

# Universidad de Huelva

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Térmica, de  
Diseño y Proyectos



## Localización y valoración de fuentes de distorsión armónica y/o desequilibrio en redes eléctricas

Memoria para optar al grado de doctor  
presentada por:

**Alejandro Pérez Vallés**

Fecha de lectura: 6 de febrero de 2020

Bajo la dirección del doctor:

Patricio Salmerón Revuelta

Huelva, 2020





**Universidad  
de Huelva**

**TESIS DOCTORAL:**

**LOCALIZACIÓN Y VALORACIÓN DE FUENTES DE  
DISTORSIÓN ARMÓNICA Y/O DESEQUILIBRIO EN  
REDES ELÉCTRICAS**

**PROGRAMA DE DOCTORADO:**

**CIENCIA Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**

Doctorando: D. Alejandro Pérez Vallés

Director: Dr. D. Patricio Salmerón Revuelta

Huelva - 2019

## ***Agradecimientos:***

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis compañeros del grupo de investigación GEYER (Grupo de Electrotecnia y Electrónica de la Rábida). En particular a Patricio Salmerón Revuelta, combinar la exigencia con la paciencia y el aliento no es tarea fácil, y en esta contienda lo conseguí. A Salvador Pérez Litrán por su amistad y apoyo continuo, a Jaime Prieto, Manuel Castilla y Juan Luis Flores por vuestro compañerismo. Siempre os estaré agradecido.

Gracias a los compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Térmica, de Diseño y Proyectos. En especial a todos aquellos con los que he compartido y comparto momentos que van más allá del trabajo. Entre ellos a los compañeros que me recibieron cuando llegué, Carlos Pérez, Javier Alcántara y Jesús Rodríguez, a Reyes Sánchez con quien coincidí en mi llegada, a los que se incorporaron después, José Antonio Dueñas, Juan Pérez y Javier Ruiz, y por último a los que se “fusionaron”, Guillermo Ortega y Manuel Bahamonde. Gracias a todos por estar siempre ahí, dispuestos a ayudarme.

Por último, quiero dar las gracias a mis amigos, a mi familia, a mis hermanos y a mis padres por estar siempre que los necesité, aun cuando no lo merecía. Y como no puede ser de otra forma, aquí debo hacer una mención especial a María José, su apoyo, respeto y confianza son pilares fundamentales en mi vida para conseguir cualquier reto.

***Dedicado a:***

*Mis padres, Teodoro y Josefa*

*Mi mujer, María José*

*Mis hijos María y Gonzalo*

---

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
RESUMEN .....	XVI
ABSTRACT .....	XIX

## CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMA ELÉCTRICOS DE POTENCIA .....	3
1.2.1. Caracterización de la distorsión armónica .....	6
1.2.2. Causas, efectos y niveles de referencia de la distorsión armónica .....	7
1.3. DESEQUILIBRIO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA .....	10
1.3.1. Caracterización del desequilibrio .....	10
1.3.2. Causas, efectos y niveles de referencia en sistemas desequilibrados .....	14
1.4. LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA Y/O DESEQUILIBRIO .....	15
1.4.1. Métodos basados en medidas localizadas en un único punto de la red .....	16
1.4.2. Métodos basados en medidas distribuidas multipunto .....	20
1.5. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS .....	21
1.5.1. Hipótesis de partida .....	22
1.5.2. Objetivos .....	22
1.5.3. Metodología .....	23
1.5.4. Estructura de la tesis .....	24

## CAPÍTULO II. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN Y/O DESEQUILIBRIO BASADOS EN MEDIDAS LOCALIZADAS EN UN ÚNICO PUNTO DE LA RED

2.1. INTRODUCCIÓN .....	27
2.2. ÍNDICES BASADOS EN EL CONOCIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA .....	27
2.2.1. Localización de fuentes de distorsión armónica .....	28
2.2.2. Localización de fuentes de desequilibrio .....	32
2.3. ÍNDICES BASADOS EN TÉRMINOS DE POTENCIA EN CONDICIONES DE DISTORSIÓN Y /O DESEQUILIBRIO .....	38
2.3.1. Análisis del flujo de potencias activas armónicas .....	38
2.3.2. Índice de calidad de carga y suministro .....	40
2.3.3. Índice de fase armónico e índice global armónico .....	43
2.3.4. Índices basados en el análisis de los valores de las componentes no activas de la potencia .....	49
2.4. ÍNDICES QUE REALIZAN UNA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UNA CARGA LINEAL Y EQUILIBRADA EQUIVALENTE .....	54
2.4.1. Índice de desequilibrio de carga no lineal .....	55

## CAPÍTULO III. MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN Y/O DESEQUILIBRIO BASADOS EN MEDIDAS DISTRIBUIDAS MULTIPUNTO

3.1. INTRODUCCIÓN .....	61
3.2. ÍNDICE GLOBAL DE <i>EPQ</i> .....	62
3.3. ÍNDICE GLOBAL DE <i>EPQ</i> MODIFICADO .....	65
3.4. NUEVA PROPUESTA DE ÍNDICE DISTRIBUIDO GLOBAL <i>EPQ</i> EN EL MARCO DEL ESTÁNDAR IEEE 1459 .....	66
3.4.1. Definiciones previas .....	67
3.4.2. Los términos de potencia en el marco del estándar IEEE 1459 .....	70
3.4.3. Componentes de las tensiones e intensidades en condiciones de distorsión y desequilibrio .....	72
3.4.4. Descomposición de la potencia aparente .....	74

3.4.5. Propuesta de un nuevo índice global <i>EPQ</i> basado en medidas distribuidas .....	75
3.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DISTRIBUIDOS DE MEDIDAS MULTIPUNTO .....	76
3.5.1. Caso 1: Sistema alimentado por una fuente equilibrada sinusoidal .....	78
3.5.2. Caso 2: Sistema alimentado por una fuente con distorsión armónica sin desequilibrio .....	82
3.5.3. Caso 3: Sistema alimentado por una fuente sin distorsión armónica y con desequilibrio .....	85
3.5.4. Caso 4: Sistema alimentado por una fuente con distorsión armónica y desequilibrio .....	88
3.5.5. Variación de los índices distribuidos multipunto en función de la variación del nivel de distorsión armónica de la fuente .....	91
3.5.6. Variación de los índices distribuidos multipunto en función de la variación del nivel de desequilibrio de la fuente .....	96

## CAPÍTULO IV. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS ÍNDICES DISTRIBUIDOS MULTIPUNTO

4.1. INTRODUCCIÓN .....	101
4.2. CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL .....	101
4.2.1. Configuración de las fuentes de alimentación .....	103
4.2.2. Configuración de las cargas .....	104
4.3. ESTUDIO DE CASOS EXPERIMENTALES .....	110
4.3.1. Casos prácticos sin presencia de bancos de condensadores .....	110
4.3.2. Casos prácticos en presencia de bancos de condensadores .....	118
4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	128
4.4.1. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada .....	128
4.4.2. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y desequilibrada .....	129
4.4.3. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada con banco de condensadores .....	130
4.4.4. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y equilibrada .....	131

4.5. RESPUESTA DE LOS ÍNDICES FRENTE A LA VARIACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE LA RED.....	133
4.5.1. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada .....	134
4.5.2. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y desequilibrada.....	135
4.5.3. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada con banco de condensadores.....	135
4.5.4. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y equilibrada.	136
4.6. CONCLUSIONES.....	137

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS

5.1. INTRODUCCIÓN.....	139
5.2. CONCLUSIONES.....	139
5.3. TRABAJOS FUTUROS.....	142
5.4. APORTACIONES CIENTÍFICAS RELACIONADAS DIRECTAMENTE CON LA TESIS.....	143
5.5. OTRAS APORTACIONES .....	145

## ANEXO A. PLATAFORMA DE SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK

A.1. CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN.....	149
A.2. PROGRAMA .....	152

## ANEXO B. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

B.1. CONFIGURACIÓN DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN .....	173
B.2. CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS .....	175
B.3. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	180

## ANEXO C. RESULTADOS DE LOS CASOS EXPERIMENTALES

C.1. RESULTADOS DE LOS CASOS REALIZADOS SIN LA PRESENCIA DE BANCOS DE CONDENSADORES.....	187
--	-----

C.2. RESULTADOS DE LOS CASOS REALIZADOS EN PRESENCIA DE BANCOS DE CONDENSADORES.....	199
C.3. RESUMEN DE LOS DISTINTOS CASOS PRESENTADOS EN EL CAPÍTULO IV.....	217
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>219</b>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1. Esquema de un sistema eléctrico de potencia genérico.....	2
Figura 1.2. Flujo de potencia activa en un sistema eléctrico de potencia que alimenta cargas lineales.....	3
Figura 1.3. Transmisión de flujo de potencia activa fundamental en un sistema eléctrico de potencia que alimenta a una carga no lineal .....	4
Figura 1.4. a) Flujo de potencias del armónico de orden $h$ . b) Circuito equivalente para el armónico de orden $h$ .....	4
Figura 1.5. Formas de ondas de tensión y diagramas de fasores de sistemas trifásicos: a-a') Equilibrado. b-b') Desequilibrio de magnitud. c-c') desequilibrio de fases .....	10
Figura 1.6. Representación gráfica de la descomposición de un sistema desequilibrado de tensiones en sus componentes simétricas .....	11
Figura 1.7. Esquema básico de medida localizada en un punto .....	17
Figura 1.8. Circuitos equivalentes Norton del sistema.....	18
Figura 1.9. Circuitos equivalentes Thevenin del sistema .....	18
Figura 1.10. Circuitos equivalentes del sistema bajo estudio.....	20
Figura 1.11. Esquema típico de un sistema de medidas distribuidas .....	21
Figura 2.1. Circuito equivalente para el análisis del armónico $h$ .....	28
Figura 2.2. Circuito equivalente para la determinación de la contribución de las fuentes de distorsión para un armónico de orden $h$ .....	29

Figura 2.3. Montaje utilizado para el método conexión/desconexión utilizando el interruptor $S_1$ .....	31
Figura 2.4. Sistema de potencia radial.....	32
Figura 2.5. Representación gráfica del nivel de desequilibrio en el $PCC$ .....	35
Figura 2.6. Nivel de desequilibrio de tensión en el $PCC$ tras conectar la carga.....	35
Figura 2.7. Esquema equivalente de una red trifásica equilibrada .....	39
Figura 2.8. Puntos de medida en un esquema simplificado de un sistema de potencia con dos cargas conectadas al $PCC$ .....	40
Figura 2.9. Sistemas de referencia trifásico $abc$ y $d-q$ .....	46
Figura 3.1. Esquema típico de un sistema de medidas distribuidas .....	62
Figura 3.2. Circuito trifásico de cuatro conductores que alimenta a una carga desequilibrada.....	67
Figura 3.3. Circuito trifásico equivalente para la definición de la intensidad efectiva, $I_e$ .....	68
Figura 3.4. Circuito trifásico equivalente para la definición de la tensión efectiva, $V_e$ según el Std IEEE.....	68
Figura 3.5. Esquema de las componentes de la potencia aparente efectiva definida en el estándar IEEE 459.....	71
Figura 3.6. Esquema implementado en la plataforma de simulación Matlab/Simulink.....	77
Figura 3.7. Formas de onda caso 1. a) Tensiones de Fuente. b) Intensidades de Línea.....	78
Figura 3.8. Formas de onda de las tensiones en el $PCC$ .....	79
Figura 3.9. Formas de onda de las intensidades de cada carga para el caso 1.....	80
Figura 3.10. Formas de onda caso 2. a) Tensiones de fuente. b) Intensidades de línea.....	83
Figura 3.11. Formas de onda de las tensiones en el $PCC$ para el caso 2.....	83
Figura 3.12. Formas de onda de las intensidades de cada carga en el caso 2.....	85
Figura 3.13. Formas de onda caso 3. a) Tensiones de fuente. b) Intensidades de línea.....	86
Figura 3.14. Formas de onda de las tensiones en el $PCC$ para el caso 3.....	86
Figura 3.15. Formas de onda de las intensidades de cada carga en el caso 3.....	88
Figura 3.16. Formas de onda caso 4. a) Tensiones de fuente. b) Intensidades de línea.....	89
Figura 3.17. Formas de onda de las tensiones en el $PCC$ para el caso 4.....	89

Figura 3.18. Formas de onda de las intensidades de cada carga en el caso 4.....	90
Figura 3.19. Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 1 .....	93
Figura 3.20. Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 2.....	93
Figura 3.21. Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 3 .....	94
Figura 3.22. Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga.....	94
Figura 3.23. Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 5 .....	95
Figura 3.24. Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 1 .....	97
Figura 3.25. Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 2.....	97
Figura 3.26. Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 3 .....	98
Figura 3.27. Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 4.....	99
Figura 3.28. Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 5 .....	99
Figura 4.1. Esquema montaje experimental implementado en el laboratorio de potencia..	102
Figura 4.2. Medidas de tensión de la fuente de alimentación a circuito abierto (S <sub>A</sub> y S <sub>B</sub> OFF): Test fuente A: formas de onda (a), fasores (b) y espectro de frecuencia (c); Test fuente B: formas de ondas (d), fasores (e) y espectro de frecuencia (f) .....	103
Figura 4.3. Formas de ondas de las intensidades que circulan por la carga 1 .....	104
Figura 4.4. Configuración de la carga 2 .....	105
Figura 4.5. Formas de ondas de las intensidades que circulan por la carga 2.....	106
Figura 4.6. Configuración de la carga 3 .....	107
Figura 4.7. Formas de ondas de las intensidades de la carga 3 .....	107
Figura 4.8. Configuración de la carga 4 .....	108
Figura 4.9. Formas de ondas de las intensidades de la carga 4 .....	109

Figura 4.10. Formas de ondas de las tensiones en el PCC y de las intensidades de la carga 1 medidas en el test A.1 .....	112
Figura 4.11. Formas de ondas de las tensiones en el PCC e intensidades de línea para el Test B.2 .....	113
Figura 4.12. Formas de ondas de las tensiones en el PCC e intensidades de línea para el Test A.3 .....	115
Figura 4.13. Formas de ondas de las tensiones en el PCC e intensidades de línea para el Test B.4 .....	117
Figura 4.14. Formas de ondas de intensidad medidas en el test A.6 en: a) Carga 3 y b) Línea de alimentación a las cargas .....	121
Figura 4.15. Formas de ondas de intensidad medidas en el test B.8 en: a) Carga 3 y b) Línea de alimentación a las cargas .....	124
Figura 4.16. Formas de ondas de tensión medidas en el PCC y de intensidades de línea para el test A.10 .....	127
Figura 4.17. Resultados obtenidos para identificar la carga 1 con el sistema alimentado con la fuente A .....	128
Figura 4.18. Resultados obtenidos para identificar la carga 1 con el sistema alimentado con la fuente B .....	129
Figura 4.19. Resultados obtenidos para identificar la carga 2 con el sistema alimentado con la fuente A .....	129
Figura 4.20. Resultados obtenidos para identificar la carga 2 con el sistema alimentado con la fuente B .....	130
Figura 4.21. Resultados obtenidos para identificar la carga 3 con el sistema alimentado con la fuente A .....	131
Figura 4.22. Resultados obtenidos para identificar la carga 3 con el sistema alimentado con la fuente B .....	131
Figura 4.23. Resultados obtenidos para identificar la carga 4 con el sistema alimentado con la fuente A .....	132
Figura 4.24. Resultados obtenidos para identificar la carga 4 con el sistema alimentado con la fuente B .....	132
Figura 4.25. Esquema de la configuración de la carga no lineal y desequilibrada del caso L.5.(Carga 5) .....	134
Figura 4.26. Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 1 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del Caso L.2; b) Resultados del Caso L.5 .....	134

Figura 4.27. Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 2 y 5 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del Caso L.2; b) Resultados del Caso L.5.....	135
Figura 4.28. Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 3 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del Caso L.2; b) Resultados del Caso L.5.....	136
Figura 4.29. Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 4 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del Caso L.2; b) Resultados del Caso L.5.....	136
Figura 5.1. Esquema genérico de un sistema de medidas distribuidas.....	142
Figura A.1. Esquema en Simulink utilizado en la plataforma de simulación .....	149
Figura A.2. Esquema en Simulink de la fuente programable.....	150
Figura A.3. Esquema en Simulink del regulador de potencia de la carga 5.....	151
Figura A.4. Bloque de medidas de <i>EPQ</i> realizadas en el <i>PCC</i> .....	151
Figura A.5. Detalle del bloque scope utilizado para registrar las formas de ondas de tensión e intensidad en uno de los puntos del sistema.....	152
Figura A.6. Esquema del Programa diseñado para el cálculo de índices, parámetros y gráficas.....	153
Figura B.1. Esquema de la plataforma experimental .....	173
Figura B.2. Fuente variable trifásica utilizada para modificar el nivel de desequilibrio de tensiones (Fuente <i>B</i> ) .....	174
Figura B.3. Bobina empleada para implementar la impedancia de línea de una de las fases de la plataforma experimental.....	174
Figura B.4. Carga 1 implementada en el laboratorio.....	175
Figura B.5. Configuración de la carga 2.....	176
Figura B.6. Carga 2 implementada en el laboratorio.....	176
Figura B.7. Rectificadores monofásicos no controlados .....	177
Figura B.8. Configuración de la carga 5.....	177
Figura B.9. Montaje de la carga 5 en el laboratorio .....	177
Figura B.10. Modulo compuesto por tres reguladores de potencia monofásicos. Esquema del módulo proporcionado por la documentación técnica del fabricante .....	178
Figura B.11. Configuración de la carga 3.....	178

Figura B.12. Montaje de la carga 3 en el laboratorio .....	179
Figura B.13. Carga trifásica no lineal y equilibrada compuesta por un rectificador trifásico no controlado.....	179
Figura B.14. Esquema del sistema modular de adquisición de datos implementado.....	180
Figura B.15. Tarjeta <i>DS 1005 PPC</i> de dSPACE .....	180
Figura B.16. Diagrama de bloques de la tarjeta <i>DS 1005 PPC</i> de dSPACE. Diagrama proporcionado por la documentación técnica del fabricante.....	181
Figura B.17. Tarjeta de entrada <i>DS 2002/2003 MUX</i> de dSPACE.....	181
Figura B.18. Diagrama de bloques de la tarjeta <i>2003 MUX</i> de dSPACE. Diagrama proporcionado por la documentación técnica del fabricante.....	182
Figura B.19. Pantalla ControlDesk.....	183
Figura B.20. Sensor de tensión <i>LV25-P</i> de LEM .....	184
Figura B.21. Sensor de intensidad <i>LA25-NP</i> de LEM.....	184
Figura B.22. Agrupación de sensores de tensión e intensidad .....	184
Figura B.23. Analizador de redes Fluke 434.....	185
Figura B.24. Esquema general en Simulink del sistema de adquisición de datos.....	186
Figura C.1.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 1, Test A.1.....	188
Figura C.1.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 1, Test B.1.....	189
Figura C.2.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 2, Test A.2.....	191
Figura C.2.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 2, Test B.2.....	192
Figura C.3.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 3, Test A.3.....	194
Figura C.3.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 3, Test B.3.....	195
Figura C.4.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 4, Test A.4.....	197
Figura C.4.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 4, Test B.4.....	198

Figura C.5.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 5, Test A.5.....	200
Figura C.5.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 5, Test B.5.....	201
Figura C.6.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 6, Test A.6.....	203
Figura C.6.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 6, Test B.6.....	204
Figura C.7.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 7, Test A.7.....	206
Figura C.7.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 7, Test B.7.....	207
Figura C.8.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 8, Test A.8.....	209
Figura C.8.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 8, Test B.8.....	210
Figura C.9.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 9, Test A.9.....	212
Figura C.9.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 9, Test B.9.....	213
Figura C.10.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 10, Test A.10.....	215
Figura C.10.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 10, Test B.10.....	216

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1. Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro, hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de $U_n$ .....	9
Tabla 1.2. Clasificación de los equipos según la norma EN 61000-3-2.....	9
Tabla 3.1. Resultados de la distorsión armónica para el caso 1 .....	79
Tabla 3.2. Valores de potencias obtenidos en el caso 1 .....	81
Tabla 3.3. Resultados Índices distribuidos globales $EPQ$ para el caso 1 .....	82
Tabla 3.4. Resultados de la distorsión armónica para el caso 2 .....	83
Tabla 3.5. Valores de potencias obtenidos en el caso 2 .....	84
Tabla 3.6. Resultados Índices distribuidos Globales $EPQ$ para el caso 2 .....	84
Tabla 3.7. Resultados de la distorsión armónica para el caso 3 .....	87
Tabla 3.8. Valores de potencias obtenidos en el caso 3 .....	87
Tabla 3.9. Resultados Índices distribuidos Globales $EPQ$ para el Caso 3 .....	87
Tabla 3.10. Resultados de la distorsión armónica para el caso 4 .....	90
Tabla 3.11. Valores de potencias obtenidos en el caso 4 .....	91
Tabla 3.12. Resultados Índices distribuidos Globales $EPQ$ para el caso 4 .....	91
Tabla 3.13. Resultados de la distorsión en el $PCC$ en función de la distorsión de la fuente .....	92
Tabla 3.14. Valores de la media aritmética y desviación típica de los índices distribuidos de cada carga.....	95

Tabla 3.15. Nivel de desequilibrio de tensiones en el PCC en función del desequilibrio de fuente .....	96
Tabla 3.16. Valores de la media aritmética y desviación típica de los índices distribuidos de cada carga .....	100
Tabla 4.1. Medidas realizadas en el PCC con la carga 1 conectada a la fuente A .....	105
Tabla 4.2. Medidas realizadas en el PCC con la carga 2 conectada a la fuente A .....	106
Tabla 4.3. Medidas realizadas en el PCC con la carga 3 conectada a la fuente A .....	108
Tabla 4.4. Medidas realizadas en el PCC con la carga 4 conectada a la fuente A .....	109
Tabla 4.5. Relación de casos prácticos sin la presencia de cargas capacitivas.....	110
Tabla 4.6. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 1.....	112
Tabla 4.7. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 2.....	114
Tabla 4.8. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 3.....	115
Tabla 4.9. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 4.....	117
Tabla 4.10. Relación de casos realizados en presencia de bancos de condensadores .....	119
Tabla 4.11. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 5.....	120
Tabla 4.12. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 6.....	122
Tabla 4.13. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 7.....	123
Tabla 4.14. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 8.....	125
Tabla 4.15. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 9.....	126
Tabla 4.16. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 10.....	127
Tabla B.1. Características nominales <i>R-L-C</i> .....	175
Tabla C.1.A. Medidas realizadas en el PCC en el Test A.1 .....	187
Tabla C.1.B. Medidas realizadas en el PCC en el Test B.1 .....	187
Tabla C.2.A. Medidas realizadas en el PCC en el Test A.2.....	190
Tabla C.2.B. Medidas realizadas en el PCC en el Test B.2 .....	190
Tabla C.3.A. Medidas realizadas en el PCC en el Test A.3 .....	193
Tabla C.3.B. Medidas realizadas en el PCC en el Test B.3 .....	193

---

Tabla C.4.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.4.....	196
Tabla C.4.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.4 .....	196
Tabla C.5.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.5 .....	199
Tabla C.5.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.5 .....	199
Tabla C.6.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.6.....	202
Tabla C.6.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.6 .....	202
Tabla C.7.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.7 .....	205
Tabla C.7.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.7 .....	205
Tabla C.8.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.8.....	208
Tabla C.8.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.8 .....	208
Tabla C.9.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.9.....	211
Tabla C.9.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.9 .....	211
Tabla C.10.A. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test A.10.....	214
Tabla C.10.B. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> en el Test B.10 .....	214
Tabla C.11. Resultados de los distintos casos presentados en el capítulo IV.....	217

---

## RESUMEN

---

En la actualidad, los consumos de potencia eléctrica se caracterizan por una amplia variedad de cargas en sus procesos productivos, en muchos de los casos cargas trifásicas/monofásicas constituidas por convertidores electrónicos de potencia. Por otro lado, los sistemas eléctricos están hoy día evolucionando hacia sistemas de generación descentralizados donde las unidades de generación, principalmente de energía renovable, se conectan mediante convertidores electrónicos directamente a las redes de distribución. Los consumos referidos y la generación distribuida, contribuye al crecimiento de las corrientes armónicas y desequilibradas que conllevan, entre otros, a un aumento de las pérdidas de la red, y mal funcionamiento de los equipos. Desafortunadamente, la identificación de estas fuentes de perturbación no puede lograrse por medio de medidas individuales en una sección determinada de un sistema eléctrico. La solución efectiva del problema requiere tener que conocer las medidas simultáneas de los parámetros eléctricos de calidad de todas las acometidas donde estén conectados los consumidores.

En efecto, los índices empleados usualmente para valorar la calidad, principalmente la tasa de distorsión armónica, no son apropiados para evaluar la calidad de la energía eléctrica cuando está presente una fuerte distorsión, y especialmente en aquellos casos donde existen múltiples fuentes de perturbación conectadas a la red. Por otra parte, se ha demostrado que las medidas de la calidad de la energía eléctrica llevadas a cabo en una sección de medida determinada de la red, no pueden suministrar la información suficiente al menos sin recurrir a mecanismos de medida invasivos. Así, en la bibliografía se encuentran diferentes enfoques para abordar este tipo de cuestión. Estos pueden

clasificarse en dos grupos: métodos de medidas en una sección localizada, y métodos de medida distribuidos multipunto (medidas efectuadas simultáneamente en diferentes secciones de la red). Los métodos basados en medidas realizadas en un punto de la red tienen como ventajas principales su bajo coste y su fácil implementación en las instalaciones, pero en algunas condiciones pueden registrar una información inexacta respecto del estado de perturbación de la red.

Por otra parte, los métodos de medidas distribuidas multipunto registran una información más precisa respecto del estado de distorsión y desequilibrio del sistema de potencia completo, aunque en la práctica hasta ahora sean difíciles de realizar y requiera una instrumentación más compleja tanto desde el punto de vista de hardware como de software. Además, este enfoque exige la definición de nuevos índices y los correspondientes métodos de medidas asociados para la evaluación de los niveles de las perturbaciones periódicas en la sección de medida. Este enfoque es el que se considera que puede resolver de forma definitiva la cuestión y el que se plantea en esta tesis.

En esta tesis se propone un nuevo índice basado en medidas distribuidas multipunto para la identificación de distorsión armónica y/o desequilibrio. El índice propuesto está construido a partir de términos de potencia dentro del marco del estándar IEEE 1459. El estándar presenta un modelo de descomposición de la potencia aparente en condiciones de distorsión y asimetría, sin embargo, éste carece de una evaluación práctica del desequilibrio causado por la carga. El algoritmo propuesto se define usando un nuevo método de descomposición de potencia aparente que lo separa en cuatro componentes, así el nuevo índice introduce dos novedades significativas. En primer lugar, se define en función de términos de potencia desarrollados según la misma filosofía de trabajo que el estándar IEEE 1459. Y en segundo lugar, los términos de potencias utilizados representan una evolución de los términos del estándar, ya que separan de forma más completa la distorsión y el desequilibrio. La nueva propuesta de índice se valida a partir de dos plataformas: una de simulación en el entorno de MATLAB/Simulink y otra experimental desarrollada en el laboratorio de potencia del grupo de investigación.

La tesis se ha organizado de la siguiente manera: en el capítulo I se estudia el problema de la distorsión armónica y el desequilibrio en los sistemas eléctricos de potencia de forma conceptual, además se plantea una clasificación de los métodos de localización de fuentes de perturbación. En el capítulo II se realiza un estudio de los métodos basados en medidas

realizadas en un único punto de la red. El capítulo III tiene un doble objetivo, por un lado se presentan los índices distribuidos multipunto más representativos recogidos en la literatura técnica, y por otro, se desarrolla la nueva propuesta de índice de medidas distribuidas para la identificación de fuente de distorsión armónica y/o desequilibrio en la red, basado en términos de potencia en el marco del estándar IEEE 1459. En el capítulo IV, con el objetivo de contrastar y validar la nueva propuesta, se realiza un análisis comparativo de los índices distribuidos multipunto a través de una plataforma experimental. Por último, en el capítulo V se presentan las conclusiones de este trabajo.

---

## ABSTRACT

---

At present, electric power distribution is characterized by a wide variety of loads at its points of production, with, in most cases, electronic power converters comprising single-phase or three-phase loads. As power networks develop towards decentralized generation systems, more units, largely from renewable sources, are being directly connected to the distribution network through electronic converters. Irregular patterns of consumption alongside this distributed generation, contribute to an increase in harmonic distortion and current unbalance that together lead to an increase in network failure and equipment malfunction. At the same time, the very elements that have allowed the development and modernization of electric power distribution networks are those that display greater sensitivity to the disturbances (that they cause) in the network, endangering the system. Consequently, identification of harmonic distortion and/or unbalanced sources in the system is essential, both to demand responsibility from the originator/s (the electrical supply system and/or customer installation), and to take the necessary measures to solve the problem.

The different approaches to tackling this problem can be classified into two groups. The first approach concerns measurements taken from a localized section (single-point), while the second concerns multi-point distributed measurement methods (that is, measurements taken simultaneously at different sections on the distribution network). Single-point measurements offer the advantages of low cost and ease of implementation, but in some conditions the information recorded with regard to the state of network disturbances can be inaccurate. The multi-point methods enables the recording of accurate information

regarding the state of distortion and unbalance of the complete power system, and is consequently considered capable of definitively resolving the issue. In practice, however, approaches of this nature have to date proved difficult to perform and require the use of expensive and more complex instrumentation from both a hardware and software perspective. What is required is the definition of new indices and corresponding methods for evaluating of the levels of periodic disturbances in the measurement section. Currently, advances in digital signal processing techniques and the interconnection of equipment allowing real-time communication over communication networks make it feasible to address the practical development of a distributed measurement system aimed at quality power in electrical networks. However, it is necessary to define a distributed index that computes the information received from the different locations. These indices are formed from the combination of three indices that have been extensively used to assess distortion and unbalance by single-point methods. The combination of these presupposes greater success in the identification of periodic disturbances. Tests in different conditions have demonstrated that they cannot always clearly identify the source of disturbance, for which reason new proposals would be welcome.

This thesis proposes a new multi-point distributed measurement index for the identification of the sources of harmonic distortion and/or unbalance, based in power terms on the IEEE Std. 1459 framework. The Std. 1459 presents a model of apparent power decomposition terms in conditions of distortion and asymmetry. However, this model lacks a practical assessment of the unbalance caused by the load. The new index algorithm is defined using a new method of apparent power decomposition which separates it into four components. The new index introduces two significant developments. First, it is defined as a function of power terms in the Std. 1459 framework, although it retains a fourth perturbation term. And second, the power terms used represent an evolution of the Std terms that most clearly separate distortion and unbalance. The index is applied and validated by means of an experimental platform connected to a real, low-voltage network.

The thesis is organized as follows: in chapter I we study the problem of harmonic distortion and imbalance in electrical power systems in a conceptual way, in addition to a classification of the methods of locating sources of disturbance. In Chapter II a study of the methods based on measurements carried out at a single point in the network is carried out. Chapter III has a double objective, on the one hand the most representative multipoint

distributed indices of the technical literature are presented, and on the other, the new proposal for the index of distributed measures for the identification of harmonic distortion source and/or unbalance is presented in the network, based on terms of power within the framework of the IEEE 1459 standard. In Chapter IV, in order to contrast and validate the new proposal, a comparative analysis of the multipoint distributed indices is carried out through an experimental platform . Finally, chapter V develops the conclusions.

# **CAPÍTULO I**

---

## **ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS**

---

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico y los avances experimentados en el campo de la Ingeniería han incrementado la dependencia de la sociedad actual al buen funcionamiento del sistema eléctrico. Esto ha provocado una elevada preocupación de los consumidores de energía eléctrica en lo que tiene que ver con la continuidad/fiabilidad del sistema respecto del número y duración de las interrupciones del suministro eléctrico, y en general sobre la calidad de la potencia eléctrica, *EPQ* (Electric Power Quality). En concreto, el término *EPQ* está asociado a todo el conjunto de alteraciones o perturbaciones del suministro que pueden producir fallos de funcionamientos o deterioro en los equipos receptores. De tal forma que en la actualidad la *EPQ* es un asunto de máxima relevancia, especialmente en el caso de consumidores que incluyen cargas críticas en su instalación.

El esquema de la figura 1.1 intenta ilustrar el problema referido a través de un sistema de potencia genérico. Hoy en día, los consumos de potencia eléctrica se caracterizan por una amplia variedad de cargas en sus procesos productivos, en muchos de esos casos, cargas trifásicas/monofásicas constituidas por convertidores electrónicos de potencia. Por otro lado, los sistemas eléctricos están hoy día evolucionando hacia sistemas de generación descentralizados donde las unidades productoras, principalmente de energía renovable, se conectan directamente a las redes de distribución mediante convertidores electrónicos. Los consumos referidos junto con esta generación distribuida, *DG*, contribuye al crecimiento de las corrientes armónicas y desequilibradas en el punto de conexión común (*PCC*), esto es, el enlace entre las redes de distribución con los consumidores [1-5]. La propagación de estas perturbaciones periódicas por la red, conlleva un aumento de las pérdidas, y un mal funcionamiento de los equipos [6-19].

Por ello, los sistemas eléctricos con distorsión y/o desequilibrio se han convertido en los últimos años en uno de los problemas técnicos de mayor interés, de tal forma que la identificación correcta de las fuentes que producen distorsión y/o desequilibrio resulta de vital importancia. Esto es así, principalmente, por dos motivos: en primer lugar, permite el diseño efectivo de los equipos de mitigación de las perturbaciones más adecuados, y en segundo lugar, consigue determinar la responsabilidad de cada uno de los agentes implicados, sean estos consumidores o empresas de distribución. En cualquier caso, la situación más común que reclama la detección de las fuentes armónicas y/o de desequilibrio es la necesidad de tener que decidir quién es el responsable de la

perturbación en el punto de conexión común, bien la red de suministro, o bien uno o varios de los consumidores.

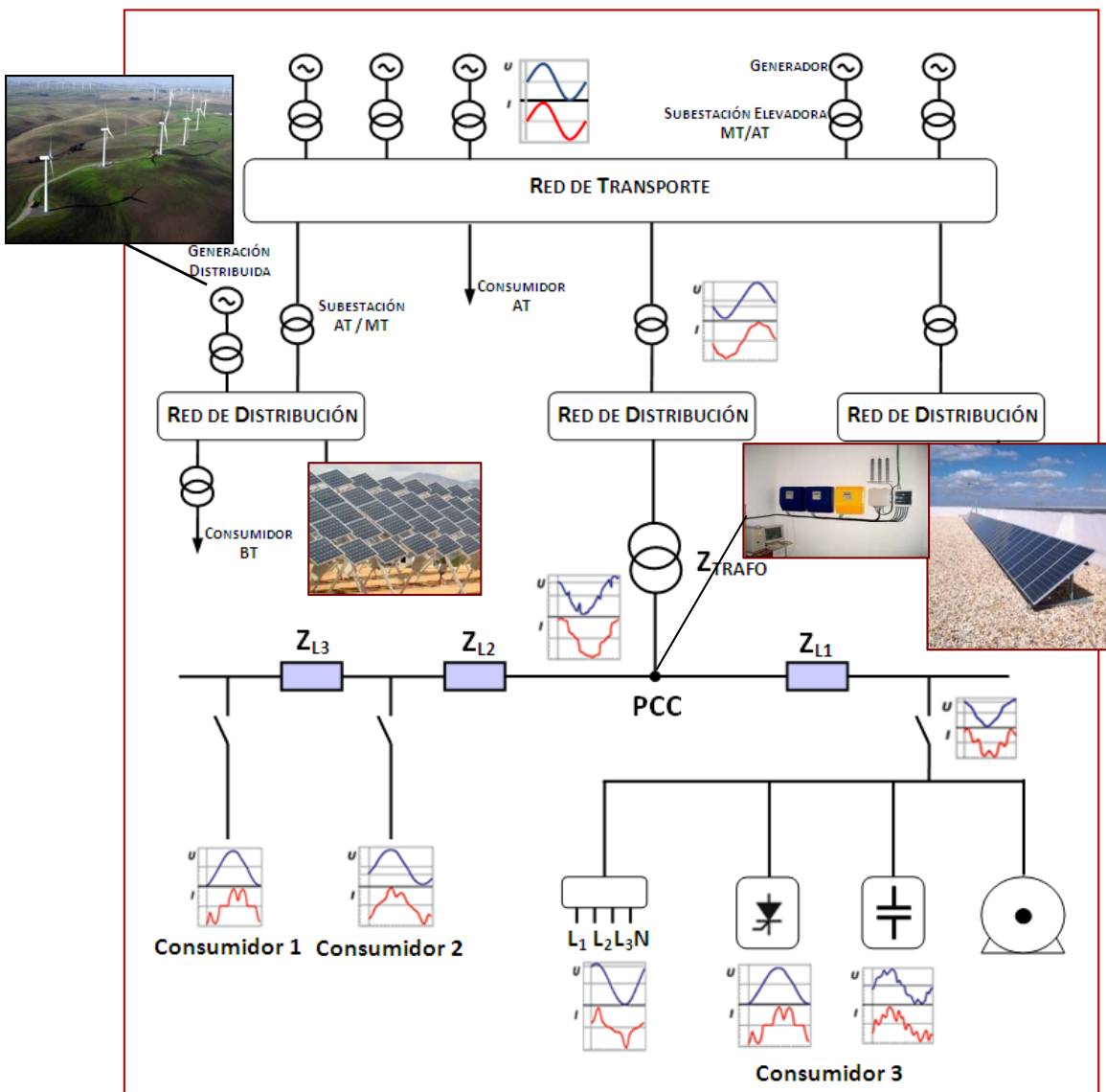
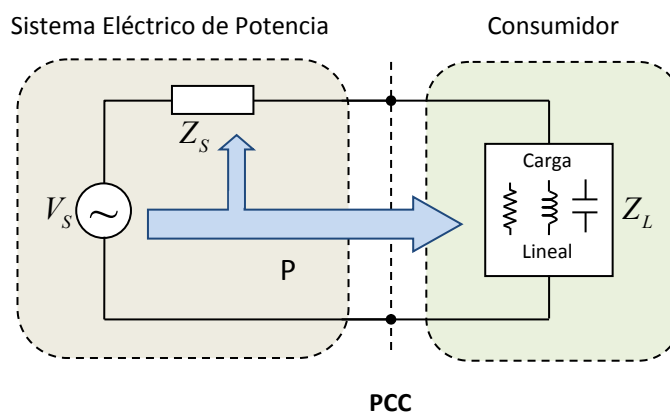


Figura 1.1. Esquema de un sistema eléctrico de potencia genérico.

