50% superior al estado de carga normal, el efecto de no considerar la rama de magnetización en los transformadores es reducido, ya que los residuos normalizados máximos no superan el valor de 0.2. Por otro lado, en un estado de carga de operación normal, aunque los residuos máximos doblan su valor, estos se siguen encontrando por debajo del límite de 0.8 definido en la *Ilustración 12*, por lo que el efecto antes mencionado sigue siendo reducido.

No obstante, cuando el estado de operación presenta un nivel de carga reducido, el efecto de no considerar dicha rama en el modelo topológico de la red del estimador tiene como consecuencia residuos normalizados elevados, los cuales oscilan entre 1.5 y 2.5. Esto da lugar a que esta no consideración contamine en gran medida el estado estimado, siendo el efecto de esta no consideración relevante en la precisión de la herramienta de estimación.

También cabe destacar que las medidas con mayores valores de los residuos normalizados corresponden a aquellas ramas que representan a transformadores, incluyéndose aquellos nudos en los que se encuentren conectados a un transformador. Además, el tipo de medidas más afectado por este fenómeno es la potencia reactiva.

5.2.1.2 Red IEEE24

A continuación se realizan los mismos ensayos del apartado anterior con otra red de similares características, aunque distintos valores de tensiones, la red IEEE24. De igual forma, se someterá a un estado de carga en el que se aumentan la generación y las cargas un 50%, y a otro en el que se disminuyen las mismas hasta un 10% del estado de cargas que define IEEE. Por ello, de forma comparativa con el estado normal de carga, se

muestran los residuos normalizados obtenidos al no considerar la rama de magnetización en la *Tabla 19*.

Tabla 19: RN de la red IEEE24 según nivel de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q10	0,2	Q3	0,2	Q15	1,5
Q9-12	0,2	Q15	0,2	Q3	1,5
Q10-12	0,1	Q3-24	0,2	P10	1,1
Q10-11	0,1	P10	0,1	Q10	0,9
Q5	0,1	P3	0,1	Q22-17	0,9
Q6-10	0,1	Q24-3	0,1	Q13	0,8

Observando los resultados obtenidos en la *Tabla 19* que cuando el nivel de carga de la red es más elevado, o el estado de operación es el definido por IEEE (estado normal), los residuos normalizados resultantes de no considerar la rama de magnetización son iguales o inferiores a 0.2, lo cual implica que en estas dos situaciones, no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red en la estimación de estado tiene un efecto mínimo, por lo que esto no es relevante.

Sin embargo, al disminuir notablemente el nivel de carga, estos residuos aumentan considerablemente, llegando a un máximo de RN= 1.5. En este escenario descargado, el efecto de no considerar dicha rama es importante debido al elevado valor de residuos normalizados asignado a medidas que a priori son exactas. Es decir, el estado estimado queda notablemente contaminado.

En ninguno de los casos estudiados los residuos normalizados superan el límite de medida errónea, independientemente del nivel de carga de la red.

Al igual que en el apartado anterior, destaca que las medidas con mayores valores de los residuos normalizados corresponden a aquellas ramas que representan a transformadores, incluyéndose aquellos nudos en los que se encuentren conectados a un transformador. Además, el tipo de medidas más afectado por este fenómeno es la potencia reactiva.

5.2.1.3 Red Kundur

Finalmente, con objeto de comparar las mismas redes que en los apartados previos, se repiten los mismos ensayos con la red de Kundur (ver *Ilustración 14*). Los niveles de carga considerados en los estados a comparar son los mismos definidos en los dos apartados anteriores, un 50% superior y un 10% del nivel de carga normal.

Tras realizar los ensayos, los resultados se reflejan en la *Tabla 20*:

Tabla 20: RN de la red Kundur según nivel de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q4	0,3	Q4	0,3	Q4	1,4
Q4-10	0,3	Q4-10	0,3	Q4-10	1,4
Q10-4	0,1	Q9-10,0	0,1	Q6-2	0,5
Q10-9,0	0,1	Q9-10,1	0,1	Q9-10,0	0,4
Q10-9,1	0,1	Q1	0,1	Q9-10,1	0,4
Q9-10,0	0,1	Q1-5	0,1	Q2	0,4

La *Tabla 20* recoge las medidas con mayores residuos normalizados consecuencia de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado. En este escenario, el efecto de no considerar la rama de magnetización sigue la misma tendencia que en los apartados anteriores, es decir, cuando el estado de operación de la red es el definido en el *apartado 5* o este es un 50% superior, el efecto de no considerar dicha rama tiene un efecto poco relevante, mientras que, cuando la red se encuentra con bajo nivel de carga, el efecto es mucho más notorio.

De hecho, en los escenarios con mayor nivel de carga, los residuos normalizados máximos oscilan el valor de 0.3, mientras que en la situación de menor carga, los máximos llegan a 1.4.

Por tanto, puede concluirse que, para redes de alta-media tensión, no considerar la rama de magnetización tiene un efecto reseñable si y sólo si el estado de carga de la red es bajo.

5.2.2 Redes de Media Tensión

Hasta ahora se ha concluido que en redes de alta o alta-media tensión, no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en los transformadores en el modelo topológico de la red no tiene un carácter relevante en el proceso de estimación de estado. Esto puede ser debido en gran medida al valor de los parámetros de dicha rama, efecto que se estudiará en apartados posteriores.

Sin embargo, con el fin de seguir con la tendencia de este análisis, se procede a evaluar una red de media tensión que incorpora los transformadores de los centros de transformación (CT). Aguas debajo de dichos centros, se encontrarían las redes de distribución de baja tensión, las cuales no se contemplan en este apartado.

Por tanto, con el propósito de analizar el impacto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en redes de media tensión que contemplan los CTs, se plantea analizar la red de la *Ilustración 15* desde distintos niveles de carga.

Nota: Se recuerda que el nivel de carga de los transformadores se encuentra entre un 50 y 65% de su potencia nominal.

Por otro lado, también se realiza el ensayo sobre la red que incluye generación distribuida correspondiente a la *Ilustración 16*. El estado de carga en condiciones normales de operación es el que se define en la propia *Ilustración*.

5.2.2.1 Red de Transformadores MT y BT.

En este ensayo se espera que, al considerar los transformadores de los CTs, los residuos normalizados aumenten cuando el nivel de carga es mucho menor al de operación normal. Según los ensayos previos realizados en el *apartado 2*, los residuos normalizados obtenidos al no considerar la rama de magnetización en estos transformadores son más significativos cuando la red se encuentra prácticamente descargada.

Tabla 21: RN de una red MT-BT según niveles de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q22	0,5	Q22	0,8	Q20	5,8
Q22-21	0,5	Q22-21	0,8	Q20-19	5,8
Q20	0,5	Q20	0,8	Q22	5,8
Q20-19	0,5	Q20-19	0,8	Q22-21	5,8
Q14	0,4	Q18	0,6	Q21-22	5,6
Q14-6	0,4	Q18-10	0,6	Q19-20	5,6

Observando los resultados obtenidos en la *Tabla 21*, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización son mucho más notables que en redes de alta-media tensión. Cuanto menor es el nivel de carga, mayor es el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador, ya que los residuos normalizados, consecuencia de la estimación de estado, aumentan.

Analizando con mayor detalle el estado normal de carga, correspondiente a las columnas 3 y 4 de la *Tabla 21*, los residuos normalizados llegan a valores máximos de 0.8, lo cual da lugar a que el efecto de no considerar la rama de magnetización comience a ser importante, ya que el estado estimado presenta cierto grado de contaminación. Si se aumenta el nivel de carga, columnas 1 y 2, los residuos normalizados disminuyen, dando lugar residuos máximos de valor 0.5. En esta situación, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización es poco relevante.

Se aprecia que en estas dos situaciones descritas, dichos residuos no superan el límite de medida errónea (RN=3). Sin embargo, cuando el estado se encuentra con bajo nivel de carga, los residuos normalizados aumentan considerablemente, superando incluso el límite de medida errónea, con máximos residuos de valor 5.8, lo cual da lugar a que muchas medidas se consideren erróneas cuando realmente no lo son.

Se concluye que, en las redes que contemplan transformadores de media tensión, el efecto de no considerar la rama de magnetización cuando el nivel de carga es bajo, contamina el análisis de la estimación de estado, ya que muchas de medidas presentan residuos normalizados por encima del valor límite de medida errónea, 3. En cualquier otro estado de carga distinto el efecto no es tan relevante.

Nota: Es importante destacar que estas medidas con $RN \geq 3$ no son erróneas, ya que se han obtenido de un reparto de cargas sin ruido ni modificación de las mismas. El efecto de no considerar la rama de magnetización es lo que hace que el estimador asigne unos residuos normalizados.

Por otro lado se elabora una gráfica en la que se muestra el valor del residuo normalizado máximo para cada uno de los estados de carga comprendidos entre los casos extremos analizados, (ver *Ilustración 19*).

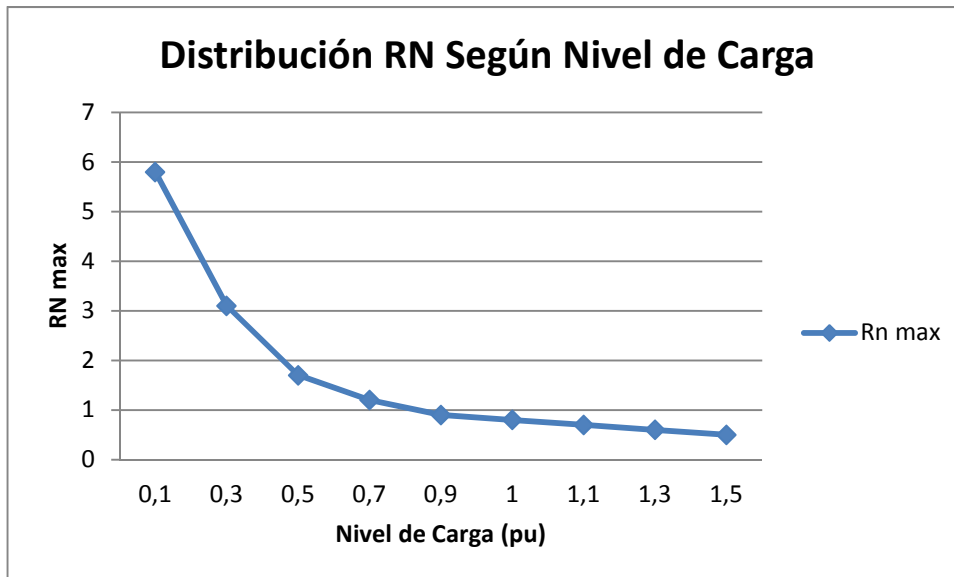


Ilustración 19: Distribución del RN max según el nivel de carga de la red MT-BT.

Se destaca de la *Ilustración 19* que el residuo normalizado máximo se obtiene con el menor nivel de carga, tendiendo este a disminuir conforme la red transporta mayor potencia. Se aprecia además que, para estados de carga por debajo de un 30% de las condiciones normales de explotación, los residuos normalizados se encuentran por encima del límite de medida errónea. Además, para niveles de carga inferiores al 80% de las condiciones de operación definidas en el *apartado 5.1.2*, el hecho de no considerar la rama de magnetización de los transformadores genera residuos superiores a la unidad, lo cual contamina en mayor o menor medida el estado estimado.

Nota: La medida con RN máximo no necesariamente es la misma medida, ya que como se aprecia en la *Tabla 21*, esta medida varía.

5.2.2.2 Red MT Generación Distribuida

De forma similar al apartado anterior se procede a realizar el mismo análisis con la red Red MT Generación Distribuida. En primer lugar se analiza el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, obteniéndose los resultados que se reflejan en la *Tabla 22*.

Tabla 22: RN de la red MT Generación Distribuida según niveles de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q9-32	0,7	Q9-32	1,6	Q9-32	13,4
Q26	0,6	Q26	1,3	Q20-21	12,1
Q26-17	0,6	Q26-17	1,3	Q6-30	12,0
Q6-30	0,6	Q6-30	1,3	Q4-28	11,7
Q18	0,5	Q18	1,2	Q24	11,7
Q5-29	0,5	Q4-28	1,2	Q24-16	11,7

Analizando los resultados de la *Tabla 22* con mayor detalle, se observa la misma tendencia que en apartados anteriores. Según disminuye el nivel de carga de la red, los residuos normalizados, resultados de la estimación de estado que no considera la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red, aumentan.

De hecho, cuando el nivel de carga de la red es elevado, el valor de los residuos normalizados se encuentra por debajo de 0.8, lo cual implica que el efecto de no considerar dicha rama no es muy notable en este escenario. Sin embargo, al presentar un estado de carga tal y como se define en el *apartado 5.1.2*, los residuos normalizados superan el valor citado, por lo que el estado estimado presenta un mayor grado de contaminación y, por tanto el efecto es más importante.

Cabe destacar que, en el estado normal de operación los residuos normalizados se encuentran en torno a 1.6, lo cual contamina en gran medida el proceso de estimación de estado, ya que se asignan residuos a medidas que son exactas, ya que no se tiene en cuenta ruido en las medidas.

De hecho, cuando el estado de carga de la red es el de operación normal o elevado, los residuos normalizados se encuentran por debajo del límite de medida errónea, mientras que cuando el nivel de carga es bajo, estos residuos aumentan notablemente, triplicando incluso dicho límite.

En esta última situación, no considerar la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado tiene un efecto crucial en el grado de veracidad de la estimación. Un elevado número de medidas exactas son consideradas erróneas y, dado el elevado valor que toman los residuos, el estado está altamente contaminado

Por tanto, se concluye que en redes de media tensión que consideran los transformadores de media-baja tensión, no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en la herramienta de estimación tiene un efecto altamente significativo siempre que la red se encuentre en un estado de operación descargado, mientras que ante un estado de operación tal que dichos transformadores se encuentren en torno al 60% de carga, el efecto es menos relevante, aunque sí importante.

Por otro lado, resulta interesante analizar en qué nivel de carga se obtendrían los residuos normalizados más elevados. Ello se refleja en la *Ilustración 20*.

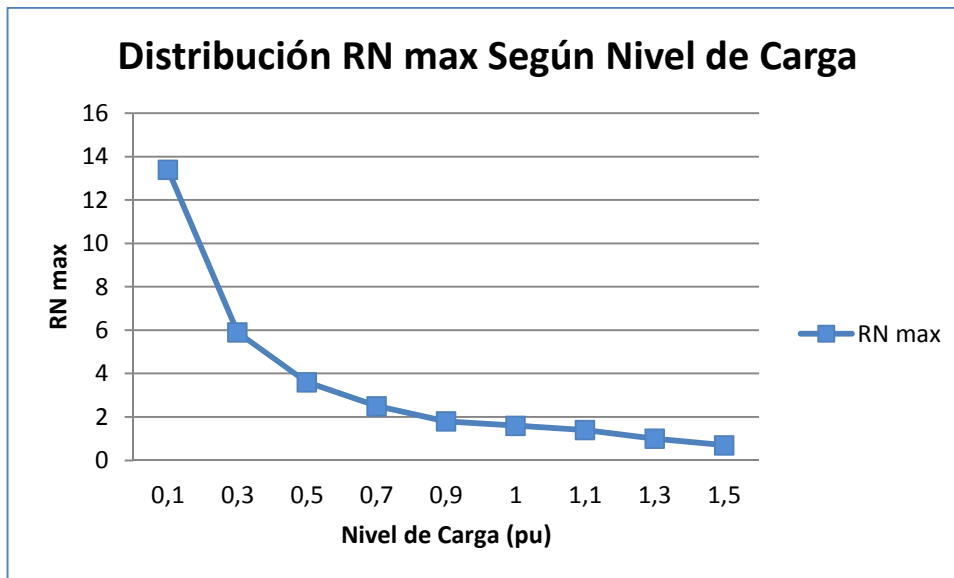


Ilustración 20: Distribución del RN máx. según el nivel de carga de la red MT Generación Distribuida.

La gráfica de la *Ilustración 20* muestra los valores de los residuos normalizados máximos según el nivel de carga de la red. Se comprueba que los máximos se obtienen para el menor nivel de carga, llegando este valor de residuo máximo a superar el límite de medida errónea cuando el nivel de carga de la red es inferior al 50% del estado normal definido. En condiciones normales de explotación, los residuos normalizados máximos se encuentran por debajo del límite de medida errónea.

Hay que tener en cuenta que, las fuentes de energía renovables no son controlables y que, el valor de potencia inyectada a la red no es constante, lo cual puede dar lugar que la potencia que circule por los transformadores que acoplan dichas fuentes a la red estén descargados en ciertos escenarios de funcionamiento. Ello tendrá como consecuencia un notable aumento de los residuos normalizados si no se consideran las pérdidas de la rama de magnetización de los transformadores. Es por ello, que en apartados posteriores se analizará el impacto que tiene la generación distribuida sobre estos escenarios.

Se destaca en el análisis de este apartado que las medidas que presentan mayores residuos normalizados son las inyecciones y flujos de las ramas correspondientes con los transformadores.

5.2.3 Redes de Baja Tensión

Finalmente, para concluir el apartado del efecto del nivel de carga, se ensayan las dos redes de distribución de baja tensión empleadas anteriormente: Red1_BT_Sevilla y Red2_BT_Sevilla. En ambas redes, el nivel de carga de los transformadores es un 55% y 60 %, respectivamente, ver *Ilustraciones 17 y 18*.

5.2.3.1 Red1_BT_Sevilla

Dada la red definida en el apartado 5.1.3, se procede a realizar los ensayos pertinentes para distintos niveles de carga. Al igual que en los apartados anteriores, se define un estado de carga elevado, un 50% superior al estado de carga definido en el apartado antes citado, y un estado de carga bajo donde el nivel de generación y consumos es un 10% del estado normal.

Posteriormente, se realiza la estimación de estado teniendo en cuenta que el modelo topológico de la red no considera las pérdidas en la rama de magnetización del transformador.

Una vez realizados los ensayos, los resultados se muestran en la *Tabla 23*:

Tabla 23: RN de la red Red1_BT_Sevilla según niveles de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q1	0,3	Q1	0,6	Q1	22,2
Q1-2	0,3	Q1-2	0,6	Q1-2	22,2
Q9	0,1	Q9	0,2	Q10	1,4
Q10	0,1	Q10	0,1	Q12	1,3
P1	0,0	Q12	0,1	Q2-12	1,3
P1-2	0,0	Q2-12	0,1	Q3	1,2

Analizando los resultados de la *Tabla 23*, se aprecia el carácter ascendente de los residuos normalizados conforme disminuye el nivel de carga. Por un lado, en el estado normal de carga, definido en el apartado 5.1.3, no considerar el efecto de la rama de magnetización en la estimación de estado no tiene un efecto significativo, ya que el valor que toman residuos normalizados es inferior al límite 0.8 definido anteriormente. Estos valores son del mismo orden de magnitud que los que se obtendrían si se considerase ruido en las medidas, por lo que no supone un impacto relevante en la estimación de estado.

De igual forma, al aumentar el nivel de carga, los residuos normalizados tienden a disminuir, los máximos alcanzan el valor de 0.3. Por tanto, el efecto de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red cuando el nivel de carga de la misma es alto es aún menos relevante.

Por otro lado, al disminuir el nivel de carga a un 10%, los residuos normalizado sí superan el límite de medida errónea (RN=3). En esta situación de red descargada, no considerar las pérdidas en la rama de magnetización tiene un efecto muy relevante, ya que se alcanzan cifras muy elevadas, llegando a valores de RN=22 para los flujos e inyección de potencia reactiva en el transformador. El resto de medidas presentan valores en torno a 1.4, lo cual reafirma la importancia de considerar la rama de magnetización de los transformadores en este tipo de escenarios ya que, el grado de contaminación del estado estimado es elevado.

A juzgar por los resultados obtenidos, en redes de baja tensión, es necesario considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador si el estado de explotación de la misma no es elevado, ya que tiene un efecto significativo. Esta situación de descarga puede

tener lugar durante las horas del día en el que los consumos de las zonas residenciales son mucho más bajo.

En la gráfica de la *Ilustración 21* se observan los valores máximos de los residuos normalizados de la red Red1_BT_Sevilla cuando se somete a distintos niveles de carga comprendidos entre el rango definido por los escenarios extremos antes comentados.

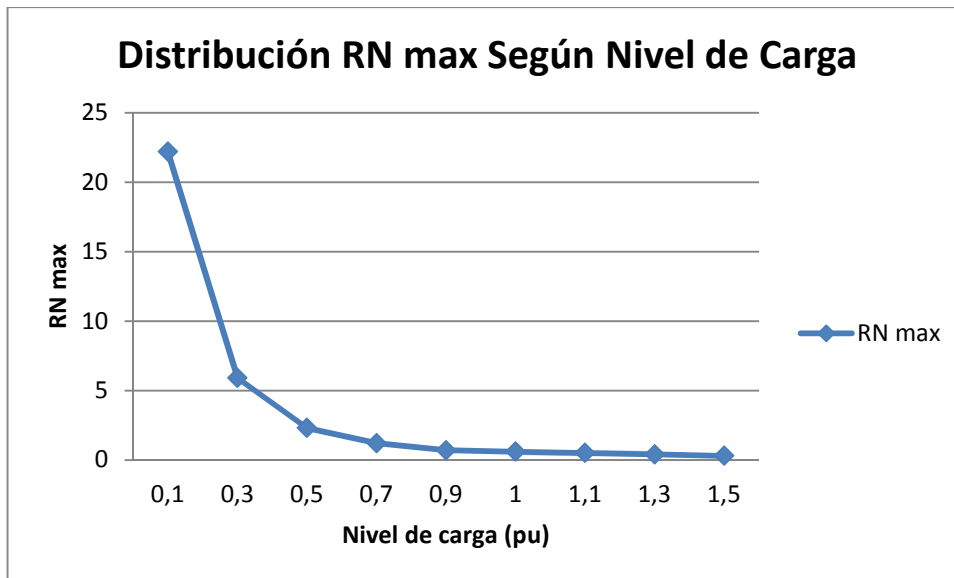


Ilustración 21: Distribución del RN máx. según el nivel de carga de la red Red1_BT_Sevilla.

La gráfica refleja claramente como para niveles de carga por debajo de 40%, los residuos normalizados máximos se encuentran por encima del límite de medida errónea, mientras que, para niveles de carga superiores, no se supera, tendiendo a decrecer exponencialmente. En el caso de redes de baja tensión el máximo valor de los residuos normalizados se encuentra cuanto menor es el nivel de carga. También puede observarse que para niveles de carga de un 70% del estado de operación normal, los residuos normalizados superan el valor unidad, por lo que el estado estimado presenta un nivel de contaminación significativo.

Por tanto, se deduce que en redes de distribución siempre que el nivel de carga sea bajo, será conveniente considerar el efecto de las pérdidas en la rama de magnetización en los transformadores.

Las medidas que presentan mayores residuos normalizados son aquellas que se corresponden con las inyecciones y flujos de potencia reactiva en las ramas de transformadores.

5.2.3.2 Red2_BT_Sevilla

De igual modo que en el apartado anterior, se simulan los mismos escenarios anteriores para la red Red2_BT_Sevilla. A priori, se esperan obtener resultados similares que corroboren las conclusiones antes obtenidas.

Tabla 24: RN de la red Red2_BT_Sevilla según niveles de carga.

Niv carga alto (x1,5)		Normal		Niv carga bajo (x0,1)	
	RN		RN		RN
Q1	0,2	Q1	0,4	Q1	18,9
Q1-2	0,2	Q1-2	0,4	Q1-2	18,9
Q6	0,1	Q6	0,1	Q6	2,9
Q3	0,1	Q3	0,1	Q3	2,8
Q10	0,1	Q10	0,1	Q7	1,2
Q9	0,0	Q9	0,1	Q2-7	1,2

Si se observan los resultados obtenidos de los ensayos que se reflejan en la *Tabla 24*, se aprecia no sólo la misma tendencia de los residuos que en el apartado anterior, sino también, que estos son del mismo orden de magnitud, por tanto, se verifican las conclusiones antes obtenidas. Si la red presenta un estado de carga bajo, el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en la herramienta de estimación de estado tendrá un efecto muy relevante, contaminando la validez del mismo en cuanto a la consideración de medidas erróneas y asignación de residuos normalizados se refiere.

Sin embargo, cuando el nivel de carga aumenta, los residuos normalizados se encuentran por muy debajo del límite de 0.8, por tanto, el efecto de no considerar dicha rama no es tan relevante.

Por otro lado, se observa que las medidas que presentan mayores residuos normalizados se corresponden con aquellas ramas asignadas a transformadores. Además, cuando los residuos normalizados superan el límite de medida errónea, estas medidas se corresponden con flujos e inyecciones de potencia reactiva.

Con objeto de conocer a qué nivel de carga se obtienen los mayores residuos normalizados, se representa el valor del residuo normalizado máximo para cada nivel de carga en la gráfica de la *Ilustración 22*.

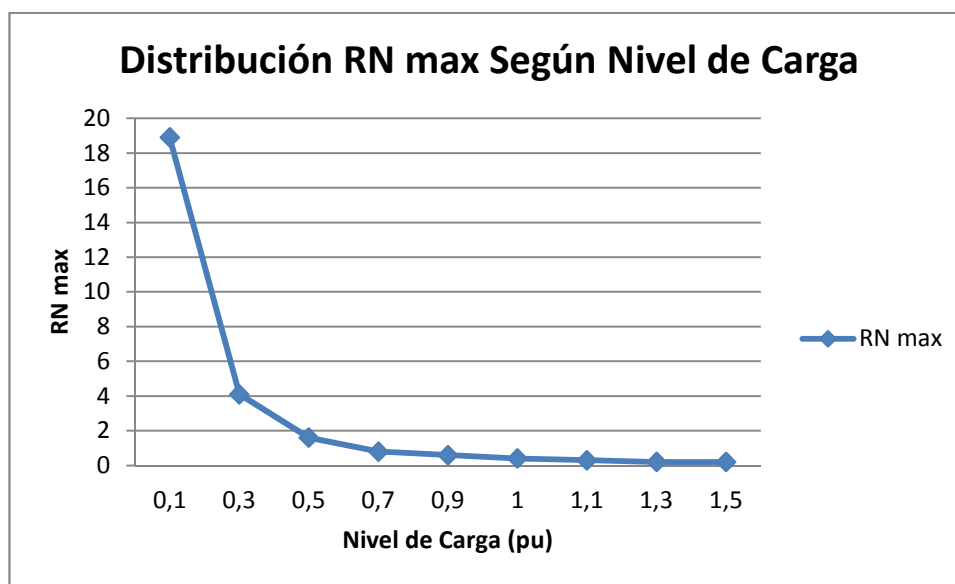


Ilustración 22: Distribución del RN máx. según el nivel de carga de la red Red2_BT_Sevilla.

La gráfica de la *Ilustración 22* es similar a la del apartado anterior, ya que presenta la misma tendencia decreciente exponencial conforme aumenta el nivel de carga. De hecho, para niveles de carga inferiores al 30% del que se define originalmente, los residuos normalizados superan el límite de medida errónea, mientras que para niveles superiores, los residuos disminuyen, mitigando el efecto de no considerar la rama de magnetización. El máximo valor de los residuos se obtiene para el menor nivel de carga, al igual que en la red del ensayo anterior. Al igual que en la gráfica del apartado anterior, cuando el nivel de carga es inferior al 70% del estado de operación normal definido, los residuos normalizados presentan un valor superior a 0.8, lo cual indica que el grado de contaminación del estado estimado empieza a ser importante y se requiere que la herramienta de estimación contemple la rama de magnetización de los transformadores.

A juzgar por los resultados obtenidos, siempre que el nivel de carga de la red de baja tensión sea descargado, el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimado será relevante, ya que se consideran erróneas una serie de medidas que no lo son.

Al igual que ocurría en los apartados anteriores, las medidas que presentan mayores residuos normalizados son los flujos e inyecciones de las ramas correspondientes a transformadores.

5.3. Efecto del Valor de Tensión

En este apartado se plantea analizar cómo afecta no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador de estado cuando la red se encuentra en un estado tal que los niveles máximos de tensión en los nudos es 1.1 pu y, un estado en el que los niveles mínimos son 0.9 pu.

Siguiendo la misma tendencia que en los ensayos previos, se someten a análisis redes de alta-media tensión y de baja.

El nivel de carga de los transformadores se encuentra entre un 50-65% en todos los escenarios planteados.

5.3.1 Redes de Alta-Media Tensión

La red a evaluar en este apartado será la red IEEE14, la cual se muestra en la *Ilustración 11*.

Para llevar a cabo las pertinentes simulaciones, se mantiene el mismo nivel de carga que establece la organización IEEE para dicha red. La única diferencia reside en que en el momento de obtener el conjunto completo de medidas, mediante reparto de cargas, se supone que la tensión del nudo de referencia toma el valor máximo de 1.1, mientras que, para el caso de tensiones mínimas de 0.9, se supone que la tensión de dicho nudo toma el valor de 0.95, cerciorándose así que la mínima tensión del resto de nudos es 0.9.

Tras realizar las simulaciones correspondientes, los resultados se muestran en la *Tabla 25*.

Tabla 25: RN de la red IEEE14 según valores de tensión de los nudos.

Normal		Tensiones altas (1,1 max)		Tensiones bajas (0,9 min)	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,4	Q9-4	0,4	Q9-4	0,3
Q5	0,3	Q5	0,4	Q5	0,3
Q6	0,3	Q6	0,3	P6	0,2
P6	0,2	Q4	0,2	Q6	0,2
Q4-9	0,2	P6	0,2	Q4	0,2
Q4-9	0,2	Q4-9	0,2	P5	0,1

La *Tabla 25* representa las medidas y los residuos normalizados cuando se ensayan los dos estados antes comentados, además del normal, el que presenta IEEE. Las dos primeras columnas se corresponden con dicho estado normal, mientras que las dos siguientes al estado de tensiones máximas 1.1 pu. Finalmente, las dos últimas, hacen referencia al de tensiones mínimas 0.9 pu.

Tras haber realizado los ensayos previos, se podía concluir que el efecto de no considerar la rama de magnetización en redes de alta-media tensión no tiene un efecto apreciable en la estimación de estado ya que los residuos obtenidos eran muy pequeños, salvo que el nivel de carga fuese bajo. En estos nuevos ensayos, los resultados no presentan relevancia alguna en cuanto a residuos normalizados se refiere. No sólo tiene el mismo orden de magnitud que en los ensayos anteriores, sino que además, la variación es prácticamente nula, e inapreciable si se considerase el efecto del ruido en las medidas.

Se puede observar un leve descenso de los residuos normalizados en el escenario de tensiones bajas con respecto al escenario normal. Sin embargo, en el caso de tensiones altas, los residuos normalizados aumentan, aunque las diferencias son mínimas.

También se aprecia que las medidas con mayores residuos normalizados corresponden con los flujos e inyecciones de potencia reactiva de los transformadores.

5.3.2 Redes de Media Tensión

Por otro lado, también se evalúa el impacto que tiene el valor de la tensión de los nudos en redes de media tensión. Dado que en estas redes las circunstancias podrán variar según la red, se realizarán ensayos en la red de transformadores (*Ilustración 15*) y en la red de generación distribuida (*Ilustración 16*).

Para analizar el impacto que tienen tensiones altas en los nudos, se establece como criterio que el nivel máximo de tensión en los nudos será 1.1, mientras que, para valores de tensiones bajas se toma como criterio que el mínimo nivel de tensión admisible será 0.9.

Para obtener las tensiones de los nudos se modifica la tensión del nudo de referencia en el reparto de cargas que obtiene el conjunto completo de medidas. En el caso de tensiones elevadas se considera la tensión del nudo Slack igual a 1.1 y 0.95 para el caso de tensiones bajas.

5.3.2.1 Red de Transformadores MT_BT

En primer lugar, se ensaya con la red Red de Transformadores MT_BT, la cual se muestra en la *Ilustración 15*. Tal y como se comentó anteriormente, se analiza el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores cuando los valores de tensión de los nudos oscilan en torno a 1.1 pu como máximo y 0.9 pu como mínimo.

La *Tabla 26* ilustra de forma comparativa con el escenario normal antes ensayado cómo son los residuos normalizados consecuentes de la estimación de estado que no considera la rama en paralelo de los transformadores.

Tabla 26: RN de la red Red de Transformadores MT_BT según valores de tensión de los nudos.

Normal		Tensiones altas (1,1 max)		Tensiones bajas (0,9 min)	
	RN		RN		RN
Q22	0,8	Q20	1,0	Q22	0,7
Q22-21	0,8	Q20-19	1,0	Q22-21	0,7
Q20	0,8	Q22	1,0	Q20	0,7
Q20-19	0,8	Q22-21	1,0	Q20-19	0,7
Q18	0,6	Q14	0,8	Q18	0,5
Q18-10	0,6	Q14-6	0,8	Q18-10	0,5

La *Tabla 26* refleja el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en el modelo topológico de estimación de estado en distintos escenarios con valores de tensiones normales (próximos a 1 pu), con tensiones cercanas a 1.1 y bajas próximas a 0.9.

Se observa que cuando los valores de tensión son cercanos a la unidad, los residuos normalizados obtenidos se encuentran en torno al límite de 0.8, por tanto, empieza a ser importante el hecho de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado.

Por otro lado, el escenario en el que los valores de la tensión en los nudos excede el valor unidad, da lugar a un incremento de los residuos normalizados, es decir, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización aunque es algo más relevante con respecto al caso normal. Lo cual implica que no considerar dicha rama implica que el estado estimado presenta cierto grado de contaminación.

El efecto se mitiga cuando los valores de tensión de los nudos son más pequeños. Tal y como recoge la *Tabla 26*, los valores de los residuos normalizados máximos llegan a 0.7, mientras que en el caso de valores de tensiones normales, estos eran 0.8. En este escenario aunque los residuos máximos están cerca del límite de 0.8, no llegan ni superan dicho valor, por lo que en esta situación el efecto de la no consideración de la rama de

magnetización no es tan importante como en los otros dos escenarios.

Se observa, además, que las medidas que presentan mayores residuos normalizados se corresponden con flujos e inyecciones de potencia reactiva de las ramas que representan a transformadores.

5.3.2.2 Red con Generación Distribuida MT

En los ensayos anteriormente realizados, se observó que no considerar la rama de magnetización en las redes de media tensión que consideran los transformadores de media-baja, no siempre da lugar a residuos normalizados que superen el límite de residuo normalizado de 0.8. Por tanto, se realizan ensayos con la red Red de Generación Distribuida MT que se muestra en la *Ilustración 16*. El objetivo es corroborar si los residuos siguen la misma tendencia.

Tras realizar los ensayos, siguiendo el mismo criterio que en el apartado anterior, la *Tabla 27* recoge los resultados obtenidos de los mismos.

Tabla 27: RN de la red Red con Generación Distribuida según valores de tensión de los nudos.

Normal		Tensiones altas (1,1 max)		Tensiones bajas (0,9 min)	
	RN		RN		RN
Q9-32	1,6	Q9-32	2,2	Q9-32	1,2
Q26	1,3	Q26	1,8	Q26	1,0
Q26-17	1,3	Q26-17	1,8	Q26-17	1,0
Q6-30	1,3	Q6-30	1,8	Q6-30	1,0
Q18	1,3	Q18	1,7	Q18	1,0
Q4-28	1,2	Q4-28	1,7	Q4-28	0,9

En esta red, para un caso normal de explotación y valores de tensión próximos a la unidad, el efecto de no considerar la rama de magnetización significativo, ya que los valores de los residuos normalizados oscilan en torno a 1.6 de máximo. Hay que tener en consideración que, aunque los residuos normalizados obtenidos se encuentran por debajo del límite de medida errónea, se contamina la veracidad de la estimación de estado, ya que, pese a no considerar ruido en las medidas, se obtienen residuos normalizados del orden de la mitad del límite de medida errónea.

En estos ensayos, si se observan los resultados de la *Tabla 27*, los residuos normalizados aumentan si las tensiones son próximas a 1.1 pu, mientras que, disminuyen cuando son cercanas a 0.9 pu. En cualquier caso no se obtienen residuos normalizados que superen el límite de $RN \geq 3$, sin embargo, el grado de contaminación de las medidas es un aspecto a considerar.

Dados los dos ensayos realizados en redes de media tensión, aumentar los valores de tensión origina un aumento de los residuos normalizados, consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en el modelo topológico de la red en estimación de estado. De hecho, los residuos aumentan un 50% aproximadamente, lo que da lugar a que no considerar dicha rama en estimación de estado tenga un

efecto relevante.

Por su parte, disminuir estos valores de tensión, tiene como consecuencia una disminución de los residuos normalizados obtenidos con respecto al estado de tensiones unitarias. Estos residuos sí superan el límite de 0.8, al contrario que en el caso anterior, por lo que no siempre puede determinarse que valores de tensiones próximos a 0.9 de lugar a que el mencionado efecto no sea importante, ya que pueden existir escenarios en los que el estado estimado quede contaminado.

Se destaca que los residuos normalizados, consecuencia de no considerar la rama de magnetización en los transformadores, son siempre inyecciones y flujos de potencia reactiva en aquellas ramas correspondiente con transformadores.

5.3.3 Redes de Baja Tensión

De igual modo, se plantea el mismo ensayo del apartado anterior para una red de baja tensión. Concretamente, se ensaya con la red Red1_BT_Sevilla, la cual se observa en la *Ilustración 17*. Dado que las redes de baja tensión presentan el mismo comportamiento y los residuos son del mismo orden de magnitud, sólo se realizará el ensayo con una de ellas.

El criterio de análisis tomado en este apartado es similar al anterior, estableciendo los límites máximos y mínimos en 1.1 y 0.9 pu respectivamente.

Tabla 28: RN de la red Red1_BT_Sevilla según valores de tensión de los nudos.

Normal		Tensiones altas (1,1 max)		Tensiones bajas (0,9 min)	
	RN		RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,9	Q1	0,4
Q1-2	0,6	Q1-2	0,9	Q1-2	0,4
Q9	0,2	Q9	0,5	Q9	0,2
Q10	0,1	Q10	0,2	Q10	0,1
Q12	0,1	Q12	0,2	Q12	0,1
Q2-12	0,1	Q2-12	0,1	Q2-12	0,1

La *Tabla 28*, refleja los resultados obtenidos en los ensayos realizados, siguiendo la misma estructura que en el apartado anterior. En los ensayos anteriores en redes de distribución de baja tensión se observaba que no considerar las pérdidas en la rama de magnetización no tenía un efecto importante en la estimación de estado, ya que no se superaba el valor límite de medida errónea y dichos residuos no llegaban a la unidad. En estos nuevos escenarios, los resultados son similares, no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico del estimador tampoco tiene un impacto considerable en los resultados de dicha herramienta, ya que el orden de magnitud de los residuos normalizados máximos es similar, en torno a 0.8.

Cabe destacar de estos ensayos que, un aumento de los valores de tensión de los nudos de la red tiene como consecuencia un aumento de los valores de los residuos normalizados máximos, aunque la diferencia no es

sustancial en comparación con el valor de los residuos que ya de por sí acarrea en el estado normal, se supera el límite de 0.8, por lo que el estado estimado presenta cierta contaminación. No obstante, si las tensiones de los nudos disminuyen, el efecto de no considerar las pérdidas en dicha rama también lo hará. Esta variación tampoco es significativa en comparación con el valor de los residuos obtenidos al no considerar esta rama. Estos residuos se mantienen por debajo del límite de 0.8, por lo que el efecto añadido del valor bajo de la tensión de los nudos no hace que no considerar la rama de magnetización sea relevante.

Finalmente, al igual que en todos los ensayos anteriores, siempre que el efecto de no considerar la rama de magnetización sea relevante, las medidas con mayores residuos normalizados son aquellas correspondientes a ramas que sean transformadores. Además, estas son de flujo o inyección de potencia reactiva.

5.4. Efecto del Valor de los Parámetros de la Rama de Magnetización

Otro parámetro significativo en la estimación de estado planteada, es el valor que tome tanto la resistencia de pérdidas en el hierro como la reactancia de magnetización. Es decir, según el valor de los parámetros de la rama de magnetización, se podrían obtener mayores o menores residuos normalizados al no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico del estimador de estado.

Si se observa de nuevo la *Ilustración 3*, se observa que cuando mayor sea R_{fe} y X_m , menor es la conductancia y susceptancia de la rama de magnetización. Estos son los parámetros que se introducen en el estimador, por tanto, cabe esperar que el efecto sea menor cuanto menor sean estos últimos parámetros.

En este apartado, se pretende analizar el efecto que tiene el valor de R_{fe} y X_m en la estimación de estado en redes de alta-media tensión, donde a priori, no cabe esperar un efecto muy notable, redes de media, que consideran los transformadores de media-baja tensión, y de baja tensión, donde el efecto se espera que el efecto sea mucho más relevante.

Durante estos ensayos, el nivel de carga de los transformadores de la red se encuentra entre un 50-65% de su potencia nominal.

5.4.1 Redes de Alta-media Tensión

Al igual que en los apartados anteriores, se pretende analizar la red IEEE14 (ver *Ilustración 11*), pero para distintos valores de los parámetros de la rama de magnetización de los transformadores. Se analizará de forma comparativa el efecto de no considerar las pérdidas en dicha rama cuando ambos parámetros de la rama de magnetización varían un 50% aumentando y disminuyendo esa cantidad.

También se analiza que la resistencia de pérdidas en el hierro aumenta y disminuye un 50%, mientras que la reactancia de magnetización permanece inalterada, con respecto a la situación normal definida por IEEE. De

igual forma se procede modificando la reactancia de magnetización manteniendo intacta la resistencia de pérdidas en el hierro. Este análisis no sólo permite evaluar qué impacto tiene modificar ambos parámetros, sino determinar cual tiene mayor relevancia.

Por otro lado, se contempla realizar un ensayo que sólo tenga en cuenta uno de los parámetros de la rama de magnetización, para así corroborar si el efecto sería el mismo que considerando ambos.

En primer lugar, se analiza el efecto que tiene variar ambos parámetros de la rama de magnetización de los transformadores de forma comparativa con el caso en el que no se modifican estos parámetros, cuando no se consideran las pérdidas en dicha rama.

Tabla 29: RN de la red IEEE14 cuando se modifica R_{fe} y X_m .

R_{fe} y X_m Normal		R_{fe} y X_m *1,5		R_{fe} y X_m *0,5	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,4	Q9-4	0,2	Q9-4	0,7
Q5	0,3	Q5	0,2	Q5	0,6
Q6	0,3	Q6	0,2	Q6	0,5
P6	0,2	P6	0,1	P6	0,4
Q4-9	0,2	Q4-9	0,1	Q4-9	0,4
Q4	0,2	Q4	0,1	Q4	0,4

La *Tabla 29* recoge los resultados de realizar estos ensayos. Las dos primeras columnas recogen las medidas y residuos normalizados cuando no se modifican ninguno de los parámetros de la rama de magnetización, las dos siguientes, cuando se han aumentado un 50% y, las dos últimas, cuando se ha disminuido.

Se puede observar que, tal y como cabía esperar, un aumento de los parámetros de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización tiene como consecuencia una disminución de los residuos normalizados, consecuencia de no considerar la rama de magnetización en los transformadores en la estimación de estado. Sin embargo, cuando estos parámetros disminuyen, los residuos normalizados aumentan con respecto al caso en el que no se modifican R_{fe} ni X_m . En todo momento dichos residuos se encuentran por debajo del límite definido en el *apartado 5* de 0.8, por lo que no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red en estimación de estado no tiene un efecto significativo en redes de alta-media tensión cuando los parámetros de dicha rama aumentan.

Sin embargo, cuando estos parámetros disminuyen su valor, los residuos normalizados se acercan al citado límite, por lo que el estado estimado empezaría a presentar cierto grado de contaminación. Esto se debe a que al considerar valores más pequeños de estas impedancias, lo que se simula es un volumen superior de pérdidas en el hierro y de consumo de reactiva, lo cual justifica el mayor valor de los residuos normalizados.

A continuación, se realizan los ensayos modificando la resistencia de pérdidas en el hierro, aumentándola y disminuyéndola un 50%, obteniéndose los resultados que se muestran en la *Tabla 30*.

Tabla 30: RN de la red IEEE14 cuando se modifica R_{fe} .

R_{fe} y X_m Normal		$R_{fe} \times 1,5$ y X_m Normal		$R_{fe} \times 0,5$ y X_m Normal	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,4	Q9-4	0,4	Q9-4	0,3
Q5	0,3	Q5	0,3	Q5	0,3
Q6	0,3	Q6	0,3	Q6	0,3
P6	0,2	P6	0,2	P6	0,2
Q4-9	0,2	Q4-9	0,2	Q4-9	0,2
Q4	0,2	Q4	0,2	Q4	0,2

En la *Tabla 30* se muestran las medidas y los residuos normalizados correspondientes de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de estimación de estado. Las dos primeras columnas corresponden al caso inalterado, donde R_{fe} y X_m presentan los valores típicos de los parámetros de los transformadores empleados. Las dos siguientes columnas corresponden al caso en el que se aumenta la resistencia un 50%, mientras que la reactancia permanece inalterada. Finalmente, las dos últimas columnas corresponden a una disminución de la resistencia en ese mismo porcentaje, manteniendo intacta la reactancia de magnetización.

Se destaca de los tres casos como los valores de los residuos son prácticamente idénticos, sin apenas variación entre ellos. Sí se aprecia una mínima variación del residuo máximo de Q9-4 cuando el parámetro resistivo disminuye, pero no es significativa.

Dado que en los tres ensayos los valores de los residuos normalizados se mantienen por debajo del límite de 0.8, se concluye que, en redes de alta-media tensión, la modificación del parámetro resistivo de la rama de magnetización no tiene un efecto relevante, siendo del mismo orden que cuando presenta un valor normal. Es decir, que dicho parámetro sea de mayor o menor valor no tiene un impacto importante al no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red del estimador.

Por otro lado, se realiza el mismo ensayo modificando ahora el valor de la reactancia de magnetización. A priori, cabe esperar un comportamiento similar al de la resistencia.

Tabla 31: RN de la red IEEE14 cuando se modifica X_m .

R_{fe} y X_m Normal		$X_m \times 1,5$ y R Normal		$X_m \times 0,5$ y R_{fe} Normal	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,4	Q9-4	0,2	Q9-4	0,7
Q5	0,3	Q5	0,2	Q5	0,6
Q6	0,3	Q6	0,2	Q6	0,5
P6	0,2	P6	0,2	P6	0,4
Q4-9	0,2	Q4-9	0,1	Q4-9	0,4
Q4	0,2	Q4	0,1	Q4	0,4

De igual forma que en el ensayo de la resistencia de pérdidas en el hierro, en la *Tabla 31* las dos primeras columnas corresponden al caso inalterado, donde R_{fe} y X_m presentan los valores típicos de los parámetros de los transformadores empleados. Las dos siguientes columnas corresponden al caso en el que se aumenta la reactancia un 50%, mientras que la resistencia permanece inalterada. Finalmente, las dos últimas columnas

corresponden a una disminución de la reactancia en ese mismo porcentaje, manteniendo intacta la resistencia de magnetización.

En estos ensayos, la variación de los residuos normalizados obtenidos, aunque sigue sin ser significativa, ya que no se supera el límite de 0.8, sí presenta mayores diferencias. Si la reactancia de magnetización es alta, sin modificar la resistencia, los residuos normalizados disminuyen ligeramente, mientras que en el caso en el que la reactancia disminuye, los residuos aumentan. En este último escenario, los residuos normalizados se acercan al citado límite, por lo que el estado estimado empezaría a presentar cierto grado de contaminación.

Se puede observar que, además, si se comparan los resultados obtenidos de las *Tablas 29 y 31* que, los resultados son prácticamente idénticos. Es decir, los residuos normalizados, obtenidos al no considerar la rama de magnetización, cuando se modifican ambos parámetros de la rama son del mismo valor que cuando se modifica la reactancia en la misma proporción.

Por tanto, puede concluirse que en redes de alta-media tensión, aumentar o disminuir la reactancia de magnetización no tiene un efecto importante al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en la estimación de estado. No obstante, los resultados parecen indicar que la reactancia de magnetización tiene una mayor influencia que la resistencia del núcleo ferromagnético en esta no consideración de los citados parámetros en la estimación de estado.

Para corroborar esta última afirmación, se realizan dos últimos ensayos, uno en el que no se tiene en cuenta la resistencia de pérdidas en el hierro pero sí la reactancia, y otro, en el caso dual. De esta forma, se podría apreciar el impacto que tiene cada parámetro en la estimación de forma independiente.

Tabla 32: Influencia de R_{fe} o X_m en la red IEEE14.