Desafortunadamente, la identificación de estas fuentes de perturbación aún no puede lograrse por medio de medidas individuales en una sección determinada de un sistema eléctrico [20]. La solución efectiva del problema requiere poder disponer de las medidas simultáneas de los parámetros eléctricos de calidad de todas las acometidas donde estén conectados cada uno de los consumidores [21].

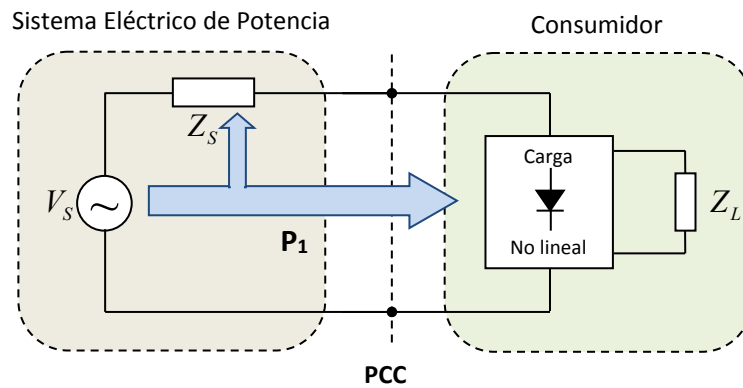
## 1.2. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La figura 1.2 muestra el circuito monofásico equivalente de un sistema eléctrico de potencia que alimenta a un consumidor a través del *PCC*. La red se representa por un equivalente Thevenin constituido por una fuente de tensión  $V_S$  en serie con su impedancia  $Z_S$ , mientras que la instalación del consumidor está constituida por cargas lineales. Si la fuente de tensión  $V_S$  genera en sus terminales una tensión sinusoidal a frecuencia nominal constante de 50 ó 60 Hz, la forma de onda de intensidad será también sinusoidal y la potencia activa suministrada por  $V_S$  será consumida tanto por la carga como por la impedancia del sistema.



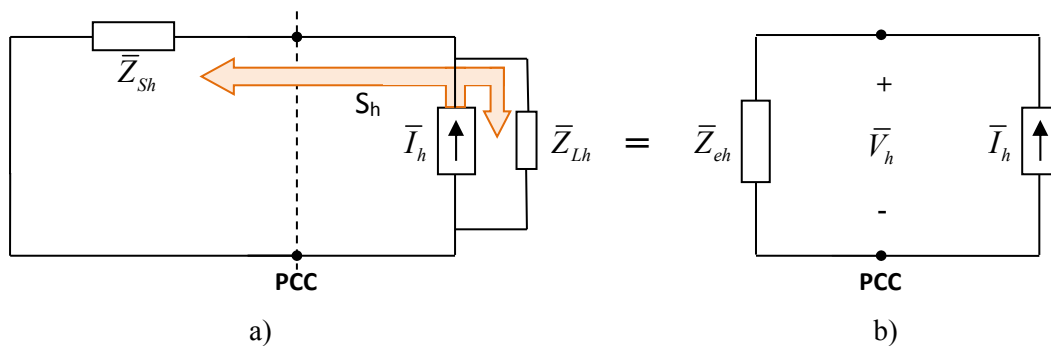
**Figura 1.2.** Flujo de potencia activa en un sistema eléctrico de potencia que alimenta cargas lineales.

Por el contrario, en la figura 1.3 se representa un sistema eléctrico que suministra potencia a un consumidor que utiliza una carga no lineal (rectificador) en su instalación. En este caso, la corriente resultante se deforma de manera que la circulación de la intensidad distorsionada por la impedancia del sistema ( $Z_S$ ) provoca una caída de tensión distorsionada; esto ocasiona una tensión de alimentación en el *PCC* con un determinado contenido armónico. Así, parte de la potencia de la fuente se transmite a la carga y a la impedancia del sistema  $Z_S$  a la frecuencia fundamental,  $P_1$ , mientras que otra parte, habitualmente de mucho menor valor se convierte en potencia a diferentes frecuencias en la carga no lineal.



**Figura 1.3.** Transmisión de flujo de potencia activa fundamental en un sistema eléctrico de potencia que alimenta a una carga no lineal.

El flujo de potencias a diferentes frecuencias de la fundamental se muestra en la figura 1.4. Al suponer la tensión interna de la fuente  $V_S$  perfectamente sinusoidal, ésta aparece cortocircuitada tanto en el circuito de la figura 1.4 a) como en el circuito equivalente de la figura 1.4 b). De tal forma que ahora el sistema no se representa por sus impedancias a la frecuencia fundamental, lo hace en función de las impedancias armónicas. Por otro lado, la carga no lineal se representa como una fuente de corriente de armónicos. [22].



**Figura 1.4.** a) Flujo de potencias del armónico de orden  $h$ . b) Circuito equivalente para el armónico de orden  $h$ .

El desarrollo de Fourier permite expresar la tensión instantánea  $v(t)$  en el  $PCC$  como suma de armónicos a través de la expresión:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h=0}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (1.1)$$

Donde  $V_0$  es el valor medio,  $V_h$  es el valor eficaz o *RMS* (Root Mean Square), del armónico  $h$  de tensión y  $\alpha_h$  es el ángulo de fase del armónico de tensión de orden  $h$ .

De la misma forma se tiene para la intensidad instantánea  $i(t)$  que circula por el PCC:

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega t + \beta_h) \quad (1.2)$$

Donde  $I_0$  es el valor medio,  $I_h$  es el valor RMS del armónico  $h$  de intensidad y  $\beta_h$  es el ángulo de fase del armónico de intensidad de orden  $h$ .

Los valores eficaces o RMS de tensión e intensidad son:

$$V = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} \quad ; \quad I = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} \quad (1.3)$$

Separando las componentes fundamentales  $V_1, I_1$  de las componentes armónicas  $V_H, I_H$  se obtienen las siguientes expresiones:

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad ; \quad I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad (1.4)$$

Donde

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad ; \quad I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (1.5)$$

La existencia de distorsión armónica en los sistemas de potencia requiere determinar la influencia de la impedancia de la red en la propagación de la distorsión a través del sistema. Así, una tensión armónica  $V_h$ , generada en el PCC, será tanto mayor cuanto más elevada sea la intensidad armónica  $I_h$  (perturbación) y la impedancia equivalente de la red  $Z_s$ , dado que,

$$\bar{V}_h = \bar{Z}_{eh} \cdot \bar{I}_h \quad (1.6)$$

Para el caso ideal, en el cual la impedancia equivalente del sistema sea despreciable (potencia de cortocircuito de red infinita), para cualquier valor finito de  $I_h$ , la tensión  $V_h$  será nula. Por tanto, redes con elevadas potencias de cortocircuito presentarían una mayor inmunidad frente a la distorsión armónica. En efecto, piénsese que la potencia de cortocircuito en un nudo de la red viene dada por:

$$S_{cc} = 3V_1 I_{CC1} = \frac{V_L^2}{Z_{th1}} \quad (1.7)$$

Donde  $V_1$  es la componente fundamental de la tensión,  $I_{CC1}$  es la componente fundamental de la intensidad de cortocircuito,  $V_L$  es la tensión de línea y  $Z_{th1}$  la impedancia Thevenin a la frecuencia de la red. Esto es, la potencia de cortocircuito en un punto de la red viene determinada por la topología del sistema y por tanto, variable en el tiempo.

### 1.2.1. Caracterización de la distorsión armónica

El índice más utilizado para cuantificar la distorsión de una forma de onda es la distorsión armónica total, *THD* (Total Harmonic Distortion), aplicable tanto a la tensión como a la intensidad. El *THD* se define como el valor *RMS* del contenido armónico de la señal dividido por el valor *RMS* de la componente fundamental, expresado por lo general en valor porcentual.

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{max}} V_h^2}}{V_1} = \sqrt{\frac{V^2 - V_1^2}{V_1^2}} \quad (1.8)$$

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{max}} I_h^2}}{I_1} = \sqrt{\frac{I^2 - I_1^2}{I_1^2}} \quad (1.9)$$

Donde  $H_{max}$  es el armónico de mayor orden de interés que se considera, mientras que el subíndice de las variables indica el orden del armónico. Si bien para la mayoría de las aplicaciones es suficiente considerar hasta el armónico 25, los instrumentos Clase *A* (IEC 61000-4-30) registran hasta el armónico 50 [27].

Una de las desventajas del *THD* es la pérdida de información sobre la influencia de cada armónico individual, por lo que es frecuente encontrar instrumentos de medidas que registran la distorsión armónica individual, definida como la relación entre el valor *RMS* de la componente armónica de orden  $h$ , respecto del valor *RMS* de la componente fundamental de la forma de onda de tensión o de intensidad.

$$A_h = \frac{V_h}{V_1} \quad ; \quad A_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (1.10)$$

En los sistemas de potencia, por lo general, la diferencia entre el contenido armónico de tensión y su componente fundamental suele ser muy reducida; el valor de *THDV* medido en un *PCC* proporciona una medida del impacto que la distorsión de tensión del sistema introduce en un consumidor, independientemente del nivel de potencia requerido. No obstante, la situación respecto de la distorsión armónica de intensidad es diferente, ya que una carga con una potencia considerable y un bajo *THDI* produce un impacto mayor en el sistema que una carga de potencia pequeña con un alto nivel de *THDI*.

Por otro lado, el estándar IEEE 519-2014 [26] define un nuevo índice, el factor de distorsión de demanda total, *TDD* (*Total Demand Distortion*) que igualmente se puede aplicar tanto a la forma de onda de la tensión como de intensidad. El índice *TDD* se define como el valor *RMS* del contenido armónico de la señal dividido por el valor *RMS* de la onda completa.

$$TDDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{\max}} V_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{H_{\max}} V_h^2}} = \sqrt{\frac{V^2 - V_1^2}{V^2}} \quad (1.11)$$

$$TDDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{\max}} I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{H_{\max}} I_h^2}} = \sqrt{\frac{I^2 - I_1^2}{I^2}} \quad (1.12)$$

En cualquier caso, hay que resaltar que estos índices caracterizan la distorsión de la forma de onda, no cuantifica el impacto que la distorsión produce en el sistema.

### 1.2.2. Causas, efectos y niveles de referencias de la distorsión armónica

En un principio las principales fuentes de armónicos presentes en la red eran los equipos que basan su funcionamiento en núcleos magnéticos funcionando en condiciones de saturación, como por ejemplo los transformadores, motores y generadores. Sin embargo, el auge de la electrónica de potencia como respuesta a los problemas que se han planteado en los sistemas eléctricos de potencia y en las cargas que alimentan, ha supuesto un incremento considerable de la conexión de las cargas no lineales y, en consecuencia, un aumento de la distorsión armónica.

Las fuentes de armónicos que polucionan los sistemas eléctricos de potencia se pueden clasificar en estos tres grupos:

- Equipos que basan su funcionamiento en núcleos magnéticos cuando funcionan en condiciones de saturación.
- Dispositivos que basan su funcionamiento en un arco eléctrico. Como por ejemplo: Hornos de arco, equipos de soldaduras por arco, lámparas de descarga (vapor de mercurio, de sodio, bajo consumo, fluorescentes, etc).
- Equipos que basan su funcionamiento en dispositivos electrónicos de potencia, como rectificadores, convertidores, convertidores de frecuencias/variadores de velocidad, etc.

La magnitud de los problemas que causa la distorsión armónica en el sistema eléctrico de potencia y en el funcionamiento de los equipos instalados, depende tanto del grado de deformación de la onda como de la sensibilidad de los equipos instalados. En cualquier caso, como se indicó en el apartado anterior, la incidencia de la distorsión armónica generada por una fuente de distorsión armónica será menor cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito de la red en el *PCC*. Entre los equipos y elementos sensibles a los efectos de la distorsión armónica, cabe destacar: los conductores, bancos de condensadores, transformadores, sistemas de protección, equipos de medidas y control, y equipos de consumo.

Ante los problemas ocasionados por las fuentes de armónicos en los sistemas eléctricos, se hace imprescindible un marco regulatorio que indique unos niveles de referencia para que los dispositivos no sufran alteraciones en su funcionamiento. Las normas que regulan a nivel nacional e internacional los niveles de compatibilidad electromagnética (*CEM*) para las tasas de armónicos, principalmente son: UNE-EN 61000-3-2, 61000-3-4, 61000-3-6 y el estándar IEEE 519 [23-26].

En condiciones normales de explotación, la norma UNE-EN 50160 [9] establece que durante cada periodo de una semana, el 95 % de los valores eficaces de cada tensión armónica promediadas en intervalos de 10 minutos no debe sobrepasar los valores que se muestran en la tabla 1.1. También indica que la tasa de distorsión armónica total de la tensión suministrada (*THDV*) no dese sobrepasar el 8 %. La norma define el *THD* a partir de la siguiente expresión:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} \quad (1.13)$$

Donde  $u_h$  representa la amplitud relativa del armónico  $h$  respecto al armónico fundamental de la tensión, comprendidos todos los armónicos hasta el 40.

**Tabla 1.1.** Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro, hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de  $U_n$

<b>Armónicos Impares</b>				<b>Armónicos pares</b>	
<b>No múltiplos de 3</b>		<b>Múltiplos</b>			
<b>Orden <math>h</math></b>	<b>Tensión relativa (%)</b>	<b>Orden <math>h</math></b>	<b>Tensión relativa (%)</b>	<b>Orden <math>h</math></b>	<b>Tensión relativa (%)</b>
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6...24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Nota.- Los valores de los armónicos de orden superior a 25, no están indicados en la tabla ya que por lo general suelen ser débiles y muy imprevisibles debido a los efectos de resonancia.

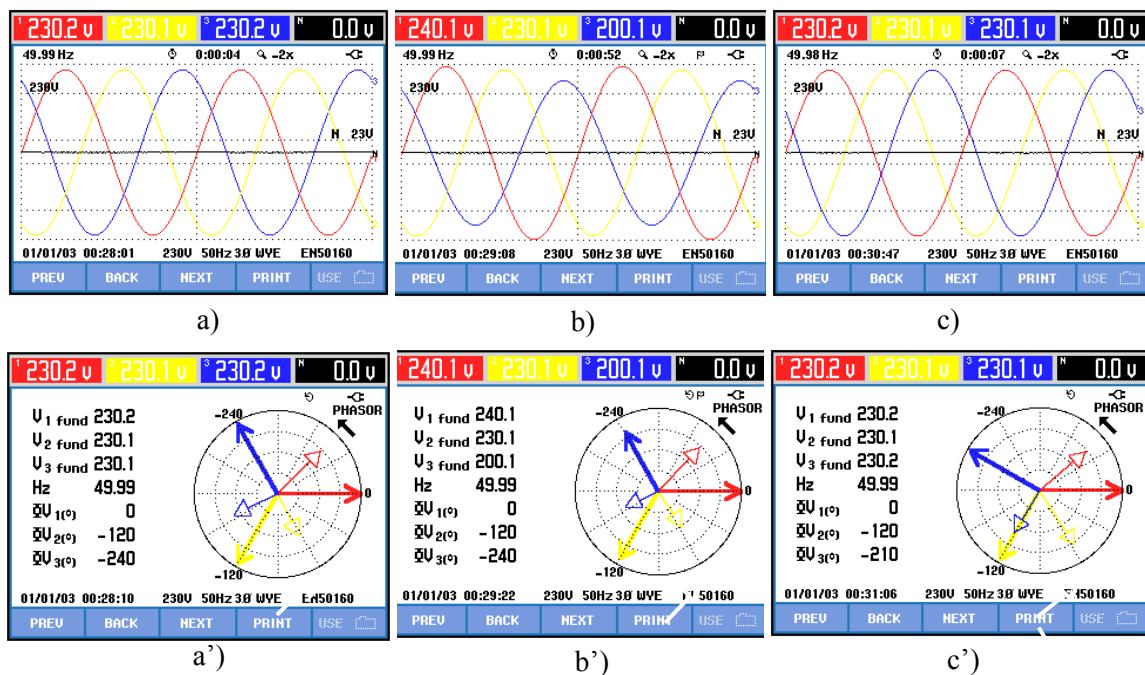
**Tabla 1.2.** Clasificación de los equipos según la norma EN 61000-3-2

<b>Equipos</b>	
<b>Clase A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipos trifásicos equilibrados.</li> <li>Equipos electrodomésticos, excepto aquellos aparatos identificados como pertenecientes a la clase <i>D</i>.</li> <li>Herramientas, a excepción de las herramientas portátiles.</li> <li>Reguladores de luz de lámparas incandescentes.</li> <li>Equipos de audio.</li> <li>Los equipos no especificados en algunas de las otras tres clases.</li> </ul>
<b>Clase B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herramientas portátiles.</li> <li>Equipos de soldadura por arco que no sean equipos profesionales.</li> </ul>
<b>Clase C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipos de iluminación.</li> </ul>
<b>Clase D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ordenadores personales y pantallas de ordenadores personales</li> <li>Receptores de televisión.</li> </ul>

El estándar IEEE 519 [26] presenta un análisis de las cargas generadoras de armónicos de corriente, así como su repercusión sobre los diferentes dispositivos del sistema eléctrico de potencia. Por otro lado, en las normas UNE-EN 61000-3-2 [23] se referencia las limitaciones de las corrientes armónicas inyectadas en las redes de distribución. En la tabla 1.2 se muestra la clasificación de los equipos según la norma. A partir de esta clasificación, la norma establece los límites de armónicos para los equipos de cada clase.

### 1.3. DESEQUILIBRIO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

En un sistema de potencia trifásico ideal las tensiones generadas son sinusoidales y equilibradas, de tal forma que las tres fases presentan el mismo valor eficaz con una diferencia de fase de  $120^\circ$  entre cada dos de ellas, [9]. Por lo tanto, se define un sistema trifásico desequilibrado o asimétrico cuando los módulos de los tres fasores representativos de las tensiones no son iguales, o los desfases relativos existentes entre ellos no presentan una diferencia de  $120^\circ$ , como se puede apreciar en la figura 1.5.



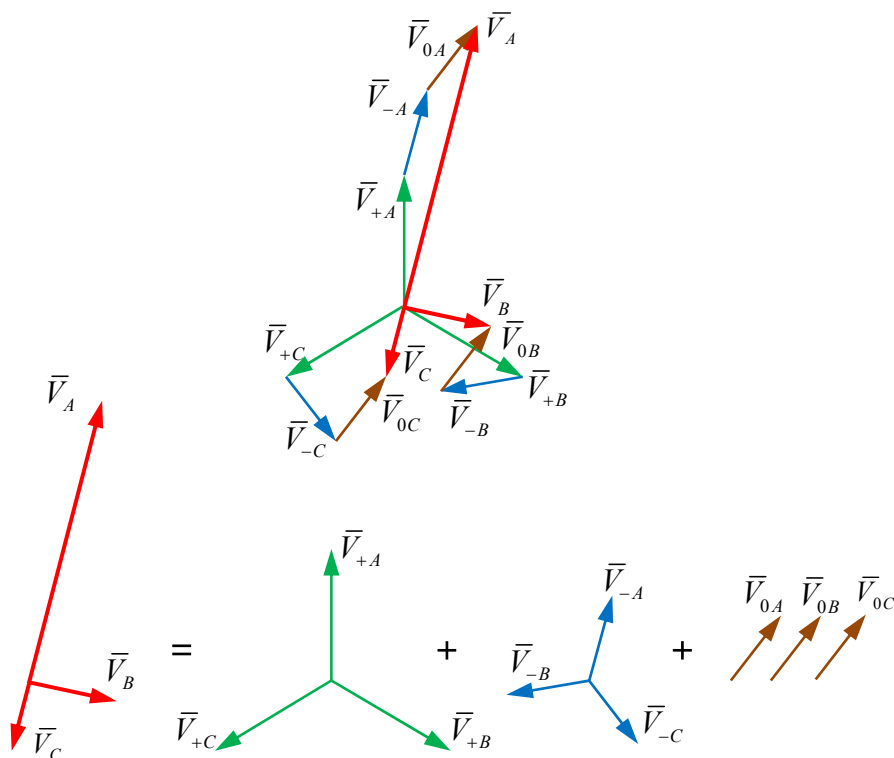
**Figura 1.5.** Formas de ondas de tensión y diagramas de fasores de sistemas trifásicos:  
 a-a') Equilibrado. b-b') Desequilibrio de magnitud. c-c') desequilibrio de fases.

#### 1.3.1. Caracterización del desequilibrio

En general, en un sistema eléctrico de potencia las tensiones presentan desequilibrios, sobre todo en el subsistema de distribución a baja tensión. El estudio de sistemas desequilibrados se realiza analíticamente mediante el denominado método de las componentes simétricas, basado en el teorema de Fortescue. El teorema, aplicado a una red trifásica, establece que un sistema trifásico desequilibrado de tensiones o intensidades se puede descomponer en tres sistemas equilibrados o simétricos de las siguientes características:

- *Sistema de secuencia directa o positiva.*- Se trata de un sistema trifásico equilibrado de fasores de secuencia positiva. Sus componentes son designados por  $\bar{V}_+$  y  $\bar{I}_+$ .
- *Sistema de secuencia inversa o negativa.*- Es un sistema trifásico equilibrado de fasores que tienen una secuencia de fase negativa. Se designa a sus componentes por  $\bar{V}_-$  y  $\bar{I}_-$ .
- *Sistema de secuencia cero u homopolar.*- Es un sistema constituido por tres fasores monofásicos iguales en módulos y fase. Sus componentes son representados mediante  $\bar{V}_0$  y  $\bar{I}_0$ .

En la figura 1.6 se representa un ejemplo gráfico de la descomposición de un sistema desequilibrado de tensiones de fase en la suma de sus componentes simétricas.



**Figura 1.6.** Representación gráfica de la descomposición de un sistema desequilibrado de tensiones en sus componentes simétricas.

Para la aplicación del procedimiento al estudio analítico de las componentes simétricas del sistema desequilibrado de tensiones representado en la figura 1.6, se define el operador “ $a$ ” como un vector unitario de módulo unidad y argumento  $120^\circ$ .

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.14)$$

Las tensiones  $\bar{V}_B$  y  $\bar{V}_C$  se pueden expresar en función del operador “a” y de la tensión  $\bar{V}_A$  de la siguiente forma:

- *Sistema de secuencia directa o positiva:*

$$\begin{aligned} \bar{V}_{+A} &= \bar{V}_{+A} \\ \bar{V}_{+B} &= a^2 \bar{V}_{+A} \\ \bar{V}_{+C} &= a \bar{V}_{+A} \end{aligned} \quad (1.15)$$

- *Sistema de secuencia inversa o negativa:*

$$\begin{aligned} \bar{V}_{-A} &= \bar{V}_{-A} \\ \bar{V}_{-B} &= a \bar{V}_{-A} \\ \bar{V}_{-C} &= a^2 \bar{V}_{-A} \end{aligned} \quad (1.16)$$

- *Sistema de secuencia cero u homopolar:*

$$\bar{V}_{0A} = \bar{V}_{0B} = \bar{V}_{0C} \quad (1.17)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \bar{V}_A &= \bar{V}_{+A} + \bar{V}_{-A} + \bar{V}_{0A} \\ \bar{V}_B &= \bar{V}_{+B} + \bar{V}_{-B} + \bar{V}_{0B} = a^2 \bar{V}_{+A} + a \bar{V}_{-A} + \bar{V}_{0A} \\ \bar{V}_C &= \bar{V}_{+C} + \bar{V}_{-C} + \bar{V}_{0C} = a \bar{V}_{+A} + a^2 \bar{V}_{-A} + \bar{V}_{0A} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Expresado en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{0A} \\ \bar{V}_{+A} \\ \bar{V}_{-A} \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

O bien:

$$\bar{V}_P = S \bar{V}_S \quad (1.20)$$

El problema en la práctica consiste en determinar las componentes simétricas ( $\bar{V}_{+A}, \bar{V}_{-A}, \bar{V}_{0A}$ ) a partir de las tensiones iniciales ( $\bar{V}_A, \bar{V}_B, \bar{V}_C$ ), así de la ecuación 1.20 sigue:

$$\bar{V}_S = S^{-1}\bar{V}_P \quad (1.21)$$

por lo que se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{0A} \\ \bar{V}_{+A} \\ \bar{V}_{-A} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Las transformaciones de componentes simétricas realizadas son válidas para cualquier conjunto de fasores, en consecuencia, se pueden aplicar a un conjunto de intensidades desequilibradas de tal forma que en ese caso las ecuaciones son:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0A} \\ \bar{I}_{+A} \\ \bar{I}_{-A} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{0A} \\ \bar{I}_{+A} \\ \bar{I}_{-A} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

De tal forma que el desequilibrio de tensión se caracteriza normalmente por medio de la tensión de secuencia negativa, y eventualmente, mediante la tensión de secuencia cero, referidas ambas a la tensión de secuencia positiva,

$$UF = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad ; \quad UF^0 = \frac{V_0}{V_+} \cdot 100 \quad (1.25)$$

Aunque normalmente sólo se considera el valor absoluto del desequilibrio, bien se podría incluir un ángulo de fase entre el cociente de las tensiones de secuencia con la intención de que suministrará más información sobre el carácter del desequilibrio. Esta misma definición, (1.25), fue igualmente adoptada en el estándar IEEE 1159-2009 [28].

Para evitar el uso del álgebra compleja en el cálculo de las componentes simétricas, el estándar IEC 61000-4-30, [27], admite un método alternativo del cálculo del

desequilibrio. En este sentido, se presenta la aproximación a la expresión (1.25) de  $UF$  (Aproximation Formula,  $AF$ ) que se define como:

$$AF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (1.26)$$

donde:

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (1.27)$$

El índice  $AF$ , (1.26), se obtiene a partir de las componentes fundamentales de las tensiones de línea. Además, dado que en el cálculo de (1.27) puede existir una diferencia entre los valores  $RMS$  y las componentes fundamentales de la tensión, habrá que tener en cuenta esta circunstancia cuando las medidas se realicen en sistemas con distorsión.

Por otro lado, la notación seguida para caracterizar el desequilibrio de tensión en los capítulos III y IV es la utilizada por el analizador de  $EPQ$  trifásico Fluke 430 clase  $A$ . Así, se denota el desequilibrio de tensión como  $V_{neg}$  y  $V_{cero}$ , de tal forma que  $UF = V_{neg}$  y  $UF^0 = V_{cero}$ . De forma análoga, para caracterizar el desequilibrio de intensidad se han utilizado las siguientes expresiones:

$$A_{neg} = \frac{I_-}{I_+} \cdot 100 \quad ; \quad A_{cero} = \frac{I_0}{I_+} \cdot 100 \quad (1.28)$$

### 1.3.2. Causas, efectos y niveles de referencias en sistemas desequilibrados

El desequilibrio de tensión puede venir provocado por distintas razones. Una de las causas principales se debe a la desigual distribución de las cargas monofásicas entre las distintas fases que, además, pueden presentar una topología aleatoria. También son posibles otras causas tales como, la asimetría de las impedancias de los arrollamientos de los transformadores, impedancias de transmisión asimétricas posiblemente debidas a una incompleta transposición, la fusión accidental de fusibles en bancos de condensadores, etc [18]. Por tanto, si bien las instalaciones industriales y comerciales pueden estar alimentadas por tensiones equilibradas, la misma instalación puede ser origen del

desequilibrio en el punto de conexión común, *PCC*, a causa de su propio consumo desequilibrado. Ese consumo puede provenir en muchas de las ocasiones de cargas no lineales como el debido a los accionamientos eléctricos, lo que puede llevar a niveles de desequilibrio con distorsión que compliquen los procesos de medida y mitigación.

Las tensiones desequilibradas en el *PCC* provocan efectos perjudiciales tanto en los equipos como en el mismo sistema de potencia. El caso de ciertas cargas, como los motores, el efecto puede quedar intensificado por el hecho de que un pequeño desequilibrio en las tensiones de fase puede producir un desproporcionado aumento en las corrientes de fase, [13]. Otros efectos destacables pueden ser: la aparición de potencias reactivas [29], disminución en la eficiencia del sistema, o bien la desconexión de las protecciones para evitar una sobrecarga, si el desequilibrio es considerable.

Con respecto a los niveles de referencia, la norma UNE-EN 50160 [9] establece tanto el grado como la duración del desequilibrio en sistemas eléctricos de la siguiente forma: en condiciones normales de explotación, para cada periodo de una semana, el 95 % de los valores eficaces promediados en 10 minutos de la componente inversa de la tensión de alimentación debe situarse entre el 0 % y el 2% de la componente de secuencia directa. En ciertas regiones con líneas parcialmente monofásicas o bifásicas, los desequilibrios pueden alcanzar el 3 % en los puntos de suministro.

#### **1.4. LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA Y/O DESEQUILIBRIO**

Los índices de caracterización, enunciados en las secciones anteriores, no son útiles a la hora de discernir si el deterioro de la calidad de la potencia eléctrica en el *PCC* es responsabilidad de la empresa suministradora de energía eléctrica o bien la responsabilidad es del consumidor [30, 31]. Como se indicó, aquellos índices estiman la conformidad o no de las señales respecto de una situación de referencia, típicamente formas de onda sinusoidales de un sistema equilibrado, pero no son adecuados para la identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio. Por ello se hace necesario desarrollar una metodología específica para detectar quién y en qué proporción es el verdadero causante de la polución en la red.

El deterioro de la calidad de la potencia eléctrica en un sistema eléctrico debido a la aparición de perturbaciones periódicas (distorsión y/o desequilibrio) puede tener su origen en distintos nudos de la red eléctrica. Por ello, no es un asunto evidente poder

identificar la responsabilidad de la degradación de la *EPQ* en el *PCC* entre el suministro y el consumidor. En ese sentido, el concepto de identificación de fuentes de perturbación consistirá en la propuesta de índices que suministren información sobre:

- Una identificación precisa de la presencia de cargas conectadas en el *PCC* que generen perturbación.
- La valoración cuantitativa de las contribuciones a la degradación de la *EPQ* en el *PCC* de la instalación.

Estos índices deberán ser fáciles de medir y progresivos, esto es, su valor deberá crecer cuando aumente el nivel de perturbación. No obstante, no todos los trabajos presentados en este ámbito han abordado la cuestión de forma completa, contemplando los dos tópicos referidos. Así, la mayoría de las propuestas tienen como objetivos la localización de fuentes de distorsión armónicas [40-85], y en menor medida las fuentes de desequilibrio [86-97].

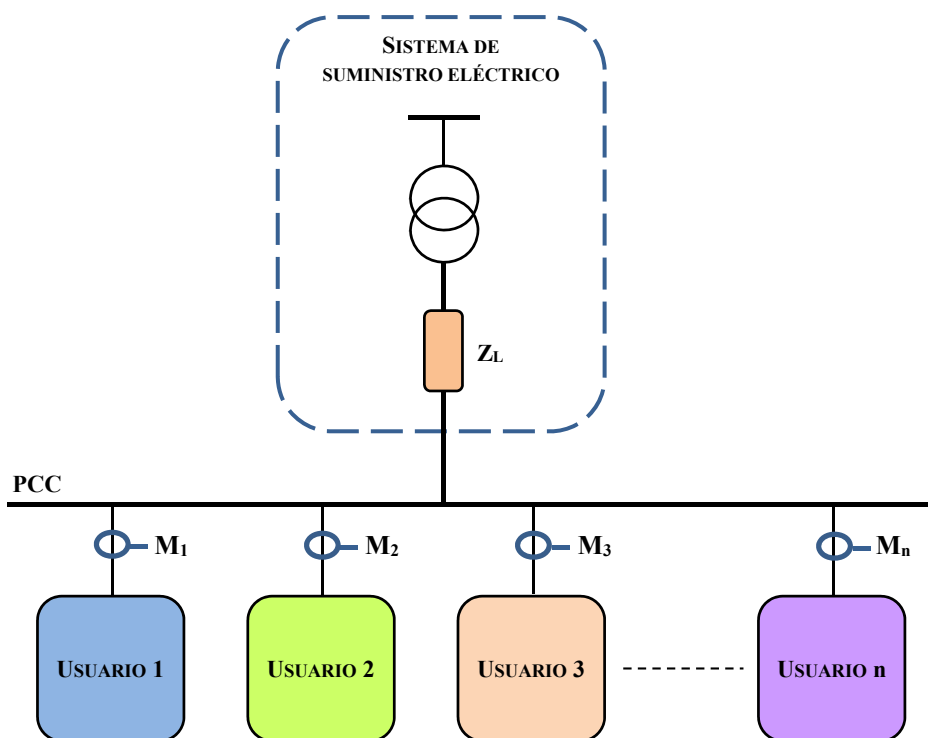
Los métodos de identificación de fuentes de distorsión armónica y/o desequilibrio pueden clasificarse en función del número de puntos de medidas que intervienen en el índice propuesto, de tal forma que se pueden establecer dos grupos [98]:

- Métodos basados en medidas realizadas en un único punto de la red.
- Métodos de medidas distribuidas multipunto.

#### **1.4.1. Métodos basados en medidas localizadas en un único punto de la red**

En la figura 1.7 se muestra un esquema básico en el que  $N$  líneas (consumidores) están conectados al sistema de suministro eléctrico través del *PCC*, de forma que cada línea dispone de una sección de medida  $M_n$ .

Los métodos basados en las medidas realizadas en un único punto del sistema, consisten en discernir si un determinado consumidor puede ser considerado como una fuente de perturbación a través de medidas realizadas en sus terminales, esto es, en la sección de medida  $M_n$ . De tal forma, que el algoritmo del índice propuesto para definir al usuario  $M_n$ , no incluye las medidas realizadas por los demás usuarios del sistema.



**Figura 1.7.** Esquema básico de medida localizada en un punto.

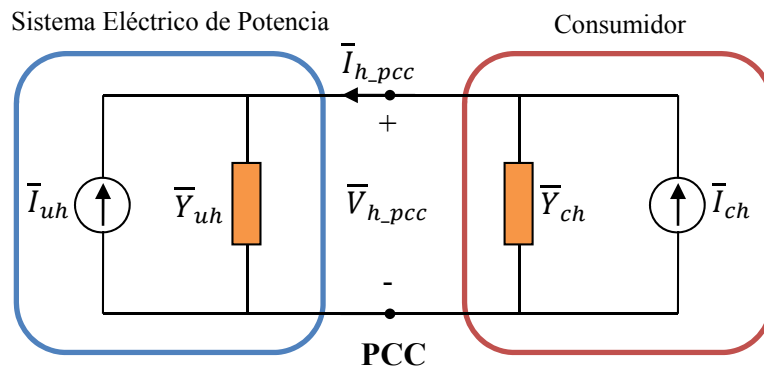
Esta metodología ha dado lugar a un número considerable de trabajos basados en diferentes propuestas, entre las que cabe destacar:

- 1) Índices basados en el conocimiento de los parámetros del sistema [40-49].
- 2) índices basados en los términos de potencias en condiciones de distorsión y/o desequilibrio [7, 99-104].
- 3) Índices que realizan una estimación de los parámetros de una carga lineal y equilibrada equivalente a través de las medidas realizadas en una determinada sección [105-108].

#### **1.4.1.1. Índices basados en el conocimiento de los parámetros del sistema**

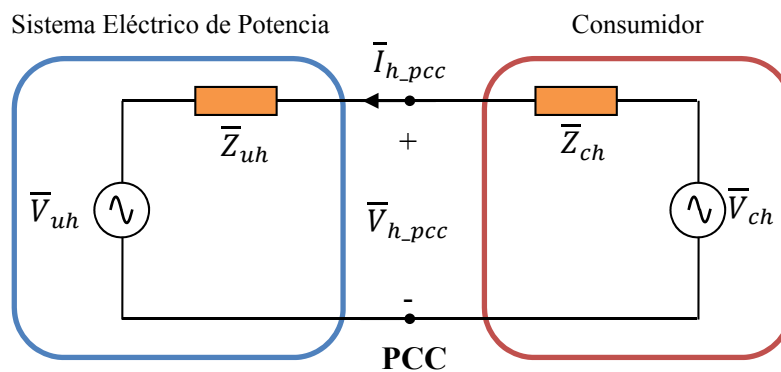
Los índices incluidos en esta metodología, por lo general están fundamentados en el conocimiento de las impedancias armónicas tanto del sistema eléctrico de potencia como del consumidor, tomando como referencia el PCC. La mayoría de las propuestas están basadas en el modelo Norton, esto es debido a que las cargas no lineales suelen estar caracterizadas por sus corrientes armónicas. En la figura 1.8 se muestra como el circuito equivalente Norton del sistema eléctrico está conectado al equivalente Norton de la instalación del consumidor a través del PCC. Entre los principales índices que emplean el modelo Norton para definir el sistema eléctrico de potencia se encuentra el método de

superposición y proyección [38], que será desarrollado con cierto detalle en la sección 2.2.1.