No considera R_{fe} ni X_m		No considera X_m		No considera R_{fe}	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,4	Q9-4	0,4	P5	0,1
Q5	0,3	Q5	0,3	P5-6	0
Q6	0,3	Q6	0,3	P4	0
P6	0,2	Q4-9	0,2	P6	0
Q4-9	0,2	Q4	0,2	Q5-2	0
Q4	0,2	P6	0,2	Q1-5	0

En la *Tabla 32*, se compara el caso en el que se considera tanto R_{fe} como X_m con los casos en los que sólo se contempla uno de los parámetros en la rama de magnetización. Las columnas tres y cuatro, hacen referencia a la situación en la que para el cálculo de medidas exactas, sólo se consideró la reactancia de magnetización, por tanto, se evalúa el impacto de que el estimador no contemple en el modelo topológico de la red la reactancia de dicha rama. Por otro lado, las dos últimas columnas, contemplan la situación dual, en la que para el cálculo de medidas exactas sólo se consideró la resistencia, evaluando así el efecto de que el estimador no contemple la resistencia de pérdidas en el hierro.

Se observa claramente que si el estimador de estado no contempla la resistencia de pérdidas en el hierro pero sí la reactancia de magnetización (columnas cinco y seis de la *Tabla 32*), los residuos normalizados son prácticamente nulos. Sin embargo, el hecho de que el estimador no considere la reactancia de magnetización

da lugar a que los residuos normalizados sean idénticos al caso en el que no se contemplan R_{fe} ni X_m . Por lo que se concluye que X_m tiene casi todo el peso de que las medidas presenten residuos y, consecuentemente, puede dar lugar a mayor contaminación en la veracidad del estado estimado. En estos niveles de tensión, es más relevante considerar la reactancia de magnetización que las pérdidas en el hierro, aunque sólo en casos en los que el nivel de carga de la red sea bajo, el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado tendrá un efecto muy relevante.

Al igual que ocurre en otros ensayos, las medidas que presentan mayores residuos normalizados son los flujos e inyecciones de potencia reactiva de las ramas que se corresponden con transformadores. Ello es debido a que no se contempla la rama de magnetización.

5.4.2 Redes de Media Tensión

Dada la importancia de la generación distribuida en el sistema eléctrico actual, se decide ensayar con las redes de media tensión empleadas en los apartados anteriores, ya que una contempla la implementación de esta tecnología y la otra red no. Por ello, ambos ejemplos permiten comparar cómo se comporta cada tipo de red ante la no consideración de las pérdidas de la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red en la herramienta de estimación, además de la modificación de los parámetros de dicha rama.

En ambas redes los transformadores se encuentran a un nivel de carga entre un 50 y 65% de la potencia nominal de los mismos.

5.4.2.1 Red de Transformadores MT-BT

Se procede a realizar el mismo análisis anterior con la red de media tensión de transformadores de media-baja de la *Ilustración 15*.

En primer lugar, se analizará el efecto que tiene modificar ambos parámetros de la rama de magnetización un $\pm 50\%$. Los resultados de los ensayos se recogen en la *Tabla 33*.

Tabla 33: RN de la red de Transformadores MT-BT cuando se modifica R_{fe} y X_m .

R_{fe} y X_m Normal		R_{fe} y X_m *1,5		R_{fe} y X_m *0,5	
	RN		RN		RN
Q22	0,8	Q22	0,5	Q22	1,6
Q22-21	0,8	Q22-21	0,5	Q22-21	1,6
Q20	0,8	Q20	0,5	Q20	1,6
Q20-19	0,8	Q20-19	0,5	Q20-19	1,6
Q18	0,6	Q14	0,4	Q18	1,2
Q18-10	0,6	Q14-6	0,4	Q18-10	1,2

Se observa en la *Tabla 33* que, un aumento de los parámetros R_{fe} y X_m da lugar a una disminución de los residuos normalizados con respecto al caso en el que no varían los parámetros. Este hecho se debe a que al considerar valores más pequeños de estas impedancias, se simula un mayor volumen de pérdidas en el hierro y de consumo de reactiva, lo cual justifica el mayor valor de los residuos normalizados.

En este nuevo ensayo, cuando los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético del transformador y de la reactancia de magnetización se mantienen inalteradas, los valores de los residuos normalizados, consecuencia de no considerar estos parámetros en la estimación de estado, rondan el límite de 0.8, lo cual supone que el grado de contaminación de dicho estado comienza a ser importante. Una ligera disminución del nivel de carga de la red tendría como consecuencia que el estado estimado presentase un notable grado de contaminación del estado estimado de la red.

Si se analiza el efecto de aumentar los parámetros resistivo y reactivo de dicha rama, se observa que los residuos máximos disminuyen al valor de 0.5, lo cual reduce la importancia que esta no consideración tiene sobre la herramienta de estimación.

Por otro lado, cuando los citados parámetros disminuyen, aumentan notablemente los residuos normalizados que, sin alcanzar el límite de medida errónea, doblan el límite de 0.8. Por tanto, el efecto de no considerar la rama de magnetización en estimación de estado en redes de media tensión sí es relevante cuanto menores sean los parámetros de dicha rama.

Hay que destacar que, cuando los parámetros son más reducidos, aumenta incluso el número de medidas que superan este valor, contaminando en gran medida la veracidad del proceso de estimación, pues se asigna un residuo normalizado a medidas que son exactas, ya que no se considera el efecto del ruido en las mismas.

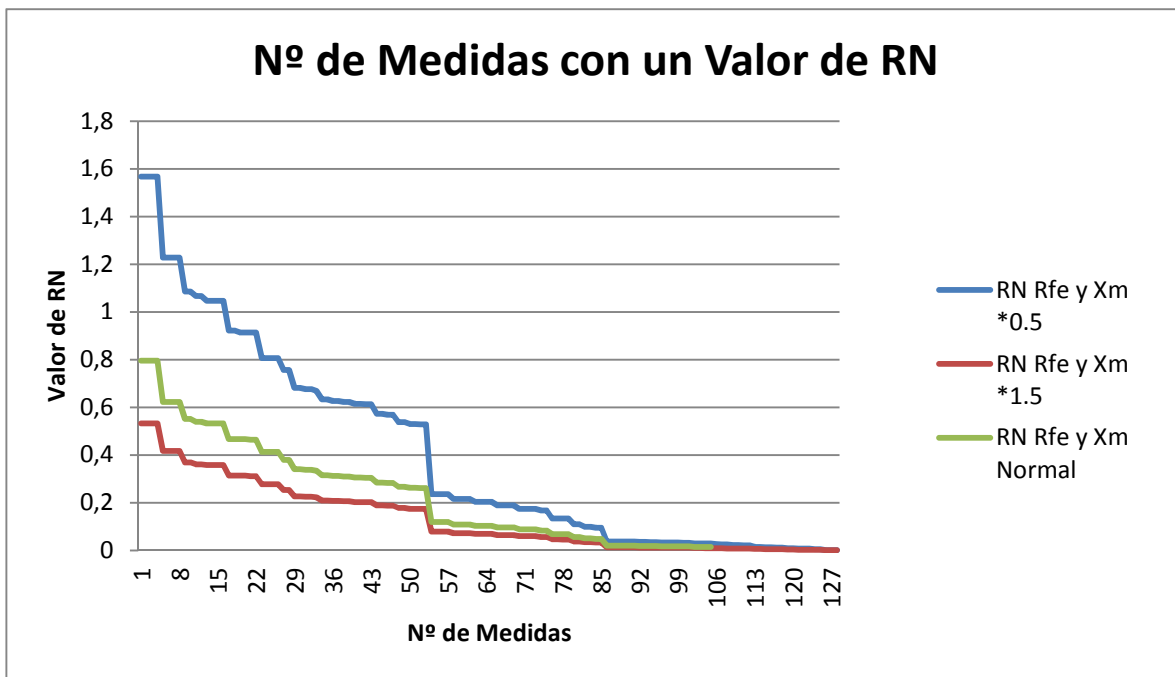


Ilustración 23: Nº de medidas con un valor de RN en Red de Transformadores MT_BT según R_{fe} y X_m .

La *Ilustración 23* refleja claramente la tendencia de los datos recogidos en la *Tabla 33*. Cuanto menores son los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización, mayores son los residuos normalizados, así como el número de medidas con $RN \geq 0.8$. La línea azul, que hace referencia a la situación en la que los parámetros citados son un 50% inferior al caso normal (línea verde), presenta aproximadamente 27 medidas con residuos normalizados que superan este límite, mientras que, el caso normal, sólo 4. Finalmente, en el escenario en el que los parámetros aumentan un 50% (línea roja), el número de medidas cuyos residuos normalizados superan el valor de 0.8 es nulo.

En ninguno de los tres ensayos recogidos se supera el límite de medida errónea, por lo que el estimador de estado no las considerará erróneas, no obstante, el estado estimado presentará un alto nivel de contaminación.

Por otro lado, se realiza el análisis comparativo variando el valor de R_{fe} , mientras que se mantiene constante el valor definido de X_m . Los resultados se muestran en la *Tabla 34*.

Tabla 34: RN de la red de Transformadores MT-BT cuando se modifica R_{fe} .

R_{fe} y X_m Normal		$R_{fe} * 1,5$ y X_m Normal		$R_{fe} * 0,5$ y X_m Normal	
	RN		RN		RN
Q22	0,8	Q22	0,8	Q22	0,8
Q22-21	0,8	Q22-21	0,8	Q22-21	0,8
Q20	0,8	Q20	0,8	Q20	0,8
Q20-19	0,8	Q20-19	0,8	Q20-19	0,8
Q18	0,6	Q18	0,6	Q18	0,6
Q18-10	0,6	Q18-10	0,6	Q18-10	0,6

Si se observan los resultados obtenidos en la *Tabla 34*, se puede apreciar que los residuos normalizados, consecuencia de no considerar las pérdidas de la rama de magnetización en estimación de estado, son prácticamente idénticos independientemente del valor de la resistencia de pérdidas en el hierro. Ello implica que este parámetro no tiene mucha relevancia, dado que pese a los diferentes valores que presenta en los distintos ensayos, los residuos obtenidos son los mismos. Todo indica que es la reactancia de magnetización el parámetro que tiene todo el peso de los residuos resultantes.

Tabla 35: RN de la red de Transformadores MT-BT cuando se modifica X_m .

Rfe y Xm Normal		$X_m * 1,5$ y Rfe Normal		$X_m * 0,5$ y Rfe Normal	
	RN		RN		RN
Q22	0,8	Q20	0,5	Q22	1,6
Q22-21	0,8	Q20-19	0,5	Q22-21	1,6
Q20	0,8	Q22	0,5	Q20	1,6
Q20-19	0,8	Q22-21	0,5	Q20-19	1,6
Q18	0,6	Q14	0,4	Q18	1,2
Q18-10	0,6	Q14-6	0,4	Q18-10	1,2

Por otro lado, al realizar los mismos ensayos variando el valor de la reactancia de magnetización manteniendo constante el parámetro resistivo, se observa en la *Tabla 35* que los residuos son más sensibles a la variación de

este parámetro. El hecho de que X_m tenga valores más altos, tiene como consecuencia una disminución de los residuos normalizados con respecto al caso de referencia. De igual forma, el que los valores de dicho parámetro sean más pequeños origina un aumento de los residuos normalizados máximos.

Cabe destacar que los residuos no superan el límite de medida errónea ($RN=3$) cuando la reactancia de magnetización disminuye, aunque los valores son altos como para considerar que contamina notablemente la estimación de estado.

Llama la atención de este análisis que cuando se varían ambos parámetros se tienen los mismos resultados que cuando se varía sólo la reactancia de magnetización. Por lo que cabe esperar que ésta sea el principal responsable de obtener residuos normalizados elevados, ya no sólo que contaminen la estimación de estado, sino que superen el límite de medida errónea.

Para corroborar esta última afirmación, resulta de interés analizar qué parámetro de la rama de magnetización tiene mayor influencia en estos residuos. En la *Tabla 36* se recogen los residuos normalizados de tres casos diferentes: uno en el que el modelo topológico de la red del estimador no considera ni la resistencia de pérdidas en el hierro ni la reactancia de magnetización (columnas 1 y 2), otro en el que sólo considera la resistencia de pérdidas en el hierro pero no la reactancia (columnas 3 y 4), y por último un ensayo que recoja el dual al anterior (columnas 5 y 6).

Tabla 36: Influencia de R_{fe} o X_m en la red de Transformadores MT-BT.

No considera R_{fe} ni X_m		No considera X_m		No considera R_{fe}	
	RN		RN		RN
Q22	0,8	Q20	0,8	P1	0,1
Q22-21	0,8	Q20-19	0,8	P1-2	0,1
Q20	0,8	Q22	0,8	P20	0,1
Q20-19	0,8	Q22-21	0,8	P20-19	0,1
Q18	0,6	Q14	0,6	P22	0,1
Q18-10	0,6	Q14-6	0,6	P22-21	0,1

Al analizar los resultados obtenidos de los ensayos recogidos en la *Tabla 36*, se aprecia que el caso en el que no se considera la resistencia del núcleo ferromagnético, pero sí la reactancia de magnetización, presenta residuos normalizados muy próximos a cero, lo cual dista mucho del ensayo en el que ninguno de los parámetros es considerado. Además, los residuos del caso donde no se considera la reactancia de magnetización pero sí la resistencia de pérdidas en el hierro, coincide con el caso en el que tampoco se tiene en cuenta ninguno de los parámetros. Por tanto, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización reside en la reactancia.

También, cabe mencionar que, en todos los ensayos anteriores, las medias que presentan mayores residuos normalizados son aquellas ramas que corresponden con transformadores. Además, estas medidas son siempre flujos o inyecciones de potencia reactiva.

5.4.2.2 Red con Generación Distribuida MT

De igual forma que con la red Red de Transformadores MT_BT, se procede con la red que presenta generación distribuida (ver *Ilustración 16*). Dado el carácter cambiante de los residuos en redes de media tensión, resulta conveniente ensayar con ambas redes para corroborar o no las conclusiones anteriores.

A priori, cabe esperar, a juzgar por los resultados antes obtenidos anteriormente, que un aumento de la resistencia de pérdidas en el hierro y de la reactancia ferromagnética, de lugar a residuos normalizados más pequeños respecto al caso en el que no se alteran estos valores. Si, por el contrario, disminuyen estos parámetros, aumentarán los residuos. También se espera que la reactancia tenga todo o casi todo el peso de los residuos, consecuencia de no considerar la rama de magnetización en los transformadores del modelo topológico de la red del estimador de estado.

En primer lugar se realizan los ensayos en los que se aumentan y disminuyen un 50% ambos parámetros antes mencionados. La *Tabla 37* recoge las medidas y sus residuos normalizados, consecuencia de no considerarse la rama de magnetización en el modelo topológico, comparándose con el caso en el que los valores son normales, es decir, no se modifican.

Tabla 37: RN de la red de Generación Distribuida MT cuando se modifica R_{fe} y X_m .

R_{fe} y X_m Normal		R_{fe} y X_m *1,5		R_{fe} y X_m *0,5	
	RN		RN		RN
Q9-32	1,7	Q9-32	1,2	Q9-32	3,2
Q26	1,4	Q26	1,0	Q26	2,6
Q26-17	1,4	Q26-17	1,0	Q26-17	2,6
Q6-30	1,4	Q6-30	0,9	Q6-30	2,6
Q18	1,3	Q18	0,9	Q18	2,4
Q4-28	1,3	Q4-28	0,9	Q4-28	2,3

Tal y como se esperaba, la *Tabla 37* refleja la tendencia ascendente de los residuos normalizados cuanto menores son los valores de los parámetros de la rama de magnetización de los transformadores, mientras que los residuos serán más pequeños cuanto mayores sean los parámetros. Aunque en estos ensayos los residuos no superan el límite de medida errónea, sí que tiene un valor relativamente alto, por lo que contaminan la estimación de estado, ya que no se está considerando ruido en las medidas en estos ensayos. Sólo se supera el límite de medida errónea cuando los parámetros de la rama de magnetización son un 50% inferior al valor normal.

Cuando los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización se mantienen en los valores inalterados, no considerar la rama de magnetización en la pertinente estimación de estado genera residuos normalizados que superan el valor de 0,8, lo cual implica que esta no consideración tiene un efecto importante sobre la estimación de estado, ya que dicho estado queda notablemente contaminado.

Si se analizan los residuos normalizados cuando los parámetros son un 50% superior, los residuos normalizados tienden a disminuir, como era de espera a juzgar por los resultados de los apartados anteriores. Sin embargo, pese a la disminución de estos valores, los residuos presentan valores que superan el citado

límite. Por tanto, en esta red, pese a aumentar los de la rama de magnetización, el efecto de no considerarlo en el modelo topológico de la red en la estimación de estado tiene un efecto importante.

Por otro lado, al disminuir los valores de los parámetros, las medidas presentan residuos mucho mayores que en el caso inalterado, lo cual aumenta mucho más el efecto de no considerar la rama de magnetización. Se puede concluir que, en redes de media tensión, no considerar la rama de magnetización de los transformadores cuando los parámetros de la misma son pequeños tiene un efecto muy relevante en la veracidad del estado estimado.

Si se comparan los ensayos entre la red de Transformadores MT_BT y la red con Generación Distribuida, esta última presenta una mayor sensibilidad cuando se varían los parámetros. Esto se debe a que el nivel de carga de primera es, en líneas generales, un 5% superior al de la segunda, aunque siempre dentro del rango definido del 50-65%. Además, la red con Generación Distribuida presenta transformadores de distintos rangos de potencia, lo cual da lugar a que algunos presenten valores de los parámetros de la rama de magnetización inferiores a los de la red de Transformadores MT_BT, en la cual todos son de igual potencia y valores de los parámetros.

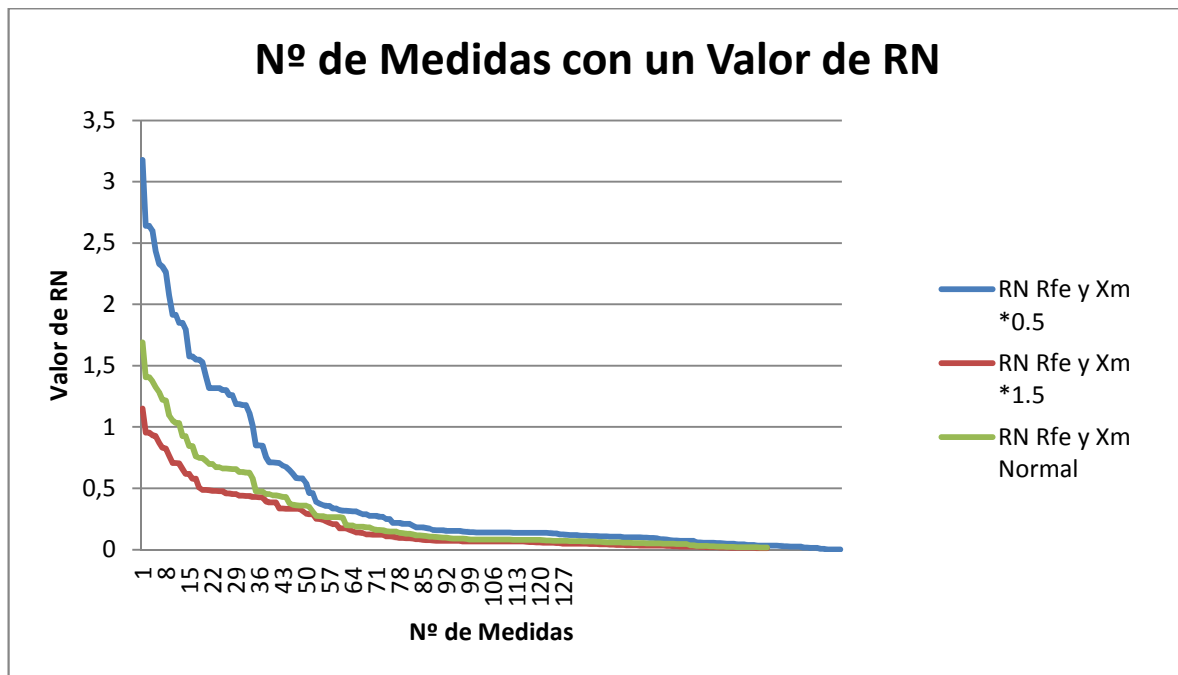


Ilustración 24: Nº de medidas con un valor de RN en Red de Generación Distribuida MT según R_{fe} y X_m .

La *Ilustración 24* refleja la tendencia de los residuos conforme aumentan o disminuyen los valores de los parámetros. No sólo se observa un aumento de los residuos normalizados cuando disminuyen la resistencia del núcleo ferromagnético y la reactancia de magnetización, sino que, también se aprecia un aumento del número de medidas que presentan residuos normalizados más significativos. Por ejemplo, el número de medidas que superan el residuo normalizado igual a 0,8, es de aproximadamente 17 en el caso en el que los parámetros no se han alterado, mientras que, en el escenario en el que disminuyen, el número de medidas con $RN \geq 0,8$ asciende a 31.

A continuación, se modifican cada uno de los parámetros un $\pm 50\%$, pero de forma independiente, es decir, primero se modificará la resistencia y se realizarán los ensayos, y posteriormente, se hará lo mismo con la

reactancia de magnetización.

Tabla 38: RN de la red Red de Generación Distribuida MT cuando se modifica R_{fe} .

R_{fe} y X_m Normal		$R_{fe} * 1,5$ y X_m Normal		$R_{fe} * 0,5$ y X_m Normal	
	RN		RN		RN
Q9-32	1,7	Q9-32	1,7	Q9-32	1,7
Q26	1,4	Q26	1,4	Q26	1,4
Q26-17	1,4	Q26-17	1,4	Q26-17	1,4
Q6-30	1,4	Q6-30	1,4	Q6-30	1,4
Q18	1,3	Q18	1,3	Q18	1,3
Q4-28	1,3	Q4-28	1,3	Q4-28	1,3

La *Tabla 38* recoge las medidas y sus residuos normalizados cuando exclusivamente se modifica la resistencia del núcleo ferromagnético. Se observa que la variación de este parámetro no da lugar a una variación reseñable de los residuos. Tanto en el caso en el que aumentan el valor de la resistencia, como en el que disminuye, se aprecia que los residuos normalizados se mantienen prácticamente inalterados.

Se destaca que los residuos normalizados consecuencia de modificar la resistencia del núcleo ferromagnético cuando el estimador de estado no considera las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, se mantienen prácticamente iguales al escenario en el que no se modifica la resistencia, por lo que parece que la influencia del parámetro resistivo es prácticamente nula.

Homólogamente, se realizan los ensayos modificando el valor de la reactancia de la rama de magnetización.

Tabla 39: RN de la red Red de Generación Distribuida MT cuando se modifica X_m .

R_{fe} y X_m Normal		$X_m * 1,5$ y R_{fe} Normal		$X_m * 0,5$ y R_{fe} Normal	
	RN		RN		RN
Q9-32	1,7	Q9-32	1,1	Q9-32	3,2
Q26	1,4	Q26	1,0	Q26	2,6
Q26-17	1,4	Q26-17	1,0	Q26-17	2,6
Q6-30	1,4	Q6-30	0,9	Q6-30	2,6
Q18	1,3	Q18	0,9	Q18	2,4
Q4-28	1,3	Q4-28	0,9	Q4-28	2,3

La *Tabla 39* muestra los resultados recogidos de los ensayos en el que se modifica la reactancia de magnetización en el modelo topológico de la red. Se observa un aumento de los residuos normalizados cuando la reactancia es pequeña, mientras que estos disminuyen si el parámetro aumenta.

La diferencia entre los residuos normalizados aumenta respecto con el escenario en el que los parámetros no se modifican, de hecho, en la situación en la que disminuye la reactancia, los residuos aumentan casi al doble. Es por ello que se concluye que la influencia de la reactancia de magnetización es mucho más relevante que la resistencia de pérdidas en el hierro. De hecho, los resultados de la *Tabla 39* son los mismos que los que se obtienen en la *37*, es decir, los residuos normalizados consecuencia de no contemplar la rama de

magnetización de los transformadores, cuando además, se varían los dos parámetros de dicha rama, son los mismos que cuando exclusivamente se varía la reactancia. En los tres escenarios analizados, el efecto de no considerar la rama de magnetización es importante, aumentando este efecto cuando los parámetros de dicha rama son más pequeños.

Para poder corroborar esta última conclusión, se realizan dos ensayos más. Uno en el que el modelo topológico de la red del estimador considera la reactancia de magnetización de los transformadores, pero no la resistencia, y otro ensayo que sea el dual a este. De esta forma se observará qué parámetro influye más notablemente al no considerarse.