**Figura 1.8.** Circuitos equivalentes Norton del sistema.

Si bien el modelo Norton es el más utilizado, también existen algunos índices que utilizan el modelo Thevenin para modelar tanto el Sistema eléctrico de potencia como la instalación del consumidor (ver figura 1.9). Entre ellos, el índice que ha tenido mayor repercusión en la literatura técnica es el índice basado en el método de impedancia crítica (CIM) [46], donde una vez conocidos los parámetros del sistema, se realiza un estudio comparativo de las fuentes de tensiones armónicas del circuito equivalente de la figura 1.9.



**Figura 1.9.** Circuitos equivalentes Thevenin del sistema.

Entre las desventajas que ofrece la aplicación de esta metodología se encuentra la dificultad de obtener los parámetros del sistema, es decir, el valor de las impedancias armónicas y el valor de las fuentes armónicas. Para ello se utilizan dos tipos de métodos denominados: invasivos y no invasivos.

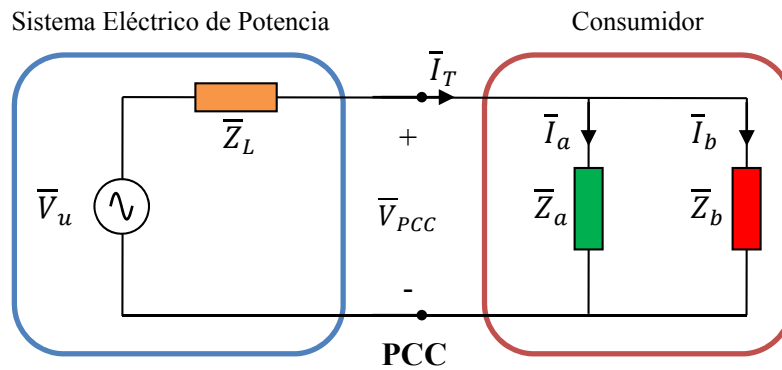
#### ***1.4.1.2. Índices basados en los términos de potencias en condiciones de distorsión y/o desequilibrio***

Los términos de potencia en sistemas eléctricos equilibrados y sin distorsión están perfectamente definidos y conceptos como la potencia útil o activa, la potencia reactiva, la potencia aparente y el factor de potencia tienen definiciones aceptadas universalmente. Por el contrario, en sistemas eléctricos con distorsión y/o desequilibrio, el análisis del flujo de potencias se hace más complejo, dando lugar a discrepancias a la hora de definir algunos términos de potencia y establecer su significado físico.

A pesar de la falta de consenso, los métodos de identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio basados en el análisis del flujo de potencia son los más utilizados. Por un lado, por ser éstos los más fáciles de implementar, y por otro, a que sus resultados obtenidos son equiparables a cualquier otro índice basado en medidas realizadas en único punto de la red. Los índices más relevantes encontrados en la literatura científica basan su funcionamiento en el análisis del flujo de potencia armónicas [7, 33, 55, 99, 100], si bien algunos autores se han decantado en los últimos años por el uso de los términos de potencia no activa en sistemas con distorsión y/o desequilibrio [101-104].

#### ***1.4.1.3. Índices que realizan una estimación de los parámetros de una carga lineal y equilibrada equivalente***

Estos índices parten de la consideración de que toda carga que muestre un comportamiento lineal y equilibrado representa a una carga ideal. De tal forma que si se conecta una carga ideal a un sistema eléctrico de potencia, únicamente el sistema de suministro sería el responsable de la distorsión armónica y/o desequilibrio en el PCC. La figura 1.10 ilustra el método, donde la instalación del consumidor se divide en dos cargas, una carga equivalente ideal ( $Z_a$ ) y otra carga en paralelo que inyecta distorsión armónica y/o desequilibrio a la red eléctrica ( $Z_b$ ). Para discernir la responsabilidad de la perturbación en el PCC, estos índices se definen en función de la relación entre las intensidades que circulan por cada una de las cargas [105-108].



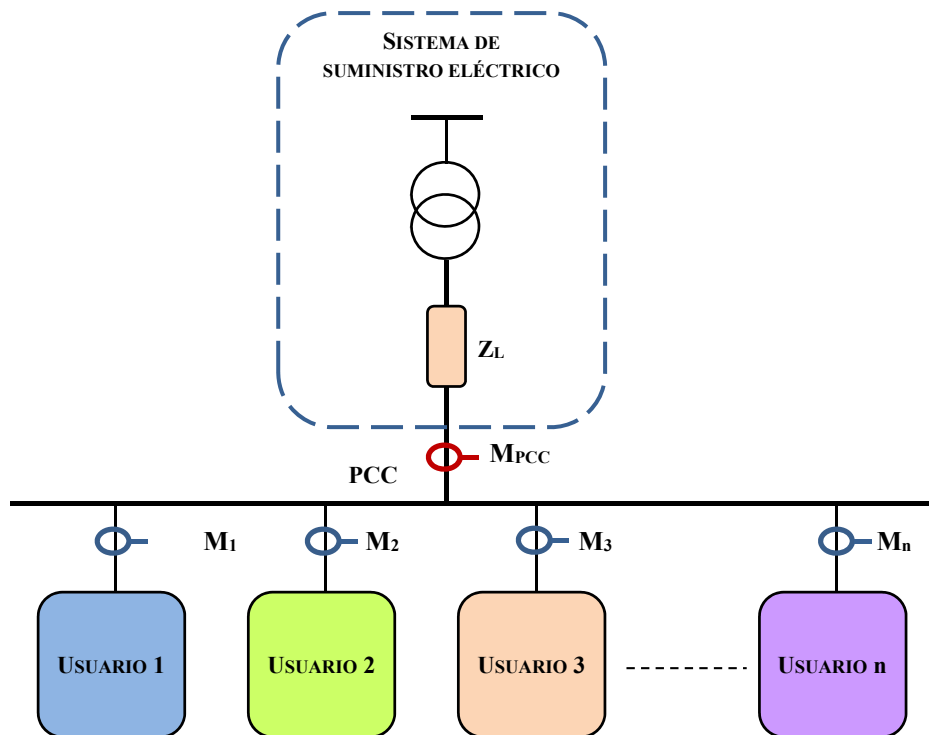
**Figura 1.10.** Circuitos equivalentes del sistema bajo estudio.

Los índices más relevantes son el índice de intensidad conforme y no conforme [106] y el índice de desequilibrio de carga no lineal [108]. Si bien los dos índices están fundamentados en la misma metodología, difieren en la definición de la carga ideal que consideran como referencia y la intensidad resultante a considerar.

#### 1.4.2. Métodos basados en medidas distribuidas multipunto

Ante las limitaciones que plantean las medidas localizadas en un único punto en determinadas condiciones de trabajo, se postulan como alternativa los métodos basados en medidas distribuidas, también denominados métodos multipunto [109-114]. En la figura 1.11 se muestra un esquema básico en el que  $N$  líneas (consumidores) están conectados al sistema de suministro eléctrico través del PCC. Cada línea dispone de una sección de medida  $M_n$ , mientras que  $M_{PCC}$  corresponde a la sección de medida del suministro eléctrico.

Un sistema de medidas distribuidas debe tener la capacidad de centralizar y monitorizar de forma simultánea un número específico de índices básicos de calidad correspondiente a todos los consumidores ( $M_n$ ), además de los correspondientes al suministro eléctrico ( $M_{PCC}$ ). Una vez centralizados todos los datos del conjunto de usuarios y PCC, se debe procesar la información obtenida con el objetivo de identificar las fuentes de distorsión y/o desequilibrio, y así poder cuantificar el efecto de las perturbaciones producidas. Evidentemente este sistema de medidas es más complejo que el utilizado en los métodos basados en una única sección localizada; sin embargo, el desarrollo de los sistemas de medición basado en el procesamiento digital de la señal, y su capacidad de interconexión e intercambio de datos hacen que estos sistemas sean especialmente adecuados para implementar los métodos de medidas distribuidas multipunto.



**Figura 1.11.** Esquema típico de un sistema de medidas distribuidas.

Se han propuesto varios índices en la literatura para evaluar la contribución de la perturbación del sistema por un consumidor a partir de medidas distribuidas. Entre ellos en [109] se propone el índice global de  $EPQ$ , definido a partir de la combinación de tres índices basados en medidas localizadas realizadas en cada carga “ $k$ ” (usuario) conectado al  $PCC$ , con respecto a las medidas realizadas en el  $PCC$ , referenciadas por el subíndice “ $s$ ”. Esta tesis se enmarca dentro de esta metodología.

### 1.5. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

Existe un amplio repertorio de propuestas de índices para la identificación de fuentes de perturbación a partir de medidas localizadas. Todos esos factores de mérito han aportado un valioso conocimiento sobre el tema, aunque por sí solos no han conseguido una solución definitiva del mismo. Sin embargo, es posible abordar el problema desde la combinación de las aportaciones de distintos de esos índices ya experimentados. Esto es, se han definido índices localizados que muestran un buen comportamiento en distintas situaciones concretas. Ese es el caso de los índices basados en el análisis del flujo de potencia activa armónica en las situaciones donde sólo está presente una única fuente de perturbación, y ésta es del tipo distorsión armónica. O el caso del índice de desequilibrio de carga no lineal [108], que modela una carga de referencia ideal a partir de parámetros

$R-L$ , y que por tanto, indica una valoración correcta de la perturbación sólo para cargas inductivas que no incluyan la presencia de baterías de condensadores de compensación.

### **1.5.1. Hipótesis de partida**

En esta tesis, la hipótesis de partida ha consistido en considerar que los responsables de las fuentes de perturbación no pueden ser identificados mediante medidas realizadas en secciones puntuales de la red. La solución del problema requiere el cómputo de medidas simultáneas de todos los consumos conectados a un mismo  $PCC$ . Y como consecuencia, se hace necesario la propuesta de un nuevo índice de medidas distribuidas que incluya en su definición, una combinación de aquellos indicadores de  $EPQ$  que hayan presentado un mejor comportamiento en la caracterización de algún tipo de perturbación (armónicos/desequilibrio).

Hasta la fecha, se han propuesto dos índices distribuidos que cumplen esas características. Ambos han mostrado un buen comportamiento en distintas configuraciones de distribuidores y condiciones de alimentación, pero se han mostrado menos efectivos en otras situaciones. Específicamente, presentan dificultad a la hora de valorar fuentes de perturbación ante la presencia de baterías de condensadores. Son necesarias, pues, nuevas propuestas que además, en su definición, se sitúen en marcos de trabajo más cercanos a los estándares de la potencia en regímenes desequilibrados y no sinusoidales.

### **1.5.2. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es encontrar soluciones que permitan localizar y valorar fuentes de distorsión armónica y/o desequilibrio en redes eléctricas. De forma más específica, aquí se plantea la búsqueda de un índice de perturbaciones periódicas basado en medidas distribuidas multipunto, formado a partir de índices localizados basados en términos de potencia en sistemas con distorsión armónica y/o desequilibrio. Así, en el desarrollo de esta tesis se ha pretendido cubrir un doble objetivo, como son:

- Proponer un nuevo índice basado en medidas distribuidas multipunto a partir de términos de potencia formulados en el marco del estándar IEEE 1459.
- Verificar el comportamiento del nuevo índice propuesto a partir de dos plataformas: una de simulación en el entorno de Matlab/Simulink y otra implementada en el laboratorio de potencia.

### 1.5.3. Metodología

La metodología seguida en este trabajo la conforman las siguientes fases:

- Estudio del problema de la identificación de las fuentes de perturbación en la literatura técnica. Análisis de los distintos indicadores propuestos ante distintas configuraciones, y presencia de desequilibrio y distorsión. Identificación de aquellos índices que mejor comportamiento han mostrado en la caracterización de fuentes de perturbación periódica.
- Análisis de distintos términos y relaciones de potencia que permitan caracterizar de forma específica la presencia de desequilibrio y distorsión en una red eléctrica en el marco del *Std.* 1459. Definición de un índice de *EPQ* distribuido basado principalmente en términos de potencia. Primera validación de la definición propuesta mediante una plataforma de simulación por ordenador desarrollada al efecto.
- Análisis comparativo del comportamiento del índice *EPQ* propuesto frente a otros índices distribuidos basados en índices localizados. La realización de distintos ensayos en la plataforma de simulación establecerá las bondades/limitaciones de cada uno de ellos.
- Desarrollo de una plataforma experimental que reproduzca una red de distribución con cinco cargas de distinto tipo, alimentadas desde la red, y con la posibilidad de presentar distinto grado de desequilibrio. Validación del índice *EPQ* propuesto en un entorno experimental, y análisis comparativo de los distintos índices distribuidos ya presentados. Discusión final sobre la posibilidad de valorar las fuentes de perturbación en una red con distintos tipos de consumo, y condiciones de suministro eléctrico.

#### 1.5.4. Estructura de la tesis

Esta tesis se ha estructurado en cinco capítulos y tres anexos. A continuación se exponen de manera resumida los objetivos específicos de cada uno de ellos.

- En el capítulo I, con la finalidad de plantear el problema de forma conceptual, se introduce un estudio de la distorsión armónica y el desequilibrio en los sistemas eléctricos de potencia, así como su caracterización y los niveles de referencia. Además, se presenta una clasificación de los métodos existentes para la identificación de fuentes de distorsión armónico y/o desequilibrio.
- El capítulo II se centra en la identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio mediante métodos basados en medidas realizadas en un único punto de la red. Para ello, se realiza un estudio de los índices más representativos presentes en la literatura técnica, abordando sus ventajas e inconvenientes.
- El capítulo III plantea la identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio mediante métodos basados en medidas distribuidas multipunto. En la primera parte del capítulo, se presenta el índice global de *EPQ*. También se analiza el índice global modificado que, si bien presenta una menor difusión que el anterior, representa una evolución del mismo que obtiene mejores resultados en determinados escenarios.

Por otro lado, se presenta un nuevo índice de medidas distribuidas para la identificación de fuente de distorsión armónica y/o desequilibrio en la red basado en términos de potencia en el marco del estándar IEEE 1459. El algoritmo del nuevo índice se define a partir de la combinación de términos procedentes de la descomposición de la potencia aparente a través de medida realizadas en cada punto del sistema eléctrico a diagnosticar.

Finaliza el capítulo con un análisis comparativo de los tres índices de medidas distribuidas a partir de los resultados obtenidos en una plataforma de simulación implementada en Matlab/Simulink.

- En el capítulo IV se realiza un análisis comparativo de los índices distribuidos multipunto estudiados a través de una plataforma experimental, con el objetivo de

contrastar los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas en el capítulo anterior.

Para ello se ha desarrollado en el laboratorio de potencia un sistema que permite configurar a pequeña escala las diferentes condiciones de trabajo que se pueden presentar en una línea de distribución en baja tensión. La topología del sistema puede configurarse de distintas formas para contrastar el comportamiento de los índices distribuidos multipunto en diferentes situaciones de interés. Los casos prácticos que se presentan se agrupan en dos grandes bloques, el primero combina configuraciones del sistema sin cargas capacitivas, mientras que en el segundo bloque se ha incluido en todas las configuraciones una carga que contiene un banco de condensadores para compensar su factor de potencia.

El capítulo finaliza con un análisis comparativo de los tres índices de medidas distribuidas a partir de los resultados experimentales. Los resultados medidos han permitido establecer el comportamiento de cada índice frente a distintos escenarios del sistema, a través de la variación de las condiciones de trabajo, tanto del suministro eléctrico como de las cargas.

- Por último, en el capítulo V se realiza una discusión crítica de los índices establecidos y propuestos para la valoración e identificación de fuentes de perturbación y se recogen las conclusiones más relevantes. Se finaliza con los trabajos futuros que pueden surgir a partir de este trabajo de investigación.

## **CAPÍTULO II**

---

# **MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN Y/O DESEQUILIBRIO BASADOS EN MEDIDAS LOCALIZADAS EN UN ÚNICO PUNTO DE LA RED**

---

## 2.1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los índices propuestos en la literatura técnica están basados en medidas realizadas en un único punto de la red. Así, los primeros índices que contemplan de forma conjunta la localización de fuentes armónicas y desequilibrios aparecen en la década de los 90. De tal forma que en [21] y [55] se desarrollan una serie de índices basados en el análisis de flujo de potencia armónica en el *PCC*. Ante las limitaciones presentadas en estas primeras propuestas se formulan nuevos índices con el mismo enfoque, entre los que destacan el índice de calidad de carga y suministro [7] y el índice global armónico [99].

La búsqueda de enfoques más efectivos da lugar a índices que basan su fundamento en la estimación de los parámetros de una carga ideal equivalente. así en [106] se propone el índice basado en la intensidad conforme y no conforme, y más tarde, el índice de desequilibrio de carga no lineal [108].

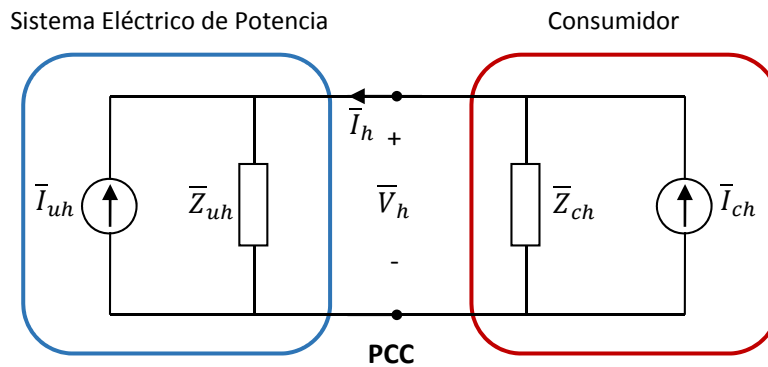
Los índices basados en el conocimiento de los parámetros del sistema están enfocados a localizar fuentes de distorsión armónica [40-48], o bien fuentes de desequilibrio [89-95], pero por lo general no consideran las dos perturbaciones al mismo tiempo. No obstante, en este capítulo, se ha optado por introducir esta metodología a efectos de conceptualizar el problema más que por su discutible viabilidad práctica.

## 2.2. ÍNDICES BASADOS EN EL CONOCIMIENTO DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA

Como ya ha quedado indicado, con el objeto de conceptualizar el problema de localización de fuentes de perturbación, en esta sección se abordará el problema de forma separada. Por un lado, se realizará un análisis de la localización de fuentes de distorsión armónica utilizando para ello el modelo equivalente Norton, mientras que para introducir el problema de la localización de fuentes de desequilibrio, se seguirá la técnica de conexión/desconexión.

### 2.2.1. Localización de fuentes de distorsión armónica

En la figura 2.1 se representan los equivalentes Norton de un sistema de energía eléctrica donde se distinguen el subsistema que suministra energía y el subsistema correspondiente a la instalación de un consumidor, [38].



**Figura 2.1.** Circuito equivalente para el análisis del armónico  $h$ .

Donde:

$\bar{I}_{uh}$ .- es la fuente que representa a la intensidad armónica inyectada en el *PCC* por el sistema de suministro eléctrico.

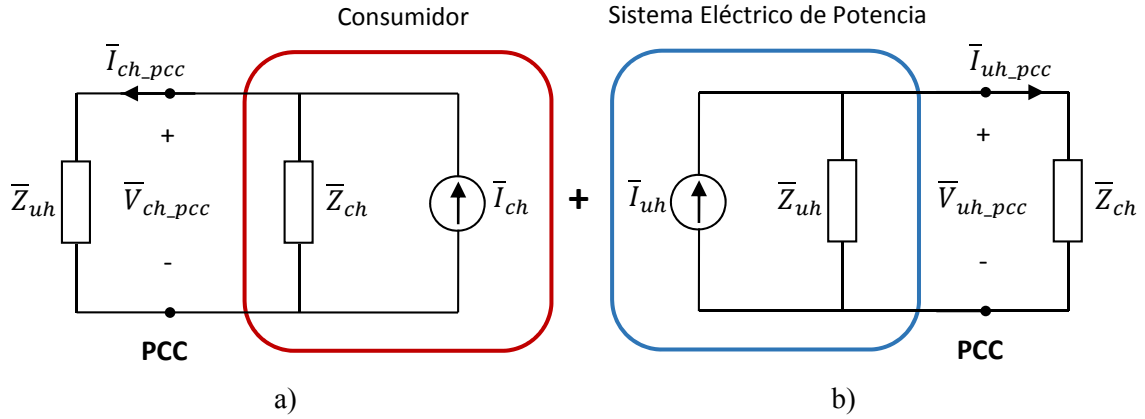
$\bar{I}_{ch}$ .- es la fuente que representa a la intensidad armónica producida por la carga distorsionante del consumidor.

$\bar{Z}_{uh}$ .- Es la impedancia armónica equivalente del sistema de suministro eléctrico.

$\bar{Z}_{ch}$ .- Es la impedancia armónica equivalente de la instalación del consumidor.

$\bar{V}_{h\_pcc}, \bar{I}_{h\_pcc}$ .- Tensión e intensidad armónicas medidas en el *PCC*.

Con el objeto de evaluar el grado de responsabilidad de la distorsión armónica en el *PCC* del circuito de la figura 2.1, se realiza el análisis para un armónico determinado, el armónico de orden  $h$ . La figura 2.2 muestra los circuitos resultantes una vez aplicado el principio de superposición al sistema.



**Figura 2.2.** Circuito equivalente para la determinación de la contribución de las fuentes de distorsión para un armónico de orden  $h$ .

La intensidad y tensión armónica en el  $PCC$  serán igual a:

$$\bar{I}_{h\_pcc} = \bar{I}_{ch\_pcc} - \bar{I}_{uh\_pcc} \quad ; \quad \bar{V}_{h\_pcc} = \bar{V}_{ch\_pcc} + \bar{V}_{uh\_pcc} \quad (2.1)$$

Del circuito equivalente de la figura 2.2 a), se calcula tanto la intensidad como la tensión armónica producida por el consumidor al  $PCC$ , por lo que se obtiene:

$$\bar{I}_{ch\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{I}_{ch} \quad ; \quad \bar{V}_{ch\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{uh} \bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{I}_{ch} \quad (2.2)$$

Del circuito equivalente de la figura 2.1, resulta:

$$\bar{V}_{h\_pcc} = \bar{Z}_{ch} (\bar{I}_{ch} - \bar{I}_{h\_pcc}) \quad (2.3)$$

Por lo que,

$$\bar{Z}_{ch} \bar{I}_{ch} = \bar{V}_{h\_pcc} + \bar{Z}_{ch} \bar{I}_{h\_pcc} \quad (2.4)$$

Sustituyendo (2.4) en (2.2) se obtienen la intensidad y tensión armónica producida por el consumidor en función de la tensión e intensidad armónica en el  $PCC$ .

$$\bar{I}_{ch\_pcc} = \frac{(\bar{V}_{h\_pcc} + \bar{Z}_{ch} \bar{I}_{h\_pcc})}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \quad ; \quad \bar{V}_{ch\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{uh} (\bar{V}_{h\_pcc} + \bar{Z}_{ch} \bar{I}_{h\_pcc})}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \quad (2.5)$$

De forma análoga, se obtiene la intensidad y la tensión armónica producida por la red a partir de la figura 2.2 b),

$$\bar{I}_{uh\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{uh}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{I}_{uh} \quad ; \quad \bar{V}_{uh\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{ch} \bar{Z}_{uh}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{I}_{uh} \quad (2.6)$$

Del circuito equivalente de la figura 2.1 se obtiene:

$$\bar{V}_{h\_pcc} = \bar{Z}_{uh} (\bar{I}_{uh} - \bar{I}_{h\_pcc}) \quad (2.7)$$

De forma que:

$$\bar{Z}_{uh} \bar{I}_{uh\_pcc} = \bar{V}_{h\_pcc} + \bar{Z}_{uh} \bar{I}_{h\_pcc} \quad (2.8)$$

Sustituyendo (2.8) en (2.6) permite obtener:

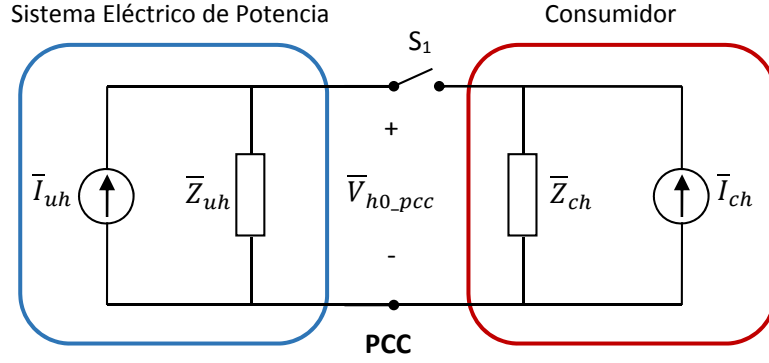
$$\bar{I}_{uh\_pcc} = \frac{(\bar{V}_{h\_pcc} + \bar{Z}_{uh} \bar{I}_{h\_pcc})}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \quad ; \quad \bar{V}_{uh\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{ch} (\bar{V}_{h\_pcc} + \bar{Z}_{uh} \bar{I}_{h\_pcc})}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \quad (2.9)$$

De las expresiones (2.5) y (2.9) se pueden definir una serie de índices para cuantificar el nivel contribución de distorsión al *PCC*, tanto por parte del consumidor, como por parte de la red.

Los índices que utilizan estas expresiones para localizar las fuentes de distorsión se encuentran con el inconveniente de que en la práctica el valor de la impedancia del sistema cambia continuamente debido a las variaciones de la carga, de los elementos de red y a las condiciones del sistema.

Para evitar tener que conocer parcial o totalmente las impedancias armónicas se introducen una serie de técnicas denominadas invasivas, como por ejemplo el método de conexión/desconexión para la detección de los niveles de emisión armónica de una carga. Para ello, como se aprecia en la figura 2.3, se emplea un interruptor en el *PCC* con el objetivo de tomar medidas antes y después de conectar la instalación del consumidor [43]. De tal forma que cuando  $S_I$  está abierto, la tensión armónica en el *PCC* viene dada por:

$$\bar{V}_{h0\_pcc} = \bar{Z}_{uh} \bar{I}_{uh} \quad (2.10)$$



**Figura 2.3.** Montaje utilizado para el método conexión/desconexión utilizando el interruptor  $S_1$ .

Cuando el interruptor  $S_1$  se cierra el resultado será:

$$\bar{V}_{h\_pcc} = \bar{Z}_{uh} (\bar{I}_{uh} + \bar{I}_{h\_pcc}) = \bar{Z}_{ch} (\bar{I}_{ch} - \bar{I}_{h\_pcc}) \quad (2.11)$$

La sustitución de (2.10) en (2.11) permite obtener el valor de la fuente armónico del lado del consumidor:

$$\bar{I}_{ch} = \frac{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} \bar{Z}_{ch}} \bar{V}_{h\_pcc} - \frac{\bar{V}_{h0\_pcc}}{\bar{Z}_{uh}} \quad (2.12)$$

Así, teniendo en cuenta la ecuación (2.5) se pueden obtener los niveles de emisión de contenido armónico de tensión e intensidad,

$$\bar{V}_{ch\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{uh} \bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{I}_{ch} = \frac{\bar{Z}_{uh} \bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \left( \frac{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} \bar{Z}_{ch}} \bar{V}_{h\_pcc} - \frac{\bar{V}_{h0\_pcc}}{\bar{Z}_{uh}} \right) \quad (2.13)$$

esto es,

$$\bar{V}_{ch\_pcc} = \bar{V}_{h\_pcc} - \frac{\bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{V}_{h0\_pcc} \quad (2.14)$$

y

$$\bar{I}_{ch\_pcc} = \frac{\bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \bar{I}_{ch} = \frac{\bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}} \left( \frac{\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh} \bar{Z}_{ch}} \bar{V}_{h\_pcc} - \frac{\bar{V}_{h0\_pcc}}{\bar{Z}_{uh}} \right) \quad (2.15)$$

así,

$$\bar{I}_{ch\_pcc} = \frac{\bar{V}_{h\_pcc}}{\bar{Z}_{uh}} - \frac{\bar{Z}_{ch}}{\bar{Z}_{uh}(\bar{Z}_{uh} + \bar{Z}_{ch})} \bar{V}_{h0\_pcc} \quad (2.16)$$

Si se tiene en cuenta que  $Z_{uh} \ll Z_{ch}$ , las expresiones (2.14) y (2.10) se pueden aproximar de la siguiente manera:

$$\bar{V}_{ch\_pcc} \approx \bar{V}_{h\_pcc} - \bar{V}_{h0\_pcc} \quad ; \quad \bar{I}_{ch\_pcc} \approx \frac{\bar{V}_{h\_pcc} - \bar{V}_{h0\_pcc}}{\bar{Z}_{uh}} \quad (2.17)$$

Si bien para el cálculo de  $V_{ch\_pcc}$  no hace falta conocer las impedancias armónicas, para el cálculo de  $I_{ch\_pcc}$  este método requiere aún conocer la impedancia armónica de la red. Otro inconveniente añadido es que la aplicación de este método requiere realizar dos medidas en dos instantes diferentes que, aunque puedan efectuarse de forma consecutiva, los resultados pueden introducir errores debido a la modificación de las condiciones de red.

### 2.2.2. Localización de fuentes de desequilibrio

La figura 2.4 muestra el circuito equivalente de un sistema de suministro eléctrico radial, compuesto por un sistema trifásico de tensiones y una línea de transmisión que alimenta a una carga determinada. De tal forma que cualquier asimetría producida por la carga o bien por el sistema de potencia, provoca la presencia de desequilibrios de tensiones en el PCC.

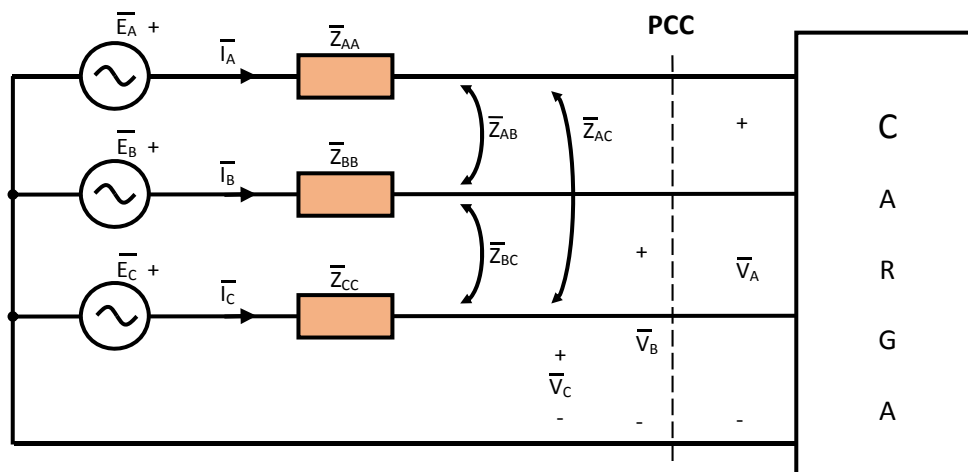


Figura 2.4. Sistema de potencia radial.

Como ha quedado establecido en el apartado 1.3.1 del capítulo anterior, para estudiar los desequilibrios de tensión, se descompone el sistema de acuerdo con las expresiones (1.19) y (1.24), obteniendo así las componentes simétricas de las tensiones e intensidades del sistema. De tal forma que a partir del circuito de la figura 2.4 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_+ \\ \bar{V}_- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{V}_{0,oc} \\ \bar{V}_{+,oc} \\ \bar{V}_{-,oc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \bar{Z}_{00} & \bar{Z}_{01} & \bar{Z}_{02} \\ \bar{Z}_{10} & \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{20} & \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_{0,i} \\ \bar{I}_{+,i} \\ \bar{I}_{-,i} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Donde el vector  $\bar{V}_{0+-}$  representa las componentes simétricas del sistema y el vector  $\bar{V}_{0+-,oc}$  las componentes simétricas a circuito abierto en el *PCC*. La matriz de impedancia del sistema  $\bar{Z}_{012}$ , representa la matriz de impedancias de secuencia del sistema de distribución visto desde el punto de evaluación, mientras que el vector  $\bar{I}_{0+-,i}$  representa las intensidades consumidas por una determinada instalación.

De acuerdo con el estándar IEC 61000-3-13:2008 [88], la emisión de desequilibrio provocada por una instalación conectada a un *PCC* viene determinada por la relación entre la tensión de secuencia negativa  $\bar{V}_-$  con respecto a la tensión de secuencia positiva  $\bar{V}_+$ . A partir de (2.18), la tensión de secuencia negativa en el *PCC* se puede expresar en función de las intensidades de secuencia que circulan por la instalación y las impedancias de secuencia del sistema de potencia de la siguiente forma:

$$\bar{V}_- = \bar{V}_{-,oc} - (\bar{Z}_{20} \cdot \bar{I}_{0,i} + \bar{Z}_{21} \cdot \bar{I}_{+,i} + \bar{Z}_{22} \cdot \bar{I}_{-,i}) \quad (2.19)$$

Donde:

- $\bar{V}_{-,oc}$  es la tensión de secuencia negativa a circuito abierto obtenida midiendo en el *PCC* antes de conectar la carga a red ( $\bar{V}_{-,pre-conexión}$ ).
- El producto de la impedancia mutua  $\bar{Z}_{20}$  entre el sistema de secuencia negativa y el sistema de secuencia cero y la intensidad de secuencia cero  $\bar{I}_{0,i}$  suele ser despreciable, ya que el valor de la impedancia  $\bar{Z}_{20}$  es relativamente pequeño

mientras que por otro lado en muchas situaciones el valor de la intensidad  $\bar{I}_{0,i}$  es cero.

- El producto de la impedancia mutua  $\bar{Z}_{12}$  entre el sistema de secuencia positiva y negativa y la corriente de secuencia positiva del sistema  $\bar{I}_{+,i}$  surge como resultado de la asimetría del sistema eléctrico de potencia y puede ser considerado como el desequilibrio inherente del sistema ( $\bar{V}_{-,i(line)}$ ). Este término puede adquirir un valor considerable ya que el valor de la intensidad de secuencia positiva es alto. La impedancia  $\bar{Z}_{12}$  existe únicamente cuando el sistema de potencia que alimenta la instalación es desequilibrado.
- El producto de la impedancia de secuencia negativa  $\bar{Z}_{22}$  (frecuentemente denotada por  $\bar{Z}_2$ ) y la intensidad de secuencia negativa  $\bar{I}_{-,i}$ , puede ser relevante si el sistema de intensidades generado por las cargas de la instalación es desequilibrado, debido a la asimetría de la carga. Por lo tanto, se considera que este término define la emisión de desequilibrio de la carga ( $\bar{V}_{-,i(load)}$ ).

Por lo tanto, si se ignora el término  $\bar{Z}_{20} \cdot \bar{I}_{0,i}$ , la expresión (2.19) se puede reescribir de la forma:

$$\bar{V}_- = \bar{V}_{-,oc} - (\bar{Z}_{21} \cdot \bar{I}_{+,i} + \bar{Z}_{22} \cdot \bar{I}_{-,i}) = \bar{V}_{-,oc} + \bar{V}_{-,i} \quad (2.20)$$

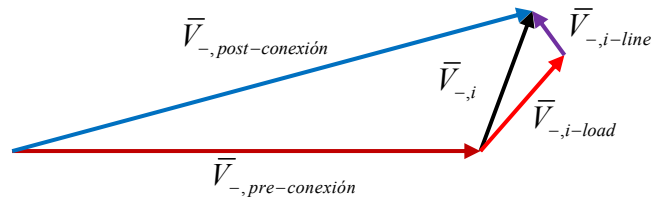
Donde el término  $\bar{V}_{-,i}$  se define como la emisión de desequilibrio de tensión resultante de la conexión de una instalación  $i$  en el PCC.  $\bar{V}_{-,i}$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$\bar{V}_{-,i} = (\bar{Z}_{21} \cdot \bar{I}_{+,i} + \bar{Z}_{22} \cdot \bar{I}_{-,i}) = \bar{V}_{-,i-line} + \bar{V}_{-,i-load} \quad (2.21)$$

El enfoque dado en CIGRE/CIREN sobre las técnicas de evaluación de niveles de emisión de desequilibrios de tensión [92], está basado en la evaluación de los niveles de desequilibrios de tensión de las medidas realizadas antes y después de conectar la instalación en el punto de evaluación. Una vez obtenidos los datos de las medidas realizadas, la emisión total  $\bar{V}_{-,i}$  puede ser establecida de la siguiente forma:

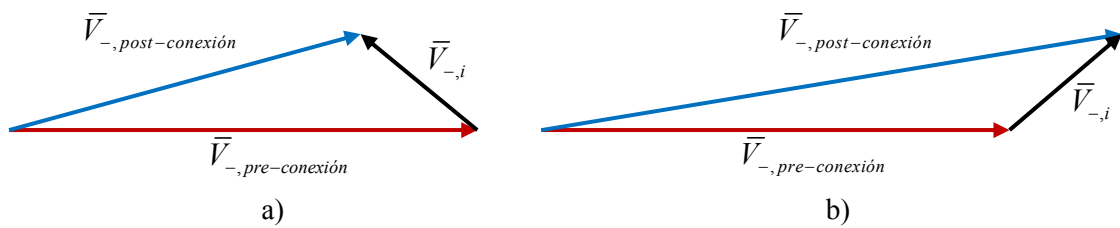
$$\bar{V}_{-,i} = \bar{V}_{-,post-conexión} - \bar{V}_{-,pre-conexión} \quad (2.22)$$

En la figura 2.5 se muestra la representación gráfica de la expresión (2.19),



**Figura 2.5.** Representación gráfica del nivel de desequilibrio en el PCC.

De acuerdo con la expresión (2.22), la evaluación de las emisiones de desequilibrio de tensión en el PCC se podrían presentar efectuar a partir de dos casos diferentes, tal y como se refleja en la figura 2.6.