Tabla 40: Influencia de R_{fe} o X_m en la red Red de Generación Distribuida MT.

No considera R_{fe} ni X_m		No considera X_m		No considera R_{fe}	
	RN		RN		RN
Q9-32	1,7	Q9-32	1,7	P19	0,2
Q26	1,4	Q26	1,4	P33	0,2
Q26-17	1,4	Q26-17	1,4	P33-19	0,2
Q6-30	1,4	Q6-30	1,4	P1	0,2
Q18	1,3	Q18	1,3	P1-2	0,2
Q4-28	1,3	Q4-28	1,3	P2-1	0,2

La *Tabla 40* recoge los residuos normalizados de tres casos diferentes: uno en el que el modelo topológico de la red del estimador no considera ni la resistencia de pérdidas en el hierro ni la reactancia de magnetización, es decir, el ‘caso normal’ considerado en ensayos previos, (columnas 1 y 2). Otro en el que sólo considera la resistencia de pérdidas en el hierro pero no la reactancia (columnas 3 y 4), y por último un ensayo en el que el modelo topológico contemple la reactancia de magnetización pero no la resistencia del núcleo ferromagnético (columnas 5 y 6).

Se observa que los residuos normalizados de no considerar en el modelo topológico de la red ninguno de los parámetros de la rama de magnetización de los transformadores presentan los mismos residuos que cuando no se contempla la reactancia pero sí la resistencia. Sin embargo, en el escenario dual, los residuos se ven notablemente más pequeños, lo que da lugar a la siguiente conclusión: la reactancia de magnetización es el parámetro que más influye cuando no se consideran las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores.

Hay que destacar que, durante todo este apartado de ensayos, las medidas que presentaban mayores residuos normalizados eran las inyecciones y flujos de potencia reactiva en las medidas de las ramas correspondientes a transformadores. Este fenómeno ocurre durante todo el trabajo, lo que indica que las medidas de reactiva de los transformadores tienen mayor sensibilidad ante el efecto de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red en estimación de estado.

Finalmente, cabe mencionar que al comparar los residuos normalizados de ambas redes de media tensión analizadas, la que tiene generación distribuida presenta mayores residuos. Ello puede significar que este tipo de redes sean más sensibles al efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización.

5.4.3 Redes de Baja Tensión

Para concluir este apartado del efecto de los valores de los parámetros de la rama de magnetización, se modifican los valores de los parámetros de la rama de magnetización en $\pm 50\%$ sobre una red de baja tensión. Concretamente, sobre la red Red1_BT_Sevilla, que se observa en la *Ilustración 17*. Ya que la tendencia en las redes de baja tensión es similar y los residuos normalizados son del mismo orden de magnitud, sólo se ensaya con una de ellas.

En primer lugar, se modifican los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético de la reactancia de magnetización un $\pm 50\%$. Los resultados de dicho análisis se recogen en la *Tabla 41*.

Tabla 41: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando se modifica R_{fe} y X_m .

R_{fe} y X_m Normal		R_{fe} y X_m *1,5		R_{fe} y X_m *0,5	
	RN		RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,4	Q1	1,2
Q1-2	0,6	Q1-2	0,4	Q1-2	1,2
Q9	0,2	Q9	0,2	Q9	0,5
Q10	0,1	Q10	0,1	Q10	0,2
Q12	0,1	Q12	0,1	Q12	0,2
Q2-12	0,1	Q2-12	0,1	Q2-12	0,2

Tras los resultados recogidos en la *Tabla 41*, se aprecia que cuando se aumentan los parámetros de la rama de magnetización, el efecto de no considerar la rama de magnetización se mitiga, ya que los residuos normalizados, consecuencia de ello, disminuyen. Mientras que, al disminuir los parámetros, los residuos aumentan. Existe pues una relación inversa entre el valor de los parámetros y los residuos normalizados resultantes de la estimación de estado.

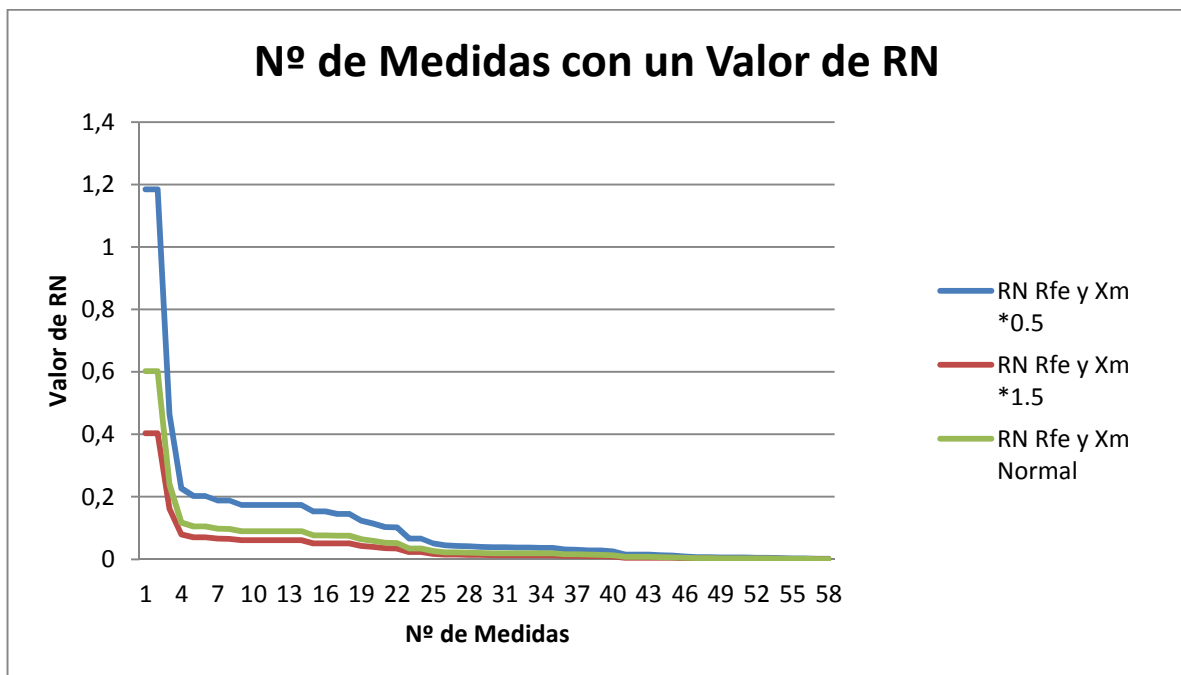


Ilustración 25: Nº de medidas con un valor de RN en Red1_BT_Sevilla según R_{fe} y X_m .

La *Ilustración 25* muestra, al igual que en ensayos anteriores, disminuir los parámetros de la rama de magnetización de los transformadores tiene como consecuencia un aumento de los residuos normalizados consecuencia de la estimación de estado. Además, el número de medidas con residuos más altos aumenta, aunque en las redes de baja tensión este último fenómeno no es tan pronunciado como en la redes de media tensión.

A continuación, se modifica el valor de la resistencia del núcleo ferromagnético, dejando constante la reactancia de magnetización. Los resultados de los ensayos se recogen en la *Tabla 42*.

Tabla 42: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando se modifica R_e .

R y X Normal		Rx1,5 y X Normal		Rx0,5 y X Normal	
	RN		RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,6	Q1	0,6
Q1-2	0,6	Q1-2	0,6	Q1-2	0,6
Q9	0,2	Q9	0,2	Q9	0,2
Q10	0,1	Q10	0,1	P1	0,2
Q12	0,1	Q12	0,1	P12	0,2
Q2-12	0,1	Q2-12	0,1	Q10	0,1

Se observa en la *Tabla 42* que, independientemente del valor que tome la resistencia de pérdidas en el hierro, los residuos normalizados, obtenidos al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en el modelo topológico de la red, prácticamente no varían. Estos no superan el límite de medida errónea, pero aunque el parámetro resistivo tenga un valor alto o bajo, los residuos normalizados no se verán alterados. Sólo se aprecia un ligero aumento cuando el parámetro resistivo es más pequeño, aunque esta variación de los residuos es casi nula. Ello implica que puede ser la reactancia de magnetización el parámetro de dicha rama que tenga la mayor influencia en el valor de los residuos.

Teniendo en cuenta esta última afirmación, se procede a realizar el mismo análisis anterior con la salvedad que se modifica la reactancia de magnetización en vez del parámetro resistivo.

Tabla 43: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando se modifica X_m .

R y X Normal		X*1,5 y R Normal		X*0,5 y R Normal	
	RN		RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,4	Q1	1,2
Q1-2	0,6	Q1-2	0,4	Q1-2	1,2
Q9	0,2	Q9	0,2	Q9	0,5
Q10	0,1	Q10	0,1	Q10	0,2
Q12	0,1	P1	0,1	Q12	0,2
Q2-12	0,1	P12	0,1	Q2-12	0,2

La *Tabla 43* recoge los resultados de estos ensayos en el que se modifica la reactancia de magnetización manteniendo constante la resistencia del núcleo ferromagnético. Se aprecia cómo al modificar el valor de dicho parámetro los residuos normalizados sí varían, al contrario que ocurre con la variación de la resistencia. De hecho, cuanto mayor es el valor de X_m , menores son los residuos, y aumentan su valor si este parámetro es más pequeño. No obstante, estos residuos normalizados o superan el límite de medida errónea.

Por otro lado, se destaca que los residuos normalizados más elevados se corresponden con medidas de ramas que son transformadores. Además, estas medidas son siempre flujos o inyecciones de potencia reactiva.

Una vez analizado el impacto que tiene variar cada uno de los parámetros sobre los residuos normalizados en la no consideración de la rama de magnetización, se comprueba cuál de los dos tiene una mayor repercusión. Para ello, se supondrá primero que el estimador contempla sólo la resistencia de pérdidas en el hierro en la rama de magnetización, y luego, sólo la reactancia magnetizante. De igual forma que en los apartados anteriores, se comparan los resultados con el caso en el que el estimador no considera ninguno de los parámetros.

Tabla 44: Influencia de R_{fe} o X_m en la red Red1_BT_Sevilla.

No considera R_{fe} ni X_m		No considera X_m		No considera R_{fe}	
	RN		RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,6	P1	0,1
Q1-2	0,6	Q1-2	0,6	P1-2	0,1
Q9	0,2	Q9	0,2	P9	0
Q10	0,1	Q10	0,1	P10	0
Q12	0,1	Q12	0,1	P2-12	0
Q2-12	0,1	Q2-12	0,1	P12	0

En la *Tabla 44*, las dos primeras columnas hacen referencia al ensayo en el que el estimador no considera ningún parámetro de la rama de magnetización. Este es el ensayo considerado hasta el momento en todos los ensayos previos. Las dos siguientes columnas contemplan el caso en el que exclusivamente se considera la resistencia del núcleo ferromagnético, y las dos últimas cuando sólo se considera la reactancia de magnetización.

Si se observan los resultados obtenidos, el efecto de considerar la resistencia de pérdidas en el hierro en la rama de magnetización pero no la reactancia, da lugar a los mismos residuos normalizados que en el caso en el que no se consideran ninguno de los parámetros. Por ello, tener en consideración sólo la resistencia da lugar a que no se mitigue el efecto de no considerar la rama de magnetización. Sin embargo, si sólo se considera la reactancia de magnetización en la rama paralelo de los transformadores, los residuos normalizados se disminuyen considerablemente, llegando a valores prácticamente nulos.

Por tanto, se concluye que la reactancia de magnetización tiene mayor influencia en la no consideración de la rama de magnetización de los transformadores. El efecto de la resistencia es prácticamente despreciable en redes de baja tensión, ya que no produce variación en los mismos y, considerar sólo este parámetro da lugar a los mismos residuos que no considerar ninguno en dicha rama.

Una vez más, las medidas que presentan mayores residuos normalizados son las inyecciones y flujos de potencia reactiva en aquellas ramas que se corresponden con transformadores.

5.5. Efecto del Nivel de Potencia Reactiva en Redes de Media y Baja Tensión

En el *apartado 2*, se observó que en aquellos transformadores de 20/0,4 kV, el hecho de que circulara una mayor o menor cantidad de potencia reactiva acarrea una variación en los residuos normalizados obtenidos. Por lo que este apartado llevará a cabo ensayos sobre redes de media y baja tensión que reflejen el impacto que tiene el nivel de reactiva que circula por la red cuando el modelo topológico de la red empleado por la herramienta de estimación de estado no considera las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores.

Se evaluarán redes de media y baja tensión, ya que son las que emplean los transformadores antes señalados. Para variar el nivel de reactiva, se define la potencia activa inyectada en los nudos (P_i) tal y como se define en los ensayos de los apartados anteriores, mientras que la reactiva (Q_i), a partir del factor de potencia (fdp), mediante la ecuación:

$$Q_i = P_i \cdot tg(\text{acos}(fdp))$$

En los ensayos se analizará de forma comparativa los escenarios en los que el factor de potencia vale 0.8, 0.9 y 0.95.

En todos los escenarios analizados el nivel de carga de los transformadores oscila entre un 50-60% de la potencia nominal de los mismos.

5.5.1 Redes de Media Tensión

En primer lugar, se realizarán los ensayos con las redes de media tensión 'Red de Transformadores MT_BT' y 'Red con Generación Distribuida MT', siguiendo el criterio antes explicado.

5.5.1.1 Red de Transformadores MT_BT

Comenzando con la red 'Red de Transformadores MT_BT' definida en la *Ilustración 15*, la *Tabla 45* recoge los resultados de ir modificando el factor de potencia al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red.

Tabla 45: RN de Red de Transformadores MT_BT según varía el factor de potencia.

Cos(φ)=0,8		Cos(φ)=0,9		Cos(φ)=0,95	
	RN		RN		RN
Q22	0,5	Q20	0,8	Q20	1,2
Q22-21	0,5	Q20-19	0,8	Q20-19	1,2
Q20	0,5	Q22	0,8	Q22	1,2
Q20-19	0,5	Q22-21	0,8	Q22-21	1,2
Q18	0,4	Q14	0,7	Q14	1
Q18-10	0,4	Q14-6	0,7	Q14-6	1

Se puede observar en la *Tabla 45* que, cuanto menor es el flujo de reactiva, la tendencia de los residuos normalizados, consecuencia de no considerar la rama de magnetización en la estimación de estado, es aumentar. Ello implica que el efecto de no considerar dicha rama en el modelo topológico será mayor conforme a la menor circulación de potencia reactiva.

Se observa que en todos los escenarios analizados los residuos normalizados de encuentran por debajo del límite de medida errónea, aunque se aprecia una mayor sensibilidad de la red ante el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización cuanto menor es el flujo de reactiva que circula por la red. Cuando el flujo de reactiva es tal que el factor de potencia es de 0.9, los residuos normalizados llegan al límite de 0.8, lo cual implica que el grado de contaminación del estado estimado es más notable y, por tanto, el efecto de no considerar dicha rama empieza a ser importante.

Hay que destacar que, la desviación típica del flujo de activa y reactiva está definida para estos ensayos como un 3% del valor de flujo, por lo que, al ser mayor el valor de la medida, mayor es la desviación típica asociada a la misma, lo cual resulta en residuos normalizados inferiores.

Por otro lado, el número de medidas con RN significativos aumenta, tal y como se muestra en la *Ilustración 26*.

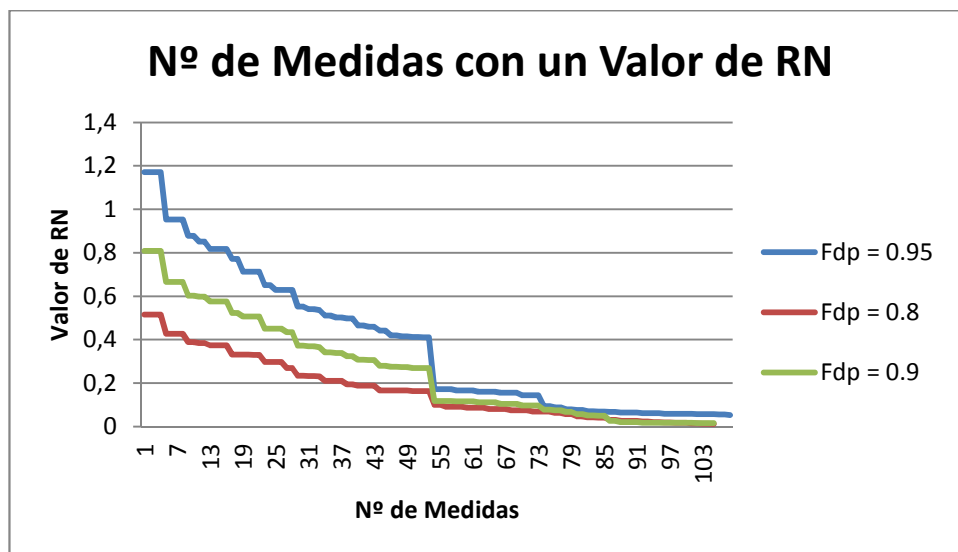


Ilustración 26: Nº de medidas con un valor de RN en Red de Transformadores MT_BT según el factor de potencia.

La *Ilustración 26* muestra, no sólo que en los tres escenarios propuestos los residuos normalizados se encuentran por debajo del límite de medida errónea, sino además, como aumenta el grado de contaminación del estado estimado al asignársele residuos a medidas que son exactas, ya que no se considera ruido en las medidas. Además, cuando el factor de potencia es 0.8 (línea roja), ninguna medida supera el límite de 0.8, sin embargo, cuando se disminuye la potencia reactiva que circula (aumenta el factor de potencia), se observa que el número de medidas que superan dicho límite asciende hasta 4, para el escenario de $\cos(\varphi)=0,9$, y 16 para el de $\cos(\varphi)=0,95$.

5.5.1.2 Red con Generación Distribuida MT

De igual forma que en el apartado anterior, se procede con la red ‘Red con Generación Distribuida MT’ (ver *Ilustración 16*). La *Tabla 46* recoge las medidas y los residuos normalizados consecuencia de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red mientras se varía, además, el factor de potencia, y con ello, la potencia reactiva que circula.

Tabla 46: RN de Red con Generación Distribuida MT según varía el factor de potencia.

Cos(φ)=0,8		Cos(φ)=0,9		Cos(φ)=0,95	
	RN		RN		RN
Q26	0,7	Q7-31	1,5	Q7-31	2,5
Q26-17	0,7	Q26	1,5	Q26	2,3
Q18	0,7	Q26-17	1,5	Q26-17	2,3
Q7-31	0,7	Q18	1,4	Q9-32	2,3
Q9-32	0,7	Q9-32	1,4	Q4-28	2,3
Q4-28	0,6	Q4-28	1,4	Q5-29	2,2

Tras los resultados obtenidos, se aprecia un aumento del efecto de no considerar la rama de magnetización conforme disminuye el nivel de potencia reactiva que circula en la red. Según los resultados obtenidos en la *Tabla 46*, cuando el factor de potencia es 0.8, los residuos normalizados no superan el límite de 0.8, aunque están cerca, mientras que, al aumentar este parámetro, circula menor potencia reactiva por la red y los residuos dobla y triplican dichos residuos al aumentar el factor de potencia a 0.9 y 0.95 respectivamente. Por tanto, cuanto menor es el nivel de reactiva, mayor es el efecto de no considerar la rama de magnetización en estimación de estado, llegando a ser de relevante importancia.

Hay que tener en cuenta que, la desviación típica del flujo de activa y reactiva está definida para estos ensayos como un 3% del valor de flujo, por lo que, al ser mayor el valor de la medida, mayor es la desviación típica asociada a la misma, lo cual resulta en residuos normalizados inferiores.

También, cabe destacar que, al circular menos potencia reactiva, la sensibilidad de la estimación de estado al efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización aumenta. El número de medidas con residuos normalizados altos es más significativo, por lo que la estimación de estado se encuentra más contaminada por dicho efecto, ya que asigna residuos normalizados a medidas exactas.

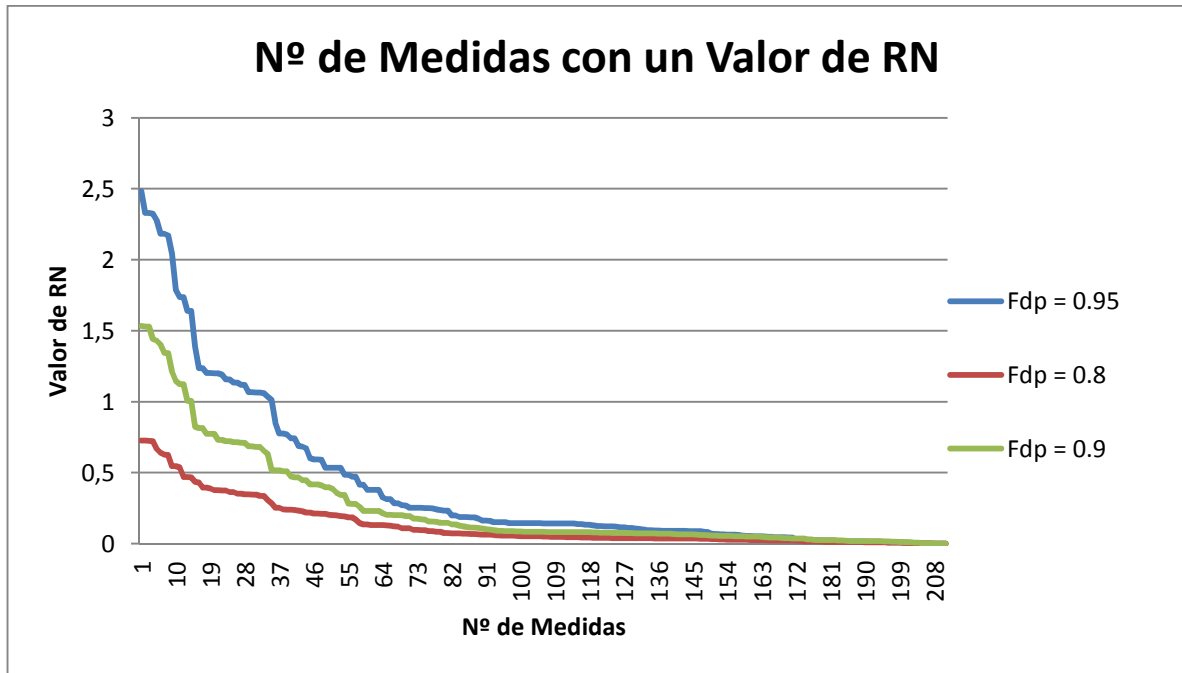


Ilustración 27: Nº de medidas con un valor de RN en Red con Generación Distribuida MT según el factor de potencia.

En la *Ilustración 27* se recogen el número de medidas que superan un determinado valor de residuos normalizados. En esta situación se aprecia una significativa variación del número de medidas con residuos normalizados significativos. De hecho, cuanto menor es la circulación de reactiva (menor fdp), mayor número de medidas superan el límite de 0.8 considerado como límite de residuos significativos (ver *Ilustración 12*). Tal y como se observa, cuando el factor de potencia es 0.8, ninguna medida supera el citado valor, mientras que, si dicho parámetro asciende a 0.9, aproximadamente 19 medidas superan este valor. De igual forma, cuando el factor de potencia es 0.95, el número de medidas al que se le asigna un residuo normalizado significativo asciende a 37, aproximadamente. Por tanto, aumenta el grado de contaminación del estado estimado, aumentan la importancia del efecto de no considerar la rama de magnetización en estimación de estado al circular un bajo nivel de reactiva.

Teniendo en cuenta que se pretende que las redes transporten la menor cantidad posible de potencia reactiva, los escenarios actuales presentarán un factor de potencia alto, lo cual, si no se considera la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red de la herramienta de estimación de estado, la contaminación que presentarán los resultados obtenidos será mucho más notable.

5.5.2 Redes de Baja Tensión

Una vez se realizan los ensayos con redes de media tensión que incluyen transformadores de media-baja tensión, se procede a analizar este mismo fenómeno de variación de reactiva cuando no se considera la rama de magnetización en estimación de estado en redes de distribución de baja tensión. Para ello, se ensaya con las redes 'Red1_BT_Sevilla' y 'Red2_BT_Sevilla', correspondientes con las *Ilustraciones 17* y *18*.

5.5.2.1 Red1_BT_Sevilla

Comenzando con los ensayos en la red 'Red1_BT_Sevilla', se modificará la cantidad de potencia reactiva circula por la red modificando el factor de potencia.