**Figura 2.6.** Nivel de desequilibrio de tensión en el PCC tras conectar la carga.

En el caso que se representa en la figura 2.6 a), el nivel de emisión de desequilibrio de tensión una vez conectada la instalación ( $\bar{V}_{-,post-conexión}$ ) decrece en comparación con el nivel de desequilibrio existente en el PCC antes de conectar la instalación ( $\bar{V}_{-,pre-conexión}$ ). En este caso se puede considerar que la instalación del consumidor no es la responsable del desequilibrio de tensiones en el PCC. En la figura 2.6 b) se muestra el caso contrario, en el cual el nivel de emisión de desequilibrio de tensión una vez conectada la instalación ( $\bar{V}_{-,post-conexión}$ ) crece en comparación con el nivel de desequilibrio existente en el PCC antes de conectar la instalación ( $\bar{V}_{-,pre-conexión}$ ), la responsabilidad de la emisión de desequilibrio de tensión cae sobre la instalación.

En el segundo caso, donde la instalación es la mayor responsable del desequilibrio de tensiones en el PCC, se debe determinar el nivel de emisión para comprobar si supera los

límites de emisión individual marcados por la normativa. Entre los métodos más comúnmente utilizados para la determinación de los niveles de emisión de desequilibrios en una determinada instalación, se encuentran:

- *Medidas de tensiones de fase en el PCC con la carga conectada.*

En este caso se asume que la instalación es la única responsable de la perturbación y que la red de distribución es totalmente equilibrada, de tal forma que tanto  $\bar{V}_{-,pre-conexión}$  como  $\bar{V}_{-,i-line}$  se desprecian. De tal forma que la expresión (2.22), se convierte en:

$$\bar{V}_{-,post-conexión} = \bar{V}_{-,i-load} \quad (2.23)$$

- *Medidas de tensiones en el PCC antes y después de conectar la instalación.*

En este caso se asume que el sistema eléctrico de potencia es totalmente equilibrado y que las perturbaciones ocasionadas en la red no introducen cambios significativos en el sistema, por lo que en este caso también se puede despreciar el término  $\bar{V}_{-,i-line}$ . Si el equipo de medida obtiene el ángulo de fase de las medidas realizadas antes y después de conectar la instalación, el nivel de emisión de desequilibrio de la instalación se calcula a partir de la diferencia fasorial de los niveles de desequilibrios obtenidos antes y después de la conexión de la instalación. De forma que:

$$\bar{V}_{-,i-load} \approx \bar{V}_{-,post-conexión} - \bar{V}_{-,pre-conexión} \quad (2.24)$$

Por otro lado, si no se conoce el ángulo de fase, según la normativa IEC 61000-3-13, se puede utilizar la expresión empírica:

$$|\bar{V}_{-,i-load}| \approx \sqrt[\alpha]{|\bar{V}_{-,post-conexión}|^\alpha - |\bar{V}_{-,pre-conexión}|^\alpha} \quad (2.25)$$

Donde el exponente  $\alpha$  depende de diversos factores, si bien por lo general se propone un valor de 1.4.

- *Medidas de intensidad.*

Asumiendo que la instalación es la principal responsable de la emisión de desequilibrio en el PCC, se pueden utilizar las componentes de desequilibrio de intensidad para estimar

el nivel de emisión de desequilibrio introducido por la instalación. De tal forma que despreciando la emisión de desequilibrio introducida por la red ( $\bar{V}_{-i-line}$ ), la expresión (2.21) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\bar{V}_{-i-load} = (\bar{Z}_{22} \cdot \bar{I}_{-i}) \quad (2.26)$$

Teniendo en cuenta que, si se considera la red como un sistema equilibrado se puede obtener el nivel de emisión de desequilibrio de la instalación en la forma,

$$\left| \frac{\bar{V}_{-i-load}}{\bar{V}_1} \right| = \frac{S_i}{S_{sc}} |CUF| \quad (2.27)$$

Donde:

- $S_i$  es la potencia aparente de la carga en MVA.
- $S_{sc}$  es la potencia de cortocircuito de la red en el PCC en MVA.
- $CUF$  es el factor de desequilibrio de intensidad, definido por la relación entre la intensidad de secuencia negativa con respecto a la intensidad de secuencia positiva de la instalación.

De la misma forma que se ha obtenido el nivel de emisión individual de una determinada instalación partiendo de las medidas de intensidad en el PCC, se puede obtener la emisión producida por la asimetría de la red [29, 95]. En efecto, de la expresión (2.21) se obtiene:

$$\bar{V}_{-i-line} = (\bar{Z}_{21} \cdot \bar{I}_{+i}) \quad (2.28)$$

Por lo que se puede estimar el nivel de emisión de desequilibrio de la red a partir de la expresión:

$$\left| \frac{\bar{V}_{-i-line}}{\bar{V}_+} \right| = \frac{S_i}{S_{sc}} \left| \frac{\bar{Z}_{12}}{\bar{Z}_1} \right| \quad (2.29)$$

Los resultados obtenidos por las expresiones (2.27) y (2.29) se pueden utilizar de forma individual para determinar las contribuciones al desequilibrio de tensiones en el PCC realizadas por una determinada instalación, o bien es producido por la red. Sin embargo,

estos índices se encuentran con los mismos inconvenientes que los índices (2.5), (2.9) y (2.17), relativos a las perturbaciones armónicas:

- Parten del conocimiento de los parámetros del sistema (impedancia del sistema y/o de la instalación del consumidor).
- Toma de medidas en dos instantes de tiempo diferentes.

### **2.3. ÍNDICES BASADOS EN TÉRMINOS DE POTENCIA EN CONDICIONES DE DISTORSIÓN Y/O DESEQUILIBRIO**

Los términos de potencia en sistemas eléctricos equilibrados y sin distorsión están perfectamente definidos, y conceptos como la potencia útil o activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia tienen definiciones aceptadas universalmente. Por el contrario, en sistemas eléctricos con distorsión y/o desequilibrio, el análisis del flujo de potencias se hace más complejo, dando lugar a discrepancias en la comunidad científica a la hora de definir algunos términos de potencia y su significado físico.

A pesar de la falta de consenso en la descomposición de la potencia en sistemas con distorsión y/o desequilibrio, los índices desarrollados bajo esta propuesta presentan unos resultados equiparables a cualquier otra metodología. Esto unido a la sencillez que presentan a la hora implementarse en las instalaciones hace que estos índices sean los más utilizados en la actualidad.

Los índices más relevantes publicados basan su funcionamiento en el análisis del flujo de potencia activa armónica [7] y [99], sin bien posteriormente se presentó una propuesta de índice basado en términos de potencia no activa [102] que fue extendida en [103] y [104] a sistemas de tres y cuatro conductores.

#### **2.3.1. Análisis del flujo de potencias activas armónicas**

Para ilustrar el método se utiliza la figura 2.7. Se trata del circuito monofásico equivalente de una red trifásica equilibrada en la que se encuentran conectadas a un *PCC* múltiples cargas no lineales. El circuito incluye  $n+1$  ramas,  $n$  de ellas corresponden a consumidores genéricos y la rama restante corresponde a la red de suministro que alimenta el *PCC*. La red se sustituye por un equivalente Thevenin constituido por una fuente de tensión  $V_s$  en serie con una impedancia  $Z_s$ . El *PCC* de la figura 2.8 representa el embarrado de un sistema de distribución eléctrico.

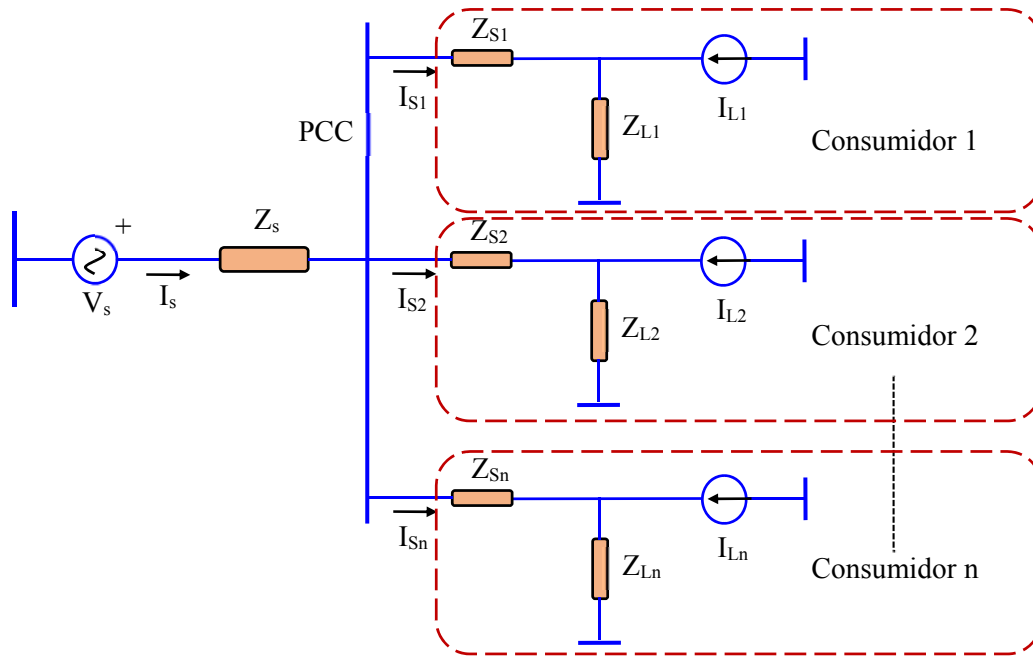
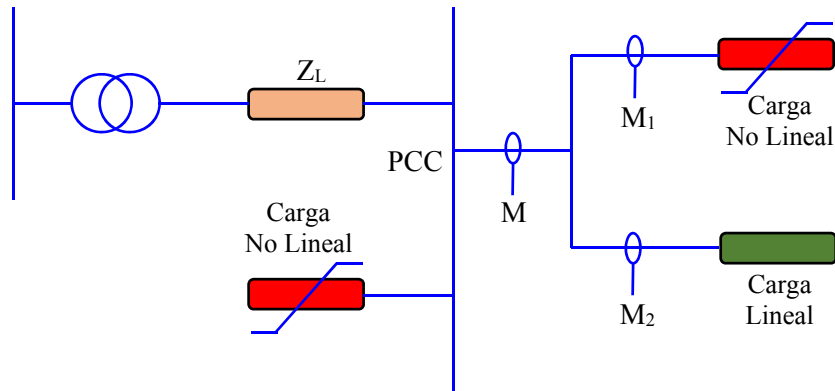


Figura 2.7. Esquema equivalente de una red trifásica equilibrada.

Los consumidores se alimentan a través de impedancias individuales,  $Z_{Sj}$ . Cada carga es modelada por una impedancia  $Z_{Lj}$  en paralelo con una fuente armónica  $I_{Lj}$ , donde  $j$  representa el índice de la rama. Dada la topología de la red, el objetivo es medir la tensión y la intensidad en cada una de las ramas conectadas al *PCC*. Una vez registradas esas medidas, el propósito genérico consiste en, primero identificar aquellos consumidores responsables de generar distorsión y/o desequilibrio, y segundo cuantificar la distorsión generada por cada uno de ellos. A esos efectos es posible reducir la red de la figura 2.7 al esquema de la figura 2.8, así, en lo que sigue se considerará como referencia el esquema de la figura 2.8. Se dispone de un punto de conexión común, *PCC*, donde se conecta una fuente de tensión sinusoidal  $V_s$  con una impedancia de fuente  $Z_s$ , y una serie de consumidores lineales y no lineales. Aquí serán motivo de interés las medidas efectuadas en  $M$ ,  $M_1$  y  $M_2$ . En  $M$  aparecen conectados: un consumidor no lineal o tiempo variante, sección de medida  $M_1$ , y un consumidor de características lineales, sección de medida  $M_2$ . La tensión en  $M$  es no sinusoidal debida a los efectos simultáneos de la distorsión causados tanto por las cargas no lineales conectadas aguas abajo de  $M$  como las conectadas aguas arriba de  $M$ .



**Figura 2.8.** Puntos de medida en un esquema simplificado de un sistema de potencia con dos cargas conectadas al PCC.

El análisis de sistemas de potencia que incluyen cargas no lineales puede ser efectuado considerando dos subsistemas entre los cuales existe, para cada uno de los armónicos, un flujo recíproco de potencia, [55]. Este análisis se realiza en el dominio de la frecuencia donde se considera un circuito equivalente para cada uno de los armónicos. Así, el sistema se simplifica a través del equivalente Thévenin visto desde la sección de medida: una tensión Thévenin no sinusoidal y una impedancia equivalente Thévenin dependiente de la frecuencia. En general, por tanto, existirán armónicos comunes entre la tensión Thévenin y el consumo no lineal aguas debajo de  $M$ ; así, para cada armónico común existirá un valor de la potencia activa armónica que resultará de la contribución simultánea de la red y el consumidor. Su valor será positivo o negativo dependiendo de cuál de los dos contribuya de manera predominante. Según esto, un análisis armónico no puede identificar las fuentes de distorsión a partir de las sumas de las potencias armónicas, sólo puede identificar aquella fuente de distorsión que prevalece sobre la otra, y esto es así porque tanto las intensidades armónicas como las potencias armónicas se deben a la suma de dos contribuciones contrapuestas. No obstante, como se comentó anteriormente, la medida de las potencias activa y reactiva armónicas ha sido el enfoque adoptado tradicionalmente para caracterizar las perturbaciones que introduce el consumidor en la calidad de la señal de suministro.

### 2.3.2. Índice de calidad de carga y suministro. (Supply and Loading Quality Index)

En [7] los autores presentan un índice basado en el flujo de potencia activa armónica, que introduce como novedad la identificación de fuentes de distorsión armónica y desequilibrio de forma conjunta. De tal forma que, a partir de las medidas realizadas en

cualquier punto de un sistema trifásico, la potencia activa  $P$  se puede descomponer de la siguiente forma:

$$P = P_{+1} + P_{-1} + \sum_{h \neq \pm 1} P_h \quad (2.30)$$

Donde  $P$  es la potencia activa total,  $P_{+1}$  es la potencia activa fundamental de secuencia directa o positiva y  $P_{-1}$  es la potencia activa fundamental de secuencia inversa o negativa, y por último,  $P_h$  es la potencia activa armónica restante.

Con el objeto de presentar de forma pormenorizada el fundamento del índice, el análisis de la identificación de fuentes de distorsión se realizará de forma separada del estudio de la identificación de fuentes de desequilibrio.

Para un sistema trifásico equilibrado, el índice de calidad de suministro y carga (Supply and Loading Quality Index) se define a partir de la siguiente expresión:

$$\xi_{slq} = \frac{P}{P_1} = \frac{P_1 + P_H}{P_1} = \frac{P_1 + \sum_{h \neq 1} P_h}{P_1} \quad (2.31)$$

Donde  $P_1$  es la potencia activa fundamental.

A partir de la expresión (2.31) se puede afirmar que:

- Si la carga es lineal y está alimentada por una fuente sin distorsión, la potencia armónica total será igual a cero ( $P_H = 0$ ) por lo que el índice identificará el caso ideal con un valor de 1.
- Si la carga es lineal pero la fuente presenta distorsión, todas las potencias activas armónicas fluirán de fuente a carga por lo que  $P_H > 0$ , de tal forma que el índice  $\xi_{slq}$  será mayor que 1. Es obvio que el valor del índice aumenta a medida que aumenta la potencia activa armónica entregada a la carga.
- Por el contrario, si la carga es no lineal y la fuente no presenta distorsión armónica, todas las potencias activas armónicas fluyen desde la carga a la fuente por lo que son negativas y por consiguiente  $P_H < 0$ , dando lugar a un valor de  $\xi_{slq}$  menor de 1.

- Por último, en el caso que una carga no lineal es alimentada por una fuente con distorsión armónica, el índice tomará un valor distinto de cero, y en función de la fuente de distorsión predominante su valor será mayor o menor de 1. En esta situación se producen los mismos problemas de cancelación de armónicos comentados en la sección anterior.

Para el caso de un sistema desequilibrado en el cual la carga es lineal y la fuente no presenta distorsión, el índice de calidad de suministro y carga se define como:

$$\xi_{slq} = \frac{P_{+1} + P_{-1}}{P_{+1}} \quad (2.32)$$

A tenor de la expresión (2.32) se puede deducir que la respuesta del índice depende de si la componente fundamental de secuencia inversa  $P_{-1}$  es positiva, negativa o cero.

Siguiendo la secuencia de estudio realizada para el comportamiento del índice en sistemas con distorsión armónica, a partir de (2.32) se puede decir que:

- Si la carga es equilibrada y está alimentada por una fuente equilibrada, la potencia activa fundamental de secuencia inversa es cero ( $P_{-1} = 0$ ) por lo que el índice marcará el caso ideal con un valor de 1.
- Si la carga es equilibrada y está alimentada por una fuente desequilibrada, la potencia activa fundamental de secuencia negativa fluye hacia la carga, por lo que se considera como positiva ( $P_{-1} > 0$ ), dando como resultado  $\xi_{slq} > 1$ .
- En el caso de una fuente equilibrada que alimenta a una carga desequilibrada, la potencia activa de la componente fundamental de secuencia inversa es negativa ( $P_{-1} < 0$ ) por lo que  $\xi_{slq} < 1$ .
- Por último, para el caso de una carga desequilibrada alimentada por una fuente con un determinado nivel de desequilibrio de tensiones en sus terminales, el resultado de la potencia activa fundamental de secuencia inversa puede ser positivo, negativo o cero, dependiendo del balance de la potencia activa de secuencia inversa generada por la fuente o bien por la carga.

Por último, para el caso de un sistema con presencia simultánea de distorsión y desequilibrio, el índice de calidad de suministro y carga viene determinado por:

$$\xi_{slq} = \frac{P}{P_{+1}} = \frac{P_{+1} + P_{-1} + \sum_{h \neq 1} P_h}{P_{+1}} \quad (2.33)$$

De tal forma que si la distorsión y/o asimetría del suministro de energía eléctrica prevalece sobre los efectos de una carga no lineal y desequilibrada,  $\xi_{slq} > 1$ , por el contrario, cuando los efectos de la distorsión y/o el desequilibrio de la carga prevalece sobre los efectos de la distorsión y/o desequilibrio de la fuente,  $\xi_{slq} < 1$ . Por último, el caso de un sistema sin distorsión armónica ni desequilibrio, el índice lo identificará tomando el valor 1,  $\xi_{slq} = 1$ .

### 2.3.3. Índice de fase armónico e Índice global armónico

Ante las limitaciones que presenta el índice de calidad de suministro y carga,  $\xi_{slq}$ , en [99] el autor propone dos nuevos índices: el índice de fase armónico ( $\xi_{HPI}$ ) y el índice global armónico ( $\xi_{HGI}$ ). Como el propio autor recoge en su trabajo, aunque el procedimiento propuesto no difiere sustancialmente de los métodos anteriores en cuanto a los antecedentes teóricos, introduce algunos cambios entre los que cabe destacar los siguientes:

- Los índices propuestos,  $\xi_{HPI}$  y  $\xi_{HGI}$ , están basados en una relación de intensidades y no de potencias.
- Para evitar cancelaciones mutuas, los valores de los diferentes armónicos no se suman algebraicamente sino cuadráticamente.

Partiendo de estas dos premisas, en [99] se presentan dos índices de identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio. Un índice se caracteriza por un enfoque más tradicional ( $\xi_{HPI}$ ), mientras que el otro ( $\xi_{HGI}$ ) utiliza una perspectiva global del sistema, gracias al uso de la transformada de Park.

### 2.3.3.1. Índice de Fase Armónico (Harmonic Phase Index)

Para calcular el índice de fase armónico ( $\xi_{HPI}$ ), el autor introduce un vector  $\bar{I}$  de orden  $3n$ , donde  $n$  es el orden máximo del armónico considerado, de tal forma que:

$$\bar{I} = [\bar{I}_{11}, \dots, \bar{I}_{1h}, \dots, \bar{I}_{1n}, \bar{I}_{21}, \dots, \bar{I}_{2h}, \dots, \bar{I}_{2n}, \bar{I}_{31}, \dots, \bar{I}_{3h}, \dots, \bar{I}_{3n}]^T \quad (2.34)$$

El vector  $\bar{I}$  se construye con los valores *RMS* de las corrientes de cada fase para cada armónico  $h$ . Este vector  $\bar{I}$  se divide a su vez en dos vectores  $\bar{I}_S$  e  $\bar{I}_L$  cuyas componentes para cada fase  $j$  de cada armónico  $h$  quedan definidas de la siguiente forma:

$$\bar{I}_{Sjh} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{jh} \leq 0 \\ \bar{I}_{jh} & \text{si } P_{jh} > 0 \end{cases} ; \quad j = a, b, c ; \quad h = 1, \dots, n. \quad (2.35)$$

$$\bar{I}_{Ljh} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{jh} \geq 0 \\ \bar{I}_{jh} & \text{si } P_{jh} < 0 \end{cases} ; \quad j = a, b, c ; \quad h = 1, \dots, n. \quad (2.36)$$

Donde la potencia armónica  $P_h$  viene definida de la forma habitual:

$$P_h = \sum_{h=1} V_h I_h \cos(\alpha_h - \beta_h) \quad (2.37)$$

Para el caso de un sistema de cuatro conductores, el autor considera una cuarta fase imaginaria correspondiente a los armónicos de intensidad de secuencia cero, de tal forma que la dimensión del vector  $\bar{I}$  será de  $4n$  en este caso. En función del signo de la potencia de secuencia cero calculada, la intensidad de secuencia cero correspondiente se incluirá en el vector  $\bar{I}_S$  o bien en  $\bar{I}_L$ .

Por otro lado, si se denota con el subíndice -1 las cantidades de las componentes de secuencia negativa a la frecuencia fundamental, se puede definir el siguiente factor:

$$K_{-1} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{-1} \geq 0 \\ 1 & \text{si } P_{-1} < 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

A partir de estas consideraciones, se define el índice de fase armónico como:

$$\xi_{HPI} = \frac{K_{-1}\bar{I}_{-1}^2 + \|\bar{I}_L\|^2}{\|\bar{I}_S\|^2} \quad (2.39)$$

Donde  $\|\ \|$  representa la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes que componen el vector correspondiente.

### 2.3.3.2. Índice Global Armónico (Harmonic Global Index)

Como se comentó anteriormente, en [99] el autor además del índice de fase armónico presenta el índice global armónico ( $\xi_{HGI}$ ). Si bien esta nueva propuesta conceptualmente es muy similar a la anterior, presenta una perspectiva global del sistema usando para ello la transformada de Park. Al utilizar la transformación Park, es posible representar el comportamiento del sistema trifásico de forma conjunta, independientemente de las condiciones de funcionamiento (presencia de distorsión, falta de equilibrio, etc.) [115].

La transformada de Park o también denominada transformación ‘dq’, convierte las componentes ‘abc’ del sistema trifásico a otro sistema de referencia ‘dq0’. El objetivo de la transformación consiste en convertir los valores trifásicos ‘abc’, variables sinusoidales con respecto al tiempo, a valores constantes ‘dq0’ en régimen permanente. El vector de las componentes en el nuevo sistema de referencia  $[x_r]$  se obtiene multiplicando el vector de coordenadas de fase  $[x]$  por la matriz de transformación  $[T]$ , según la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [x_r] = [T] \cdot [x] = [T] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Donde la matriz  $[T]$  viene dada por:

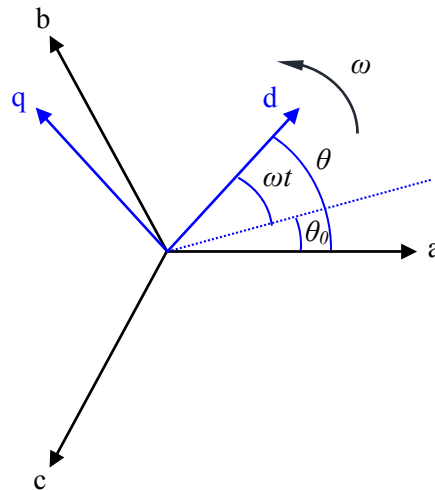
$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

En (2.41)  $\theta$  es el ángulo de la referencia rotativa de los ejes  $d$ - $q$ , tal y como se muestran en la figura 2.9 y definidos por la expresión:

$$\theta = \int_0^t (\omega \cdot t) \cdot dt + \theta_0 \quad (2.42)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad angular.

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega \cdot t + \theta_0) & \cos(\omega \cdot t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega \cdot t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega \cdot t + \theta_0) & -\sin(\omega \cdot t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega \cdot t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$



**Figura 2.9.** Sistemas de referencia trifásico  $abc$  y  $d-q$ .

En el plano  $d$ - $q$ , es posible definir el vector de Park de la tensión e intensidad en forma compleja a partir de las siguientes expresiones:

$$\bar{u}(t) = u_d(t) + ju_q(t) \quad (2.44)$$

$$\bar{i}(t) = i_d(t) + ji_q(t) \quad (2.45)$$

Así, al tratarse de un sistema constituido por formas de ondas periódicas es posible efectuar su desarrollo en serie de Fourier,

$$\bar{u}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \bar{U}_k e^{jk\omega t} \quad (2.46)$$

$$\bar{i}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \bar{I}_k e^{jk\omega t} \quad (2.47)$$

Para el caso de sistemas trifásicos de cuatro conductores, las componentes homopolares requieren un tratamiento separado, y de la misma forma se pueden descomponer en sus series de Fourier definidas por:

$$\bar{u}_0(t) = \text{Re} \left( \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \bar{U}_{0k} e^{jk\omega t} \right) \quad (2.48)$$

$$\bar{i}_0(t) = \text{Re} \left( \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \bar{I}_{0k} e^{jk\omega t} \right) \quad (2.49)$$

Cada término se corresponde con un vector de amplitud constante  $U_k$  e  $I_k$  que gira a una velocidad proporcional a  $k$ . En (2.46) y (2.47), cada frecuencia armónica  $n\omega$  está definida por dos vectores ( $n$  y  $-n$ ) con diferente amplitud y que giran en direcciones opuestas. En [115] los autores definen el vector de Park sobre un sistema trifásico “ $abc$ ”, efectúan un análisis frecuencial del mismo y establecen su relación con las componentes simétricas. Así, se identifican las componentes  $k > 0$  con la componente simétrica de secuencia directa o positiva, la componente  $k < 0$  con la componente simétrica de secuencia inversa o negativa a la frecuencia  $n\omega$ .

Una vez calculadas todas las componentes armónicas de la tensión y la intensidad se puede calcular la potencia activa producida por cada armónico a partir de las siguientes expresiones:

$$P_k = \text{Re} \{ \bar{U}_k I_k^* \} \quad \text{for } k \geq 0 \quad (2.50)$$

$$P_k = \text{Re} \{ \bar{U}_k^* I_k \} \quad \text{for } k < 0 \quad (2.51)$$

$$P_{0k} = \text{Re}\{\bar{U}_{0k} I_{0k}^*\} \quad (2.52)$$

Donde  $\text{Re}\{\}$  es la parte real del número complejo mientras que  $*$  indica el número complejo conjugado.

Una vez obtenidas las potencias armónicas, el autor define un vector  $\bar{I}$  de dimensión  $3n+2$ , siendo  $n$  el orden del armónico máximo considerado. El vector  $\bar{I}$  se puede dividir a su vez en dos vectores  $\bar{I}_S$  e  $\bar{I}_L$ , también de dimensiones  $3n+2$ , cuyas componentes, para cada  $k$  armónico se definen de la siguiente forma:

$$\bar{I}_{S(k+n)} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_k \leq 0 \\ \bar{I}_k & \text{si } P_k > 0 \end{cases} \quad k = -n, \dots, n \quad (2.53)$$

$$\bar{I}_{L(k+n)} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_k \geq 0 \\ \bar{I}_k & \text{si } P_k < 0 \end{cases} \quad k = -n, \dots, n \quad (2.54)$$

$$\bar{I}_{S(k+2n+1)} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{0k} \leq 0 \\ \bar{I}_{0k} & \text{si } P_{0k} > 0 \end{cases} \quad k = 0, \dots, n \quad (2.55)$$

$$\bar{I}_{L(k+2n+1)} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{0k} \geq 0 \\ \bar{I}_{0k} & \text{si } P_{0k} < 0 \end{cases} \quad k = 0, \dots, n \quad (2.56)$$

Por último, el índice global armónico (Harmonic Global Index) se define como:

$$\xi_{HGI} = \frac{\|\bar{I}_L\|^2}{\|\bar{I}_S\|^2} \quad (2.57)$$

A partir de las expresiones (2.39) y (2.57) se pueden realizar las siguientes consideraciones:

- Si un sistema de suministro eléctrico con distorsión armónica y/o desequilibrio alimenta a una carga lineal y equilibrada a través del PCC, todas las potencias activas armónicas son positivas ( $P_h > 0$ ) de tal forma que el valor de los dos índices será igual a cero ( $\xi_{HPI} = 0$  y  $\xi_{HGI} = 0$ ).

- Si una carga no lineal y/o desequilibrada es alimentada por un sistema de suministro eléctrico sin distorsión armónica ni desequilibrio, todas las potencias activas armónicas serán negativas ( $P_h < 0$ ) por lo que los índices tomarán un valor mayor que 1 ( $\xi_{HPI} > 1$  y  $\xi_{HGI} > 1$ ). A mayor distorsión armónica y/o mayor nivel de desequilibrio presente en la red, debido a la no linealidad y/o desequilibrio de la carga, mayor será el valor de los índices.
- Si el sistema presenta distorsión armónica y/o desequilibrio y la carga es no lineal y/o presenta desequilibrio, los índices tomarán un valor mayor que cero, de tal forma que cuanto mayor sea el valor de los índices, mayor será la responsabilidad de la carga, por el contrario, cuanto menor sea el valor de los índices, mayor será la responsabilidad del suministro eléctrico.
- Por último, ante un sistema de suministro eléctrico sin distorsión armónica ni desequilibrio que alimenta una carga lineal y equilibrada, el índice de fase armónico presentará una indeterminación, ya que  $\xi_{HPI} = \xi_{HGI} 0/0$ . Si bien en la práctica este caso es bastante improbable, para evitar posibles problemas derivados de una división por cero, siempre que el numerador y el denominador sean menor que  $10e-4$ , el resultado de la división se considera 0.

Por último, hay que destacar que tanto el índice de fase armónico  $\xi_{HPI}$  como el índice global armónico  $\xi_{HGI}$  tienen dos características apreciables para cumplir su objetivo. Primero, está definido a partir del cociente de valores *RMS* de las corrientes que son la causa real de las perturbaciones introducidas por las cargas en la red. Y segundo, los valores de los diferentes armónicos no se suman algebraicamente, sino de forma cuadrática, lo que evita las cancelaciones mutuas entre los distintos armónicos.

#### **2.3.4. Índices basados en el análisis de los valores de las componentes no activas de la potencia**

Los métodos de identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio en las redes eléctricas, basados en el flujo de potencia activa armónica, como ya ha quedado indicado presentan limitaciones en determinadas situaciones [100, 101]. Es por ello por lo que otros autores han planteado una solución alternativa basada en el estudio de las componentes ‘no activas’ de la potencia aparente medida en un nudo determinado del sistema. La interpretación de la potencia no activa en sistemas con distorsión armónica

y/o desequilibrio ha sido ampliamente discutida en la literatura científica, donde no existe un acuerdo unánime para definir la potencia aparente y mucho menos los términos de potencia más apropiados para su descomposición. Se han formulado múltiples definiciones a partir de diferentes enfoques que permitan la agrupación de las diferentes componentes de la potencia no activa, de tal forma que se puede observar que, en sistemas sin distorsión ni desequilibrio, todas las definiciones de potencia reactiva formuladas conducen al mismo resultado. Por otro lado, como era de esperar, en presencia de distorsión armónica y/o desequilibrio adoptan diferentes valores dependiendo de las condiciones de trabajo [102]. Esto debido a las diferentes agrupaciones de las componentes de los términos de potencia instantánea que realizan las distintas teorías propuestas.

#### 2.3.4.1. Fundamento de la metodología

A partir de estas consideraciones, se propone un nuevo enfoque para la detección de la fuente de perturbación dominante, aguas arriba o aguas abajo de la sección de medida. En [102], los autores presentan esta metodología a partir de la comparación de las siguientes definiciones:

Potencia reactiva fundamental:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (2.58)$$

Potencia reactiva de Fryze, definida por:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.59)$$

Potencia reactiva cuadratura (Sharon), expresada por:

$$S_Q = V \sqrt{\sum_k I_k^2 \sin^2 \theta_k} = \sqrt{S^2 - P^2 - S_C^2} \quad (2.60)$$

Donde  $S$  es la potencia aparente,  $P$  es la potencia activa,  $V$  es el valor *RMS* de la tensión,  $S_C$  es la potencia complementaria [101], y  $k$  es el índice relacionado con las componentes armónicas que son comunes tanto a la tensión como a la intensidad.

A partir de las tres definiciones presentadas se puede afirmar que  $Q_I$  puede ser considerado como el valor mínimo de referencia, ya que se trata de la componente no activa en condiciones sinusoidales. Por otro lado,  $Q_F$  es el máximo valor ya que contiene

todos los términos de la potencia no activa. A partir de las expresiones (2.58) y (2.59) se puede concluir que la expresión  $S_Q$  conduce a un valor de potencia no activo que es intermedio entre  $Q_I$  y  $Q_F$ . Esto es debido al hecho de que  $S_Q$  no contempla la potencia complementaria  $S_C$ . Es decir, cuanto mayor sea la distorsión del sistema, mayor será la diferencia entre  $Q_I$  y  $Q_F$ .

A partir de las conclusiones anteriores, los autores proponen una estrategia de localización de fuentes de perturbación localizada en un único punto de medida basada en la comparación de los términos de potencia  $Q_I$ ,  $Q_F$  y  $S_Q$ . Si se realiza un análisis para diferentes condiciones de trabajo se puede establecer lo siguiente:

- En un sistema de suministro eléctrico sin distorsión que alimenta a una carga lineal, los tres términos de potencia tendrán el mismo valor  $Q_I = S_Q = Q_F$ .
- Si un sistema de suministro eléctrico con distorsión alimenta una carga lineal se cumple la condición:  $Q_I < S_Q < Q_F$ . En este caso los autores argumentan que la distorsión armónica de intensidad es reducida ya que los armónicos comunes entre tensión e intensidad se reducen principalmente a la componente fundamental. De tal forma que en este caso el valor de  $S_Q$  está más cerca de  $Q_I$  que de  $Q_F$ .
- Si una carga no lineal es alimentada por un sistema eléctrico sin distorsión armónica, de nuevo se cumple la condición anterior en la que  $Q_I < S_Q < Q_F$ . Sin embargo, en este caso  $S_Q$  está más cerca de  $Q_F$  que de  $Q_I$ , ya que en estos casos los niveles de distorsión armónica de intensidad suelen ser altos.
- Por último, para el caso en que el sistema de suministro con distorsión alimenta a una carga no lineal,  $S_Q$  tomará un valor situado entre  $Q_F$  y  $Q_I$ .

Para el caso trifásico, el enfoque propuesto se basó en la comparación de las potencias no activas en sistemas equilibrados, considerando las potencias no activas trifásicas como la suma aritmética de las potencias no activas de cada fase.