Tabla 47: RN de Red1_BT_Sevilla según el factor de potencia.

Cos(φ)=0,8		Cos(φ)=0,9		Cos(φ)=0,95	
	RN		RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,9	Q1	1,3
Q1-2	0,6	Q1-2	0,9	Q1-2	1,3
Q9	0,2	Q9	0,4	Q9	0,5
Q10	0,1	Q10	0,2	Q10	0,2
Q12	0,1	Q12	0,2	Q12	0,2
Q2-12	0,1	Q2-12	0,2	Q2-12	0,2

La *Tabla 47* recoge los resultados obtenidos de los ensayos antes mencionados. Estos reflejan que cuanto menor es el nivel de potencia reactiva que circule por la red, mayor es el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores. Los residuos normalizados superan el límite 0.8, si consideramos este valor como significativo para contaminar de forma importante la estimación de estado (ver *Ilustración 12*), cuando el factor de potencia es 0.9. Por tanto, en redes de baja tensión la circulación de reactiva también tiene un efecto reseñable, ya que el grado de contaminación del estado estimado aumenta conforme disminuye el nivel de reactiva.

Hay que destacar que, la desviación típica del flujo de reactiva está definida para estos ensayos como un 3% del valor de flujo, por lo que, al ser mayor el valor de la medida, mayor es la desviación típica asociada a la misma, lo cual resulta en residuos normalizados inferiores.

5.5.2.2 Red2_BT_Sevilla

Al igual que en el apartado anterior, se procede con la red 'Red2_BT_Sevilla'. Se espera que los resultados sean similares y corroboren la misma tendencia que en el ensayo anterior.

Tabla 48: RN de Red2_BT_Sevilla según el factor de potencia.

Cos(φ)=0,8		Cos(φ)=0,9		Cos(φ)=0,95	
	RN		RN		RN
Q1	0,5	Q1	0,8	Q1	0,9
Q1-2	0,5	Q1-2	0,8	Q1-2	0,9
Q6	0,2	Q6	0,3	Q6	0,3
Q3	0,2	Q3	0,2	Q3	0,3
Q10	0,1	Q10	0,2	Q10	0,2
Q9	0,1	Q9	0,2	Q9	0,2

Tal y como cabía esperar, los ensayos recogidos en la *Tabla 48* muestran la tendencia ascendente de los residuos normalizados conforme el nivel de reactiva es menor (aumento del factor de potencia). Se observa que cuando el nivel de reactiva es tal que $\cos(\varphi) \geq 0.9$ los valores de los residuos normalizados de las medidas supera el límite de 0.8, lo cual aumenta la relevancia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red.

También se aprecia que cuando circula mayor nivel de reactiva, las medidas presentan residuos normalizados por debajo del citado límite, lo cual disminuye la importancia de no considerar la rama de magnetización en la herramienta de estimación de estado. Hay que destacar que, la desviación típica del flujo de activa y reactiva está definida para estos ensayos como un 3% del valor de flujo, por lo que, al ser mayor el valor de la medida, mayor es la desviación típica asociada a la misma, lo cual resulta en residuos normalizados inferiores.

Por tanto, aunque en baja tensión, exista una relación inversa entre los residuos normalizados, consecuencia de no considerar dicha rama en el modelo del estimador, y la cantidad de potencia reactiva que circula por la red, no genera un efecto relevante.

5.6. Efecto de la Calidad de los Instrumentos de Medida

Hasta ahora, en los apartados anteriores se ha considerado que el valor de la desviación típica asignada a las medidas de flujo de potencia activa y reactiva que proporcionan los instrumentos de medidas es un 3% del valor medido, tal y como se sugiere en el artículo *Tuning of Measurement Weights in State Estimation: Theoretical Analysis and Case Study* [2]. Teniendo en cuenta que este valor oscila entre un 2 y un 4% en función de la precisión de cada instrumento, resulta de interés analizar qué efecto tiene esta precisión en el estimador de estado cuyo modelo topológico de red no considera las pérdidas en la rama de magnetización.

En caso de que la medida sea muy pequeña, se asigna un valor mínimo a la desviación típica igual a 0.0001, ya que el instrumento de medida tiene siempre un error mínimo asociado.

Cabe esperar que el efecto tenga cierta relevancia ya que cuanto más precisas se consideren estas medidas, es decir, menor desviación típica, mayor peso tendrán en la estimación de estado. Por ello, se ensayan distintas redes con el mismo estado de cargas y distintos porcentajes de desviación típica de las medidas.

5.6.1 Redes de Alta-Media Tensión

En primer lugar se procede a analizar el impacto que tiene la desviación típica en las medidas de flujo de potencia activa y reactiva en la red IEEE14 (ver *Ilustración 11*). Los valores que toma dicha desviación se encuentra entre un rango entre 2 y 4%, por ello, en este apartado se realizan tres ensayos en los que se comparan los residuos normalizados, consecuencia de no considerar la rama de magnetización de los transformadores, cuando el valor de la desviación típica de dichas medidas es un 2, 3 y 4% del valor de la medida.

El nivel de carga de los transformadores se mantiene, como en todo el presente proyecto, en valores entre un 50-65% de la potencia nominal. Por otro lado, el nivel de carga de la red es el definido por la organización IEEE.

La *Tabla 49* muestra los resultados obtenidos de las respectivas estimaciones de estado.

Tabla 49: RN de la red IEEE14 según el valor de la desviación típica.

2% del Valor Medido		3% del Valor Medido		4% del Valor Medido	
	RN		RN		RN
Q9-4	0,5	Q9-4	0,4	Q9-4	0,3
Q5	0,5	Q5	0,3	Q5	0,2
Q6	0,4	Q6	0,3	Q6	0,2
P6	0,3	P6	0,2	P6	0,2
Q4-9	0,3	Q4-9	0,2	Q4-9	0,1
Q4	0,2	Q4	0,2	Q4	0,1

En la *Tabla 49* se recogen las medidas con mayores residuos normalizados cuando no se considera la rama de magnetización de los transformadores y además el valor de la desviación típica asociado a las medidas de flujo de potencia activa y reactiva es un 2%, correspondiente a las columnas 1 y 2, un 3%, reflejado en las columnas 3 y 4, y un 4% del valor medido, en las columnas 5 y 6 de dicha tabla.

A juzgar por los resultados obtenidos en la *Tabla 49*, se observa claramente que cuanto más precisas son las medidas, es decir, menor desviación típica, mayor es el efecto de no considerar las pérdidas de la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador de estado. Cuando la desviación típica es un 2%, los residuos normalizados máximos oscilan en torno a 0.5, mientras que, cuando el valor de la misma es un 4%, los residuos máximos alcanzan valores menores, 0.3. En ninguno de los escenarios ensayados en este apartado ha se superado el límite 0.8.

Se concluye que en redes con mayor calidad de los instrumentos de medida, como cabe esperar en el caso de las Smart Grids, son más sensibles a la incorporación de la rama de magnetización de los transformadores, ya que, cuando más precisos sean estos instrumentos de medida, mayores serán los residuos normalizados consecuencia de no considerar dicha rama. Este efecto, además, puede superponerse con otros estudiado en apartados anteriores aumentando los efectos de los mismos.

Con objeto de representar un caso más desfavorable, se realiza otro ensayo de la misma red donde el nivel de carga es un 10% del estado de carga definido por la organización IEEE. Además se supone que la desviación típica de las medidas de flujo de potencia activa y reactiva es un 2% del valor medido. En este escenario se espera que los residuos sean más significativos.

Tabla 50: RN de la red IEEE14 para un 10% del nivel de carga y desviación típica 2% del valor medido.

Nivel carga bajo (x0,1)	
2% del Valor Medido	
	RN
Q9	2,7
Q10	2,3
Q2	2,3
Q13	1,7
Q8	0,8
Q8-7	0,8

La *Tabla 50* recoge los resultados de este último ensayo, donde se observa que los residuos normalizados son mucho más elevados, dando lugar a una mayor contaminación del estado estimado, ya que asigna residuos normalizados altos a medidas que son exactas al no considerarse ruido en las medidas. En esta situación el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red es muy relevante ya que contamina notablemente el estado estimado.

Por tanto, se concluye que el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado no muy determinante en redes de alta-media tensión independientemente de la calidad de los instrumentos de medida, ya que no se supera el límite definido de 0.8. Sin embargo, aumenta la sensibilidad conforme al nivel de precisión de los instrumentos de medida. Se destaca que, cuando el nivel de carga de la red es bajo y la calidad de los instrumentos de medida es elevada, el efecto de esta no consideración sí es importante.

5.6.2 Redes de Media Tensión

Al igual que en el apartado anterior, se analiza el efecto del valor de la desviación típica añadido al efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en redes de media tensión en la estimación de estado.

Dado la distinta sensibilidad de las redes ‘Red de Transformadores MT_BT’ y ‘Red con Generación Distribuida’, se analizará el impacto que tiene el valor de la desviación típica en ambas redes. Aunque el comportamiento de las redes es similar, la presencia de generación distribuida implicaba residuos normalizados más altos, ya que los transformadores asociados a los nudos de generación distribuida no siempre se encuentran con un alto nivel de carga. Por ello, cabe esperar que al disminuir el valor de la desviación típica la variación de los residuos sea más notable.

No obstante, en este apartado el nivel de carga de los transformadores se encuentra dentro del rango establecido anteriormente.

5.6.2.1 Red de Transformadores MT_BT

La red a analizar en este apartado es la red de transformadores que se presenta en la *Ilustración 15*. El estado de carga de la red es el definido en el *apartado 5.1*. Al igual que en el apartado anterior, se recoge en la *Tabla 51* los residuos normalizados de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en la estimación de estado cuando el valor de la desviación típica es un 2, 3 y 4% del valor medido.

Tabla 51: RN de la red de Transformadores MT_BT según el valor de la desviación típica.

2% del Valor Medido		3% del Valor Medido		4% del Valor Medido	
	RN		RN		RN
Q20	1,2	Q22	0,8	Q20	0,6
Q20-19	1,2	Q22-21	0,8	Q20-19	0,6
Q22	1,2	Q20	0,8	Q22	0,6
Q22-21	1,2	Q20-19	0,8	Q22-21	0,6
Q14	0,9	Q18	0,6	Q14	0,5
Q14-6	0,9	Q18-10	0,6	Q14-6	0,5

Los resultados recogidos en la *Tabla 51* reflejan la misma tendencia que en el apartado anterior. Cuanto menor es el valor de la desviación típica, mayores son los residuos normalizados obtenidos al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en la estimación de estado. Igualmente, un aumento de ésta, da lugar a que los residuos disminuyan.

Observando con mayor detalle la tendencia de los valores, una mayor precisión de los valores da lugar a una mayor variación de los residuos en comparación con el escenario en el que la desviación es más grande. Es decir, cuando la desviación típica disminuye del 3 al 2%, los residuos varían entre 0.3 y 0.4 su valor. Mientras que, cuando la desviación de las medidas asciende del 3 al 4%, la variación de los residuos de las medidas es sólo 0.1-0.2.

Por otro lado, cuando la desviación típica de las medidas de flujo es un 3%, el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores es importante, ya que los residuos oscilan en torno a 0.8, lo cual empieza a contaminar notablemente el estado estimado. Un aumento de la precisión de los instrumentos de medida tal que, la desviación típica sea un 2%, aumenta los residuos normalizados hasta valores que superan la unidad, por tanto el efecto es mucho más notable. Sin embargo, si la desviación aumenta a un 4%, los residuos se encuentran por debajo del límite establecido de 0.8, por lo que el efecto de dicha no consideración no es tan significativa como en los escenarios anteriores.

Se observa, además, una mayor sensibilidad de los residuos en redes de media tensión que en las de alta ante una variación en la precisión de las medidas, aunque sigue sin ser significativa. En estos escenarios, tampoco se supera el límite de medida errónea, no obstante, el grado de contaminación del estado estimado en redes de media tensión es significativo como para considerar importante el efecto de no contemplar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red.

Realizar un ensayo en el que se disminuye el nivel de carga de la red al 10% combinado con desviaciones típicas del 2% no dará lugar a resultados que no se hayan obtenido en los apartados anteriores, ya que en el *apartado 5.2.2* se analiza el primer efecto mencionado para un valor de desviación del 3% obteniéndose

residuos normalizados que superan el límite de medida errónea, por lo que aumentar la precisión de las medidas dará lugar a residuos normalizados aún mayores.

5.6.2.2 Red con Generación Distribuida

La red objeto de análisis de este apartado es la red que presenta generación distribuida de la *Ilustración 16*. Dicha red es mucho más sensible al efecto de no considerar la rama de magnetización en la herramienta de estimación de estado, por lo que se espera, a priori, que los residuos normalizados sean mucho más elevados conforme la precisión de las medidas aumenta.

El nivel de carga de la red es el mismo que se define en la *Ilustración 16*, al igual que los transformadores, que se encuentran entre un 50 y 65% de la potencia nominal.

Tabla 52: RN de la red con Generación Distribuida según el valor de la desviación típica.

2% del Valor Medido		3% del Valor Medido		4% del Valor Medido	
	RN		RN		RN
Q20	2,5	Q22	1,7	Q9-32	1,3
Q20-19	2,1	Q22-21	1,4	Q26	1,1
Q22	2,1	Q20	1,4	Q26-17	1,1
Q22-21	2,1	Q20-19	1,4	Q6-30	1,0
Q14	2,0	Q18	1,3	Q18	1,0
Q14-6	1,9	Q18-10	1,3	Q4-28	1,0

Los resultados reflejados en la *Tabla 52* muestran la mayor sensibilidad antes mencionada de este tipo de redes ante no considerar las pérdidas en la rama de magnetización sumado a la mayor precisión de las medidas. Se observa que, para medidas cuya desviación típica es un 4% del valor medido, los residuos superan el valor de 0.8, por tanto, el grado de contaminación de la estimación de estado empieza a ser notable para el escenario más flexible.

Al disminuir la desviación típica a un 3%, estos residuos aumentan ligeramente entre 0.3 y 0.4, mientras que, cuando ésta disminuye a un 2% los residuos normalizados dobla el valor de los mismos obtenidos para un 4% de desviación típica. Por lo que se puede apreciar que este tipo de redes es mucho más sensible ante el valor de la desviación típica cuando no se considera la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red.

Tal y como reflejan los resultados, una mayor precisión en los instrumentos de medida aumenta la sensibilidad del estimador de estado ante la no consideración de la rama de magnetización, ya que el efecto puede llegar a ser bastante relevante.

Cabe destacar que, este ensayo, con respecto al del apartado anterior, presenta mayores residuos normalizados. Esto se debe a que la mayoría de los transformadores de la red ‘Red con Generación Distribuida’ presentan un nivel de carga en torno al 55%, mientras que, muchos de los transformadores de la red ‘Red de Transformadores MT_BT’ se encuentran en un estado de carga próximo al 60%. Esa diferencia en cuando al nivel de carga, tal y como se demuestra en el *apartado 5.2*, hace que dicha red sea más sensible ante dicha no

consideración.

5.6.3 Redes de Baja Tensión

Finalmente, se realizan los mismos ensayos previos para la red de baja tensión 'Red1_BT_Sevilla'. En este escenario, el estado de carga es el mismo que se define en la *Ilustración 17*, sólo se varía el valor de la desviación típica de las medidas de flujo de potencia activa y reactiva: 2, 3 y 4% del valor medido.

La *Tabla 53* recoge los resultados obtenidos al no considerar la rama de magnetización de los transformadores, además de modificar la precisión de las medidas de flujo.

Tabla 53: RN de la red 'Red1_BT_Sevilla' según el valor de la desviación típica.

2% del Valor Medido		3% del Valor Medido		4% del Valor Medido	
	RN		RN		RN
Q1	1,0	Q1	0,6	Q1	0,5
Q1-2	1,0	Q1-2	0,6	Q1-2	0,5
Q9	0,7	Q9	0,2	Q9	0,1
P1	0,4	P1	0,1	P1	0,1
P1-2	0,4	P1-2	0,1	P1-2	0,1
Q10	0,4	Q10	0,1	Q10	0,1

La *Tabla 53* muestra las medidas y los residuos normalizados para la situación antes descrita para los distintos valores de desviación típica. Se aprecia un descenso de los residuos a medida que aumenta el valor de la desviación, es decir, disminuye la precisión de los instrumentos de medida. Al igual que en los apartados anteriores, la variación de los residuos normalizados cuando disminuye la desviación típica es mayor que al aumentar. Se observa que cuando la desviación típica disminuye del 3 al 2%, los residuos varían entre 0.3 y 0.4 su valor. Mientras que, cuando la desviación de las medidas asciende del 3 al 4%, la variación de los residuos de las medidas es sólo 0.1.

Se observa que, al igual que cuando el valor de la desviación típica de las medidas de flujo de potencia es un 2%, los residuos normalizados superan el límite de 0.8, lo cual hace que el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red comience a ser importante. A medida que se disminuye la precisión de los instrumentos de medidas (aumento de la desviación típica), los residuos normalizados disminuyen y, con ellos, el efecto que la no consideración tiene sobre el estado estimado.

Hay que destacar de los ensayos realizados en estos últimos apartados que, las medidas que presentan mayores residuos normalizados son los flujos e inyecciones de potencia reactiva en aquellas ramas correspondientes a transformadores.

5.7. Ensayos en Situaciones Desfavorables en Baja Tensión

A continuación, en el presente apartado se decide plantear una situación en la red ‘Red2_BT_Sevilla’ que refleje un escenario que fácilmente puede tener lugar en el sistema eléctrico español en baja tensión.

Se supone que dicha red dispone de un CT cuyo transformador es de alta eficiencia, lo cual supone que las pérdidas en la rama de magnetización serán menores que las que se tendrían en un transformador de peores características. Dado que dicha red suministra electricidad a una zona residencial, durante el día, el consumo de potencia será bajo, el cuál se estima un 15% del nivel de carga definido en la *Ilustración 18*. Y, finalmente, dado que la empresa distribuidora trata de que la red opere en unas condiciones tales que la circulación de reactiva sea aceptable, se supondrá un factor de potencia igual a 0.9.

Tras definir las condiciones de operación de la red, se lleva a cabo una estimación de estado para comprobar qué efecto tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador. A modo ilustrativo, se decide comparar este mismo escenario con otro de ese mismo día, pero a una hora diferente, donde el consumo residencial es más significativo, tomándose el estado de carga definido en la *Ilustración 18*.

Tabla 54: RN escenario desfavorable.

Nivel de carga al 15%		Operación normal	
	RN		RN
Q1	23,0	Q1	1,5
Q1-2	23,0	Q1-2	1,5
Q6	1,7	Q6	0,5
Q3	1,6	Q3	0,5
Q10	1,4	Q10	0,4
Q9	1,3	Q9	0,4

En la *Tabla 54* se observa la gran diferencia existente entre los residuos normalizados de ambos escenarios. Mientras que en el primero, con un bajo nivel de carga los residuos normalizados llegan a ser muy elevados, en la situación de operación normal, no superan el valor de 1.5. Además, se observa que cuando el nivel de carga es el mayor, el número de medidas con residuos normalizados algo más significativos aumenta.

Las medidas que presentan mayores residuos normalizados, una vez más, son las inyecciones o flujos de potencia reactiva en aquellas ramas que se corresponden con transformadores.

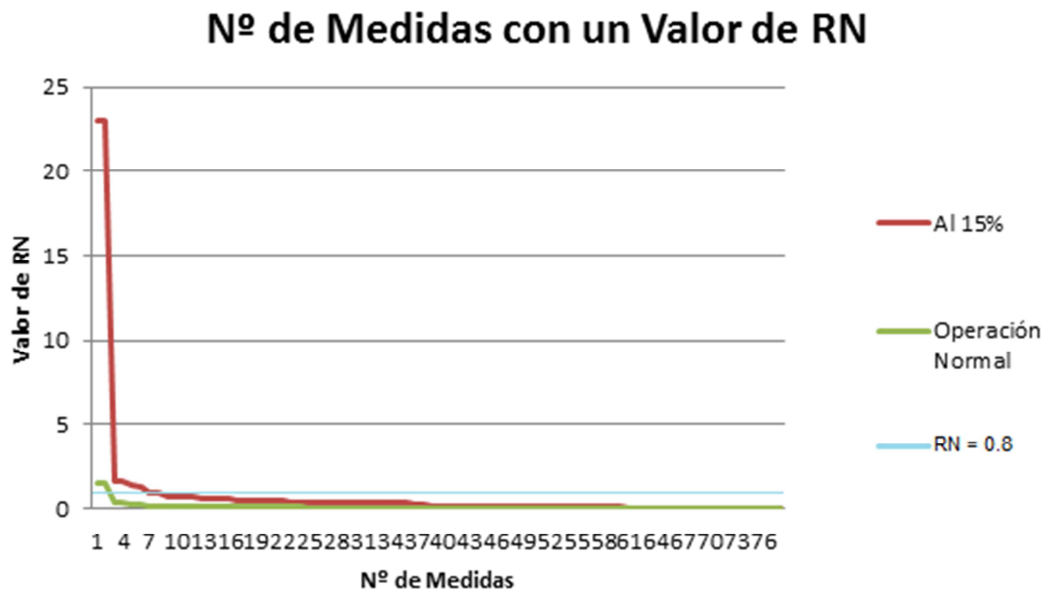


Ilustración 28: Nº de medidas con un valor de RN en el escenario realista.

Esta última afirmación puede verse claramente en la *Ilustración 28*, donde se puede ver que el número de medidas que superan el valor de 0.8 es mayor en el escenario en el que el nivel de carga es menor. No parece que el hecho de utilizar un transformador de mayor eficiencia tenga un efecto importante en comparación con el efecto que produce el nivel de carga de la red.

Este último ensayo deja claro que existen escenarios a los que puede verse sometido una misma red en la que no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores tiene un efecto muy relevante.

5.8. Efecto de la Generación Distribuida

Durante los ensayos realizados, se puede concluir que el nivel de carga que presente la red es un estado de vital importancia a la hora de determinar si considerar o no las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores tiene un efecto significativo sobre la estimación de estado. Un nivel de carga bajo en redes de media y baja tensión hace que se requiera considerar dichas ramas en el modelo topológico de la red para obtener residuos normalizados por debajo del límite de medida errónea que no contaminen los resultados de la herramienta de estimación.

Hasta el momento se ha analizado la red que presenta generación distribuida cuando el nivel de carga de los transformadores oscila entre el 50 y 60%. No obstante, las fuentes de energías renovables no son controlables ni aportan una cantidad mínima y constante a la red. En muchas situaciones, la generación de energía será pequeña, por lo que los transformadores que permiten incorporar las plantas de generación renovable a la red estarán sometidos a un bajo nivel de carga.

En este apartado se pretende analizar el impacto que tiene el nivel de carga de estos transformadores sobre la con consideración de las pérdidas en la rama de magnetización en estimación de estado.

5.8.1 Descarga Puntual de Transformadores

En este escenario se plantea descargar algunos transformadores de interconexión de los generadores de las fuentes de generación distribuida. En los ensayos anteriores, estos se encontraban a un nivel de carga que oscilaba entre el 50-60% de la potencia nominal, mientras que, en esta nueva situación, se disminuye por debajo del 35%, manteniendo intacta el consumo y generación del resto de cargas y generadores. La *Ilustración 29* refleja los generadores a los que se les modifica el nivel de generación, con objeto de simular un escenario desfavorable en el que la potencia aportada por dichas fuentes no es elevada.

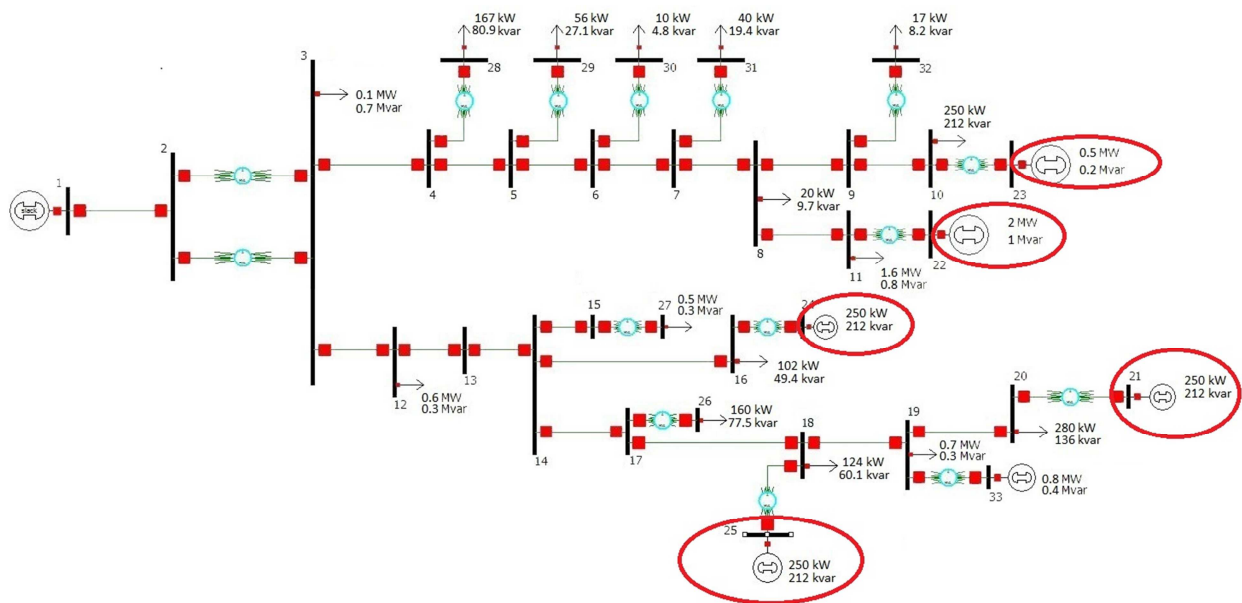


Ilustración 29: Generadores modificados en la red de Generación Distribuida.

En primer lugar, se muestra el ensayo en el que disminuye la generación de todos los generadores indicados en la *Ilustración 29*, de forma tal que nivel de carga de los transformadores se encuentra en torno al 20%. Se realiza el reparto de carga considerando la rama de magnetización, obteniendo así un conjunto completo de medidas y se lleva a cabo la estimación de estado sin considerar la rama de magnetización de todos los transformadores de la red.

Tabla 55: Nivel de carga de los transformadores al 20% y RN de la red con Generación Distribuida.

Trafos	Niv carga	Red Gen. Distrib.	
			RN
21_20	21%	Q20-21	4,6
22_11	21%	Q18-25	4,4
23_10	20%	Q16-24	4,4
24_16	18%	Q24	2,9
25_18	21%	Q24-16	2,9
		Q25	2,7

La *Tabla 55* muestra el nivel de carga de cada uno de los transformadores en cuyo generador asociado se ha disminuido la potencia que aporta al sistema. Además, también recoge las medidas y los residuos normalizados máximos resultantes de la estimación de estado.

Se observa que el efecto de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red del estimador de estado es elevado, ya que los residuos normalizados no sólo presentan valores que superan el valor de 0.8, sino que superan incluso el límite de medida errónea, considerándose como erróneas medidas que no lo son.

Por tanto, en situaciones en la que los transformadores asociados a generación distribuida se encuentran descargados, no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en estimación de estado tiene un efecto relevante, incluso aunque el resto de transformadores se encuentren cargados.

De igual forma, se plantea realizar el mismo ensayo disminuyendo aún más el nivel de carga de los transformadores a un 15% de su potencia nominal.

Tabla 56: Nivel de carga de los transformadores al 15% y RN de la red con Generación Distribuida.

Trafos	Niv carga	Red Gen. Distrib.	
			RN
21_20	16%	Q16-24	6,2
22_11	16%	Q18-25	6,0
23_10	15%	Q20-21	4,4
24_16	14%	Q24	3,8
25_18	16%	Q24-16	3,8
		Q25	3,6

La *Tabla 56* recoge los niveles de carga de los transformadores, así como las medidas con mayores residuos normalizados consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en la estimación de estado. Se puede apreciar que en esta situación donde el nivel de carga es mucho menor, el efecto de no considerar las pérdidas en dicha rama son mucho más notable, tal y como se concluía en el *apartado 5.2.2*. Los residuos normalizados máximos ascienden al doble del límite de medida errónea, corroborando así las conclusiones del citado apartado.

Es por ello que esta situación de descarga es muy común en redes que presentan generación distribuida, por lo que no considerar la rama de magnetización en los transformadores en el modelo topológico de red dará lugar a un alto grado de contaminación de la estimación.

Finalmente, se plantea analizar un escenario de la red con generación distribuida con los niveles de carga de los transformadores tal y como se define en la *Ilustración 29*. La única diferencia reside en que exclusivamente se modifica el nivel de carga del transformador 23-10, el cual presentará un nivel de carga aproximadamente del 10%. El objetivo de este ensayo es determinar si en una red con un elevado número de transformadores el hecho de que uno sólo se encuentre en situación de descarga afecta significativamente a la estimación de estado.

Tabla 57: RN de la red con Generación Distribuida cuando sólo el transformador 23-10 se encuentra al 10% de carga.

Red Gen. Distrib.	
	RN
Q10-23	4,8
Q23	3,7
Q23-10	3,6
Q20-21	1,5
Q18-25	1,2
Q16-24	1,2

La *Tabla 57* recoge los resultados del ensayo en el que sólo el transformador 23-10 se encuentra descargado. Tal y como se observa, el grado de descarga del transformador sumado a no tener en cuenta en la herramienta de estimación la rama de magnetización de los transformadores, da lugar a que los residuos normalizados de las medidas asociadas a dicho transformador superen el límite de medida errónea, además de un elevado grado de contaminación de la estimación al asociar residuos normalizados mayores de la unidad a medidas exactas cuando no se tiene en consideración el efecto del ruido.

Se concluye, por tanto, que incluso el hecho que uno de los generadores de la red de generación distribuida no aporte potencia suficiente como para que el transformador alcance un determinado nivel mínimo de carga, afecta notablemente al resultado de la estimación de estado, siendo el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización elevado.

Estas situaciones expuestas pueden reflejar escenarios en la que el día está nublado o es de noche, lo cual mermaría notablemente si parte de la generación distribuida es fotovoltaica, y si bien, la generación es eólica, puede simular una situación donde la velocidad del viento no es suficiente como para aprovechar su energía. Por tanto, dada la tendencia del sistema eléctrico a incorporar generación en media y baja tensión, es conveniente tener en cuenta el efecto que tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores cuando algunos generadores de la red con generación distribuida se encuentran funcionando a baja capacidad.

5.8.2 Red sin Generación Distribuida

Para concluir este apartado de ensayos, se simula el efecto que tiene pasivar la generación distribuida en la red de la *Ilustración 16* al mismo tiempo que no se considera el efecto de las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores. Es decir, se hace cero la potencia activa y reactiva de todos los generadores a excepción del principal (conectado en el nudo 1), que será el encargado de suministrar toda la potencia que requieren las cargas.

Se espera que al ser nula la generación, los transformadores asociados se encuentran totalmente descargado, por lo que el flujo de potencia que circula por dichos elementos que estima la herramienta de estimación es nulo. Sin embargo, debido a las pérdidas de la rama de magnetización, que realmente existen, dan lugar a que las medidas proporcionadas por los instrumentos de medición sean distintas de cero, asignando un residuo normalizado.

Tabla 58: RN con y sin generación distribuida.

Con Gen. Distrib.		Gen. Distrib. Pasivada	
	RN		RN
Q9-32	1,6	Q19-33	31,8
Q26	1,3	Q10-23	31,3
Q26-17	1,3	P19-33	31,2
Q6-30	1,3	Q18-25	29,1
Q18	1,2	Q16-24	29,1
Q4-28	1,2	Q20-21	29,0

La *Tabla 58* recoge las medidas y los residuos máximos asignados de la red 'Red con Generación Distribuida' cuando, además de no considerarse las pérdidas en la rama de magnetización, se pasivan los generadores. Estos residuos se comparan con los que se obtienen si la red sí tiene la presencia esta generación adicional.

Tal y como cabe esperar, al hacer nula la generación, los transformadores se encuentran totalmente descargados, dando lugar a residuos normalizados extremadamente grandes, superando en diez veces el valor de medida errónea. Esta situación contamina mucho la veracidad del estado estimado, ya que se consideran erróneas una gran cantidad de medidas que, realmente, no lo son.

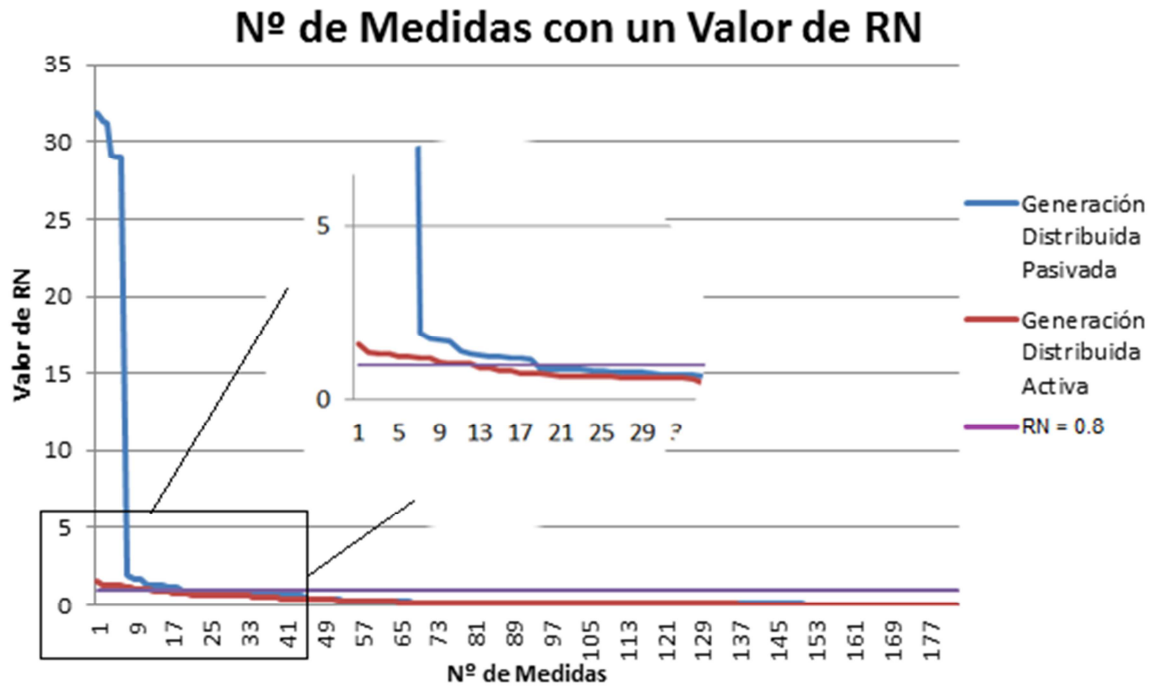


Ilustración 30: Nº de medidas con un valor de RN para la red de Generación Distribuida activa y pasivada.

La *Ilustración 30* refleja claramente la diferencia de los residuos consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en la estimación de estado en función de la presencia de generación distribuida. Este efecto es mucho más notable cuando la red no dispone de la inyección de potencia de estas fuentes alternativas. Esta situación puede reflejar escenarios en la que el día está nublado o es de noche, lo cual merma notablemente si la generación distribuida es fotovoltaica, y si bien, la generación es eólica, puede simular una situación donde la velocidad del viento no es suficiente como para aprovechar su energía.

Por otro lado, cabe destacar que cuando la presencia de generación distribuida se ve mermada, el número de medidas con residuos normalizados relevantes, los cuales consideramos superior al valor de 0.8, aumenta respecto al escenario en la que la generación es más fuerte. Concretamente, cuando la red dispone de generación distribuida, el número de medidas con residuos superiores a la unidad es 10, mientras que al pasivar las fuentes, el valor asciende a 19.

6 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS

Tras realizar los ensayos expuestos en el *apartado 5*, se puede concluir que la rama de magnetización no tiene un efecto muy relevante en la estimación de estado. Esta afirmación presenta varios matices, ya que existen ciertos escenarios y circunstancias en las que no considerar las pérdidas en dicha rama puede tener un efecto de notablemente importante.

Siendo más exhaustivo en este apartado, hay situaciones que suponen una mayor sensibilidad de la herramienta de estimación al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red. Por ello, se puede concluir que:

- En redes de alta, media y baja tensión con estado de cargas o explotación, tal que los transformadores se encuentren a un nivel de carga superior al 50%, no considerar la rama de magnetización de los transformadores no tiene una vital importancia en estimación de estado. Sin embargo, el estado estimador puede quedar bastante contaminado en redes de media tensión, que consideran transformadores de media-baja tensión, al asignar a varias medidas residuos normalizados con valor considerable.
- Cuanto menor es el nivel de carga de la red, mayor sensibilidad tienen los residuos normalizados, consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en estimación de estado. Es decir, a menor nivel de carga, mayor valor presentan dichos residuos. Este fenómeno ocurre en todo tipo de redes.
- En redes de alta-media tensión, no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador de estado, solo tiene relevancia cuando el nivel de carga de las mismas es bajo. En el resto de escenarios de carga, los residuos normalizados son del orden de los que se producirían si se considerase ruido en las medidas.
- En redes de media y baja tensión, no considerar dicha rama en el modelo topológico de la red del estimador, tiene como consecuencia residuos normalizados mayores que los que se obtienen en redes de alta-media tensión.
- Para niveles de carga altos en redes de media y baja tensión, no considerar las pérdidas en la rama de magnetización no tiene un efecto relevante en la estimación de estado, ya que los residuos normalizados no superan el límite definido de 0.8.
- En redes de media y baja tensión, no considerar la rama de magnetización cuando el nivel de carga de los transformadores es bajo, es decir, por debajo del 30% de su potencia nominal, tiene un efecto muy significativo en la estimación de estado. Mientras que si el nivel de carga se encuentra entre un 30 y 85% de la potencia nominal de los transformadores, el efecto será menos importante aunque el grado de contaminación del estado estimado empieza a ser notable.
- En redes de alta-media tensión, valores extremos de tensiones en los nudos, próximos a 0.9 o 1.1 pu, da lugar a una ligera disminución o aumento, respectivamente, de los residuos normalizados consecuencia de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red, aunque esta variación es prácticamente nula. En ningún caso, los residuos normalizados superan el límite de 0.8, por lo que este efecto no es relevante.

- En redes de media y baja tensión, valores extremos de tensiones en los nudos, próximos a 0.9 o 1.1 pu, da lugar a una disminución o aumento, respectivamente, de los residuos normalizados consecuencia de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red. La relevancia o no de este efecto dependerá de cuan sensible sea la red a la no consideración de dicha rama, sin embargo, el grado de contaminación será más elevado cuando se disponen de tensiones más elevadas.
- Cuanto mayores son los valores de R_{fe} y X_m , menor es el efecto que tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en el modelo topológico de la red del estimador de estado. Igualmente, cuanto menores sean los parámetros, mayor es la relevancia de no considerarlos. Esta tendencia ocurre con todo tipo de redes, siendo más notable el efecto en las de media y baja tensión.
- En redes de alta-tensión tensión, el valor de dichos parámetros no tiene mucha relevancia en la estimación de estado, ya que en ningún caso da lugar a residuos normalizados que superen el límite 0.8. Aunque los residuos normalizados aumenten consecuencia de disponer de reducidos valores de los parámetros, ello sólo se traduce en un mayor grado de contaminación aunque sin ser notablemente significativo.
- En redes de media y baja tensión, el valor de dichos parámetros tiene mucha relevancia en la estimación de estado, ya que cuanto más reducidos son los valores de la resistencia de pérdidas en el hierro y la reactancia de magnetización, mayores son residuos normalizados que, doblan incluso el límite de $RN=0.8$.
- El elevado o reducido valor de la resistencia del núcleo ferromagnético de los transformadores, no genera una variación importante en los residuos normalizados consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización en la estimación de estado. De hecho, se obtienen los mismos residuos que otros transformadores con idéntica reactancia de magnetización y distinto parámetro resistivo de dicha rama.
- El valor que tenga la reactancia de la rama de magnetización de los transformadores sí tiene relevancia en el valor de los residuos normalizados, obtenidos de la estimación de estado cuando no se consideran los parámetros de la rama de magnetización en el modelo topológico de la red. Existe una relación inversa entre el tamaño del valor de la reactancia de magnetización y el valor de los residuos normalizados.
- En estimación de estado, no considerar la reactancia de magnetización puede llegar a tener un efecto vital en la validez del estado estimado. No considerar la resistencia de dicha rama no genera un efecto significativo.
- Se obtienen los mismos residuos normalizados cuando se varía el tamaño de la reactancia de magnetización que cuando se varían ambos parámetros de la rama en paralelo de los transformadores y se realiza la estimación de estado sin considerar la rama de magnetización de los transformadores.
- Si la estimación de estado considera la resistencia de la rama de magnetización pero no la reactancia, los residuos normalizados resultantes son los mismos que si el modelo topológico no considera ninguno de estos parámetros. Por el contrario, si sólo considera la reactancia de magnetización los residuos normalizados son mucho más reducidos. Por tanto, se concluye que la reactancia de magnetización tiene mayor influencia en el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización que la resistencia del núcleo ferromagnético.
- En redes de baja y media tensión que consideran los transformadores de los CTs, cuanto menor sea el flujo de potencia reactiva, mayores son los residuos normalizados, consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red. Se supera el límite de $RN=0.8$ siempre que la circulación de potencia reactiva sea tal que el factor de potencia sea superior a 0.9, siendo importante el efecto adicional a la no consideración de dicha rama.
- Cuanto mayor sea el factor de potencia, es decir, menor circulación de potencia reactiva haya por los transformadores, mayor será el grado de contaminación del estado.
- Independientemente del tipo de red, cuanto menor es el valor de la desviación típica de las medidas de flujo de potencia activa y reactiva, mayores residuos normalizados se obtienen al no considerar las pérdidas en la rama de magnetización. Es decir, cuanto más precisas sean las medidas de flujo de potencia, mayor es el efecto de no considerar la rama de magnetización de los transformadores en el

modelo topológico de la red. Este efecto tendrá mayor relevancia en redes de media y baja tensión que no consideren la rama de magnetización de los transformadores.

- La presencia de generación distribuida aumenta notablemente la sensibilidad del estimador de estado ante la no consideración de las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, aumentando los efectos antes mencionados.
- En redes que presenten generación distribuida, la descarga puntual de tan sólo uno de los transformadores asociados a estos generadores, da lugar a que el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores sea sustancial en la herramienta de estimación.
- Cuanto mayor número de transformadores se encuentren en situación de bajo nivel de carga, mayor número de medidas presentarán residuos normalizados superiores al límite de medida errónea y, mayor grado de contaminación del estado estimado.
- Las medidas más sensibles al efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores son los flujos e inyecciones de potencia reactiva de las ramas correspondientes a transformadores. Esto se debe a la diferencia en el orden de magnitud de la resistencia del núcleo ferromagnético y la reactancia de magnetización, ya que el parámetro resistivo es entre 5 y 8 veces más grande, por tanto, en la admitancia es más relevante el término reactivo.
- La superposición de aquellos fenómenos que generen mayor sensibilidad de la estimación de estado ante la no consideración de las pérdidas en la rama de magnetización da lugar a mayores residuos normalizados, pudiendo en alguna situación generar que incluso se supere el límite de medida errónea.
- El fenómeno que mayor efecto genera ante la no consideración de la rama de magnetización de los transformadores es el nivel de carga de los mismos, la precisión de los instrumentos de medida y el valor del parámetro reactivo de la rama de magnetización de los transformadores.

7 ¿CUÁNDO ES CONVENIENTE QUE EL ESTIMADOR DE ESTADO CONSIDERE LAS PÉRDIDAS EN LA RAMA DE MAGNETIZACIÓN?

El hecho de que sea necesario considerar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red de la herramienta de estimación de estado, reside en aquellas situaciones de los ensayos del *apartado 5* en los que se han obtenido residuos normalizados que superen el límite de medida errónea. También, se considerará que si los residuos normalizados superan el valor unidad, y el número de medidas con al menos este valor es elevado, la veracidad del estimador queda en cuestión, ya que se asigna un residuo a ciertas medidas que son exactas, cuando no se ha considerado ruido en las medidas.

A juzgar por los resultados obtenidos en los ensayos, en este apartado se recomienda en qué redes sería conveniente considerar las pérdidas en la rama de magnetización.

- En redes de alta-media tensión sólo será necesario considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores si los transformadores son susceptibles de operar a un nivel de carga bajo. En el resto de los casos, los residuos normalizados consecuencia de ello son muy reducidos y no se supera el límite de 0.8.
- Las redes de baja tensión presentan residuos normalizados elevados cuando el nivel de carga es se encuentra por debajo del nivel de operación normal. Es decir, los transformadores operan a menos de un 80% de su potencia nominal. Estos residuos presentan valores muy elevados cuando el nivel de los mismos se encuentra por debajo del 40% de su potencia nominal. Esta situación se genera al menos una vez al día, cuando el consumo de la red es mínimo, como es el caso de las zonas residenciales, durante la mañana, o zona más industrial durante la noche. Por tanto, en las redes de baja tensión sí será necesario considerar las pérdidas en la rama de magnetización en el modelo topológico de la red del estimador de estado.
- En redes de media tensión que consideren los transformadores de media-baja tensión, no considerar la rama de magnetización de los transformadores tiene un efecto significativo en situaciones en las que los transformadores operen con un nivel de carga inferior al 85%, por lo que se recomienda incluir en el modelo de red las pérdidas que se producen en esta rama.
- Las redes que presenten generación distribuida son mucho más sensibles a situaciones de descarga por parte de los transformadores asociados a estas fuentes de generación. Es por ello, que en este tipo de redes es necesario que el estimador de estado considere en el modelo topológico las pérdidas en la rama de magnetización.

Por tanto, se recomienda considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en redes de media y baja tensión.

8 RECOMENDACIÓN DE VALORES PARA LA RAMA DE MAGNETIZACIÓN

Dados los resultados obtenidos en los ensayos de los apartados anteriores, se remarca la necesidad de incorporar al modelo topológico de la red del estimador de estado la rama de magnetización de los transformadores, ya que existen circunstancias en las que no considerarla, dará lugar a residuos normalizados elevados que contaminen en gran medida la veracidad del estado estimado.

Sin embargo, dada que esta importancia se limita a situaciones en las que el nivel de carga de los transformadores de redes de media y baja tensión es baja, lo cual es muy frecuente en redes que incorporan generación distribuida, se podría introducir un valor aproximado de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización.

Por ello, se proponen en las *Ilustraciones 31 y 32* un valor aproximado para dichos parámetros en transformadores de alta, media y baja tensión, clasificándolos según la relación de tensión y potencia nominal del transformador.

Estimaciones		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)	
		300		250		200		150		100		75	
V AT (kV)	V BT (kV)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)
220	132	328,0	103,0	252,0	135,0	1138,0	143,5	1074,0	224,0	1011,0	305,0		
220	66	767,0	457,0	727,0	446,0	687,0	434,0	648,0	423,0	605,0	323,0	799,0	536,0
220	20												
132	66											428,0	126,0
132	20												
66	20												

		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)		S _n (MVA)	
		60		50		40		20		15		10	
V AT (kV)	V BT (kV)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)
220	132												
220	66												
220	20	1303,0	1172,0	1055,0	677,0	1537,0	878,0	3025,0	1613,0	2665,0	1518,0	2305,0	1422,0
132	66	316,7	203,0	340,0	261,0	363,0	319,0	1029,0	590,0	1361,0	726,0		
132	20			696,0	421,0	452,0	315,0	1089,0	581,0	1313,0	908,0	1997,0	1065,0
66	20							279,0	145,0	360,0	212,0	670,0	225,0
												806,0	481,0

Ilustración 31: Valores de R_{fe} y X_m para transformadores de alta y media tensión según la potencia nominal.

Estimaciones		Sn (MVA)		Sn (MVA)		Sn (MVA)		Sn (MVA)		Sn (MVA)	
		2,5		2		1,5		1		0,63	
V AT (kV)	V BT (kV)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)
20	0,4	174	32,6	261	45,2	304,5	51,6	348	57,9	316,3	54,3

		Sn (MVA)		Sn (MVA)		Sn (MVA)		Sn (MVA)	
		0,5		0,2		0,1		0,05	
V AT (kV)	V BT (kV)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)	R _{fe} (kΩ)	X _m (kΩ)
20	0,4	588	80,8	1380	180,1	2240	291,8	3080	403,4

Ilustración 32: Valores de R_{fe} y X_m para transformadores de baja tensión según la potencia nominal.