#### **2.3.4.2. Índices basados en las potencias no activas dentro del marco del estándar IEEE 1459**

En [104] los autores utilizan la misma metodología, sin embargo, adaptan los términos de potencia no activa utilizados en [102] a aquellos propuestos por el IEEE Std 1459 para sistemas monofásicos [116]. El estándar considera las dos primeras cantidades  $Q_I$  y  $Q_F$ ,

mientras que por el contrario no define ningún término de potencia equiparable a  $S_Q$ . En concreto, la potencia reactiva formulada por Fryze ( $Q_F$ ) es definida en el estándar por la potencia no activa, denominada  $N$ , esto conduce a los autores a descartar la potencia reactiva en cuadratura formulada por Sharon ( $S_Q$ ) y sustituirlo por la potencia no activa definida en el estándar ( $N$ ). De tal forma que, para seguir la metodología, se hace necesario la formulación de una nueva potencia que realice la misma función que la potencia reactiva de Fryze ( $Q_F$ ) en el método original. Es por ello que introducen un nuevo término de potencia reactiva “ficticia” denominado  $Q_X$  [102] y definido de la siguiente manera:

$$Q_X^2 = V^2 \left( I_1^2 \sin^2 \theta_1 + I_H^2 \sin^2 \theta_H \right) \quad (2.61)$$

El primer sumando representa la contribución de la componente fundamental de la intensidad a la potencia no activa, mientras que el segundo sumando representa la aportación que realiza la componente armónica de la intensidad. De acuerdo con la definición de la potencia aparente del estándar [5], la expresión  $\sin \theta_H$  se puede expresar como:

$$\sin^2 \theta_H = 1 - \cos^2 \theta_H = 1 - \frac{P_H^2}{V_H^2 I_H^2} \quad (2.62)$$

Sustituyendo (2.62) en (2.61),  $Q_X^2$  se puede expresar en términos definidos por el estándar de la siguiente forma:

$$Q_X^2 = V^2 \left[ I_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{D_H^2}{V_H^2} \right] \quad (2.63)$$

A tenor de las expresiones de las diferentes potencias a evaluar,  $Q_I$ ,  $Q_X$  y  $N$ , en cada medida realizada en un determinado nudo de la red, se puede decir que si el sistema es ideal (sin distorsión ni desequilibrio) se cumple la siguiente condición:

$$N = Q_X = Q_I \quad (2.64)$$

En sistemas con distorsión,  $Q_I$  se considera el valor mínimo de referencia debido que es la única componente de la potencia reactiva en sistemas sin distorsión. Por el contrario,  $N$  es el valor de referencia máximo ya que contiene todas las componentes no activas de

la potencia aparente. Por otro lado, si la potencia reactiva ficticia  $Q_X^2$  se dispone en función de la potencia reactiva fundamental ( $Q_I$ ), se obtiene:

$$Q_X^2 = (V_1^2 + V_H^2) \left( I_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{D_H^2}{V_H^2} \right) \quad (2.65)$$

Esto es:

$$Q_X^2 = Q_1^2 + V_H^2 I_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{V_1^2}{V_H^2} D_H^2 + D_H^2 \quad (2.66)$$

De tal forma que en sistemas con distorsión se cumple la condición:

$$Q_X > Q_1 \quad (2.67)$$

Con el objetivo de comparar la potencia no activa  $N$  con  $Q_X$  y  $Q_1$  en sistemas con distorsión, se descompone la expresión a partir de los términos del estándar, es decir:

$$N^2 = S^2 - P^2 = (S_1^2 + S_N^2) - (P_1^2 + P_H^2) = (S_1^2 - P_1^2) + (S_N^2 - P_H^2) \quad (2.68)$$

Si se expresa la potencia no activa  $N$  en función de  $Q_I$ , se tiene la siguiente expresión:

$$N^2 = Q_1^2 + D_V^2 + D_I^2 + D_H^2 \quad (2.69)$$

Para conseguir la potencia no activa en función de  $Q_X$ , se desarrolla la expresión (2.69), de forma que:

$$\begin{aligned} N^2 &= Q_1^2 + V_H^2 I_1^2 + V_1^2 I_H^2 + D_H^2 \\ N^2 &= Q_1^2 + V_H^2 I_1^2 (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) + \frac{V_1^2}{V_H^2} (P_H^2 + D_H^2) + D_H^2 \end{aligned} \quad (2.70)$$

Al desarrollar la expresión (2.70) y sustituir (2.66) se obtiene:

$$N^2 = Q_X^2 + V_H^2 I_1^2 \cos^2 \theta_1 + \frac{V_1^2}{V_H^2} P_H^2 \quad (2.71)$$

Por lo que se demuestra que, en sistemas con distorsión armónica, se cumple la siguiente relación:

$$N > Q_X > Q_I \quad (2.72)$$

La diferencia entre los tres valores depende del nivel de distorsión presente en el sistema, a mayor distorsión mayor diferencia entre los valores de  $Q_I$  y  $N$ .

Para localizar la fuente de distorsión se utiliza el valor de  $Q_X$ , de tal forma que, en presencia de una carga no lineal alimentada por una fuente sin distorsión, el valor de  $Q_X$  estará más próximo a  $N$  que a  $Q_I$ . Por el contrario, si un sistema con distorsión alimenta a una carga lineal, el valor de  $Q_X$  estará más próximo a  $Q_I$  que a  $N$ . En caso de sistemas en los que tanto la carga como la fuente aportan distorsión al sistema, el valor de  $Q_X$  asume un valor intermedio entre  $N$  y  $Q_I$ .

Como ha quedado indicado en la sección anterior, en [102] y [103] se presenta una estrategia basada en la evaluación simultánea de tres cantidades diferentes de potencia no activa en una misma sección para definir la fuente predominante de distorsión y/o desequilibrio. Los dos trabajos utilizan la potencia reactiva fundamental para definir el valor mínimo de referencia, mientras que para definir el valor máximo de referencia en un caso [102] utiliza la potencia aparente en cuadratura (definida por Sharon) y en el otro caso [103] se utiliza la potencia no activa definida en el IEEE Std. 1459 para sistemas monofásicos. Los términos de potencia comentados se desarrollaron para el caso monofásico y su extensión a sistemas trifásicos se realizó a partir de la suma aritmética de las potencias no activas de cada fase. En [104] los autores presentan una evolución de la metodología, de tal forma que posteriormente adoptan las modificaciones introducidas en la revisión del estándar IEEE Std. 1459 de 2010.

#### **2.4. ÍNDICES QUE REALIZAN UNA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UNA CARGA LINEAL Y EQUILIBRADA EQUIVALENTE**

Estos índices enfocan el problema partiendo de la base aceptada de que el deterioro de la calidad de la potencia eléctrica debido a las perturbaciones puede originarse simultáneamente en varios puntos de la red. Las formas de onda de la tensión e intensidad medidas en el *PCC* se deben al efecto combinado de numerosos dispositivos conectados en diferentes lugares del sistema. Por lo tanto, se considerará la carga desde los terminales conectada al resto del sistema (suministro y el conjunto de cargas alimentadas desde el mismo *PCC*). A partir de ahí, el primer paso para la propuesta de unos índices que permitan valorar la contribución a la distorsión armónica consiste en fijar las condiciones

de una carga ideal. Así, una carga que muestre un comportamiento lineal y equilibrado se considerará como carga de referencia. De esa forma, si la carga en estudio es equilibrada y lineal, entonces sólo el sistema de suministro será responsable de la perturbación.

Inicialmente, es necesario identificar qué forma de onda de corriente será extraída si estuviera presente una “carga lineal y equilibrada equivalente” en lugar de la carga real. Esta carga equivalente puede ser definida, como aquella carga lineal que absorbe desde sus terminales una potencia activa a la frecuencia fundamental igual a la potencia activa a la frecuencia fundamental que realmente fluye a través del PCC. Así, la “carga lineal y equilibrada equivalente” constituye la carga de referencia; esta carga extrae desde la red una corriente distorsionada, pero ella en sí mismo no es responsable de esa distorsión.

A continuación, se realiza el estudio del índice de identificación de fuentes de perturbación más representativo que se fundamenta en esta metodología, denominado índice de desequilibrio de carga no lineal (*UNL*).

#### **2.4.1. Índice de desequilibrio de carga No Lineal (*UNL*)**

El problema de separar las contribuciones a la distorsión armónica y/o al desequilibrio en el PCC fue abordado por Dell’Aquila et al. en un artículo de 2004 [108]. Para presentar el índice, en primer lugar, se ha realizado una evaluación en sistemas con distorsión armónica, para a continuación desarrollar el estudio en sistemas que presentan desequilibrio de tensiones en el PCC.

##### **2.4.1.1. Evaluación de la distorsión armónica**

En orden a modelar la carga trifásica lineal ideal se han considerado tres ramas serie *R-L* idénticas. Mediante la evaluación de los parámetros *R* y *L* de este modelo ideal, puede identificarse la parte de la carga que representa la carga lineal equivalente que no deteriora la calidad de potencia. Así, desde el lado de consumo, siempre es posible estimar la parte de la carga, identificada en términos de elementos pasivos (*R* y *L*), que no afectan la distorsión. Esta parte extrae una “intensidad equilibrada y lineal” que constituye una intensidad ideal, y representa sólo una parte de la corriente total que consume la carga real. La diferencia entre la intensidad medida y la intensidad lineal ideal representa la componente no lineal de la intensidad de carga.

Los parámetros *R* y *L* de la “carga lineal equivalente” se estiman en la fase “*a*” de acuerdo al procedimiento que se indica a continuación; el mismo método puede ser aplicado a las

fases “b” y “c”. Si se designa por  $\bar{Z}_{1a}$  la impedancia lineal equivalente de la fase “a”, el circuito  $R$ - $L$  serie a la frecuencia fundamental es:

$$\begin{aligned} |\bar{Z}_{1a}| &= \frac{V_{1a}}{I_{1a}} \\ \angle \bar{Z}_{1a} &= |\theta_{1a} - \phi_{1a}| = \varphi_{1a} \end{aligned} \quad (2.73)$$

Donde  $V_{1a}$  e  $I_{1a}$  son los valores  $RMS$  a la frecuencia fundamental de la tensión y la intensidad, respectivamente, en el  $PCC$ , y  $\theta_{1a}$  y  $\phi_{1a}$  son los ángulos de fase de las mismas magnitudes. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} R_a &= |\bar{Z}_{1a}| \cos \varphi_{1a} \\ X_{1a} &= |\bar{Z}_{1a}| \operatorname{sen} \varphi_{1a} \\ L_a &= \frac{X_{1a}}{2\pi f_1} \end{aligned} \quad (2.74)$$

Donde  $X_{1a}$  es la reactancia de la combinación  $R$ - $L$  serie a la frecuencia fundamental,  $f_1$ , y  $R_a$  y  $L_a$  son los parámetros correspondientes. Los valores de la reactancia a las frecuencias de las componentes armónicas de tensión son:

$$X_{ha} = 2\pi h f_1 L_a, \quad h = 1, 2, \dots, n \quad (2.75)$$

Si se desprecia el efecto skin y se supone el valor de  $R_a$  independiente de la frecuencia, entonces,

$$\begin{aligned} |\bar{Z}_{ha}| &= \sqrt{R_a^2 + X_{ha}^2} \\ \varphi_{ha} &= \operatorname{tag}^{-1} \frac{X_{ha}}{R_a}, \quad h = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.76)$$

La intensidad que consume la carga lineal ideal en la fase “a” viene dada entonces por,

$$i_{La}(t) = \sum_{h=1}^{H_{\max}} \frac{\bar{V}_{ha}}{|\bar{Z}_{ha}|} \sqrt{2} \operatorname{sen}(2\pi h f_1 t + (\theta_{ha} - \varphi_{ha})) \quad (2.77)$$

Donde  $H_{\max}$  representa el orden del último armónico de tensión significativo. Esta es la “intensidad lineal equivalente”, y el sistema de suministro es el único causante de su distorsión. La diferencia entre la intensidad medida y la intensidad ideal calculada representa la “intensidad no lineal”,

$$i_{nLa}(t) = i_a(t) - i_{La}(t) \quad (2.78)$$

La intensidad no lineal establece en que grado la carga real en la fase “a” difiere de la ideal en términos de la distorsión armónica. Por tanto, se define un índice de corriente no lineal que suministra información fiable alrededor de la distorsión atribuible al consumidor,

$$NL = \frac{I_{nLa}}{I_a} \times 100 (\%) \quad (2.79)$$

Donde  $I_{nLa}$  e  $I_a$  son los valores *RMS* correspondientes a las intensidades no lineal ( $i_{nLa}(t)$ ) y total ( $i_a(t)$ ), definidos por:

$$I_{nLa} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H_{\max}} I_{hnLa}^2} \quad (2.80)$$

$$I_a = \sqrt{\sum_h I_{ha}^2}$$

$I_{hnLa}$  e  $I_{ha}$  representan los valores *RMS* de los correspondientes componentes armónicos de  $i_{nLa}(t)$  e  $i_a(t)$  respectivamente.

#### 2.4.1.2. Evaluación del desequilibrio

Para definir un índice que tenga en cuenta el desequilibrio de la carga, en [108] se elige como referencia la corriente de fase de menor valor *RMS*. De acuerdo con este procedimiento para la estimación de los parámetros, se supone que la carga equivalente está constituida por tres cargas lineales, equilibradas, iguales a la carga lineal estimada para la fase “a”. Por lo tanto, las corrientes absorbidas por las fases “b” y “c” para la misma carga serie *RL* que se estima en la fase “a”, son:

$$i_{bLj}(t) = \sum_{h=1}^{H_{\max}} \frac{\bar{V}_{hj}}{|\bar{Z}_{ha}|} \sqrt{2} \text{sen}(2\pi h f_1 t + (\theta_{hj} - \phi_{ha})) \quad (2.81)$$

$$j = b, c$$

Estas corrientes se denominan “*corrientes lineales equilibradas*” y el único responsable de su desequilibrio y distorsión es la red. La diferencia entre la corriente real medida en cada fase y la corriente ideal calculada se denomina “*corriente no lineal desequilibrada*”,

$$i_{unLj}(t) = i_j(t) - i_{bLj}(t) \quad (2.82)$$

$$j = b, c$$

Las corrientes expresan cómo las fases “b” y “c” difieren de las condiciones de referencia ideales en términos de desequilibrio de fase y distorsión. Por otro lado, es posible calcular las corrientes no lineales  $i_{nLj}(t)$  ( $j = a, b, c$ ) para las fases “b” y “c” de la misma forma que para la fase “a”. En efecto, se puede separar la contribución de la distorsión restando la intensidad no lineal  $i_{nLj}(t)$  de  $i_{unLj}(t)$  en la fase correspondiente, de forma que:

$$i_{uj}(t) = i_{unLj}(t) - i_{nLj}(t) \quad (2.83)$$

$$j = b, c$$

Estas corrientes expresan cómo las fases “b” y “c” difieren de las condiciones de referencia ideales sólo en términos del desequilibrio de fases. Una vez se han introducido todos estos componentes de la corriente, se define el índice de desequilibrio de carga no lineal  $UNL$ , como:

$$UNL = \frac{\|i_u\|}{\|i_{nL}\|} \times 100(\%) \quad (2.84)$$

Donde los valores  $RMS$ , y la norma de las corrientes  $I_{uj}$  y  $I_{nLj}$  se definen de la siguiente manera:

$$\|i_u\| = \sqrt{\sum_{j=a,b,c} I_{uj}^2} \quad ; \quad \|i_{nL}\| = \sqrt{\sum_{j=a,b,c} I_{nLj}^2} \quad (2.85)$$

$$I_{uj} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H_{\max}} I_{huj}^2} \quad ; \quad I_{nLj} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H_{\max}} I_{hnLj}^2}$$

$I_{hnLj}$  representan los valores  $RMS$  de los correspondientes componentes armónicos de  $i_{nLj}(t)$ .

En este capítulo, se han presentado los índices de mayor repercusión basados en la metodología de medidas localizadas en un único punto del sistema. Así, se ha constatado que las propuestas planteadas para determinar los parámetros del sistema son difíciles de aplicar desde un punto de vista práctico [81]. Por otro lado, los índices basados en términos de potencia en sistemas con distorsión y/o desequilibrio son más fáciles de implementar; sin embargo, se ha comprobado que estos índices ofrecen una información errónea cuando hay más de una carga no lineal y/o desequilibrada conectada al mismo PCC [100, 101]. Por último, se ha presentado el índice de desequilibrio de carga no lineal  $UNL$ ; se trata del índice de mayor relevancia basado en la estimación de una carga

equivalente lineal y equilibrada. El índice *UNL* presenta un comportamiento correcto y estable ante cargas no lineales y/o desequilibradas, sin embargo, da información errónea ante la presencia de bancos de condensadores en la red [117, 118].

Las desventajas que muestran los métodos de localización de fuentes de distorsión y/o desequilibrio en las redes eléctricas basados en medidas localizadas en un único punto de la red, han propiciado que surja como alternativa el uso de métodos basados en medidas distribuidas multipunto.

## **CAPÍTULO III**

---

### **MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN Y/O DESEQUILIBRIO BASADOS EN MEDIDAS DISTRIBUIDAS MULTIPUNTO**

---

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de identificación de fuentes de distorsión y/o desequilibrio en las redes eléctricas basados en medidas individuales o localizadas en una sección específica del sistema presentan limitaciones. Una de las desventajas es el alcance de la información que aporta, ya que no da una visión global del problema, únicamente ofrece un diagnóstico entre un consumidor y el resto del sistema. Por lo general, hay que tener en cuenta la posibilidad de que cuando la tensión de alimentación en el *PCC* se distorsiona e incluso se desequilibra puede ser debido a varias fuentes de perturbación, y esta información será crucial a la hora de diseñar una posible solución al problema. Otra limitación importante de las medidas localizadas tiene que ver con la dificultad que presentan a la hora de identificar las instalaciones que disponen de bancos de condensadores [117, 118]. En muchas ocasiones podrían ser consideradas como una fuente de perturbación, cuando son las mismas compañías de suministro eléctrico las que promocionan su uso para reducir el flujo de potencia reactiva por la red de distribución/transporte. Estas circunstancias hacen que, para tener un diagnóstico completo de la situación, sea necesario conocer desde el punto de vista de la *EPQ* el comportamiento de todos los agentes implicados (empresa suministradora de energía eléctrica y usuarios).

Una solución alternativa a los métodos basados en medidas realizadas en un único punto de la red, se plantea a través del uso de métodos basados en medidas distribuidas también denominados índices multipunto; esto es la utilización de los parámetros eléctricos de calidad medidos a la vez en todos los consumidores conectados a un mismo *PCC* junto con aquellos medidos en el mismo *PCC*, tal y como se muestra en la figura 3.1.

En la actualidad, es posible la centralización y monitorización de un número específico de índices básicos de calidad correspondiente a varios consumidores, además de los correspondientes *PCC* de la línea de alimentación. El desarrollo de los sistemas de medición basado en el procesamiento digital de señales, y su capacidad de interconexión e intercambio de datos hacen que esta tecnología sea especialmente adecuada para la implementación de los métodos de medidas distribuidas multipunto [21, 111]. Una vez centralizados todos los datos del conjunto de usuarios y *PCC*, se puede procesar la

información conjunta con el objetivo de identificar las fuentes de distorsión y/o desequilibrio, y así poder cuantificar el efecto de las perturbaciones producidas.

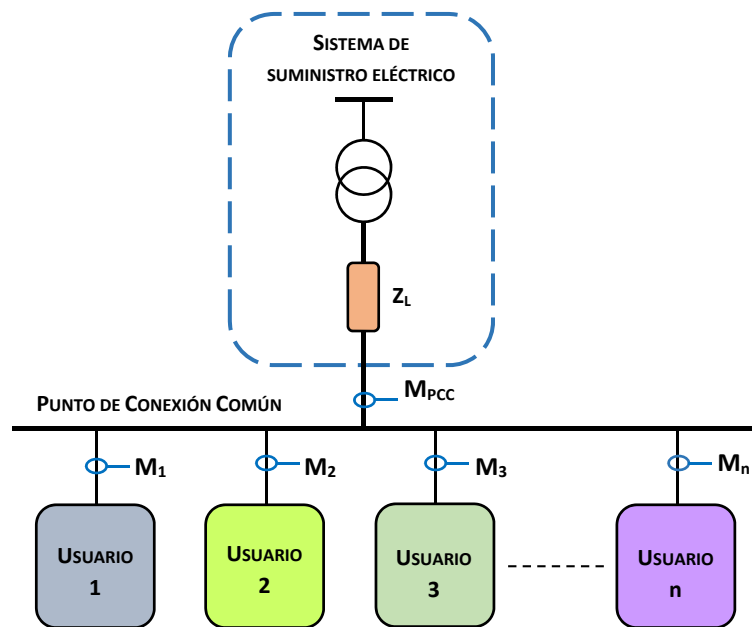


Figura 3.1. Esquema tipo de un sistema de medidas distribuidas.

### 3.2. ÍNDICE GLOBAL DE EPQ

Se han propuesto varios índices en la literatura técnica para evaluar la contribución a la perturbación del sistema debida a un consumidor mediante medidas distribuidas. Entre ellos en [109] se propone el índice global de EPQ (3.1), definido a partir de la combinación de tres índices basados en medidas localizadas realizadas en cada carga “k” (usuario), referenciadas a las medidas realizadas en el PCC, e identificadas por el subíndice “s”.

El índice global de EPQ se define a partir de la siguiente expresión:

$$\mathcal{G}_{1k} = \frac{1}{3} \left( \frac{\xi_{slq_k}^{-1}}{\xi_{slq_s}^{-1}} + \frac{\xi_{HGI_k}}{\xi_{HGI_s}} + \frac{\eta_k^+}{\eta_s^+} \right) \quad (3.1)$$

Donde  $\mathcal{G}_{1k}$  es el índice global EPQ de la carga “k”. Los tres términos que componen el índice Theta 1 son:

- Índice de calidad de carga y suministro (Supply and Loading Quality Index) definido en [7] como:

$$\xi_{slq} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma+1}} \quad (3.2)$$

Donde  $P_{\Sigma}$  es la potencia activa total trifásica y  $P_{\Sigma+1}$  es la potencia activa asociada a la secuencia positiva de la frecuencia fundamental.

Como se deduce de la expresión (3.2), si el sistema está compuesto por una fuente sinusoidal y equilibrada, y de una carga lineal y equilibrada, se obtiene que  $\xi_{slq} = 1$ .

Cuando  $\xi_{slq} < 1$ , la potencia activa asociada a las tensiones y corrientes con distorsión y/o desequilibrio, fluye desde la carga a la fuente de suministro, indicando así que los efectos de distorsión y/o desequilibrio de la carga prevalecen con respecto a los de la fuente. Por el contrario, cuando  $\xi_{slq} > 1$ , la potencia activa asociada a las componentes de tensión y corrientes con distorsión y/o desequilibrio fluyen de la fuente a la carga, indicando que los efectos de la distorsión armónica y/o desequilibrio de la fuente prevalecen sobre los de la carga.

- Índice armónico global (The Harmonic Global Index), definido en [99]:

$$\xi_{HGI} = \frac{\|\bar{I}_{\Sigma L}\|^2}{\|\bar{I}_{\Sigma S}\|^2} \quad (3.3)$$

Donde los  $\bar{I}_{\Sigma L}, \bar{I}_{\Sigma S}$  son los vectores de los valores *RMS* trifásico de las componentes de intensidad asociadas a los armónicos de potencia activa que fluyen desde la carga a la red y de la potencia armónica que fluye desde la red hacia la carga, respectivamente. Valores cercanos a cero indican que la carga es lineal y equilibrada.

- Relación de índices globales de distorsión armónica total de tensión e intensidad ( $GTHD_{V+}$  y  $GTHD_{I+}$ ):

$$\eta^+ = \frac{GTHD_{V+}}{GTHD_{I+}} \quad (3.4)$$

Se trata de la relación de la tasa de distorsión armónica respecto al armónico fundamental de secuencia positiva, y se determina a partir de las siguientes expresiones:

$$GTDH_{V^+} = \sqrt{\frac{V_{\Sigma}^2}{V_{\Sigma+1}^2} - 1} \quad (3.5)$$

$$GTDH_{I^+} = \sqrt{\frac{I_{\Sigma}^2}{I_{\Sigma+1}^2} - 1} \quad (3.6)$$

Donde  $V_{\Sigma}$  e  $I_{\Sigma}$  son los valores *RMS* totales de tensión e intensidad, respectivamente, y  $V_{\Sigma+1}$  e  $I_{\Sigma+1}$  son los valores *RMS* totales de las componentes fundamentales de secuencia positiva de las tensiones e intensidades.

Este índice no está concebido para identificar una fuente de perturbación en el sistema, se trata de un índice de caracterización que refleja la tendencia de una carga a amplificar la distorsión de la tensión debido a la distorsión de intensidad que provoca, bien por su no linealidad o porque presenta algún tipo de resonancia. De esta forma si  $\eta^+ = 1$ , la carga es lineal, equilibrada y opera a plena carga. Si  $\eta^+ < 1$ , la carga filtra parte de la distorsión de la intensidad o bien está trabajando por debajo de su potencia nominal. Por el contrario, si  $\eta^+ > 1$  la carga es no lineal o bien presenta resonancia frente a componentes armónicos de la tensión de suministro.

A partir de todos los valores de los valores de  $\Theta_{1k}$  ( $\mathcal{G}_{1k}$ ) obtenidos en todas las líneas alimentadas por el *PCC*, incluida aquella que suministra energía eléctrica al *PCC*, se puede concluir que:

- Cuando el suministro de energía eléctrica está compuesto por un sistema sinusoidal y equilibrado, y las cargas conectadas a las líneas que parten del *PCC* son lineales y equilibradas, el valor del índice  $\mathcal{G}_{1k}$  medido en cualquier punto es igual a 1.
- Si una carga conectada a una determinada línea causa distorsión armónica y/o desequilibrio en el sistema, el índice global medido en la línea que alimenta a dicha carga será mayor que 1. Si son varias líneas las que presentan un índice

global mayor que 1, la carga que más perturbación inyecta al sistema será aquella que presente el mayor valor de  $\mathcal{G}_k$ .

- Por el contrario, cuando el índice global  $\mathcal{G}_k$  es menor que 1, es la red quien inyecta la perturbación armónica (distorsión y/o desequilibrio) en la carga conectada a la línea “k”.

### 3.3. ÍNDICE GLOBAL *EPQ* MODIFICADO

En [113] se propone una modificación del índice global  $\mathcal{G}_{1k}$  definido en (3.1). Se trata del índice global de *EPQ* modificado, denominado Theta<sub>2k</sub> ( $\mathcal{G}_{2k}$ ) y definido como:

$$\mathcal{G}_{2k} = \frac{1}{3} \left( \frac{UNL_k}{UNL_s} + \frac{\xi_{HGI_k}}{\xi_{HGI_s}} + \frac{\eta_k^+}{\eta_s^+} \right) \quad (3.7)$$

En esta nueva propuesta, se ha sustituido el índice  $\xi_{slq}$  (3.2) basado en el flujo de potencias armónicas, por la relación entre el índice de desequilibrio de carga no lineal, *UNL*, propuesto en [108]. Así, se define *UNL<sub>s</sub>* como el índice de desequilibrio de carga no lineal calculado a partir de las medidas realizadas en el *PCC*, mientras que *UNL<sub>k</sub>* se calcula a partir de las medidas realizadas en cada punto de consumo.

A partir de la expresión (3.7) puede comprobarse que cuando las tensiones de suministro son sinusoidales y equilibradas, y la carga conectada a una rama genérica “k”, es lineal y equilibrada, el índice  $\mathcal{G}_{2k}$  es la unidad. Cada uno de estos cocientes aumenta si la perturbación es inyectada por la carga situada en el extremo de la línea “k”, mientras que disminuye si la perturbación es producida por el suministro. Esto es,  $\mathcal{G}_{2k} = 1$  representa el valor umbral entre la carga que produce perturbación,  $\mathcal{G}_{2k} > 1$ , y carga perturbada,  $\mathcal{G}_{2k} < 1$ .

Una vez que el índice global  $\mathcal{G}_{2k}$  es determinado para todas las líneas conectadas al mismo *PCC*, cuando  $\mathcal{G}_{2k} > 1$ , la carga conectada a la línea “k” se comporta como una fuente de perturbación a la red. Si más de una carga presenta un valor de  $\mathcal{G}_{2k} > 1$ , aquella de mayor valor es la que produce mayor perturbación. Por otro lado, cuando  $\mathcal{G}_{2k} \leq 1$ , esa carga, de forma predominante, se ve perturbada por la conexión al *PCC*.

### **3.4. NUEVA PROPUESTA DE ÍNDICE DISTRIBUIDO GLOBAL *EPQ* EN EL MARCO DEL ESTÁNDAR IEEE 1459**

En este apartado se presenta un nuevo índice basado en medidas distribuidas multipunto que permite localizar fuentes de distorsión armónica y/o de desequilibrio en redes de distribución. La novedad de la propuesta consiste en el uso de términos de la potencia aparente procedentes de una descomposición realizada bajo el marco del IEEE Std. 1459 [116]. Así, a continuación se introduce los términos de potencia definidos por el estándar, para después proceder al desarrollo de la nueva propuesta.

Las definiciones de potencias utilizadas en las primeras ediciones del estándar IEEE Dictionary para evaluar el flujo de potencia en los sistemas eléctricos no eran adecuadas en sistemas trifásicos con distorsión y/o desequilibrio. Esto hizo necesario establecer un marco regulatorio que sirviese de guía a los ingenieros, con el objetivo de unificar criterios en aspectos claves como: el diseño de equipos de medidas, una correcta elección de las técnicas de compensación o simplemente la definición de tarifas eléctricas. Así, fruto de los trabajos del IEEE Working Group on Sinusoidal Situations, apareció en el año 2000 la norma IEEE Std. 1459 en su versión “trial”, siendo elevada a “full use” en 2002 y actualizada a la versión “Red Line” en 2010. Así, el estándar establece una definición genérica de la potencia aparente, define las denominadas tensión e intensidad efectiva, y establece una descomposición de la potencia aparente efectiva según los siguientes principios:

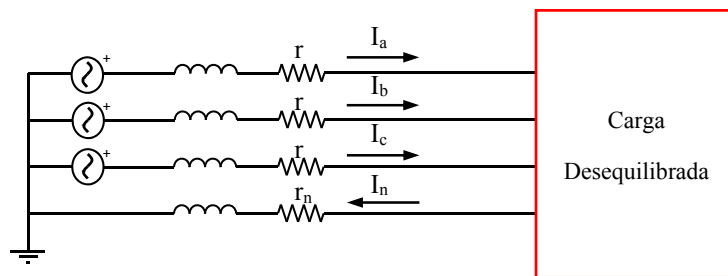
- a) Separar convenientemente la potencia aparente fundamental y sus componentes activa y reactiva, de la potencia aparente no fundamental.
- b) Suministrar una medida útil del grado de distorsión armónica a través de la potencia aparente fundamental de desequilibrio.
- c) Suministrar una medida del grado de desequilibrio a partir de la introducción de la potencia aparente fundamental de desequilibrio.

Estas nuevas definiciones establecidas por el estándar y sus actualizaciones posteriores provocan un doble efecto en los índices de localización de fuentes de perturbación. Por un lado, los investigadores han adaptado sus propuestas de acuerdo a las definiciones incluidas en el estándar, y por otro lado, ha sido posible desarrollar nuevos índices basados en la nueva descomposición de la potencia que plantea el estándar.

### 3.4.1. Definiciones previas

El estándar IEEE 1459 define la potencia aparente como *la máxima potencia que puede ser transmitida bajo condiciones ideales (sistema monofásico sinusoidal o trifásico equilibrado sinusoidal) con el mismo impacto de tensión (sobre el aislamiento y sobre las pérdidas en vacío) y el mismo impacto de intensidad (o pérdidas en la línea) del sistema sobre la red*. Por ello, según la definición establecida por el estándar, la potencia aparente se determina a partir de una intensidad y una tensión efectiva o equivalente de un sistema equilibrado de secuencia positiva que originan el mismo impacto sobre la red que las tensiones e intensidades del sistema de partida.

Para la determinación de la intensidad equivalente,  $I_e$ , se supone un sistema trifásico constituido por una carga desequilibrada que se alimenta por un sistema de cuatro conductores donde se supone que cada una de las líneas tiene una resistencia “ $r$ ” y el conductor de neutro una resistencia “ $r_n$ ”, tal y como se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2.** Circuito trifásico de cuatro conductores que alimenta a una carga desequilibrada.

Las pérdidas de potencia de la línea trifásica son,

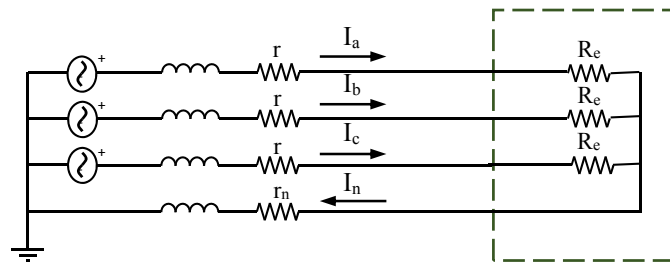
$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + r_n I_n^2 \quad (3.8)$$

Donde  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , representan los valores eficaces de las corrientes de línea del sistema e  $I_n$  es el valor eficaz de la corriente que fluye a través del conductor neutro.

El sistema ideal se compone de tres resistencias de carga iguales,  $R_e$ , alimentadas por un sistema equilibrado de tensiones de tal forma que:

$$\begin{aligned} I_a &= I_b = I_c = I_e \\ I_n &= 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Las intensidades (3.9) deben disipar exactamente la misma potencia en las líneas que el sistema original.



**Figura 3.3.** Circuito trifásico equivalente para la definición de la intensidad efectiva,  $I_e$

Esto es,

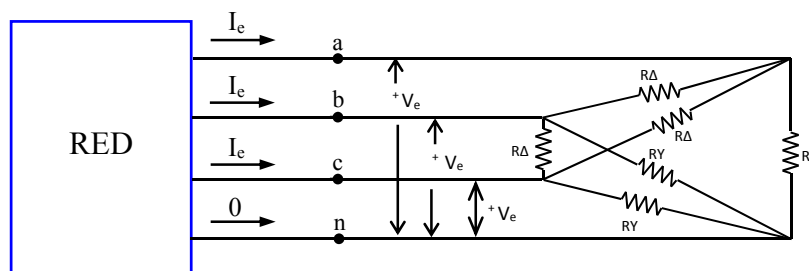
$$\Delta P = 3 r I_e^2 \quad (3.10)$$

De las expresiones anteriores (3.8), (3.9) y (3.10), se obtiene el valor de la intensidad efectiva o equivalente,

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2)} \quad ; \quad \rho = \frac{r_n}{r} \quad (3.11)$$

El estándar 1459 considera  $\rho = 1$ . En las instalaciones de media y baja tensión se utiliza un valor de  $\rho$  comprendido entre 0,2 – 4. Hoy día, la instrumentación digital puede desarrollar equipos que pueden ajustar el parámetro  $\rho$ .

Respecto del valor equivalente de tensión, el concepto de pérdidas que dependen de la tensión fue abandonado a favor de un enfoque de carga que consume una determinada potencia activa efectiva. De modo que para determinar la tensión  $V_e$  efectiva se supone que la carga está formada por un grupo de resistencias conectadas en  $Y$ , que consumen una potencia  $P_Y$ , y un grupo conectado en  $\Delta$ , que consumen una potencia  $P_\Delta$ . Cada grupo de resistencias está caracterizado por una resistencia efectiva  $R_Y$  y  $R_\Delta$ , respectivamente, ver figura 3.4.



**Figura 3.4.** Circuito trifásico equivalente para la definición de la tensión efectiva,  $V_e$  según el Std. IEEE.

El criterio de equivalencia está basado en considerar efectos electro térmicos idénticos, de tal forma que:

$$\frac{V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{R_{\Delta}} = \frac{3V_e^2}{R_Y} + \frac{9V_e^2}{R_{\Delta}} \quad (3.12)$$

Si se define la relación de potencias como,

$$\xi = \frac{P_{\Delta}}{P_Y} = \frac{\frac{9V_e^2}{R_{\Delta}}}{\frac{3V_e^2}{R_Y}} = \frac{3R_Y}{R_{\Delta}} \quad (3.13)$$

y se sustituye en la expresión (3.12), se obtiene (3.14),

$$\frac{V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3R_Y} \xi = \frac{3V_e^2}{R_Y} + \frac{9V_e^2}{3R_Y} \xi \quad (3.14)$$

Donde finalmente se obtiene la expresión para la tensión efectiva,  $V_e$ .

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2) + \xi(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (3.15)$$

De acuerdo con las recomendaciones del estándar IEEE 1459, se suele utilizar un valor de  $\xi = 1$ .

La tensión y la intensidad equivalentes (3.11) y (3.15), pueden también expresarse a través de las componentes simétricas. Si se denota con los subíndices +, -, y 0, las componentes de secuencia directa, inversa y homopolar, respectivamente, se tiene:

$$I_e = \sqrt{I_+^2 + I_-^2 + (1 + 3\rho)I_0^2} \quad (3.16)$$

$$V_e = \sqrt{V_+^2 + V_-^2 + \frac{1}{1 + \xi}V_0^2} \quad (3.17)$$

### 3.4.2. Los términos de potencia en el marco del estándar IEEE 1459

Con respecto a la potencia aparente, si se utiliza el mismo enfoque expuesto anteriormente, donde se separa la potencia aparente  $S_e$ , en la potencia aparente fundamental de los términos de la potencia aparente no fundamental se tiene:

$$S_e^2 = (3V_e I_e)^2 = (3V_{e1} I_{e1})^2 + (3V_{e1} I_{eH})^2 + (3V_{eH} I_{e1})^2 + (3V_{eH} I_{eH})^2 \quad (3.18)$$

Donde el primer término es la potencia aparente efectiva fundamental,

$$S_{e1} = V_{e1} I_{e1} \quad (3.19)$$

Este término puede separarse en la potencia aparente fundamental de secuencia positiva  $S_{+1}$  y una componente denominada complementaria  $S_{U1}$ , atribuida al desequilibrio del sistema. A su vez,  $S_{+1}$  queda definida por las potencias activa y reactiva fundamental de secuencia directa o positiva., de tal forma que:

$$S_{+1}^2 = P_{+1}^2 + Q_{+1}^2 \quad (3.20)$$

Donde,

$$P_{+1} = 3V_{+1} I_{+1} \cos \theta_{+1} \quad ; \quad Q_{+1} = 3V_{+1} I_{+1} \sin \theta_{+1} \quad (3.21)$$

Los siguientes tres términos conforman la potencia aparente efectiva no fundamental,

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2} \quad (3.22)$$

Siendo la potencia de distorsión de intensidad efectiva igual a:

$$D_{eI} = 3V_{e1} I_{eH} \quad (3.23)$$

La potencia de distorsión de tensión efectiva,

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} \quad (3.24)$$

Y la potencia armónica efectiva viene definida por:

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (3.25)$$

Que a su vez se puede descomponer en:

$$S_{eH} = P_H + D_{eH} \quad (3.26)$$

Donde la potencia activa armónica se define por:

$$P_H = \sum_{\substack{h \neq 1 \\ i=a,b,c}} V_{ih} I_{ih} \cos \theta_{ih} = P - P_1 \quad (3.27)$$

Y por último, el término no activo restante,

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2} \quad (3.28)$$

Donde la potencia aparente efectiva queda definida por:

$$S_e^2 = P_{+1}^2 + Q_{+1}^2 + S_{U1}^2 + D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + P_H^2 + D_{eH}^2 \quad (3.29)$$

En la figura 3.5 se muestra un esquema de la descomposición de la potencia aparente efectiva definida en el estándar IEEE 1459 en sistemas con distorsión y desequilibrio.

A partir del análisis presentado del Std. 1459 se infiere que el estándar caracteriza el desequilibrio desde los términos de potencia a la frecuencia fundamental. No obstante, en un sistema no sinusoidal y desequilibrado la presencia de desequilibrio se sitúa en todos los armónicos presentes en el sistema. Por lo tanto, una caracterización adecuada del desequilibrio en condiciones no sinusoidales requiere una revisión de la descomposición de la potencia propuesta en el estándar [119-121].

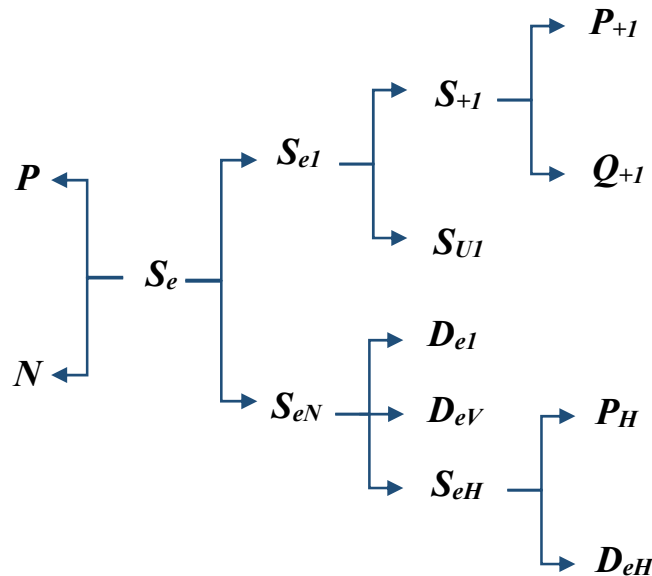


Figura 3.5. Esquema de las componentes de la potencia aparente efectiva definida en el estándar IEEE 1459.

En los siguientes apartados se realiza una reformulación de la potencia aparente con el mismo enfoque adoptado en el estándar, pero valorando tanto el desequilibrio del armónico fundamental, como el desequilibrio de todos los armónicos presentes en el sistema. Una vez introducidos los diferentes términos de potencia se presenta una nueva propuesta de índice distribuido global  $EPQ$ , basado en las medidas realizadas en todos los puntos del sistema, con el objetivo de identificar las fuentes de distorsión y/o desequilibrio del sistema.

### 3.4.3. Componentes de las tensiones e intensidades en condiciones de distorsión y desequilibrio

En sistemas no-sinusoidales y equilibrados, los armónicos de las formas de ondas de las tensiones e intensidades se pueden dividir en tres grupos en función de la secuencia de fase: los armónicos de orden  $3h+1$  (para  $h=0,1,2\dots$ ) con secuencia de fase directa (secuencia positiva); los armónicos de orden  $3h+2$ , de secuencia de fase inversa (secuencia negativa); y los de orden  $3h+3$ , con secuencia de fase homopolar (secuencia cero). Por el contrario, en un sistema no-sinusoidal y desequilibrado, cada uno de los armónicos de las tensiones e intensidades tendrá una componente de secuencia positiva, una componente de secuencia negativa y una componente de secuencia cero [100, 122, 123].

En este nuevo enfoque, la tensión y la intensidad se descompondrán según sus componentes de equilibrio y sus componentes de desequilibrio. Las componentes de equilibrio del sistema de tensiones e intensidades,  $V_b$  y  $I_b$ , están compuestas por los fasores de orden  $3h+1$  de los armónicos de secuencia positiva, fasores de orden  $3h+2$  de los armónicos de secuencia negativa y los fasores de orden  $3h+3$  de los armónicos de secuencia cero. De esta forma, el valor  $RMS$  de las componentes de tensión e intensidad equilibrada se define de la siguiente manera:

$$V_b^2 = \sum_{\forall h} \left[ (V_+^{3h+1})^2 + (V_-^{3h+2})^2 + \frac{1}{1+\xi} (V_0^{3h+3})^2 \right] \quad (3.30)$$

$$I_b^2 = \sum_{\forall h} \left[ (I_+^{3h+1})^2 + (I_-^{3h+2})^2 + (1+3\rho)(I_0^{3h+3})^2 \right] \quad (3.31)$$

Los términos +, - y 0 hacen referencia a las componentes de secuencia positiva, negativa y cero de los correspondientes armónicos de tensión e intensidad respectivamente.

El resto de los fasores de las componentes simétricas de los armónicos de tensión e intensidad están asociados con las componentes de tensión e intensidad desequilibrada,  $V_u$  y  $I_u$ . Así, el valor *RMS* de las componentes de tensión e intensidad desequilibrada se definen de la siguiente manera:

$$V_u^2 = \sum_{\forall h} \left[ \left( V_-^{3h+1} \right)^2 + \frac{1}{1+\xi} \left( V_0^{3h+1} \right)^2 + \left( V_+^{3h+2} \right)^2 + \frac{1}{1+\xi} \left( V_0^{3h+2} \right)^2 + \left( V_+^{3h+3} \right)^2 + \left( V_0^{3h+3} \right)^2 \right] \quad (3.32)$$

$$I_u^2 = \sum_{\forall h} \left[ \left( I_-^{3h+1} \right)^2 + (1+3\rho) \left( I_0^{3h+1} \right)^2 + \left( I_+^{3h+2} \right)^2 + (1+3\rho) \left( I_0^{3h+2} \right)^2 + \left( I_+^{3h+3} \right)^2 + \left( I_0^{3h+3} \right)^2 \right] \quad (3.33)$$

Por otro lado, se definen los valores *RMS*,  $V_{b1}$  e  $I_{b1}$  como las componentes fundamentales equilibradas de la tensión e intensidad respectivamente, obtenidas a partir de las siguientes expresiones:

$$V_{b1} \equiv V_+^1 \quad (3.34)$$

$$I_{b1} \equiv I_+^1 \quad (3.35)$$

Y los valores *RMS* de las componentes fundamentales de desequilibrio de la tensión e intensidad,  $V_{u1}$  y  $I_{u1}$  se definen como:

$$V_{u1} \equiv \sqrt{\left( V_-^1 \right)^2 + \frac{1}{1+\xi} \left( V_0^1 \right)^2} \quad (3.36)$$

$$I_{u1} \equiv \sqrt{\left( I_-^1 \right)^2 + (1+3\rho) \left( I_0^1 \right)^2} \quad (3.37)$$

Las componentes armónicas equilibradas de tensión e intensidad,  $V_{bH}$  y  $I_{bH}$ , se pueden obtener como:

$$V_{bH}^2 = V_b^2 - V_{b1}^2 \quad (3.38)$$

$$I_{bH}^2 = I_b^2 - I_{b1}^2 \quad (3.39)$$

Mientras que las componentes armónicas desequilibradas de tensión e intensidad,  $V_{uH}$  y  $I_{uH}$ , se obtienen de la siguiente forma:

$$V_{uH}^2 = V_u^2 - V_{u1}^2 \quad (3.40)$$

$$I_{uH}^2 = I_u^2 - I_{u1}^2 \quad (3.41)$$

De tal forma que los valores *RMS* de la tensión e intensidad equivalente se pueden expresar a partir de las cuatro componentes desarrolladas:

$$V_e^2 = V_{b1}^2 + V_{u1}^2 + V_{bH}^2 + V_{uH}^2 \quad (3.42)$$

$$I_e^2 = I_{b1}^2 + I_{u1}^2 + I_{bH}^2 + I_{uH}^2 \quad (3.43)$$

A partir de los términos (3.42) y (3.43) se puede obtener la potencia aparente.

#### 3.4.4. Descomposición de la potencia aparente

La descomposición establecida en (3.42) y (3.43) de los respectivos valores *RMS* de la tensión y la intensidad permite realizar la partición de la potencia aparente en los cuatro términos expresados en la siguiente expresión:

$$S_e^2 = (3V_e I_e)^2 = S_{b1}^2 + S_{u1}^2 + S_{bH}^2 + S_{uH}^2 \quad (3.44)$$

Los cuatro términos de potencia vienen dados por:

$$S_{b1}^2 = 9V_{b1}^2 I_{b1}^2 \quad (3.45)$$

$$S_{u1}^2 = 9(V_{b1}^2 I_{u1}^2 + V_{u1}^2 I_{b1}^2 + V_{u1}^2 I_{u1}^2) \quad (3.46)$$

$$S_{bH}^2 = 9(V_{b1}^2 I_{bH}^2 + V_{bH}^2 I_{b1}^2 + V_{bH}^2 I_{bH}^2) \quad (3.47)$$

$$S_{uH}^2 = S_e^2 - S_{b1}^2 - S_{u1}^2 - S_{bH}^2 \quad (3.48)$$

Donde  $S_{b1}$  es la componente de la potencia aparente fundamental equilibrada,  $S_{u1}$  es la componente de la potencia aparente fundamental de desequilibrio,  $S_{bH}$  es la potencia aparente armónica equilibrada y  $S_{uH}$  es la potencia aparente armónica de desequilibrio.

### 3.4.5. Propuesta de un nuevo índice global *EPQ* basado en medidas distribuidas

La propuesta del nuevo índice distribuido que se plantea en este trabajo combina los términos de potencia desarrollados en la sección anterior junto con una modificación del índice global armónico ( $\xi_{HG1}$ ). Así, el índice propuesto  $\mathcal{G}_{3k}$ , se define de la siguiente manera:

$$\mathcal{G}_{3k} = \frac{1}{4} \left( \frac{S_{u1k}}{S_{u1s}} + \frac{S_{bHk}}{S_{bHs}} + \frac{S_{uHk}}{S_{uHs}} + \frac{\xi_{HG1mk}}{\xi_{HG1ms}} \right) \quad (3.49)$$

Donde el índice de medida localizado en un solo punto de la red  $\xi_{HG1m}$ , utilizado en la nueva propuesta se ha definido como,

$$\xi_{HG1m} = \frac{\|\bar{I}_{\Sigma L}\|}{\|\bar{I}_{\Sigma S}\|} \quad (3.50)$$

Al igual que los otros dos índices distribuidos multipunto estudiados en las secciones 3.2 y 3.3, el nuevo índice propuesto tiene las siguientes características:

- Cada uno de los términos del índice  $\mathcal{G}_{3k}$  es la relación de un índice medido en una de las líneas que alimentan cada carga (subíndice  $k$ ) con respecto al mismo índice medido en la línea de suministro al *PCC* (subíndice  $s$ ).
- Se puede verificar que cuando el suministro eléctrico está compuesto por un sistema sinusoidal y equilibrado y la carga conectada a una rama genérica “ $k$ ” es lineal y equilibrada, el valor del índice  $\mathcal{G}_{3k}$  es igual a 1.
- El índice  $\mathcal{G}_{3k}$  aumenta si la perturbación es causada por la carga “ $k$ ”, mientras que disminuye si la perturbación es producida por la red de suministro eléctrico. De forma que, si  $\mathcal{G}_{3k} = 1$  el sistema de suministro es sinusoidal y equilibrado y alimenta a una carga lineal y equilibrada. Si  $\mathcal{G}_{3k} > 1$  la carga inyecta distorsión armónica y/o desequilibrio al sistema, y por último, si  $\mathcal{G}_{3k} < 1$  es el sistema el responsable de la perturbación.

El nuevo índice tiene en cuenta la potencia aparente fundamental equilibrada, la potencia aparente fundamental de desequilibrio, la potencia aparente armónica equilibrada y la potencia armónica de desequilibrio de todos los consumidores con respecto a estos

mismos componentes de la red, de tal manera que se obtiene un registro de información preciso sobre el estado de distorsión y desequilibrio de todo el sistema eléctrico.

### 3.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DISTRIBUIDOS DE MEDIDAS MULTIPUNTO

Una vez introducidos los índices de medidas distribuidas a partir de medidas realizadas en los diferentes puntos de un sistema eléctrico de potencia, se analizará su comportamiento en distintos escenarios de trabajo. Para ello se ha desarrollado una plataforma de simulación en el entorno de SimPowerSystems de Matlab/Simulink que se describe con detalle en el anexo B. En la figura 3.6 se muestra el esquema en el que aparece la modelización de la red de distribución en baja tensión (400/230 V, 50 Hz) que alimenta a cinco cargas diferentes a través de una impedancia de línea  $Z_L$ . De esta forma se pretende cumplir un doble objetivo, por un lado, mostrar la capacidad que cada índice tiene para identificar y evaluar las perturbaciones introducidas por una carga determinada, y por otro lado, determinar la robustez de su ejecución ante distintas condiciones de asimetría y distorsión del suministro eléctrico.

Las cinco cargas conectadas al *PCC* están configuradas de la siguiente forma:

- Carga 1.- Se trata de una carga Lineal y Desequilibrada. La carga está compuesta por tres resistencias cuyos valores son:  $165 \Omega$  en la fase  $L_1$ ,  $85\Omega$  en  $L_2$  y  $46 \Omega$  en  $L_3$ , las tres resistencias están conectadas en estrella.
- Carga 2.- Carga lineal y Equilibrada. Formada por tres ramas *R-L* conectadas en estrella, con unos valores de  $R = 60 \Omega$  y de  $L = 0.05$  H.
- Carga 3.- Carga Lineal y Equilibrada *R-L* conectada en estrella, con un banco de condensadores en cabecera de la carga conectado en triángulo para la mejora del factor de potencia.  $R = 60 \Omega$ ,  $L = 0.05$  H y  $C = 4 \mu\text{F}$ .
- Carga 4.- Carga No Lineal y Equilibrada. Se trata de un rectificador trifásico no controlado con una resistencia en el lado *DC* de  $95 \Omega$ .
- Carga 5.- Carga No Lineal y Desequilibrada. Configurada a partir de tres reguladores por control de fase de corriente alterna monofásicos, compuesto por dos *SCRs* conectados en antiparalelo. Los ángulos de disparo de cada fase son:  $\alpha_{L1} = 45^\circ$ ,  $\alpha_{L2} = 75^\circ$  y  $\alpha_{L3} = 75^\circ$ . Los reguladores alimentan a tres resistencias conectadas en estrella cuyos valores son:  $R_{L1} = 104 \Omega$ ,  $R_{L2} = 85 \Omega$  y  $R_{L3} = 60 \Omega$ .

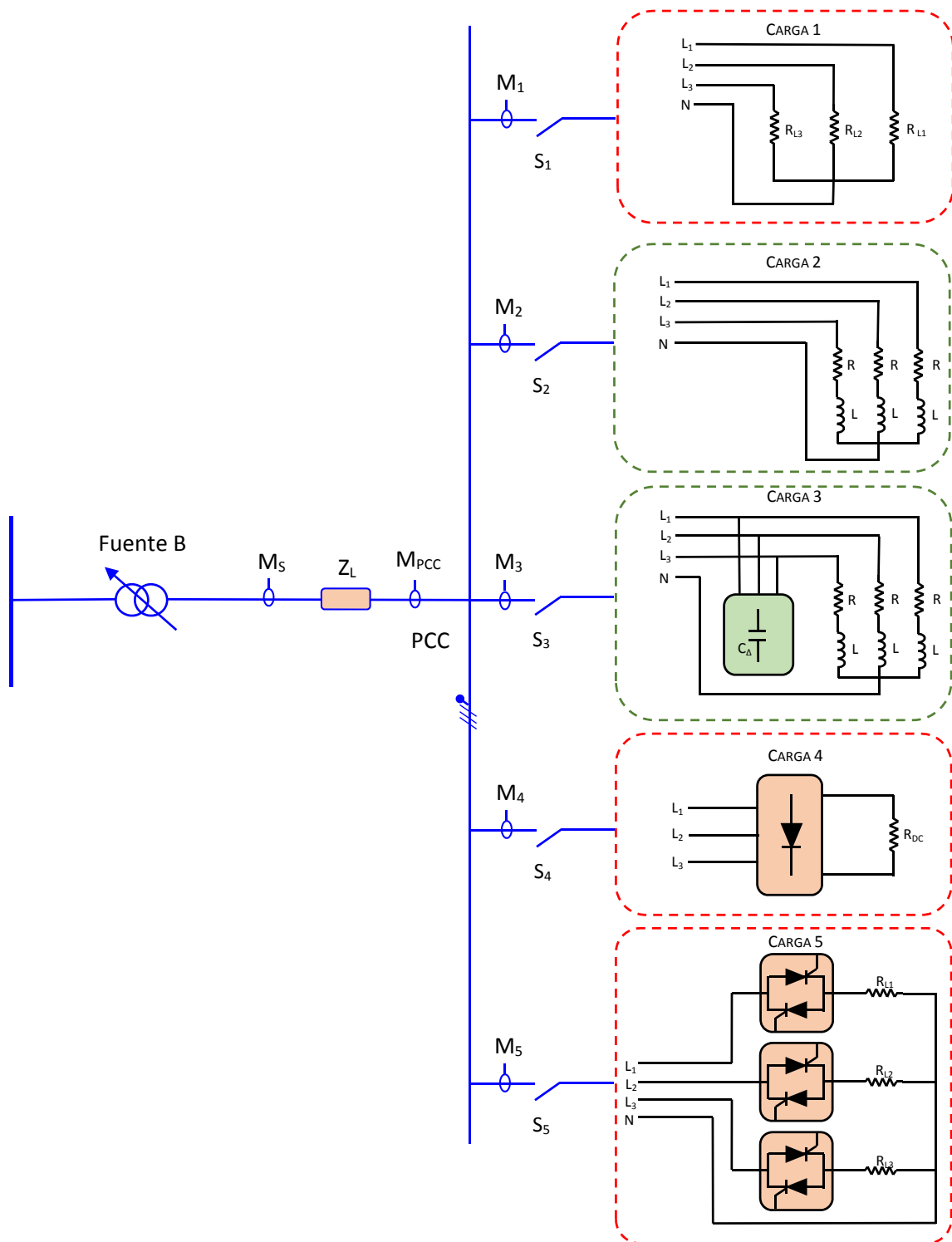
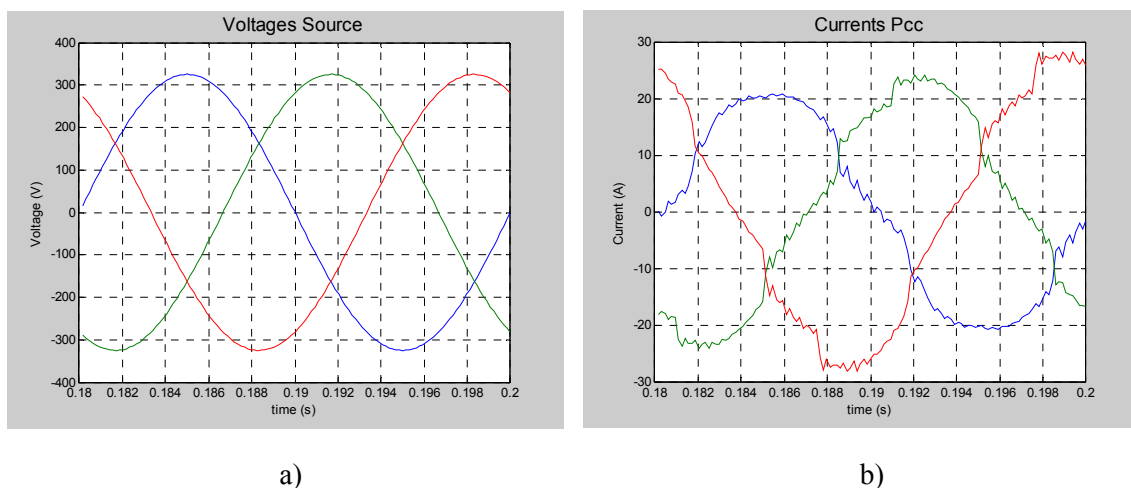


Figura 3.6. Esquema implementado en la plataforma de simulación Matlab/Simulink.

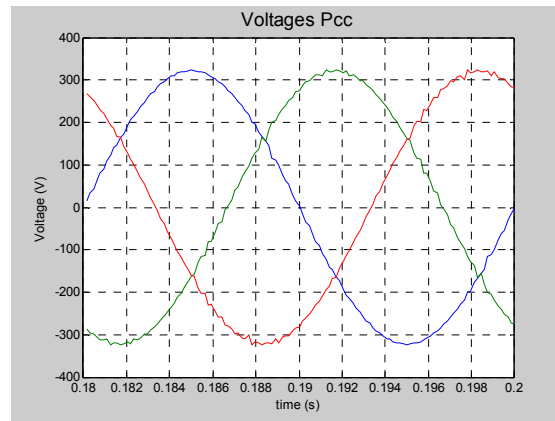
### 3.5.1. Caso 1: Sistema alimentado por una fuente equilibrada sinusoidal

Para el primer caso se ha configurado el sistema con un suministro eléctrico de potencia ideal, de tal forma que las cargas son alimentadas a través de una fuente compuesta por un sistema trifásico de tensiones equilibrado y sinusoidales, de manera que todas las perturbaciones existentes en el *PCC* están provocadas por las cargas no lineales y/o desequilibradas conectadas al sistema eléctrico de potencia. En la figura 3.7, se muestran las formas de ondas de tensión de la fuente y las intensidades que circulan por la red de distribución. En estas condiciones, la distorsión armónica de las intensidades que circulan por cada fase de la red de distribución son  $THDI_{L1} = 9.93 \%$ ,  $THDI_{L2} = 10.04 \%$  y  $THDI_{L3} = 9.60 \%$ .



**Figura 3.7.** Formas de onda caso 1. a) Tensiones de Fuente. b) Intensidades de Línea.

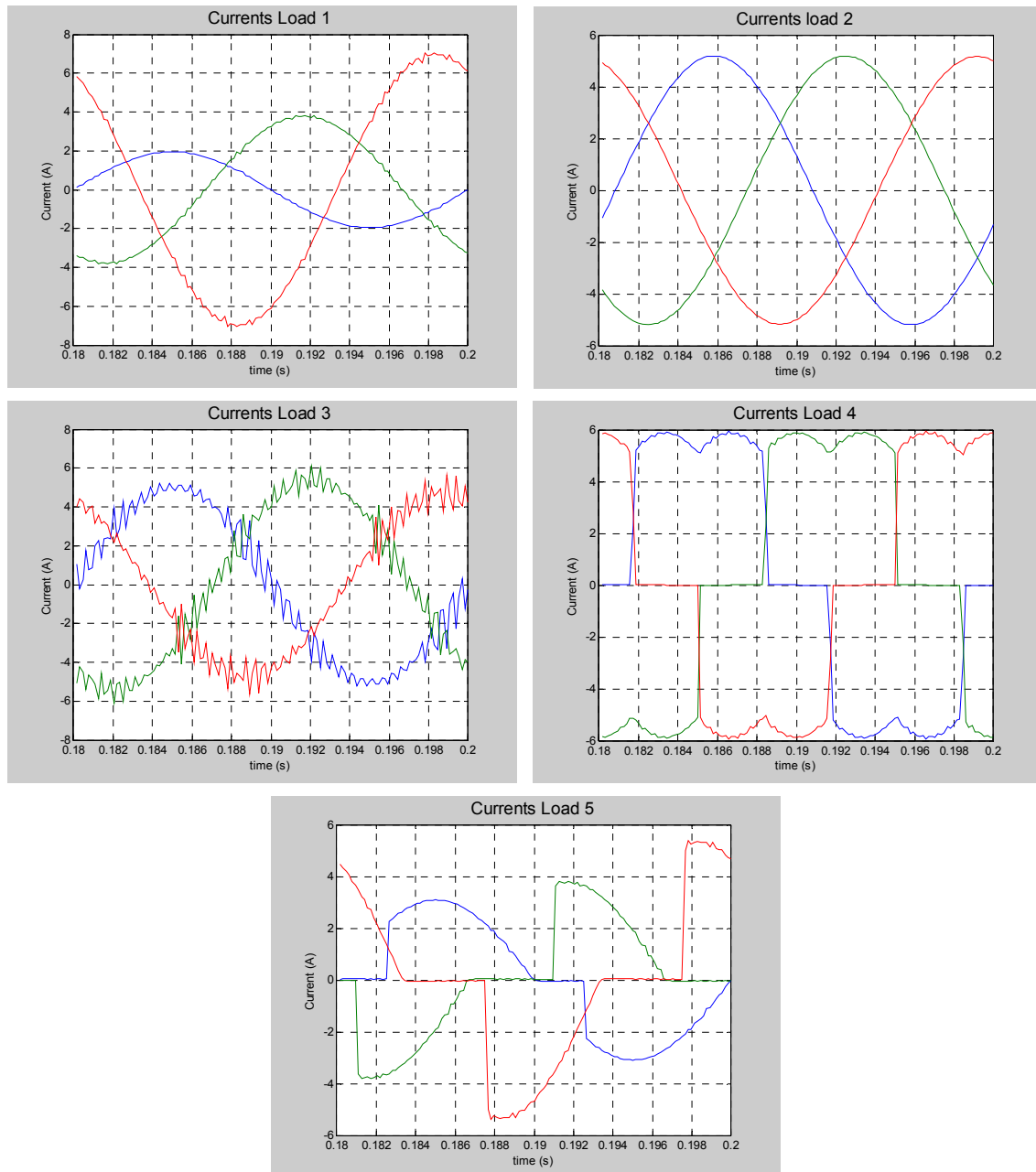
La circulación de las intensidades distorsionadas por la red de distribución provoca caídas de tensiones no sinusoidales en la impedancia de la red, dando como resultado un sistema de tensiones distorsionado en el *PCC*. En la figura 3.8 se muestra las formas de ondas de tensión en el *PCC*, así, la distorsión armónica de tensión en cada fase es de  $THDV_{L1} = 1.76 \%$ ,  $THDV_{L2} = 1.72 \%$  y  $THDV_{L3} = 1.69 \%$ . En cuanto al nivel de desequilibrio de tensiones, como ha quedado indicado, en la fuente es del  $0 \%$ , mientras que en el *PCC* es del  $0.07 \%$ , lo que demuestra que la influencia del nivel de desequilibrio de las cargas 1 y 5 es muy reducido en la tensión de red.



**Figura 3.8.** Formas de onda de las tensiones en el PCC.

Por otro lado, en la figura 3.9 se muestran las formas de ondas de intensidad de todas las cargas, mientras que en la tabla 3.1 se muestran los valores de *THDI* medidos en cada fase de las diferentes cargas. A tenor de los resultados obtenidos, se puede apreciar como la carga 1 presenta los mismos valores de *THDI* por fase que los correspondientes a los *THDV* por fase del PCC, revelando su carácter lineal y resistivo; sin embargo, como era de esperar, el índice de caracterización armónica no determina el desequilibrio de la carga. Los valores de *THDI* de la carga 2 son más reducidos respecto a los del PCC, esto es debido a que el carácter inductivo de la carga amortigua el efecto de los armónicos. Por el contrario, la carga 3 presenta unos índices de caracterización armónica de intensidad elevados debido a la amplificación ejercida por el banco de condensadores. La carga 4 presenta unos índices *THDI* elevados característicos de una carga no lineal, siendo estos valores similares por tratarse de un rectificador trifásico no controlado. Por último, la carga 5 presenta unos índices de distorsión armónica de intensidad altos, dónde además difieren considerablemente los valores de la fase  $L_1$  con respecto a los de las otras dos fases dado su carácter desequilibrado.

<b>Tabla 3.1.</b> Resultados de la distorsión armónica para el caso 1			
	<b><i>THDI<sub>L1</sub></i> (%)</b>	<b><i>THDI<sub>L2</sub></i> (%)</b>	<b><i>THDI<sub>L3</sub></i> (%)</b>
<b>Carga 1</b>	1.17	1.72	1.69
<b>Carga 2</b>	0.15	0.16	0.18
<b>Carga 3</b>	14.74	14.01	14.80
<b>Carga 4</b>	28.66	30.17	30.05
<b>Carga 5</b>	26.22	53.15	51.4



**Figura 3.9.** Formas de onda de las intensidades de cada carga para el caso 1.

La tabla 3.2 recoge los resultados de la potencia activa total ( $PT$ ), la potencia activa correspondiente a la componente fundamental ( $PT_1$ ) y la potencia activa armónica total ( $PT_H$ ) en todos los puntos del sistema. También muestra los valores de la descomposición de la potencia aparente según el esquema propuesto en el apartado anterior. En concreto, la componente de la potencia aparente fundamental equilibrada ( $S_{b1}$ ), la componente de la potencia aparente fundamental de desequilibrio ( $S_{u1}$ ), la potencia aparente armónica equilibrada ( $S_{bH}$ ) y la potencia aparente armónica de desequilibrio ( $S_{uH}$ ).

**Tabla 3.2.** Valores de potencias obtenidos en el caso 1

	$PT$ (W)	$PT_l$ (W)	$PT_H$ (W)	$S_e$ (VA)	$S_{bl}$ (VA)	$S_{ul}$ (VA)	$S_{bH}$ (VA)	$S_{uH}$ (VA)
<b>PCC</b>	11261	11262	- 1.21	11499.8	11356.7	1781.0	77.1	304.1
<b>Carga 1</b>	2043.8	2043.2	0.54	2493.2	2044.4	1416.8	0.23	170.7
<b>Carga 2</b>	2419.2	2419.2	0.00	2501.3	2500.8	4.9	0.1	52.1
<b>Carga 3</b>	2419.2	2419.2	0.00	2506.6	2431.3	36.6	9.3	608.7
<b>Carga 4</b>	2985.4	2986.8	- 1.33	3000.9	2987.4	21.5	126.7	254.2
<b>Carga 5</b>	1393.2	1393.7	- 4.39	1659.0	1485.4	585.9	327.7	308.5

El valor de la potencia armónica total que fluye por la red (- 1.21 W) es muy reducido comparado con el valor de la potencia de la componente fundamental 11261 W. El signo negativo indica que la dirección del flujo de potencia armónica va de las cargas a la red, por lo que se confirma que son las cargas las causantes de la distorsión armónica del sistema. La potencia armónica medida en la carga 1 es positiva (0.54 W) mientras que la potencia armónica de las cargas 2 y 3 es igual a cero, valores que en principio descartan a estas cargas como fuentes de armónicos. Por el contrario, las potencias armónicas medidas en las cargas 4 y 5 son negativas, de tal forma que se puede concluir que, en este caso, las cargas responsables de la distorsión en el sistema serían las 4 y 5. Pero como quedó establecido en las secciones anteriores, el análisis del flujo de potencias armónicas no resulta eficaz en todos los casos, ni discrimina el efecto del desequilibrio en el sistema.

Una de las ventajas que presenta el análisis de las componentes de la potencia aparente es la posibilidad, por un lado, de analizar la distorsión armónica a través de las componentes  $S_{bH}$  y  $S_{uH}$  y por otro lado, evaluar el desequilibrio mediante las componentes  $S_{ul}$  y  $S_{uH}$ . A tenor de los resultados obtenidos, se puede concluir que las cargas 1 y 5 presentan un nivel de desequilibrio importante con respecto al resto de carga, siendo  $S_{ul}=1416.8$  VA y  $S_{ul} = 585.9$  VA los resultados medidos en las cargas 1 y 5, respectivamente. Con respecto a la distorsión armónica, las componentes  $S_{bH}$  y  $S_{uH}$  señalan a las cargas 4 y 5 como los responsables de la distorsión del sistema, con unos valores de  $S_{bH4} =126.7$  VA,  $S_{uH4} = 254.2$  VA y  $S_{bH5} =327.7$  VA,  $S_{uH5} = 308.2$  VA. Sin embargo, el valor de  $S_{uH3} = 608.7$  VA de la carga 3 (lineal y equilibrada RLC) presenta un valor apreciable.

Por otro lado, la tabla 3.3 recoge los resultados de los índices distribuidos multipunto presentados en este trabajo para el caso 1.

	<i>Theta 1</i>	<i>Theta 2</i>	<i>Theta 3</i>
<i>Carga 1</i>	5.67	3.89	1.21
<i>Carga 2</i>	0.33	0.01	0.04
<i>Carga 3</i>	0.78	0.77	0.72
<i>Carga 4</i>	2.18	1.15	1.13
<i>Carga 5</i>	5.84	3.13	2.27

A la vista de los resultados obtenidos los tres índices identifican perfectamente todas las cargas. Cabe destacar que el índice Theta 1 identifica a las fuentes de distorsión y/o desequilibrio del sistema (cargas 1, 4 y 5) de una forma más pronunciada, mientras que el índice Theta 3 lo hace con las cargas lineales y equilibradas (cargas 2 y 3). El índice Theta 2 también muestra un comportamiento adecuado para todos los casos.

### **3.5.2. Caso 2: Sistema alimentado por una fuente con distorsión armónica sin desequilibrio**

Como se indicó en el capítulo 1, según la norma UNE-EN 50160 la tasa de distorsión armónica total de la tensión suministrada no debe sobrepasar el 8 % (comprendidos todos los armónicos hasta el 40). De tal forma que, para el segundo caso, las cargas se han alimentado a través de una fuente con una distorsión armónica por encima del umbral que dicta la norma, pero a partir de un sistema equilibrado de tensiones. En la figura 3.10 se muestra las formas de ondas de las tensiones de la fuente y de las intensidades de cada fase de la red de distribución. La distorsión armónica de la fuente viene dada por un factor de  $THDV = 10 \%$ ; mientras que la distorsión armónica de la intensidad que circula por cada fase de la red de distribución es de  $THDI_{L1} = 9.22 \%$ ,  $THDI_{L2} = 7.72 \%$  y  $THDI_{L3} = 7.30 \%$ .

La figura 3.11 muestra las formas de ondas de tensión en el *PCC*. La distorsión armónica de tensión en cada fase es de  $THDV_{L1} = 10.24 \%$ ,  $THDV_{L2} = 10.28 \%$  y  $THDV_{L3} = 10.30 \%$ . Por otro lado, el nivel de desequilibrio de tensiones en la fuente es del 0 %, mientras que en el *PCC* es del 0.07 %.

En la tabla 3.4 se muestran los valores de *THDI* medidos en cada fase de las diferentes cargas, mientras que la figura 3.8 corresponde a las formas de ondas de intensidad de todas las cargas.

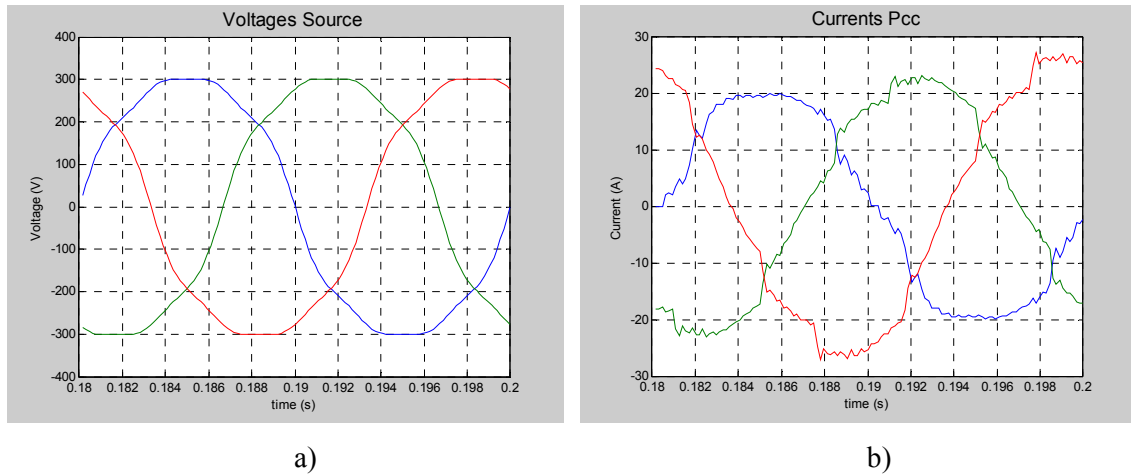


Figura 3.10. Formas de onda caso 2. a) Tensiones de fuente. b) Intensidades de línea.