Los datos de estas tablas se obtuvieron a partir de una serie de transformadores de una base de datos disponible. Estos elementos se clasificaron según la relación de transformación y potencia nominal de los mismos. Dado que no todos los transformadores tenían los mismos valores de la resistencia ferromagnética ni de la reactancia de magnetización, se realiza media de los valores de los parámetros para cada uno de los grupos de transformadores.

Sin embargo, pese a recomendar estos valores, podría ocurrir que no se mitigara el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, por lo que se decide realizar algunos ensayos para corroborar si esta aproximación de los valores consigue disminuir este efecto.

8.1. Modificación del Algoritmo

En primer lugar, y por mayor simplicidad, se modifica ligeramente el algoritmo de la *Ilustración 7* para que en vez de eliminar la rama de magnetización, asigne al modelo topológico de la red los parámetros aproximados de la rama de magnetización de los transformadores.

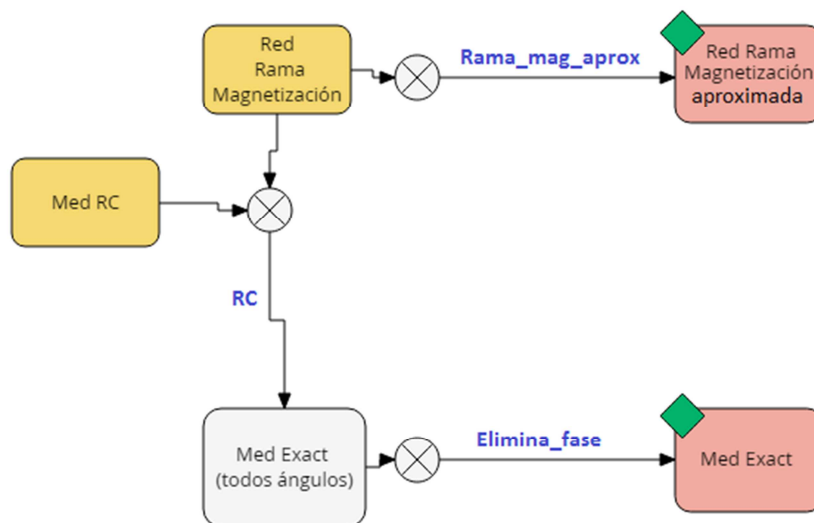


Ilustración 33: Diagrama de bloques del algoritmo que genera rama magnetización aproximada.

Tal y como se observa en el diagrama de bloques de la *Ilustración 33*, se ha modificado el algoritmo inicial. Concretamente, se emplea una función 'Rama_mag_aporx' que tiene como entrada la red original y, en función de la relación de tensiones del transformador y la potencia nominal del mismo, asigna los valores aproximados de la rama de magnetización de los transformadores. Dicha función devuelve la red con la modificación de dicha rama la cual es copiada en un archivo con la misma estructura que el de entrada, modificando el nombre para que pueda ser integrado en el algoritmo original.

En caso de que se disponga del fichero de red con la aproximación de los parámetros de la rama de magnetización de los transformadores, este puede introducirse manualmente, por lo que la función sólo hará una copia del archivo modificando el nombre del mismo.

Una vez se dispone de este algoritmo, se procede a realizar los ensayos en aquellas redes donde la criticidad de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización era mayor.

8.2. Red con Generación Distribuida

En primer lugar, se decide realizar ensayos con la red 'Red de Generación Distribuida' (ver *Ilustración 16*) en los que se parte de un fichero de red con los parámetros exactos de la rama de magnetización para, con ellos y un fichero mínimo de medidas, realizar un reparto de cargas y obtener un conjunto completo de medidas, las cuales, tal y como se ha considerado hasta ahora, son medidas reales y exactas.

Posteriormente, se modifica el fichero de red introduciéndose un valor aproximado de R_{fe} y X_m en cada uno de los transformadores de dicha red, según los parámetros recomendados en las tablas de la *Ilustración 30* y *31*.

Finalmente, se realiza la estimación de estado con el conjunto completo de medidas exactas y el fichero de red con la rama de magnetización aproximada, esperando obtener residuos normalizados pequeños o nulos.

El primero de los escenarios a considerar, es cuando la red se encuentra a un nivel de carga tal, que los flujos de potencia que circulan por transformadores son entre un 50-65% de su potencia nominal. Es decir, el mismo escenario planteado en el apartado 5.1. La *Tabla 59* recoge las medidas y residuos normalizados, consecuencia de la estimación de estado, de este ensayo, comparándolo con el que se llevó a cabo en dicho apartado previo.

Tabla 59: RN de la red de Generación Distribuida sin rama de magnetización y aproximándola para un nivel de carga normal.

Nivel Carga Normal			
Sin Rama Mag.		Rama Mag. Aprox.	
	RN		RN
Q9-32	1,6	Q3-2,0	0,0
Q26	1,3	Q3-2,1	0,0
Q26-17	1,3	Q19	0,0
Q6-30	1,3	Q33	0,0
Q18	1,2	Q33-19	0,0
Q4-28	1,2	Q17-14	0,0

Tal y como se observa en la *Tabla 59*, aproximar los valores de la rama de magnetización por aquellos que se sugieren en las *Ilustraciones 31* y *32* da lugar a que los residuos normalizados obtenidos sean nulos. Mientras que en el escenario en el que no se considera la rama de magnetización los residuos normalizados contaminan notablemente la estimación de estado al presentar residuos superiores a la unidad, la nueva situación en la que se aproxima el valor de los parámetros mejora notablemente la veracidad de la estimación.

Por otro lado, también resulta de interés comprobar como de fiable es esta aproximación planteándose el escenario más desfavorable, es decir, aquella situación en la que el nivel de carga es muy bajo. Esta casuística se contempló en el *apartado 5.2* del presente documento, por lo que se incorporan los resultados a la *Tabla 60* para poder comparar los nuevos resultados obtenidos con las aproximaciones.

Tabla 60: RN de la red de Generación Distribuida sin rama de magnetización y aproximándola para un nivel de carga bajo.

Nivel Carga Bajo (x0,1)			
Sin Rama Mag.		Rama Mag. Aprox.	
	RN		RN
Q9-32	13,4	Q33	0,0
Q20-21	12,1	Q33-19	0,0
Q6-30	12,0	Q19-33	0,0
Q4-28	11,7	Q19	0,0
Q24	11,7	Q20-21	0,0
Q24-16	11,7	Q4-28	0,0

La *Tabla 60* recoge las medidas y los residuos normalizados cuando la red se encuentra en un bajo nivel de carga. Las dos primeras columnas reflejan los resultados cuando no se consideran las pérdidas en la rama de magnetización, mientras que las dos siguientes, cuando se aproxima el valor de los parámetros de dicha rama por los que se sugieren en las *Ilustración 31* y *32*.

Se observa que cuando no se considera en el modelo topológico de la red la rama de magnetización, los residuos normalizados consecuencia de la estimación de estado, son elevados. No obstante, cuando se aproximan los valores de la rama de magnetización, estos residuos disminuyen drásticamente, llegando a ser aproximadamente cero.

Estos ensayos determinan, a priori, que aproximar el valor de la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red del estimador de estado presenta beneficios importantes para dicha estimación.

Sin embargo, ¿hasta qué punto son aceptables estos valores recomendados? ¿Qué ocurre si la resistencia del núcleo ferromagnético y la reactancia de magnetización aproximados distan mucho del valor real?

Cuanto mayor sea la diferencia existente entre el valor real y el aproximado, mayores residuos normalizados se obtendrán, ya que existen diferencias entre el modelo topológico real y el que se emplea en el estimador. Por tanto, se llevan a cabo unos ensayos que determinen el margen de error entre el valor real de la rama de magnetización y el aproximado en el que se puede incurrir sin contaminar la validez del estado estimado.

En primer lugar, se tratará de determinar el margen de error que se puede cometer en la aproximación de la rama de magnetización sin que ello genere residuos normalizados por encima del valor unidad, asegurando así que el grado de veracidad de la estimación es aceptable. Para ello, se simula la situación más desfavorable, la cual es cuando el nivel de carga de la red es bajo.

Tabla 61: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red con Generación Distribuida para un nivel de carga bajo 1.

Rama Mag. Aprox. Y Nivel Carga Bajo (x0,1)			
Error R_{fe} y X_m +9%		Error R_{fe} y X_m -7,5%	
	RN		RN
Q9-32	1,1	Q9-32	1,1
Q20-21	1,0	Q20-21	1,0
Q6-30	1,0	Q6-30	1,0
Q4-28	1,0	Q4-28	0,9
Q24	1,0	Q24	0,9
Q24-16	1,0	Q24-16	0,9

La *Tabla 61* recoge las medidas y los residuos normalizados cuando se incurre en un error de un porcentaje determinado en la aproximación del valor de la resistencia y reactancia de la rama de magnetización. Las dos primeras columnas recogen el caso en el que el valor aproximado supera un 9% el valor de los parámetros de dicha rama, mientras que las columnas siguientes, reflejan la situación en la que los valores estimados son menores que los que realmente son, concretamente, un 7.5% inferior.

A juzgar por los resultados obtenidos, cuando se comete un error en los valores de los parámetros de la rama de magnetización de 9% superior, se empiezan a obtener residuos que superan el valor unidad, al igual que cuando el valor de los parámetros es un 7.5% más pequeño. Ello, a priori, asegura que aproximar la rama de magnetización con un error entre el +9% y -7.5% da lugar a residuos normalizados por debajo de la unidad.

Nota: Aproximar un valor más pequeño de la rama de magnetización genera mayores residuos normalizados que si ese mismo error es cometido al sobreestimar los valores. Ello se debe a que cuanto menor es el valor de estos parámetros, más sensible es el estimador, tal y como se comprobó en el *apartado 5.4*.

Finalmente, se comprueba cual es el error máximo en el que se puede incurrir en la aproximación de los parámetros de la rama de magnetización sin que el estimador considere erróneas ciertas medidas, es decir, los residuos normalizados se encuentran por debajo del límite de medida errónea ($RN \leq 3$).

Tabla 62: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red con Generación Distribuida para un nivel de carga bajo 2.

Rama Mag. Aprox. Y Nivel Carga Bajo (x0,1)			
Error R_{fe} y X_m +30%		Error R_{fe} y X_m -20%	
	RN		RN
Q9-32	3,1	Q9-32	3,0
Q20-21	2,8	Q20-21	3,0
Q6-30	2,8	Q6-30	3,0
Q4-28	2,7	Q4-28	2,9
Q24	2,7	Q24	2,9
Q24-16	2,7	Q24-16	2,9

Al igual que en la *Tabla 61*, la *Tabla 62* recoge las medidas y los residuos normalizados cuando se incurre en un error de un porcentaje determinado en la aproximación del valor de la resistencia y reactancia de la rama de magnetización. La diferencia reside en que en esta situación el porcentaje de error cometido puede aumentar siempre que los residuos normalizados de las medidas se encuentren por debajo del límite de medida errónea.

Nota: El estado de carga de la red es descargado para contemplar la situación más desfavorable.

Se destaca que cuando el valor aproximado de la rama de magnetización es un 30% superior al valor real, empiezan a aparecer residuos normalizados cuyo valor es superior a 3, al igual que, cuando el valor es un 20% más pequeño. Por tanto, se asegura que aproximar los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización con un error entre el +30% y -20% da lugar a residuos normalizados por debajo del límite de medida errónea, aunque la estimación queda notablemente contaminada.

8.3. Red1_BT_Sevilla

Al igual que en el apartado anterior, se realizan los mismos ensayos con una red de baja tensión. En esta red el nivel de carga del transformador también está definido entre un 50 y 65%, aunque el transformador será diferente a los empleados en la red anterior. Con ello, se pretende comprobar si existen límites más restrictivos, o si por el contrario, los límites son los mismos. La red a evaluar es la red 'Red1_BT_Sevilla' (ver *Ilustración 17*).

En primer lugar, se lleva a cabo el análisis en el que el nivel de carga de la red es normal, es decir, los transformadores se encuentran dentro del rango especificado. En la *Tabla 63* se comparará el escenario donde no se contempla la rama de magnetización con la situación en la que aproximan los valores de los parámetros de dicha rama por aquellos sugeridos en la *Ilustración 31* y *32*.

Tabla 63: RN de la red Red1 Sevilla_BT sin rama de magnetización y aproximándola para un nivel de carga normal.

Nivel Carga Normal			
Sin Rama Mag.		Rama Mag. Aprox.	
	RN		RN
Q1	0,6	Q1	0,0
Q1-2	0,6	Q1-2	0,0
Q9	0,2	Q9	0,0
Q10	0,1	Q10	0,0
Q12	0,1	Q12	0,0
Q2-12	0,1	Q2-12	0,0

En la *Tabla 63* se observa que cuando no se considera la rama de magnetización de los transformadores en la red de baja tensión los residuos normalizados son cercanos a 0.6, tal y como se estudió en el *apartado 5.1*. Sin embargo, cuando se aproxima el valor de la rama de magnetización, los residuos se mitigan notablemente.

En esta situación, contemplar o no la rama de magnetización no supone una importancia relevante en la estimación de estado. No obstante, tal y como se observaba en el *apartado 5.2*, existían situaciones en las que no considerar las pérdidas en dicha rama suponía una elevada contaminación del estado estimado, ya que los residuos superaban en gran medida el límite de medida errónea. Por ello, en la *Tabla 64* se recoge este escenario desfavorable en el que el nivel de carga de la red es muy bajo.

Tabla 64: RN de la red Red1_BT_Sevilla de magnetización y aproximándola para un nivel de carga bajo.

Nivel Carga Bajo (x0,1)			
Sin Rama Mag.		Rama Mag. Aprox.	
	RN		RN
Q1	22,2	Q1	0,1
Q1-2	22,2	Q1-2	0,1
Q10	1,4	Q10	0,0
Q12	1,3	Q12	0,0
Q2-12	1,3	Q2-12	0,0
Q3	1,2	Q3	0,0

En la *Tabla 64* se observa la misma tendencia que en el escenario anterior. Para la situación en la que no se considera la rama de magnetización en el modelo topológico de la red, los residuos normalizados son muy elevados, llegan a ser 4 veces mayor que el límite de medida errónea. Sin embargo, en el escenario en el que se aproximan los valores de la rama de magnetización por aquellos que se facilitan en la *Ilustración 31* y *32*, los residuos normalizados disminuyen notablemente, consiguiendo que estos sean prácticamente nulos, o próximos a este valor.

Al igual que en el apartado anterior, es conveniente determinar el margen de error que se podría cometer en la aproximación de los valores de los parámetros en la rama de magnetización. Por ello, en primer lugar se supondrá que los residuos normalizados consecuencia de cometer un cierto porcentaje de error no superan el límite de la unidad, de esta forma se asegura no contaminar la veracidad del estado estimado.

Para ello, se ensaya en la situación más desfavorable, la cual es en la que el nivel de carga de la red es un 10% del estado definido anteriormente. La *Tabla 65* muestra el nivel máximo de error en el que se puede incurrir sin que los residuos normalizados que superen la unidad.

Tabla 65: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red Red1_BT_Sevilla para un nivel de carga bajo 1.

Rama Mag. Aprox. Y Nivel Carga Bajo (x0,1)			
Error R_{fe} y X_m +6%		Error R_{fe} y X_m -4%	
	RN		RN
Q1	1,1	Q1	1,0
Q1-2	1,1	Q1-2	1,0
Q10	0,1	Q10	0,1
Q12	0,1	Q12	0,1
Q2-12	0,1	Q2-12	0,1
Q3	0,1	Q3	0,1

Tal y como refleja la *Tabla 65*, cuando se comete un error del 6% en la aproximación de los parámetros de la rama de magnetización superior al valor que realmente tienen, se obtienen valores de los residuos normalizados próximos a la unidad. De igual forma, cuando el error es de un 4% por debajo del valor real, se obtendrán residuos normalizados próximos a 1.

Nota: Aproximar un valor más pequeño de la rama de magnetización genera mayores residuos normalizados que si ese mismo error es cometido al sobreestimar los valores. Ello se debe a que cuanto menor es el valor de estos parámetros, más sensible es el estimador, tal y como se comprobó en el *apartado 5.4*.

Tal y como se observa, existe una situación más restrictiva que limita el posible error en el que se puede incurrir al aproximar los valores de los parámetros de la rama de magnetización. Por tanto, se asegura que aproximar los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización con un error entre el +6% y -4% da lugar a residuos normalizados menores o igual a la unidad. Cometer un mayor error puede dar lugar a un mayor grado de contaminación del estado estimado de la red.

Finalmente, con objeto de determinar el error máximo en el que se podría incurrir en la rama de magnetización considerando que el estado estimado es el mínimo admisible, se establece que el valor de los residuos normalizados máximos serán menores o igual al límite de medida errónea, $RN \leq 3$. Al igual que en el ensayo anterior, se realiza el análisis en el escenario más desfavorable.

Tabla 66: Porcentaje de error en la rama de magnetización en la red Red1_BT_Sevilla para un nivel de carga bajo 2.

Rama Mag. Aprox. Y Nivel Carga Bajo (x0,1)			
Error R_{fe} y X_m +16,5%		Error R_{fe} y X_m -12%	
	RN		RN
Q1	3,0	Q1	3,1
Q1-2	3,0	Q1-2	3,1
Q10	0,2	Q10	0,2
Q12	0,2	Q12	0,2
Q2-12	0,2	Q2-12	0,2
Q3	0,2	Q3	0,2

La *Tabla 66* recoge las medidas y los residuos normalizados asociados cuando se incurre en un cierto error al aproximar los parámetros de la rama de magnetización. A juzgar por los resultados, cometer un error en la aproximación de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización del 16.5% superior al valor real, las medidas presentan residuos normalizados próximos al límite de medida errónea. Igualmente ocurre cuando el error incurrido es un 12% inferior.

Al igual que en el ensayo anterior, existe una situación más restrictiva que limita el error en el que se puede incurrir al aproximar el valor de los parámetros de la rama de magnetización. Por tanto, se establece que aproximar los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización con un error entre el +16.5% y -12% da lugar a residuos normalizados menores o igual al límite de medida errónea.

Es conveniente destacar de estos ensayos realizados que se ha cometido el mismo porcentaje de error en la aproximación de la resistencia y de la reactancia. No obstante, a juzgar por los resultados obtenidos en el *apartado 5.4*, cometer un error en la reactancia tiene mayor relevancia que cometerlo en la resistencia de la rama de magnetización, ya que el parámetro reactivo es 5 ó 7 veces más pequeño que el resistivo, por tanto, la susceptancia será mayor que la admitancia. Ello hace que un error en esa susceptancia sea más significativo que en la admitancia.

9 INFLUENCIA EN LA DETECCIÓN DE PÉRDIDAS NO TÉCNICAS

Después de los ensayos presentados en el presente estudio, parece evidente que, la no consideración de las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores tiene un efecto relevante en la estimación de estado, existiendo situaciones en las que se contamina en exceso el estado estimado y llegando, incluso, a dar lugar a residuos normalizados que superan el límite de medida errónea.

Estas situaciones en las que se contamina en mayor o menor medida el estado estimado, asignándose residuos normalizados a medidas que sin la presencia de ruido, a priori, son reales, por tanto, en los ensayos realizados, deberían tener residuos normalizados nulos.

Una posible aplicación de la herramienta de estimación de estado puede ser la identificación de pérdidas no técnicas, es decir, situaciones en las que el consumo medido por los instrumentos de medida es menor del que debiera ser. Esta aplicación requiere que la veracidad del estado estimado sea lo más fiable posible, ya que, si algún efecto distorsiona este estado, compromete la capacidad para determinar en qué nudo se producen las pérdidas no técnicas.

En este apartado se plantea analizar si el estimador de estado es capaz de determinar en qué nudo se producen este tipo de pérdidas. Para ello, en el algoritmo de la *Ilustración 7* se modificará manualmente el consumo de potencia activa y reactiva uno de los nudos, una vez que se haya obtenido el conjunto completo de medidas. Este efecto se analizará conjuntamente a la no consideración de las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, lo cual puede provocar que el estado estimado presente cierto grado de contaminación.

En los ensayos a realizar, no se tendrá en cuenta el efecto del ruido en las medidas para una mayor claridad de los análisis. No obstante, se considerará que, para que la herramienta de estimación de estado identifique en qué nudo se producen las pérdidas no técnicas, los residuos normalizados resultantes de la estimación de estado de P_i y Q_i deben ser superiores al límite de medida errónea (siendo i el nudo en el que se producen dichas pérdidas). Además, estos dos residuos normalizados deben ser los más elevados. De esta forma, se asegura que, incluso con la presencia de ruido en las medidas, se identificará en qué nudo se producen las pérdidas no técnicas.

Nota: La presencia de ruido en las medidas origina que éstas, aunque sean exactas, dispondrán de un residuo normalizado aleatorio que sigue una distribución Normal de media nula y desviación típica unidad. Por ello, para determinar que una medida es errónea, con un grado de certeza del 99.7%, se establece que debe superar el límite de $3 \cdot \sigma$, siendo σ la desviación típica. El ruido de las medidas, por tanto, asignaría residuos normalizados entre 0 y 3, sin alcanzar el límite superior.

A priori, antes de realizar los ensayos, cabe esperar que, cuando el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores sea más notable, la capacidad de identificar las pérdidas no

técnicas se vea mermada.

9.1. Identificación de Pérdidas no Técnicas en la Red con Generación Distribuida

En este apartado se realizan los ensayos sobre la red ‘Red con Generación Distribuida’ que se muestra en la *Ilustración 16*, en la cual se supondrá que en el nudo 16 el consumo disminuye un determinado porcentaje consecuencia de las pérdidas no técnicas.

En primer lugar, se ensaya con la red sometida a un estado de carga de operación normal, tal y como se definió en el *apartado 5.1*. Es decir, el nivel de carga de la red es tal que los transformadores de las mismas se encuentran entre un 50 y un 65% de su máxima capacidad. En la *Tabla 67* se recogen los ensayos realizados en la cual se compara el efecto que tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización cuando se pretende detectar pérdidas no técnicas, con esta misma situación cuando el modelo topológico de la red si considera dicha rama en los transformadores.

Tabla 67: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es normal.

10% de pérdidas en el consumo del nudo 16		20% de pérdidas en el consumo del nudo 16		30% de pérdidas en el consumo del nudo 16							
Con Rama Magnetización	Sin Rama Magnetización	Con Rama Magnetización	Sin Rama Magnetización	Con Rama Magnetización	Sin Rama Magnetización						
	RN		RN		RN						
Q16	1,8	Q16	2,9	Q16	3,6	Q16	4,7	Q16	5,4	Q16	6,5
P16	1,7	P16	1,8	P16	3,5	P16	3,6	P16	5,2	P16	5,3
Q16-24	0,8	Q24	1,7	Q16-24	1,7	Q24	2,6	Q16-24	2,5	Q24	3,4
Q24	0,8	Q24-16	1,7	Q24	1,6	Q24-16	2,6	Q24	2,5	Q24-16	3,4
Q24-16	0,8	Q9-32	1,7	Q24-16	1,6	Q9-32	1,7	Q24-16	2,5	P24	2,3
P24	0,7	Q26	1,4	P24	1,5	P24	1,5	P24	2,2	P24-16	2,3

La *Tabla 67* se compone de 3 columnas principales correspondiente a cada uno de los porcentajes de pérdidas no técnicas, 10, 20 y 30%. Cada una de estas columnas principales se divide en otras dos, las cuales abarcan los ensayos en los que se consideran las pérdidas en la rama de magnetización y los que no la consideran, respectivamente para cada uno de los porcentajes de pérdidas. A su vez, cada uno de estos ensayos recoge las medidas con mayores residuos normalizados.

A juzgar por los resultados obtenidos, las medidas que presentan mayores residuos normalizados son los consumos de potencia activa y reactiva del nudo que presenta las pérdidas no técnicas, es decir, el nudo 16. Esto ocurre independientemente del porcentaje de pérdidas y si el ensayo contempla o no las pérdidas en la rama de magnetización.

Por otro lado, a medida que aumenta el porcentaje de pérdidas no técnicas, mayores residuos normalizados se obtienen. Tal y como es de esperar, a mayor diferencia existente entre el consumo ‘real’ y el estimado, mayores residuos normalizados se obtienen. Sin embargo, independientemente de si se considera o no la rama de magnetización de los transformadores, el algoritmo de estimación sólo identifica el nudo en el que se producen pérdidas no técnicas cuando el porcentaje de pérdidas es del 20 y 30%, ya que los residuos normalizados asociados a las medidas de P_{16} y Q_{16} son superiores al límite de medida errónea. De hecho, en el ensayo en el que el porcentaje de pérdidas es un 10%, el algoritmo detecta que estas medidas de consumo de potencia en dicho nudo presentan irregularidad, pero es incapaz de identificarlas como pérdidas no técnicas. Estas irregularidades podrían estar ocasionadas por ruido (si se hubiese considerado en estos ensayos) o bien por la no consideración de las pérdidas en la rama de magnetización, como ocurre en los ensayos en los que no se tienen en cuenta las pérdidas en dicha rama.