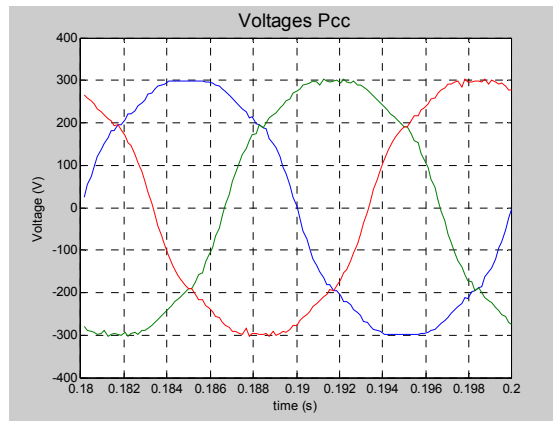


Figura 3.11. Formas de onda de las tensiones en el PCC para el caso 2.

<b>Tabla 3.4.</b> Resultados de la distorsión armónica para el caso 2			
	<b><math>THDI_{L1}</math> (%)</b>	<b><math>THDI_{L2}</math> (%)</b>	<b><math>THDI_{L3}</math> (%)</b>
<b>Carga 1</b>	10.24	10.28	10.30
<b>Carga 2</b>	7.73	7.76	7.78
<b>Carga 3</b>	17.12	12.27	14.07
<b>Carga 4</b>	28.88	28.87	29.6
<b>Carga 5</b>	24.13	48.08	46.41

A partir de los resultados obtenidos en los puntos de medidas, se puede constatar como el aumento de la distorsión armónica de tensión de la fuente repercute de forma directa y proporcional en las cargas 1, 2 y 3 (cargas lineales) a través de la distorsión armónica de tensión generada en el PCC. Por otro lado, se observa como en las cargas 4 y 5 la repercusión del aumento de distorsión armónica de la fuente es mínima, ya que la variación de los índices no es significativa con respecto al caso 1 (fuente sin distorsión armónica).

La tabla 3.5 recoge los resultados de las potencias activas y las potencias aparentes. En este caso, la potencia activa armónica medida en el *PCC* es de 4.57 W, lo que indica que la resultante total aumenta y cambia de signo con respecto al caso anterior, por lo que puede decirse que la potencia armónica fluye, de forma prevalente, de la fuente a las cargas. Los valores de potencia activa armónica de todas las cargas aumentan y mantienen el signo con respecto al caso 1.

En cuanto a los valores de las potencias aparentes medidas en el sistema, cabe destacar el aumento producido en la componente  $S_{bH}$  de las cargas lineales (cargas 1, 2 y 3) con respecto al caso 1. Aun así, los valores de la componente  $S_{bH}$  de las cargas no lineales (cargas 4 y 5) muestran unos valores muy superiores con respecto a las cargas lineales. Por otro lado, los valores de  $S_{ul}$  identifican de forma correcta a las cargas 1 y 5 como fuentes de desequilibrio, con unos valores de 1416.9 VA y 598.5 VA respectivamente, frente a unos valores de 4.9 VA, 26.4 VA y 8.8 VA de las cargas equilibradas 2, 3 y 4.

**Tabla 3.5.** Valores de potencias obtenidos en el caso 2

	$PT (W)$	$PT_l (W)$	$PT_H (W)$	$S_e (VA)$	$S_{bl} (VA)$	$S_{ul} (VA)$	$S_{bH} (VA)$	$S_{uH} (VA)$
<b>PCC</b>	11206	11201	4.57	11452.9	11309.9	1780.8	57.2	285.7
<b>Carga 1</b>	2064.9	2043.3	4.5	2494.0	2044.4	1416.9	34.9	177.1
<b>Carga 2</b>	2433.9	2419.3	14.5	2501.5	2500.8	4.9	27.7	48.7
<b>Carga 3</b>	2433.9	2419.3	14.5	2509.4	2431.4	26.4	34.4	619.2
<b>Carga 4</b>	2910.5	2947.9	- 37.3	2967.0	2949.3	8.8	121.7	300.1
<b>Carga 5</b>	1362.8	1371.6	- 8.78	1651.8	1491.4	598.5	245.3	292.6

La tabla 3.6 muestra los resultados de los índices distribuidos multipunto para cada carga conectada al sistema.

**Tabla 3.6.** Resultados Índices distribuidos Globales *EPQ* para el caso 2

	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$
<b>Carga 1</b>	6.84	4.13	1.48
<b>Carga 2</b>	0.58	0.24	0.16
<b>Carga 3</b>	0.87	0.86	0.88
<b>Carga 4</b>	2.50	1.25	1.35
<b>Carga 5</b>	5.97	3.13	2.30

El efecto de la subida de la distorsión armónica de la fuente en el sistema se traduce en el aumento de todos los índices de las cargas, pero al igual que ocurre en el caso 1, los tres índices identifican de forma correcta a todas las cargas.

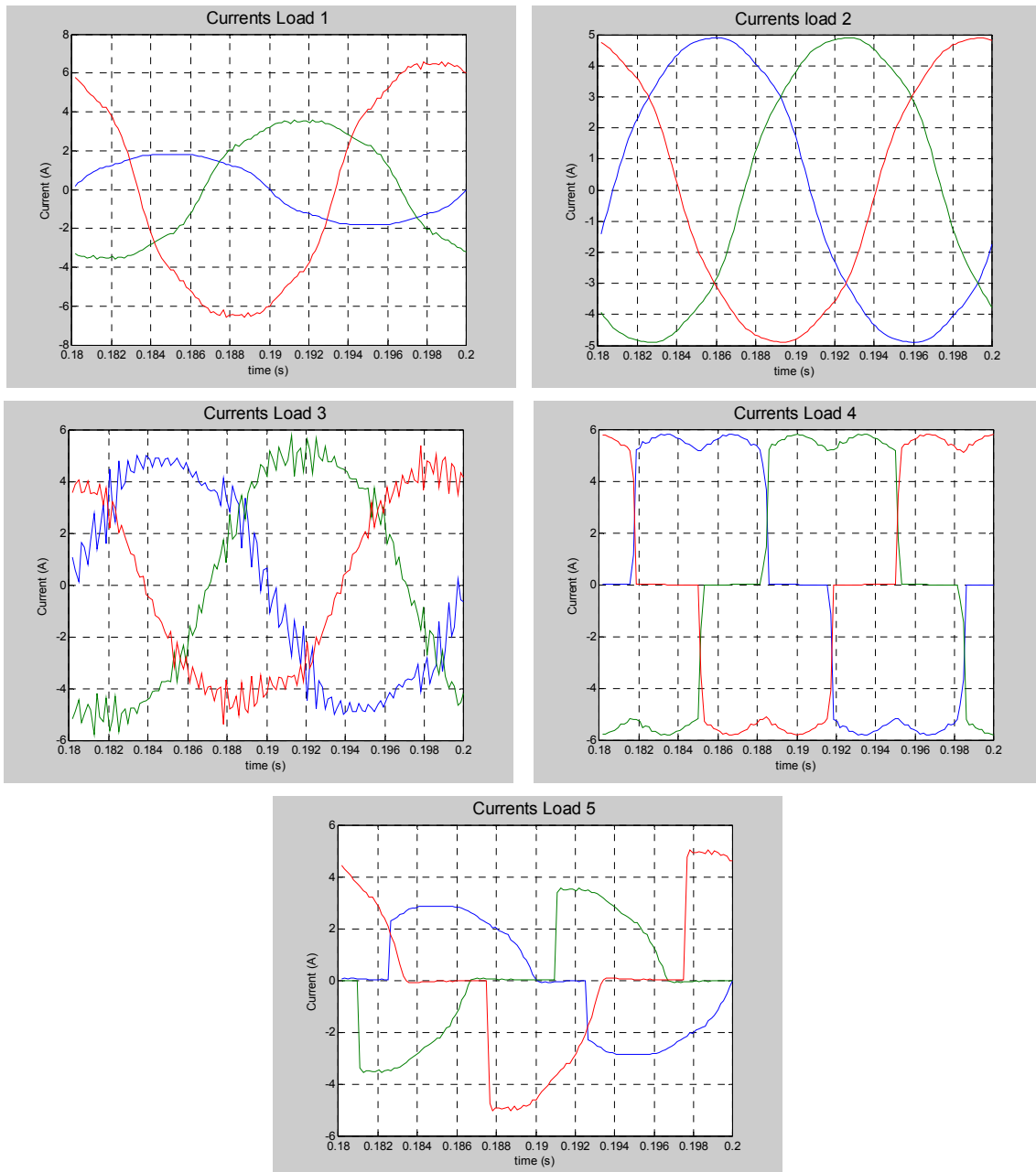
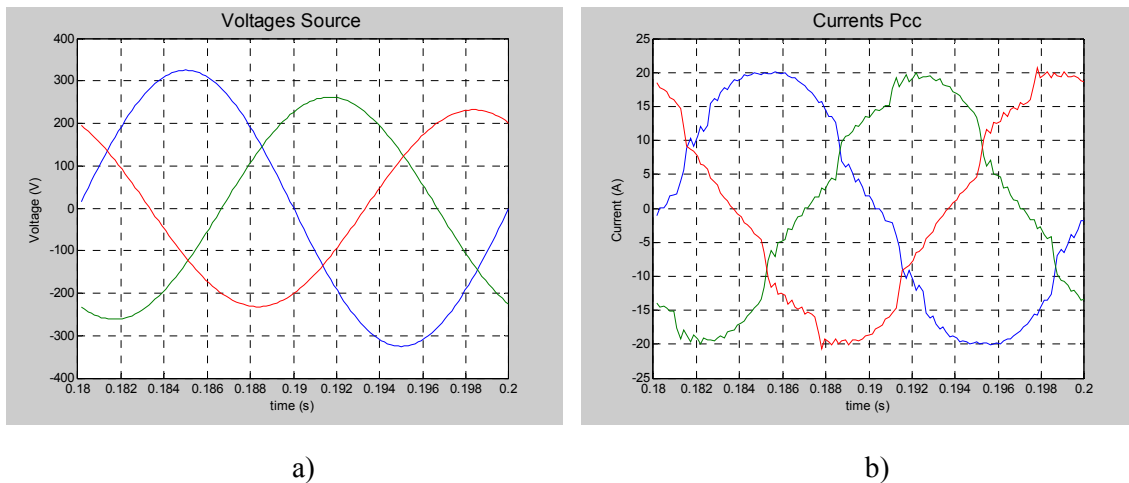


Figura 3.12. Formas de onda de las intensidades de cada carga en el caso 2.

### 3.5.3. Caso 3: Sistema alimentado por una fuente sin distorsión armónica y con un sistema de tensiones desequilibrado

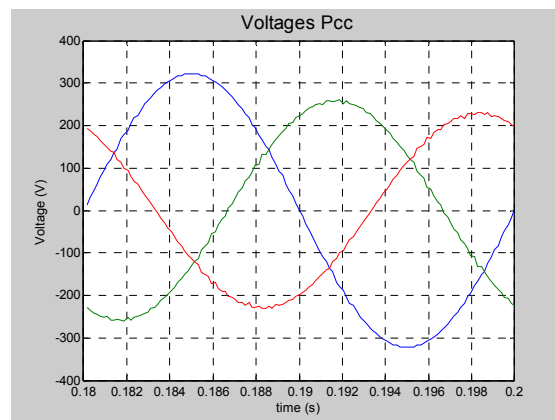
Como tercer caso de estudio se ha considerado una fuente de suministro eléctrico sin distorsión armónica, pero con un nivel de desequilibrio por encima del máximo permitido por la norma UNE-EN 50160. Según la norma, las condiciones de compatibilidad en el PCC en las redes de media y baja tensión, el grado de asimetría no puede superar el 2% en valoraciones de más de un minuto. Por ello se ha considerado para este caso una fuente de alimentación con un desequilibrio de tensiones del 10 %, así junto con las cargas 1 y

5 conforman las fuentes de desequilibrio presentes en el sistema; por otro lado, las fuentes de distorsión armónica son las cargas 4 y 5. En la figura 3.13 se muestran las formas de ondas de tensión de la fuente y las formas de ondas de intensidades que circulan por la red.



**Figura 3.13.** Formas de onda caso 3. a) Tensiones de fuente. b) Intensidades de línea.

En la figura 3.14 se muestra la forma de onda de las tensiones medidas en el PCC, donde se ha medido un nivel de desequilibrio del 10.15 % y unos valores de distorsión armónica de  $THDV_{L1} = 0.85\%$ ,  $THDV_{L2} = 1.37\%$  y  $THDV_{L3} = 1.40\%$ .



**Figura 3.14.** Formas de onda de las tensiones en el PCC para el caso 3.

La tabla 3.7 muestra los valores de los índices de distorsión armónica de intensidad que caracterizan a las cargas para el caso 3. Se puede apreciar como los valores son similares a los del caso 1 (fuente sin distorsión ni desequilibrio) ya que las fuentes de distorsión armónicas son las mismas en ambos casos.

**Tabla 3.7.** Resultados de la distorsión armónica para el caso 3

	$THDI_{L1}$ (%)	$THDI_{L2}$ (%)	$THDI_{L3}$ (%)
<b>Línea</b>	7.40	10.58	10.09
<b>Carga 1</b>	0.85	1.37	1.40
<b>Carga 2</b>	0.11	0.17	0.19
<b>Carga 3</b>	10.27	10.57	13.16
<b>Carga 4</b>	24.14	30.18	34.48
<b>Carga 5</b>	26.22	53.07	51.43

Los valores de las diferentes potencias medidas en todas las cargas y en el *PCC* se muestran en la tabla 3.8. Al igual que en el caso 1, las únicas fuentes de distorsión en el sistema son las cargas 4 y 5, por lo que la potencia armónica total del sistema fluye desde las cargas a la fuente, tal y como indica su signo negativo (-0.74 W). Los valores de las potencias armónicas de las cargas individuales también bajan considerablemente, y mantienen el signo en todas ellas. Con respecto a los valores de las potencias aparentes, se observa un aumento de los valores de la componente  $S_{ul}$  correspondientes a las cargas 2 y 3, mientras que el resto de los valores son del mismo orden que en el caso 1.

**Tabla 3.8.** Valores de potencias obtenidos en el caso 3

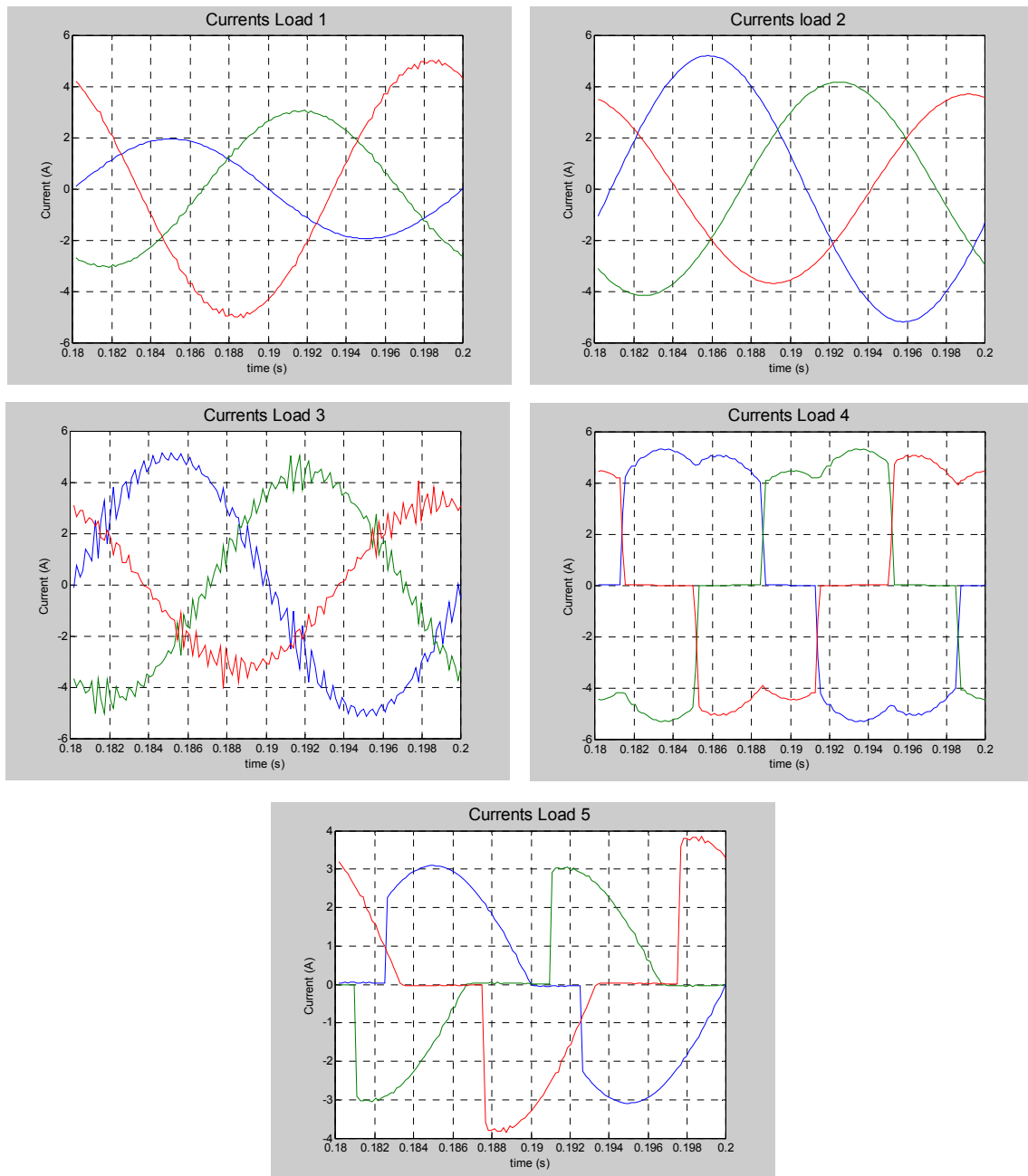
	$PT$ (W)	$PT_I$ (W)	$PT_H$ (W)	$S_e$ (VA)	$S_{bl}$ (VA)	$S_{ul}$ (VA)	$S_{bh}$ (VA)	$S_{uH}$ (VA)
<b>PCC</b>	7863.9	7864.6	- 0.74	7930.3	7884.7	710.4	42.4	463.6
<b>Carga 1</b>	1277.7	1277.5	0.21	1534.1	1345.5	723.8	0.07	137.4
<b>Carga 2</b>	1739.4	1739.4	0.00	1806.7	1761.5	382.1	0.03	123.2
<b>Carga 3</b>	1739.4	1739.4	0.00	1766.6	1707.0	381.1	3.1	248.1
<b>Carga 4</b>	2125.1	2125.7	-0.65	2202.1	2104.1	151.8	64.3	628.3
<b>Carga 5</b>	982.3	982.6	- 0.30	1132.7	1028.9	353.4	201.5	242.2

Los resultados de los índices distribuidos multipunto para el caso 3 se muestran en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9.** Resultados Índices distribuidos Globales *EPQ* para el caso 3

	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$
<b>Carga 1</b>	7.13	4.12	1.33
<b>Carga 2</b>	0.88	0.54	0.20
<b>Carga 3</b>	<b>1.20</b>	<b>1.11</b>	0.47
<b>Carga 4</b>	3.84	1.97	1.49
<b>Carga 5</b>	7.97	3.81	2.47

En este caso, el efecto de la subida del nivel de desequilibrio de la fuente provoca un aumento de los índices  $\Theta_1$  y  $\Theta_2$ , de tal forma que identifican de forma errónea la carga 3 como fuente de perturbación. Por el contrario, el índice  $\Theta_3$  es el único que identifica de forma correcta el carácter de cada una de las cargas. Además, el índice  $\Theta_3$  se muestra más estable, ya que los resultados se mantienen en el mismo rango que en los casos anteriores.

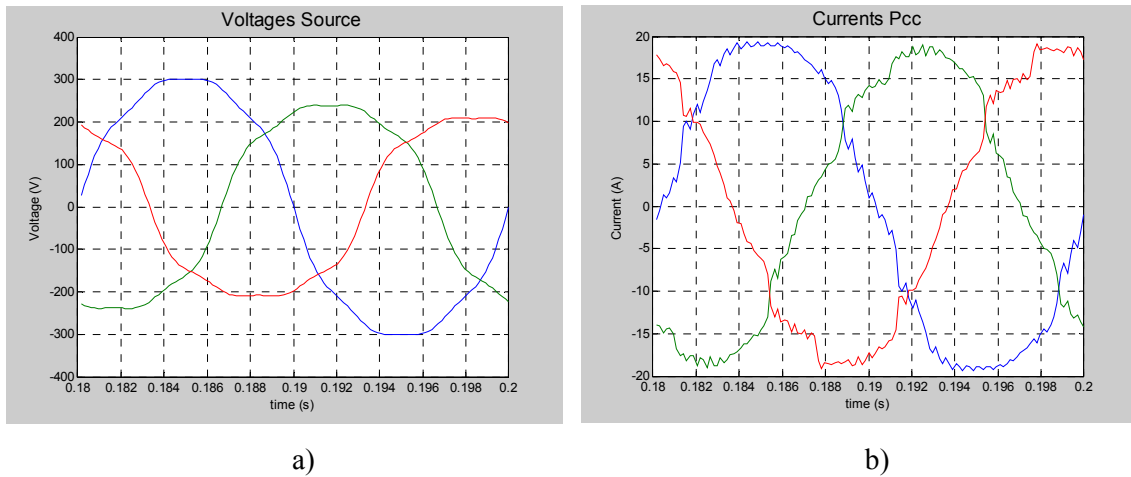


**Figura 3.15.** Formas de onda de las intensidades de cada carga en el caso 3.

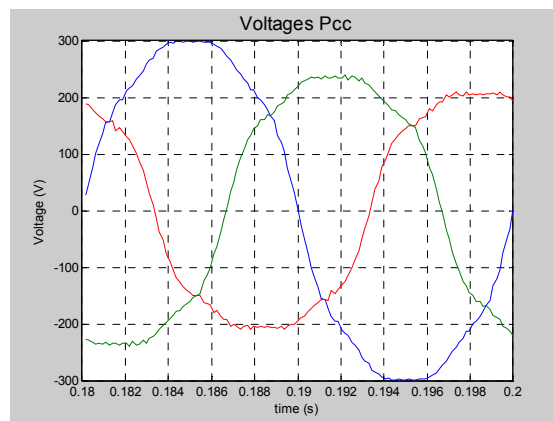
### 3.5.4. Caso 4: Sistema alimentado por una fuente con distorsión armónica y un servicio de tensiones desequilibrado

Por último, se ha considerado una de las situaciones más desfavorable. Para ello, se ha conectado el sistema a una fuente con un nivel de desequilibrio de tensión del 10 % y una distorsión armónica del  $THDV = 10\%$ . En la figura 3.16 se muestran las formas de ondas de tensión de la fuente y las de las intensidades que circulan por la red, donde la intensidad presenta una distorsión armónica en cada fase de  $THDI_{L1} = 8.50\%$ ,  $THDI_{L2} = 8.85\%$  y  $THDI_{L3} = 7.25\%$ .

En la figura 3.17 se puede ver la forma de onda de tensión en el *PCC* resultante al conectar el sistema a la fuente distorsionada y desequilibrada. El nivel de desequilibrio de tensiones medido en el *PCC* es del 10.1 %. La distorsión armónica obtenida registra unos valores de  $THDV_{L1} = 10.17 \%$ ,  $THDV_{L2} = 12.78 \%$  y  $THDV_{L3} = 14.36 \%$ .



**Figura 3.16.** Formas de onda caso 4. a) Tensiones de fuente. b) Intensidades de línea.

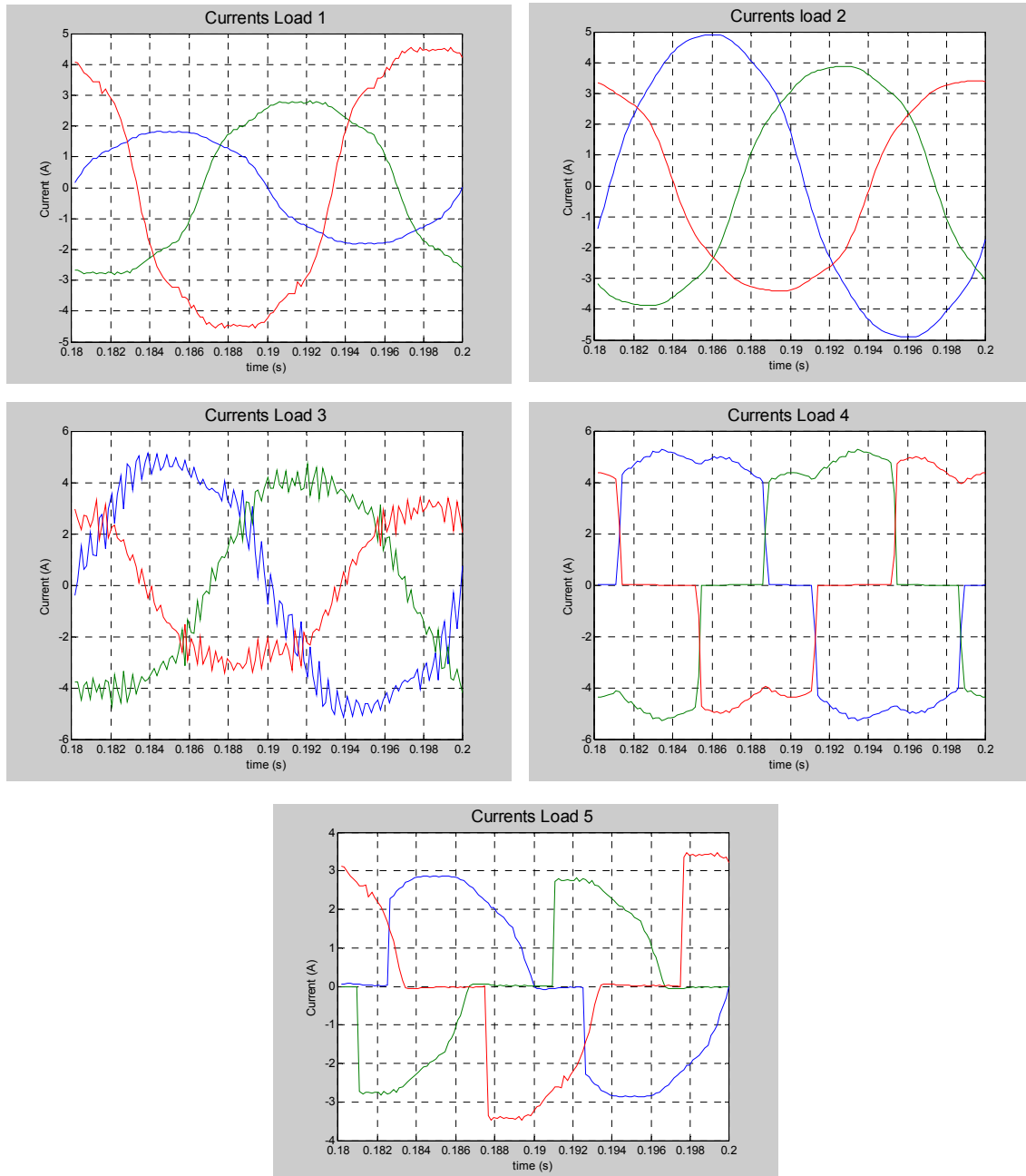


**Figura 3.17.** Formas de onda de las tensiones en el *PCC* para el caso 4.

En la figura 3.18 se muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en todos los puntos del sistema, mientras que en la tabla 3.10 se exponen los valores de distorsión armónica de intensidad obtenidos en las medidas realizadas en cada carga. Al igual que en los anteriores casos, la distorsión armónica de intensidad medida en la carga 1 (lineal y equilibrada) coincide con los niveles de distorsión armónica de tensión obtenidos en el *PCC*. La carga 2 se caracteriza por unos niveles inferiores debido a su carácter lineal, pero con una componente inductiva alta. Por otro lado, la carga 3 amplifica de forma considerable los niveles debido a la amplificación armónica que realizan los condensadores de la carga. Por último, los valores de la carga 4 y 5 se mantienen al mismo nivel que en los casos anteriores.

**Tabla 3.10.** Resultados de la distorsión armónica para el caso 4

	$THDI_{L1}$ (%)	$THDI_{L2}$ (%)	$THDI_{L3}$ (%)
<b>Carga 1</b>	10.17	12.78	14.36
<b>Carga 2</b>	7.69	9.66	10.88
<b>Carga 3</b>	16.56	14.65	19.48
<b>Carga 4</b>	23.31	29.64	36.87
<b>Carga 5</b>	24.07	47.13	44.81



**Figura 3.18.** Formas de onda de las intensidades de cada carga en el caso 4.

En la tabla 3.11 se muestran los valores medidos de la potencia activa total, la potencia activa fundamental y la potencia activa armónica, además incluye los valores de la potencia aparente efectiva y sus distintas componentes. La potencia activa armónica total

aumenta considerablemente comparada con los otros tres casos y fluye de la fuente a las cargas. Con respecto a los valores de las componentes de la potencia aparente cabe destacar el lógico aumento tanto de las componentes de desequilibrio ( $S_{ul}$  y  $S_{uH}$ ), como las componentes de distorsión ( $S_{bH}$  y  $S_{uH}$ ).

**Tabla 3.11.** Valores de potencias obtenidos en el caso 4

	$PT (W)$	$PT_l (W)$	$PT_H (W)$	$S_e (VA)$	$S_{bl} (VA)$	$S_{ul} (VA)$	$S_{bH} (VA)$	$S_{uH} (VA)$
<b>PCC</b>	7834.9	7815.0	19.8	7891.6	7843.1	716.9	47.57	496.8
<b>Carga 1</b>	1299.0	1277.6	21.4	1535.7	1345.6	723.9	36.8	149.4
<b>Carga 2</b>	1753.9	1739.4	14.49	1807.0	1761.6	382.1	27.5	123.3
<b>Carga 3</b>	1753.9	1739.4	14.49	1772.4	1707.1	381.4	33.6	283.8
<b>Carga 4</b>	2069.1	2094.3	- 25.2	2186.8	2068.3	149.4	51.6	692.3
<b>Carga 5</b>	958.9	964.2	- 5.2	1127.1	1033.4	368.0	136.7	219.4

Por último, en la tabla 3.12, se presentan los resultados de los índices distribuidos multipunto de cada carga obtenidos para este caso. La distorsión y el nivel de desequilibrio de la fuente provoca un aumento de los índices Theta 1 y Theta 2 en todas las cargas. De tal forma que el índice Theta 1 identifica erróneamente tanto la carga 2 (lineal y equilibrada *RL*) como la carga 3 (Lineal y equilibrada *RLC*). El aumento producido en los valores del índice Theta 2 al identificar a cada carga provoca que señale a la carga 3 como fuente de perturbación de forma errónea. Por el contrario, el índice Theta 3 identifica correctamente todas las cargas, además muestra una razonable estabilidad de los resultados frente a la distorsión y el nivel de desequilibrio de la fuente.

**Tabla 3.12.** Resultados Índices distribuidos Globales *EPQ* para el caso 4

	<i>Theta 1</i>	<i>Theta 2</i>	<i>Theta 3</i>
<b>Carga 1</b>	10.54	4.68	1.79
<b>Carga 2</b>	<b>1.06</b>	0.72	0.34
<b>Carga 3</b>	<b>1.81</b>	<b>1.52</b>	0.79
<b>Carga 4</b>	5.48	2.30	1.57
<b>Carga 5</b>	8.63	3.81	2.06

### 3.5.5. Variación de los índices distribuidos multipunto en función de la variación del nivel de distorsión armónica de la fuente

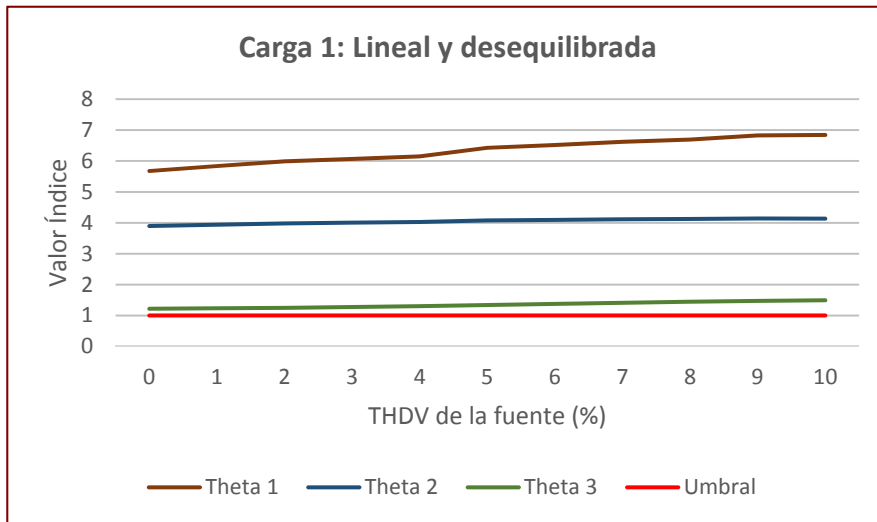
En esta sección, se analiza el comportamiento de los índices a la hora de identificar las fuentes de perturbación en función del nivel de distorsión de la fuente de alimentación. En la tabla 3.13 se muestran los valores de distorsión armónica de tensión y de intensidad en cada fase del *PCC* obtenidos al variar la distorsión armónica de la fuente. Para ello, se han generado armónicos de orden 3, 5 y 7 en la fuente de alimentación del sistema.

**Tabla 3.13.** Resultados de la distorsión en el *PCC* en función de la distorsión de la fuente

<i>Fuente</i>	<i>PCC</i>					
	<i>THDV<sub>L1</sub></i> (%)	<i>THDV<sub>L2</sub></i> (%)	<i>THDV<sub>L3</sub></i> (%)	<i>THDI<sub>L1</sub></i> (%)	<i>THDI<sub>L2</sub></i> (%)	<i>THDI<sub>L3</sub></i> (%)
<b>0</b>	1.17	1.72	1.69	9.93	10.04	9.60
<b>1</b>	1.64	2.08	2.07	9.72	9.73	9.21
<b>2</b>	2.37	2.71	2.71	9.61	9.49	8.90
<b>3</b>	3.31	3.58	3.58	9.54	9.26	8.61
<b>4</b>	4.19	4.41	4.42	9.50	9.07	9.38
<b>5</b>	5.22	5.39	5.40	9.37	8.79	8.09
<b>6</b>	6.20	6.32	6.33	9.29	8.54	7.86
<b>7</b>	7.23	7.32	7.34	9.25	8.24	7.62
<b>8</b>	8.16	8.23	8.24	9.09	8.06	7.52
<b>9</b>	9.14	9.18	9.20	9.07	7.71	7.26
<b>10</b>	10.24	10.28	10.30	9.22	7.72	7.30

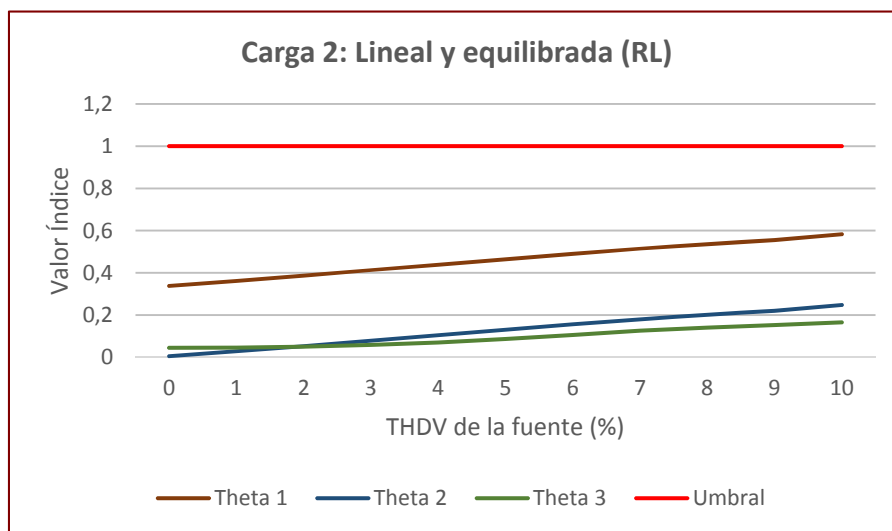
A partir de los resultados obtenidos, cabe destacar que con un *THDV* de la fuente del 0 %, se obtienen unos valores de distorsión en el *PCC* de  $THDV_{L1} = 1.17$  %,  $THDV_{L2} = 1.72$  % y  $THDV_{L3} = 1.69$  %. debido a la distorsión armónica que inyectan en el sistema las cargas 3 y 4. Sin embargo, a medida que aumenta la distorsión armónica de la fuente, la influencia de la distorsión de las cargas en el sistema es mucho menor, así con un valor de  $THDV = 10$  % de la fuente de alimentación del sistema, se obtienen unos valores de distorsión en el *PCC* del  $THDV_{L1} = 10.24$  %,  $THDV_{L2} = 10.28$  % y  $THDV_{L3} = 10.30$  %.