También es conveniente destacar la comparativa de valores de los residuos normalizados cuando se consideran y no las pérdidas en la rama de magnetización. Cuando se consideran las pérdidas en la rama de magnetización, los residuos normalizados, consecuencia de las pérdidas no técnicas, son aproximadamente una unidad inferiores a cuando no se consideran dichas pérdidas, independientemente del porcentaje de pérdidas. Esto se debe a que, en este segundo caso, se superponen los efectos de las pérdidas no técnicas y el de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red. Ello hace que cuando el nivel de carga de la red tal que los transformadores se encuentran entre un 50 y un 65% de su potencia nominal, los residuos normalizados son mayores.

Resulta de interés comparar los resultados de la *Tabla 67* con los que se obtienen en caso de que no existan pérdidas técnicas y el escenario en el que existe un 5% de las mismas. La *Tabla 68* recoge las medidas y los residuos normalizados cuando no hay pérdidas técnicas y cuando estas suponen un ahorro en el consumo del nudo 16 de un 5% cuando se considera y no la rama de magnetización.

Tabla 68: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existe bajo nivel pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es normal.

Sin Perd. Téc.				5% de pérdidas en el consumo del nudo 16			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN		RN		RN
Q3-2,0	0,0	Q9-32	1,6	Q16	0,7	Q9-32	1,9
Q3-2,1	0,0	Q26	1,3	P16	0,4	Q26	1,5
Q19	0,0	Q26-17	1,3	Q16-24	0,2	Q26-17	1,5
Q33	0,0	Q6-30	1,3	Q24	0,2	Q6-30	1,4
Q33-19	0,0	Q18	1,2	Q24-16	0,2	Q16	1,3
Q17-14	0,0	Q4-28	1,2	P24	0,1	P16	0,9

Al comparar los resultados de la *Tabla 68* con los de la *Tabla 67*, se observa que al no considerar pérdidas técnicas y no tener en cuenta la rama de magnetización, se obtienen residuos del mismo orden de magnitud que disponer de un 10% de pérdidas técnicas considerando la rama de magnetización. Es decir, no contemplar dicha rama, implica que aquellas pérdidas no técnicas cuyos residuos normalizados, consecuencia de la estimación de estado, por debajo o del mismo orden de magnitud que los producidos por dicha no consideración no podrán ser identificadas por el estimador de estado.

Esta afirmación se puede confirmar con el escenario de pérdidas no técnicas de un 5% que se refleja en la *Tabla 68*. Los residuos normalizados de este escenario cuando no se consideran la rama de magnetización son del mismo orden de magnitud, por lo que no es posible identificar las pérdidas no técnicas. Los residuos de potencia activa y reactiva consumida en el nudo 16 presentan valores inferiores a los que se obtienen por consecuencia de no considerar la rama de magnetización de los transformadores. Por tanto, dicha no consideración dificulta la identificación de pérdidas no técnicas en algunos escenarios.

No obstante, esta situación no es la más desfavorable, ya que, ante este estado de cargas, el efecto de no considerar la rama de magnetización no es notable. Un escenario más relevante es cuando las redes se encuentran a un nivel de carga mucho más bajo, lo cual da lugar, tal y como se comprobó en el *apartado 5.2*, a que el efecto de no considerar las pérdidas en dicha rama sean más significativos. Por tanto, que se produzcan pérdidas no técnicas en un escenario mucho más descargado puede dar lugar a que los residuos normalizados originados por esta disminución del consumo queden enmascarados por los que tienen su origen en la no consideración de la rama de magnetización.

A continuación, se procede a realizar los mismos ensayos que se realizaron anteriormente con la diferencia que en esta nueva situación el nivel de carga de la red es un 10% el del escenario definido en el *apartado 5.1*. Siguiendo la misma estructura que en la *Tabla 67*, la *Tabla 69* recoge los mismos ensayos para este nuevo escenario de cargas.

Tabla 69: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es bajo.

10% de pérdidas en el consumo del nudo 16				20% de pérdidas en el consumo del nudo 16				30% de pérdidas en el consumo del nudo 16			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN		RN		RN		RN		RN
Q16	2,1	Q9-32	13,5	Q16	4,3	Q9-32	13,5	Q16	6,4	Q16	15,2
P16	1,7	Q24	12,4	P16	3,4	Q24	13,1	P16	5,1	Q24	13,8
Q16-24	1,4	Q24-16	12,4	Q16-24	2,8	Q24-16	13,1	Q16-24	4,2	Q24-16	13,8
Q16-24	0,8	Q20-21	12,1	P16-24	1,6	Q16	13,1	P16-24	2,3	Q9-32	13,5
P24	0,8	Q6-30	12,1	P24	1,5	Q20-21	13,1	P24	2,3	Q20-21	12,1
P24-16	0,8	Q4-28	11,7	P24-16	1,5	Q6-30	13,1	P24-16	2,3	Q6-30	12,1

Si se observan los resultados obtenidos en la *Tabla 69*, se observa la misma tendencia que en los ensayos anteriores. Un aumento del porcentaje de pérdidas no técnicas genera mayores residuos normalizados, se considere o no la rama de magnetización en el modelo topológico de la red. Además, en los ensayos en los que se contemplan las pérdidas en la rama de magnetización, cuando el porcentaje de pérdidas no técnicas es del 10% no se identifica el nudo en el que estas se producen, ya que, los residuos normalizados obtenidos no superan el límite de medida errónea. Exclusivamente se identifica cuando el porcentaje de pérdidas no técnicas es mayor.

Por otro lado, puede apreciarse que el algoritmo de estimación sólo identifica el nudo en el que se producen pérdidas no técnicas cuando el algoritmo contempla la rama de magnetización de los transformadores, ya que, en los ensayos en los que no, las medidas con residuos normalizados elevados corresponden al efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización. De hecho, los ensayos en los que no se contemplan las pérdidas en dicha rama presentan residuos muy elevado, enmascarando los residuos producidos por las

pérdidas no técnicas. Si se observa la última columna, sólo cuando el porcentaje de pérdidas es muy elevado se empieza a identificar el nudo en el que se producen pérdidas no técnicas cuando no se considera la rama de magnetización, aunque sólo se detecta el consumo de potencia activa en el nudo 16.

Es conveniente mostrar el orden de magnitud de esta red a este nivel de carga cuando no existen pérdidas no técnicas para ver el orden de magnitud que presentan los residuos normalizados, ya que, aquellas medidas cuyos residuos sean inferiores a los que se producen cuando no se considera la rama de magnetización no serán detectados y, como consecuencia, no se identifican las pérdidas no técnicas. La *Tabla 70* recoge este último escenario cuando se consideran y no las pérdidas en la rama de magnetización con un nivel de carga de un 10% al estado definido en el *apartado 5*.

Tabla 70: RN de la Red con Generación Distribuida cuando no existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es bajo.

Sin Perd. Téc.			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN
Q33	0,0	Q9-32	13,4
Q33-19	0,0	Q20-21	12,1
Q19-33	0,0	Q6-30	12,0
Q19	0,0	Q4-28	11,7
Q20-21	0,0	Q24	11,7
Q4-28	0,0	Q24-16	11,7

Tal y como se observa en la *Tabla 70*, los residuos normalizados cuando se consideran la rama de magnetización de los transformadores y no existen pérdidas no técnicas, son nulos. No obstante, cuando no se considera dicha rama, los residuos tienen un orden de magnitud importante, lo cual muestra la notable relevancia de no considerar la rama de magnetización en esta situación de descarga.

A raíz de estos resultados, cabe destacar que, no considerar la rama de magnetización impide la identificación del nudo donde se producen pérdidas no técnicas, ya que los residuos normalizados consecuencia de tener en cuenta dicha rama en la estimación de estado son elevados e introducen un elevado grado de contaminación en las medidas. Por tanto, salvo que las pérdidas no técnicas generen residuos normalizados superiores a los que se producen cuando no se considera la rama de magnetización, el estimador de estado no podrá identificar el nudo en el que se producen las pérdidas.

Si se comparan los residuos obtenidos en la *Tabla 69* con los de la *Tabla 70*, se aprecia claramente esta última afirmación. Cuando el modelo topológico de la red del estimador de estado no considera la rama de magnetización de los transformadores, es estimador de estado sólo detecta las pérdidas no técnicas cuando la potencia activa y reactiva disminuyen un 30%, ya que los residuos generados por este último fenómeno son más altos que los producidos por dicha no consideración. Sin embargo, sólo identifica la variación en el consumo de potencia reactiva, ya que el residuo de la medida de consumo de activa tiene un residuo menor o del mismo orden de magnitud que las medidas afectadas por no considerar la rama de magnetización.

Por tanto, se concluye que, en aquellos escenarios en los que no se consideren las pérdidas en la rama de

magnetización de los transformadores, estando la red sometida a un nivel de carga bajo, el algoritmo de estimación de estado no podrá localizar el nudo en el que se producen las pérdidas no técnicas, ya que, se enmascaran los residuos normalizados provocados por este efecto con los de no incorporar la rama de magnetización.

Es interesante destacar de la *Tabla 67 y 69* que, con rama de magnetización aparecen residuos normalizados elevados tanto en flujos como inyecciones de potencia activa y reactiva, mientras que si no se considera la rama de magnetización, solamente se aprecian residuos normalizados en la componente reactiva de la potencia. Este hecho puede deberse a que el orden de magnitud del parámetro resistivo es 5-8 veces mayor que el reactivo, por tanto, en la admitancia, el término reactivo es mayor y los residuos mayores se reflejan en los términos de potencia reactiva.

9.2. Identificación de Pérdidas no Técnicas en Redes de Baja Tensión

Al igual que en el apartado anterior, se realizan los ensayos sobre la red de baja tensión ‘Red1 Sevilla_BT’ que se muestra en la *Ilustración 17*. En ésta se supondrá que en el nudo 7 el consumo disminuye un determinado porcentaje consecuencia de las pérdidas no técnicas.

En primer lugar, se ensaya con la red sometida a un estado de carga de operación normal, en el que el nivel de carga de la red es tal que el transformador se encuentra a un 55% de su máxima capacidad. En la *Tabla 71* se recogen los ensayos realizados donde, al igual que en el apartado anterior, se compara el efecto que tiene no considerar las pérdidas en la rama de magnetización cuando se pretende detectar pérdidas no técnicas, con esta misma situación cuando el modelo topológico de la red si considera dicha rama en los transformadores.

Tabla 71: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es normal.

10% de pérdidas en el consumo del nudo 7				20% de pérdidas en el consumo del nudo 7				30% de pérdidas en el consumo del nudo 7			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN		RN		RN		RN		RN
P7	2,4	Q7	2,5	P7	4,8	Q7	4,9	P7	7,2	Q7	7,3
Q7	2,4	P7	2,4	Q7	4,8	P7	4,8	Q7	7,2	P7	7,2
Q2-7	2,3	P2-7	2,3	Q2-7	4,8	P2-7	4,6	Q2-7	6,9	P2-7	6,8
P2-7	2,3	Q2-7	2,2	P2-7	4,6	Q2-7	4,5	P2-7	6,9	Q2-7	6,8
Q1	0,2	Q1	0,8	Q1	0,4	Q1	1,0	Q1	0,5	Q1	1,1
Q1-2	0,2	Q1-2	0,8	Q1-2	0,4	Q1-2	1,0	Q1-2	0,5	Q1-2	1,1

La *Tabla 71* tiene la misma estructura que la *Tabla 67*, con la única diferencia en la red que se analiza. A juzgar por los resultados obtenidos, las medidas que presentan mayores residuos normalizados son los consumos de potencia activa y reactiva del nudo que presenta las pérdidas no técnicas, es decir, el nudo 7. Esto

ocurre independientemente de si el ensayo contempla o no las pérdidas en la rama de magnetización y del porcentaje de pérdidas no técnicas.

Por otro lado, es conveniente destacar la comparativa de valores de los residuos normalizados cuando se consideran y no las pérdidas en la rama de magnetización. Cuando se consideran las pérdidas en la rama de magnetización, los residuos normalizados, consecuencia de las pérdidas no técnicas, son ligeramente inferiores a cuando no se consideran dichas pérdidas. Esto se debe a que, en este segundo caso, se superponen los efectos de las pérdidas no técnicas y el de no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red.

Cabe destacar que, a medida que aumenta el porcentaje de pérdidas no técnicas, se obtienen mayores residuos normalizados, ya que, a mayor diferencia entre el consumo ‘real’ y el estimado, mayores residuos normalizados se obtienen. Sin embargo, para determinar a partir de qué nivel de pérdidas no técnicas el estimador de estado es capaz de identificar el nudo en el que se producen, es conveniente ver el orden de magnitud de los residuos normalizados de las medidas cuando no existen pérdidas no técnicas y no se considera además la rama de magnetización.

Tabla 72: RN de la red Red1_BT_Sevilla cuando no existen pérdidas no técnicas.

Sin Perd. Téc.			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN
Q1	0,0	Q1	0,6
Q1-2	0,0	Q1-2	0,6
Q9	0,0	Q9	0,2
Q10	0,0	Q10	0,1
Q12	0,0	Q12	0,1
Q2-12	0,0	Q2-12	0,1

La *Tabla 72* recoge las medidas y sus residuos normalizados tras la estimación de estado cuando se consideran y no las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores y, además, no existen pérdidas no técnicas. Se observa que, cuando no se contempla dicha rama, el orden de los residuos normalizados más elevados es aproximadamente 0.6, por lo que en caso de que existan pérdidas no técnicas, el estimador de estado identificará el nudo en el que se producen si éstas dan lugar a residuos normalizados que superen dicho valor.

No obstante, un escenario más relevante sería cuando las redes se encuentran a un nivel de carga mucho más bajo, lo cual da lugar a que el efecto de no considerar las pérdidas en dicha rama sean más significativos. Por tanto, se procede a realizar los mismos ensayos que se realizaron anteriormente con la diferencia que en esta nueva situación el nivel de carga de la red es un 10% el del escenario definido en la *apartado 5.1*. Siguiendo la misma estructura que en la *Tabla 67*, la *Tabla 73* recoge los mismos ensayos para este nuevo escenario de cargas.

Tabla 73: RN de la Red con Generación Distribuida cuando existen pérdidas no técnicas en el nudo 16 y el nivel de carga es bajo.

10% de pérdidas en el consumo del nudo 16				20% de pérdidas en el consumo del nudo 16				30% de pérdidas en el consumo del nudo 16			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización		Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN		RN		RN		RN		RN
P7	2,4	Q1	22,2	P7	4,8	Q1	22,3	P7	7,2	Q1	22,4
Q7	2,4	Q1-2	22,2	Q7	4,7	Q1-2	22,3	Q7	7,1	Q1-2	22,4
Q2-7	2,3	Q7-2	3,5	Q2-7	4,7	Q7	5,8	Q2-7	7,0	Q7	8,2
P2-7	2,3	P7	2,6	P2-7	4,6	P7	5,0	P2-7	6,9	P7	7,4
Q2-1	0,2	P7-2	2,1	Q2-1	0,4	P2-7	4,4	Q2-1	0,6	P2-7	6,7
P2-1	0,2	Q10	1,4	P2-1	0,4	Q2-7	3,6	P2-1	0,5	Q2-7	5,9

Si se observan los resultados obtenidos en la *Tabla 73*, se observa la misma tendencia que en los ensayos anteriores. Un aumento del porcentaje de pérdidas no técnicas genera mayores residuos normalizados, se considere o no la rama de magnetización en el modelo topológico de la red.

Por otro lado, se destaca que el algoritmo de estimación sólo identifica el nudo en el que se producen pérdidas no técnicas cuando el algoritmo contempla la rama de magnetización de los transformadores, ya que, en los ensayos en los que no, las medidas con residuos normalizados más elevados corresponden al efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización. De hecho, los ensayos en los que no se contemplan las pérdidas en dicha rama presentan residuos muy elevado, enmascarando los residuos producidos por las pérdidas no técnicas.

En estos ensayos, donde no se contemplan las pérdidas en dicha rama, las medidas que presentan mayores residuos normalizados corresponden con aquellas ramas donde hay un transformador, dejando a las medidas de consumo de potencia activa y reactiva en el nudo 7 en segundo lugar. Ello, por tanto, induce a pensar que estos residuos sean consecuencia de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización, por lo que no se puede determinar con total certeza que sean producto de las pérdidas no técnicas.

En estos ensayos realizados, los máximos residuos, cuando además no se considera la rama de magnetización, tienen un valor en torno a 22, lo cual resulta muy elevado. Esto se debe a que el nivel de carga de la red es muy bajo, tal y como se comentó en el *apartado 5.2*. Estos escenarios con un bajo nivel de carga dificultan mucho más la identificación del nudo en el que se producen las pérdidas no técnicas, debido al elevado valor de los residuos normalizados consecuencia de dicha no consideración. En la *Tabla 74* se recogen las medidas y sus residuos cuando no existen pérdidas no técnicas para, así, tener un orden de magnitud de los mismos cuando no se considera la rama de magnetización.

Sin Perd. Téc.			
Con Rama Magnetización		Sin Rama Magnetización	
	RN		RN
Q1	0,0	Q1	22,2
Q1-2	0,0	Q1-2	22,2
Q9	0,0	Q10	1,4
Q10	0,0	Q12	1,3
Q12	0,0	Q2-12	1,3
Q2-12	0,0	Q3	1,2

Se observa en la *Tabla 74* que los residuos normalizados máximos consecuencia de no considerar la rama de magnetización sin pérdidas no técnicas oscilan en torno a 22. Ello implica que el estimador de estado sólo identificará el nudo en el que se produzcan las pérdidas no técnicas si, tras la estimación de estado, el efecto de éstas dan lugar a residuos normalizados que superen dicho valor

Por tanto, en aquellos escenarios en los que no se consideren las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores, estando la red sometida a un nivel de carga bajo, el algoritmo de estimación de estado podría identificar el nudo en el que se producen las pérdidas no técnicas aunque no determinar con total seguridad que su origen sea ese, ya que, se enmascaran los residuos normalizados provocados por este efecto con los de no incorporar la rama de magnetización, quedando los residuos de las medidas de consumo de potencia en segundo lugar (ver *Tabla 73*).

Además, se concluye que en redes con bajo nivel de carga es mucho más difícil identificar el nudo en el que se producen las pérdidas no técnicas con el estimador de estado cuando no se considera la rama de magnetización. Resulta de interés incorporar la rama de magnetización de los transformadores al modelo topológico de la red si se pretende detectar pérdidas no técnicas, ya que no considerar dicha rama introduce un elevado nivel de contaminación en el estado estimado.

10 CONCLUSIONES SOBRE LA DETECCIÓN DE PÉRDIDAS NO TÉCNICAS

Habiéndose realizado los ensayos pertinentes, parece que el algoritmo de estimación de estado puede emplearse para localizar pérdidas no técnicas. No obstante, para que esta aplicación pueda llevarse a cabo requiere que el algoritmo esté lo más limpio posible de fenómenos que puedan perturbar y contaminar el estado estimado.

De hecho, el efecto de no considerar las pérdidas en la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red es una fuente de error que impide al algoritmo la identificación del nudo en el que se producen pérdidas no técnicas.

Por ello, tras realizar los ensayos del apartado anterior se concluye que:

- Un aumento del porcentaje de pérdidas no técnicas aumenta los residuos normalizados consecuencia de ello.
- Cuando el porcentaje de pérdidas no técnicas es tal que los residuos normalizados no superan los residuos consecuencia de no considerar la rama de magnetización, no será posible identificar el nudo en el que se producen dichas pérdidas.
- Cuando el nivel de carga de la red es tal que los transformadores se encuentran entre un 50-65% de su capacidad máxima, independientemente de si se consideran o no las pérdidas en la rama de magnetización, el estimador de estado puede identificar el nudo en el que se producen dichas irregularidades, si el porcentaje de pérdidas es superior o igual al 10%. Ya que los residuos resultantes de no considerar la rama de magnetización no son tan altos como los que son consecuencia de las pérdidas no técnicas.
- Cuando el nivel de carga de la red es tal que los transformadores se encuentran descargados por debajo del 40% de carga máxima, el estimador de estado identifica el nudo en el que se producen las pérdidas no técnicas exclusivamente si se consideran las pérdidas en la rama de magnetización.
- Cuando la red se encuentra descargada y no se consideran las pérdidas en la rama de magnetización, el estimador de estado no identifica claramente el nudo en el que se producen pérdidas no técnicas, ya que, los residuos normalizados máximos son debidos a la no consideración de la rama de magnetización en el modelo topológico de la red.
- El estimador de estado presenta mayor dificultad para identificar el nudo en el que se producen las pérdidas no técnicas, si no se considera la rama de magnetización, conforme disminuye el nivel de carga de la red.
- Al no considerarse la rama de magnetización en redes cuyo estado de operación es descargado, el estimador de estado presentará problemas para identificar donde se producen pérdidas no técnicas. Por tanto, ello implica la necesidad de introducir los parámetros en la rama de magnetización.

11 CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras haber realizado el presente estudio, queda reflejada la importancia que puede llegar a tener no considerar la rama de magnetización de los transformadores en la herramienta de estimación de estado, además del impacto significativo que presenta sobre el análisis de información errónea en las medidas.

Durante la realización de este documento:

- Se ha desarrollado una herramienta de estimación de estado que permite simular la situación actual del estimador, el cual no contempla las pérdidas en la rama de magnetización.
- Se han realizado ensayos que permiten determinar en qué situaciones es necesario contemplar la rama de magnetización de los transformadores en el modelo topológico de la red, además de aquellos factores de influencia y sensibilidad que presentan mayor relevancia.
- Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran como en determinadas condiciones los resultados del estimador pueden quedar contaminados de una manera importante si no se consideran las pérdidas en la rama de magnetización, como es el caso de redes de media y baja tensión descargadas.
- En las redes de alta-media tensión, no considerar la rama de magnetización en el modelo topológico de la red no tiene relevancia en la estimación de estado, salvo en escenario de bajo nivel de carga.
- Se ha elaborado una tabla que permite aproximar los valores de la resistencia del núcleo ferromagnético y de la reactancia de magnetización de los transformadores, clasificados según relación de transformación y potencia de dichos elementos. También se ha determinado un margen de error en la aproximación según el cual se siguen obteniendo resultados aceptables del estado estimado.
- Se ha ensayado el efecto que tiene no considerar la rama de magnetización de los transformadores cuando el estimador de estado pretende identificar el nudo en el que se producen pérdidas no técnicas. Se observó que la contaminación del estado estimado debido a no considerar las pérdidas en la rama de magnetización cuando la red se encuentra descargada, da lugar a que la herramienta de estimación no pueda realizar dicha función.

El presente estudio sobre la estimación de estado puede dar lugar a futuras líneas de investigación, como:

- Estimación de los parámetros asociados a la rama de magnetización de los transformadores mediante la herramienta de estimación de parámetros. A partir de las medidas reales en el entorno de un estimador, desarrollar un proceso de estimación de estado que permita estimar unos valores de la resistencia de pérdidas en el hierro y de la reactancia de la rama de magnetización.
- Incorporar el efecto de la temperatura del transformador en el valor de la resistencia del núcleo ferromagnético, valorando el impacto en las pérdidas del transformador.
- Estudiar de forma más exhaustiva la identificación de pérdidas no técnicas cuando no se considera la rama de magnetización de los transformadores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/>
- [2] Tuning of Measurement Weights in State Estimation: Theoretical Analysis and Case Study. Antonio de la Villa Jaén, Jesus Beloso Martínez, Antonio Gómez-Expósito and Francisco González Vázquez, Fellow, IEEE, 2016
- [3] REGLAMENTO (UE) No 548/2014 DE LA COMISIÓN de 21 de mayo de 2014 por el que se desarrolla la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a los transformadores de potencia pequeños, medianos y grandes, 2014.
- [4] <https://www.powerworld.com/knowledge-base/use-spreadsheets-to-create-or-modify-model-objects>
- [5] NORMA GE FND001 - TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS PARA DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN - CLASES B2 Y B1B2. Dirección de Explotación y Calidad de Suministro, Endesa Distribución, 2004.