La figura 3.19 muestra el valor de los índices distribuidos medidos en la carga 1 (lineal y desequilibrada) para los diferentes valores de *THDV* de la fuente de alimentación del sistema. A partir de los resultados obtenidos cabe destacar que los tres índices identifican correctamente a la carga 1 como fuente de distorsión. Si bien el índice Theta 1 identifica la carga 1 de forma más pronunciada, el rango de valores que toma el índice es más elevado (5.67 a 6.84) que el resto de los índices estudiados. Al contrario que el índice Theta 3 que, si bien toma valores más cercanos al umbral, se muestra más estable ante la variación de distorsión de la fuente (1.21 a 1.48).



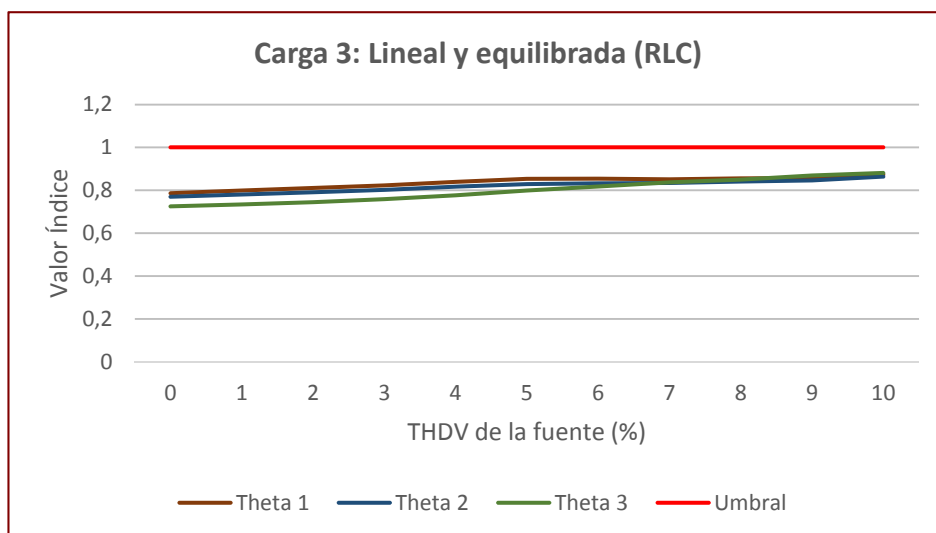
**Figura 3.19.** Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 1.

Los resultados de la evolución de los índices medidos en la carga 2, con respecto a la variación del nivel de distorsión de la fuente se muestran en la figura 3.20. Los tres índices identifican correctamente a la carga 2 (lineal y equilibrada *RL*) a lo largo del rango estudiado. En este caso es el índice Theta 3 es el que identifica a la carga de forma más pronunciada, de forma que el índice no llega al valor de 0.2 en todo el rango de distorsión de la fuente estudiado. El índice Theta 2 presenta un comportamiento similar al índice Theta 3.



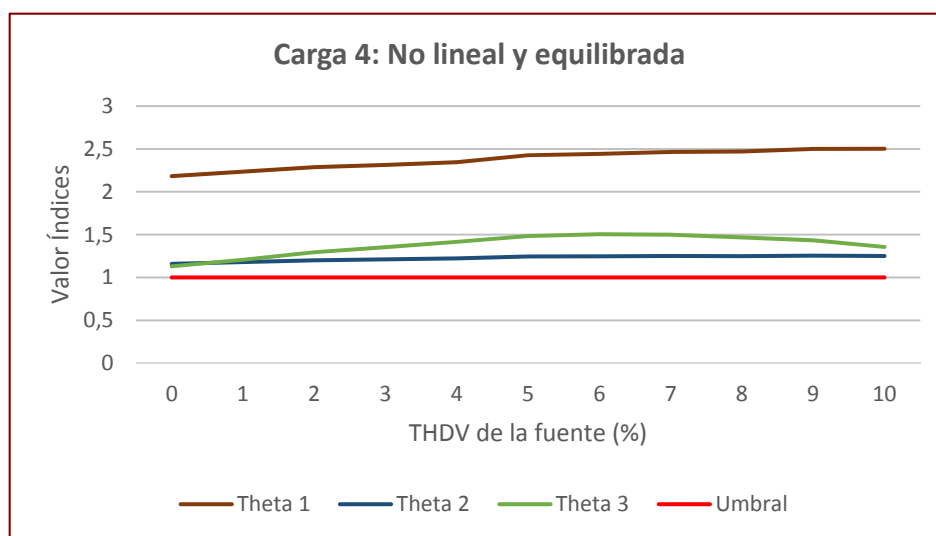
**Figura 3.20.** Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 2.

Los resultados obtenidos con respecto a la carga 3, no lineal, equilibrada y equipada con un banco de condensadores para mejorar el factor de potencia, se muestran en la figura 3.21. Los tres índices identifican a la carga 3 como lineal y equilibrada; además, el comportamiento y la estabilidad que presentan frente a la variación de distorsión de fuente es similar.



**Figura 3.21.** Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 3.

En la figura 3.22 se representan los valores de las medidas realizadas en la carga 4 (no lineal y equilibrada) con respecto a la variación de la distorsión de la fuente. En este caso, al igual que los anteriores, los tres índices confirman a la carga 4 como fuente de distorsión.



**Figura 3.22.** Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 4.

La figura 3.23 muestra la evolución de los índices frente a la distorsión de la fuente para definir la carga no lineal y desequilibrada (carga 5). Así, se observa que los tres índices la identifican como fuente de perturbación; además, presentan una adecuada estabilidad frente a la variación de la distorsión de la fuente, toda vez que la variación del valor de los índices es mínima con respecto al cambio de valor de la distorsión de la fuente.

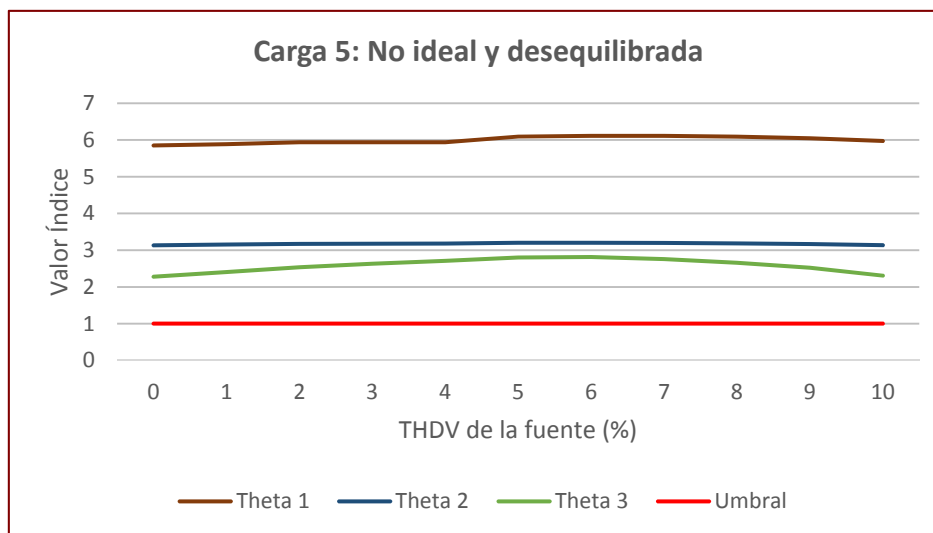


Figura 3.23. Evolución de los índices frente a la distorsión armónica de la fuente para definir la carga 5.

Finalmente, con el objetivo de estudiar la variación de los índices distribuidos multipunto de cada carga frente a la variación de la distorsión de la fuente, en la tabla 3.14 se muestra tanto el promedio ( $\bar{x}$ ) como la desviación estándar ( $\sigma$ ) que resultan de los índices calculados.

	Carga 1			Carga 2			Carga 3			Carga 4			Carga 5		
	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$
<b>Average</b> ( $\bar{x}$ )	6,33	4,04	1,34	0,46	0,12	0,09	0,83	0,81	0,79	2,37	1,22	1,37	5,99	3,17	2,58
<b>Deviation</b> ( $\sigma$ )	0,40	0,08	0,09	0,08	0,08	0,04	0,02	0,02	0,05	0,11	0,03	0,12	0,09	0,02	0,18

Atendiendo a los valores promedios, los tres índices identifican las cinco cargas de forma correcta. El índice Theta 1 identifica las fuentes de distorsión y/o desequilibrio de una forma más pronunciada (cargas 1, 4 y 5), sin embargo, es el índice Theta 3 quien lo hace con las cargas lineales y equilibradas (cargas 2 y 3). Con respecto a los valores de la desviación estándar obtenidos en este caso, todos los índices muestran unos valores muy reducidos, lo que puede considerarse un indicador de estabilidad del comportamiento de

los índices frente a la distorsión armónica de la fuente de alimentación del sistema eléctrico.

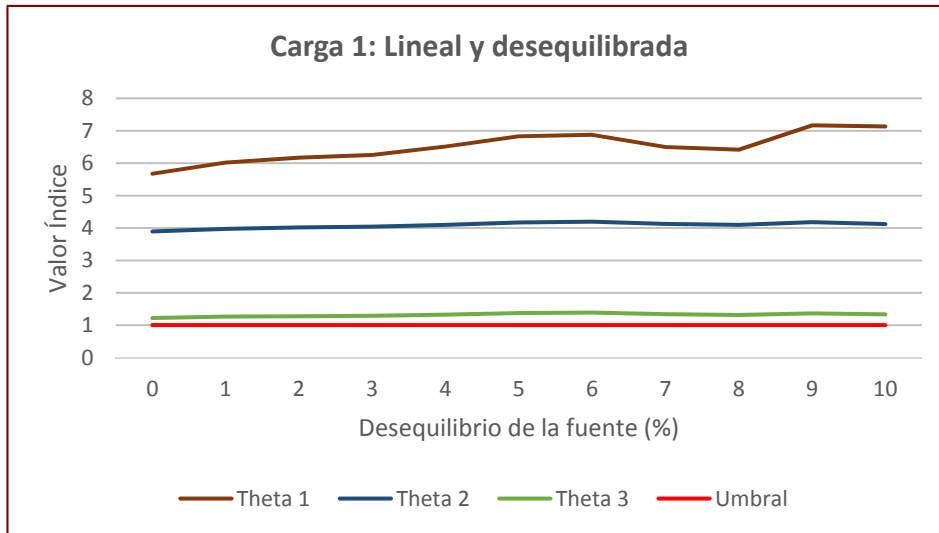
### 3.5.6. Variación de los índices distribuidos multipunto en función de la variación del nivel de desequilibrio de la fuente

El análisis de los casos 3 y 4 mostró cómo el nivel de desequilibrio de tensiones del suministro eléctrico repercute directamente en las condiciones de trabajo del *PCC*, así como los efectos trascienden directamente en las cargas. En este punto se va a estudiar el comportamiento de los índices respecto a la variación del nivel de desequilibrio de tensiones de la fuente. Para ello, se ha variado el nivel de desequilibrio de la fuente desde 0 al 10 % y se han medido los índices distribuidos multipunto en cada carga con respecto al *PCC*.

En la tabla 3.15 se presenta el nivel de desequilibrio de tensiones obtenido en el *PCC*, en función del nivel de desequilibrio de la fuente de alimentación del sistema. Así, cuando la fuente es equilibrada ( $V_{neg} = 0 \%$ ), el nivel de desequilibrio presente en el *PCC* es despreciable ( $V_{neg} = 0,08 \%$ ). Mientras que para un desequilibrio de la fuente de alimentación de  $V_{neg} = 10 \%$ , en el *PCC* se obtiene un valor de  $V_{neg} = 10.1 \%$ .

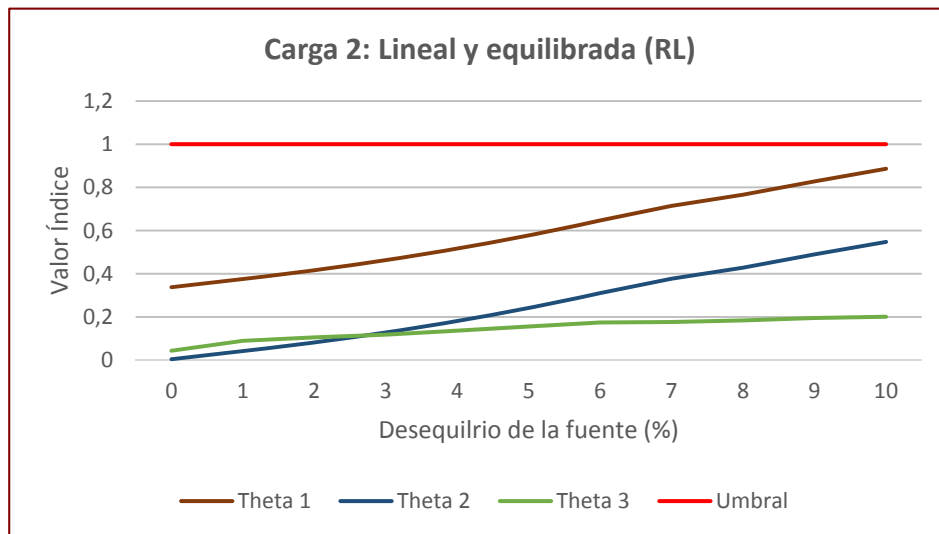
<b>Desequilibrio fuente</b> $V_{neg} (\%)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Desequilibrio <i>PCC</i></b> $V_{neg} (\%)$	0.08	1.09	2.07	3.06	4.04	5.02	6.08	7.07	8.07	9.06	10.1

En la figura 3.24 se presentan la evolución de los índices de la carga 1 (Lineal y Desequilibrada) frente a la variación del nivel de desequilibrio de la fuente. Analizando los datos obtenidos se puede apreciar como los tres índices identifican siempre a la carga 1 como fuente de perturbación. Cabe destacar que, si bien el comportamiento de los tres índices es bastante estable, los índices Theta 2 y Theta 3 presentan un rango de valores más reducido frente a la variación del nivel de desequilibrio de la fuente de alimentación del sistema, con valores comprendidos entre 3.89 y 4.19 para Theta 2 y de 1.21 a 1.38 para Theta 3.



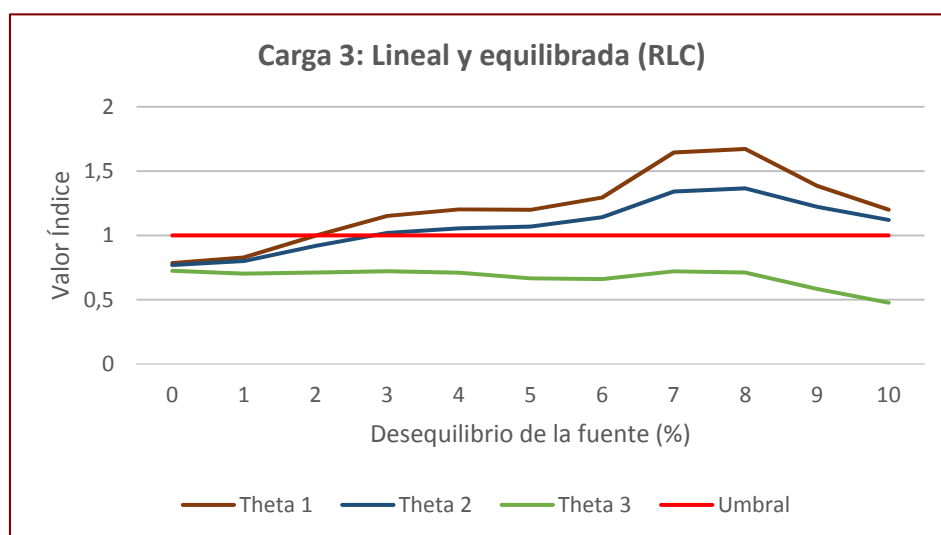
**Figura 3.24.** Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 1.

La carga 2 es lineal y equilibrada (*RL*). En la figura 3.25 se presenta la repuesta de los índices medidos en la carga 2 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la fuente. A tenor de los resultados se puede comprobar que, si bien todos los índices identifican correctamente a la carga 2 en el intervalo del 0 al 10 %, la tendencia de los índices Theta 1 y Theta 2 muestra que para un nivel de desequilibrio de la fuente superior al 10 % los índices tienden a alcanzar valores cercanos a uno. Por otro lado, el nuevo índice propuesto Theta 3, muestra un comportamiento muy estable frente a la variación del nivel de desequilibrio de tensiones de la fuente de alimentación del sistema, no superando el valor de 0.2 en todo el rango estudiado.



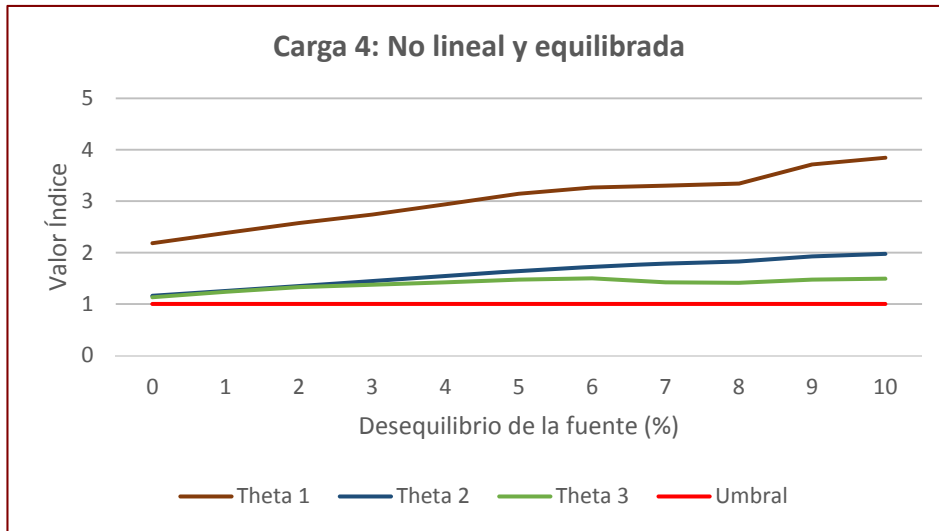
**Figura 3.25.** Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 2.

Los resultados de la evolución de los índices tomados en la carga 3 (carga lineal y equilibrada con banco de condensadores) con respecto a la variación del nivel de desequilibrio, se muestran en la figura 3.26. Se puede apreciar como el índice Theta 3 es el único que define a la carga 3 como lineal y equilibrada de forma clara y contundente en todo el rango estudiado. El índice Theta 1 muestra valores cercanos al umbral hasta que la fuente alcanza un nivel de desequilibrio del 2 %, y a partir de ahí, los valores del índice se disparan hasta superar el valor de 1,5. De igual forma se comporta el índice Theta 2, si bien con niveles de desequilibrio de fuente comprendidos entre el 0 y el 3 % identifica a la fuente correctamente con niveles cercanos al umbral, a partir del 3 % supera los valores del umbral, llegando a tener valores cercanos al 1,5. Por el contrario, el índice Theta 3 identifica siempre de forma correcta a la carga 3 a lo largo de todo el rango.



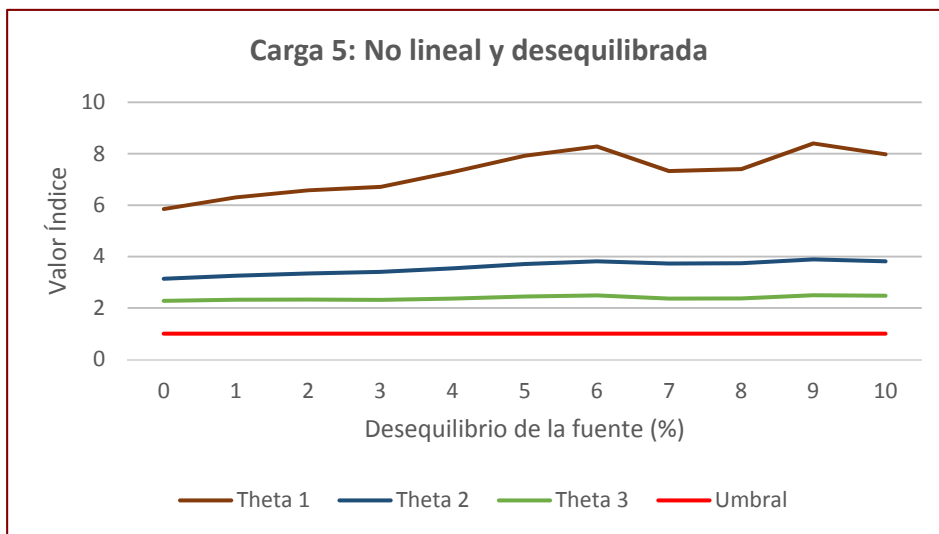
**Figura 3.26.** Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 3.

Los resultados con respecto a la carga 4, no lineal y equilibrada se muestran en la figura 3.27. De nuevo los tres índices identifican siempre a la carga 4 como una fuente de perturbación. Si bien el índice Theta 1 lo hace de una forma más pronunciada, el índice Theta 3 se muestra más estable ante la variación del nivel de desequilibrio de la fuente, con un rango de valores comprendido entre 1.13 y 1.49.



**Figura 3.27.** Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 4.

La figura 3.28 muestra la evolución de los valores de los índices medidos en la carga 5. Los tres índices califican a la carga 5 (no lineal y desequilibrada) como fuente de perturbación de forma clara, tomando valores por encima de 2.



**Figura 3.28.** Evolución de los índices frente al nivel de desequilibrio de la fuente para definir la carga 5.

Por último, con el objetivo de estudiar la variación de los índices distribuidos multipunto de cada carga frente a la variación del desequilibrio de la fuente, en la tabla 3.16 se muestra tanto el promedio ( $\bar{x}$ ) como la desviación estándar ( $\sigma$ ) que resultan de los índices calculados.

**Tabla 3.16.** Valores de la media aritmética y desviación típica de los índices distribuidos de cada carga

	Carga 1			Carga 2			Carga 3			Carga 4			Carga 5		
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
<b>Average</b> ( $\bar{x}$ )	6,50	4,08	1,31	0,59	0,25	0,14	1,21	1,07	0,67	3,03	1,67	1,38	7,27	3,57	2,38
<b>Deviation</b> ( $\sigma$ )	0,46	0,09	0,05	0,18	0,18	0,04	0,28	0,19	0,06	0,52	0,27	0,11	0,83	0,25	0,07

A partir de los valores promedios, se puede concluir que en promedio el índice Theta 3 identifica correctamente el carácter de las cinco cargas, mientras que los índices Theta 1 y Theta 2 identifican de forma errónea a la carga 3 (carga lineal y equilibrada con banco de condensadores). Con respecto a los valores de desviación estándar, se puede constatar que el índice propuesto presenta unos valores de dispersión más bajos en todos los casos, lo que muestra mayor estabilidad que el resto de los índices analizados frente a los cambios de las condiciones de alimentación.

## **CAPÍTULO IV**

---

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS ÍNDICES DISTRIBUIDOS MULTIPUNTO**

---

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez planteados los índices globales distribuidos multipunto, y evaluado su comportamiento a través de diferentes configuraciones en el entorno de Matlab/Simulink, en este capítulo se realiza un análisis comparativo de los índices a través de una plataforma experimental, con el objetivo de contrastar en situaciones reales los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas en el capítulo anterior.

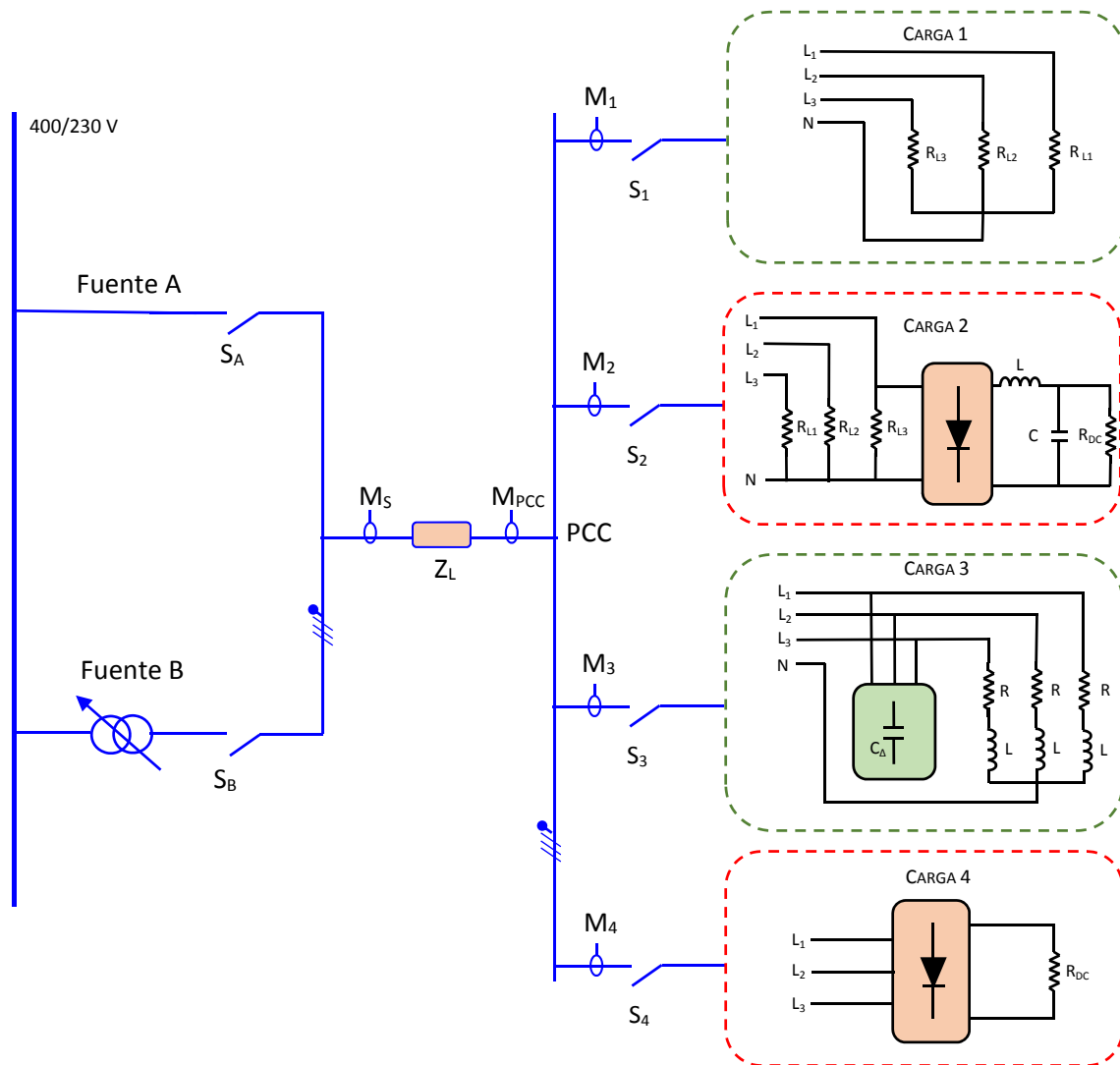
Para ello, se ha construido en el laboratorio un montaje experimental que permite configurar a pequeña escala las diferentes condiciones de trabajo que se pueden presentar en una línea de distribución en baja tensión. La topología del sistema puede configurarse de distintas formas para contrastar el comportamiento del índice distribuido en diferentes situaciones de interés. Los casos prácticos que se presentan se agrupan en dos grandes bloques, el primero combina configuraciones del sistema sin cargas capacitivas, mientras que, en el segundo bloque, todas las configuraciones incluyen una carga que contiene un banco de condensadores para compensar su factor de potencia.

El capítulo concluye con un análisis comparativo de los tres índices de medidas distribuidas a partir de los resultados obtenidos en la plataforma experimental. Así los resultados obtenidos han permitido establecer el comportamiento de cada índice frente a distintos escenarios del sistema eléctrico, entre los que se incluyen diferentes niveles de distorsión y/o desequilibrio del suministro eléctrico y distintas configuraciones de carga.

#### 4.2. CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

La figura 4.1 muestra el esquema del montaje realizado en el laboratorio a través del cual se pueden configurar a pequeña escala las diferentes condiciones de trabajo que se pueden producir en una línea de distribución en baja tensión. En concreto se trata de cuatro cargas alimentadas por un sistema trifásico (400/230 V, 50 Hz) mediante una línea de cuatro conductores. A través de una serie de interruptores puede modificarse la topología del sistema con el objetivo de estudiar el comportamiento de los índices para diferentes configuraciones. Por medio de los interruptores “ $S_A$ ” y “ $S_B$ ” se puede seleccionar la fuente de alimentación que suministra la energía eléctrica a las cargas. Así, a través de la fuente “ $A$ ” ( $S_A$  ON y  $S_B$  OFF) las cargas se alimentan directamente desde la red eléctrica que da suministro eléctrico al laboratorio, por lo tanto, la fuente “ $A$ ” mantiene la

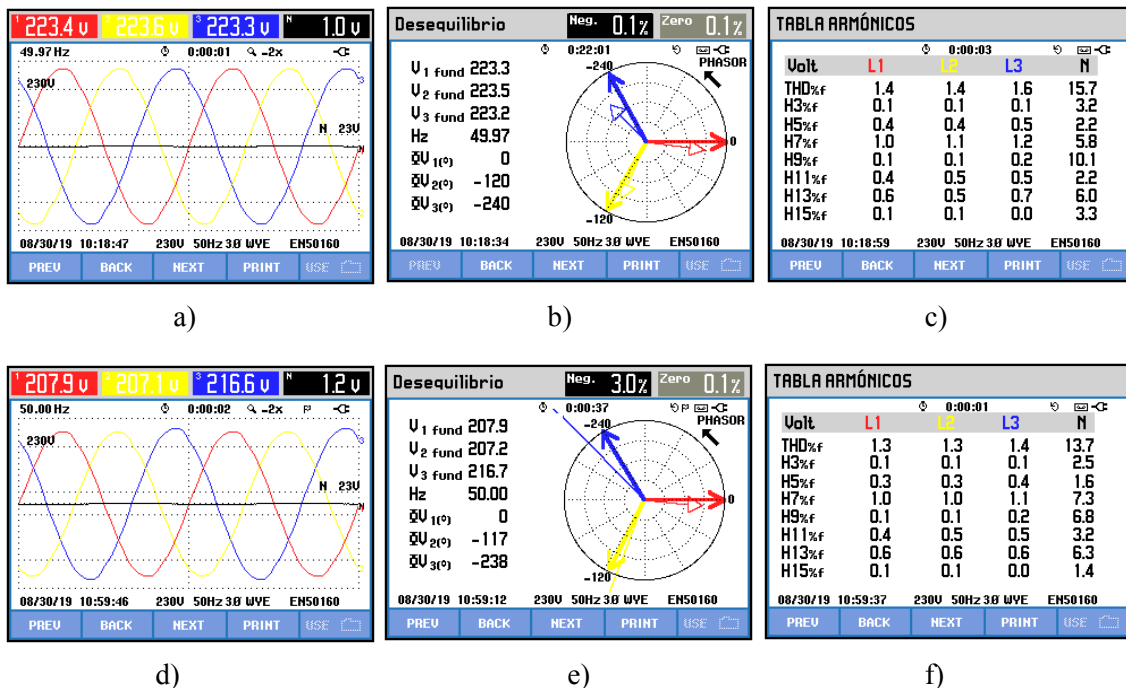
distorsión armónica y el desequilibrio propio de la red en ese momento. Por otro lado, la fuente “B” ( $S_A$  OFF y  $S_B$  ON) si bien mantiene la distorsión de la red, permite ajustar el desequilibrio. Las cargas pueden ser conectadas o desconectadas del sistema a través de los interruptores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , y  $S_4$ . Para conformar los valores de la impedancia de línea se ha tomado  $R_L = 0.15 \Omega$  y  $L_L = 0.21$  mH. Los detalles de la plataforma experimental, así como el sistema empleado para realizar las diferentes medidas se detallan en el anexo B.



**Figura 4.1.** Esquema montaje experimental implementado en el laboratorio de potencia.

### 4.2.1. Configuración de las fuentes de alimentación

Como se ha comentado en el apartado anterior, la alimentación de las cargas se puede realizar de dos formas diferentes, conectando la plataforma de experimentación directamente desde el suministro eléctrico que alimenta el laboratorio (fuente *A*), o bien a través de tres autotransformadores que nos permiten modificar el desequilibrio de la red (fuente *B*). En la figura 4.2 se representan las formas de ondas de tensiones de las fuentes *A* y *B* a circuito abierto ( $S_A$  y  $S_B$  OFF) y su caracterización un instante antes de comenzar las pruebas. Mientras que la fuente *A* presenta una distorsión armónica de tensión del 1.4 % y un desequilibrio del 0.1 %, a través de tres autotransformadores variables, la fuente *B* permite modificar el nivel de tensión de cada fase de la red del suministro eléctrico de forma independiente. En concreto, como se aprecia en la figura 4.2, la fuente *B* se ha configurado con unos valores de tensión de 207.9 V, 207.1 V y 216.6 V resultando un nivel de desequilibrio de tensiones de  $V_{neg} = 3\%$  y un  $THDV = 1.3\%$ . Estas medidas se han realizado con un analizador de *EPQ* trifásico Fluke 430 clase *A*.



**Figura 4.2.** Medidas de tensión de la fuente de alimentación a circuito abierto ( $S_A$  y  $S_B$  OFF): Test fuente *A*: formas de onda (a), fasores (b) y espectro de frecuencia (c); Test fuente *B*: formas de ondas (d), fasores (e) y espectro de frecuencia (f).

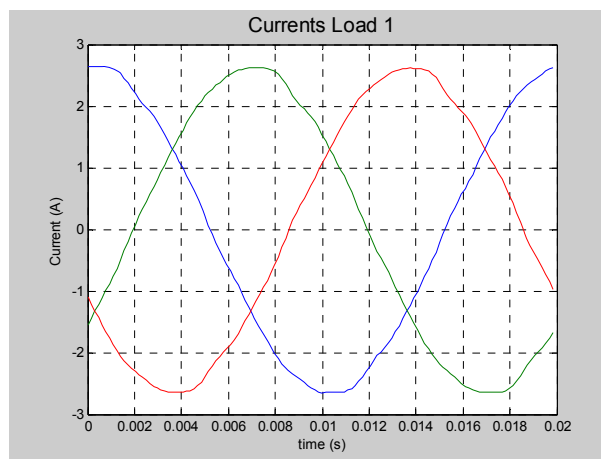
## 4.2.2. Configuración de las cargas

Con el objetivo de realizar un análisis completo del comportamiento de los índices frente a los cambios de configuraciones del sistema, se han implementado cuatro cargas de distintas características. Las cuatro cargas son:

- **Carga 1.**- Carga lineal y equilibrada.
- **Carga 2.**- Carga no lineal y desequilibrada.
- **Carga 3.**- Carga lineal y equilibrada provista de un banco de condensadores.
- **Carga 4.**- Carga no lineal y equilibrada.

### 4.2.2.1. Carga1: Lineal y equilibrada

La carga 1 está compuesta por tres resistencias conectadas en estrella de  $120 \Omega$  cada una. La figura 4.3 muestra las formas de ondas de intensidad de la carga 1 conectada a la fuente A, mientras que en la tabla 4.1 se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el PCC. Los valores de distorsión armónica y nivel de desequilibrio medidos ( $THDV = THDI = 1.4 \%$  y  $V_{neg} = 0.1 \%$ ) identifican a la carga 1 como una carga ideal, ya que no inyecta armónicos ni genera desequilibrio en el sistema.



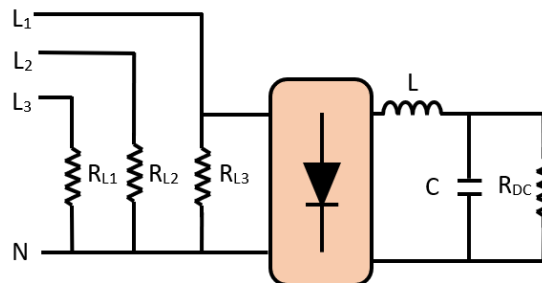
**Figura 4.3.** Formas de ondas de las intensidades que circulan por la carga 1.

**Tabla 4.1.** Medidas realizadas en el PCC con la carga 1 conectada a la fuente A

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
<b>RMS (V, A)</b>	222.0	1.9	222.7	1.9	223.3	1.9
<b>THD (%f)</b>	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.5
<b>H<sub>3</sub> (%f)</b>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<b>H<sub>5</sub> (%f)</b>	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
<b>H<sub>7</sub> (%f)</b>	1.1	1.0	1.1	1.0	1.2	1.2
<b>H<sub>9</sub> (%f)</b>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3
<b>H<sub>11</sub> (%f)</b>	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4
<b>H<sub>13</sub>(%f)</b>	0.6	0.5	0.6	0.5	0.7	0.6
<b>THD (%f)</b>	THDV = 1.4; THDI = 1.4					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 0.1; V <sub>cero</sub> = 0.7; A <sub>neg</sub> = 0.7; A <sub>cero</sub> = 0.1					
<b>P (kW)</b>	0.41		0.41		0.42	
	1.24					
<b>S (kVA)</b>	0.41		0.41		0.42	
	1.24					
<b>Q (kVAr)</b>	0.01		0.01		0.01	
	0.03					
<b>PF</b>	1.00		1.00		1.00	
	1.00					
<b>Cos φ</b>	1.00		1.00		1.00	

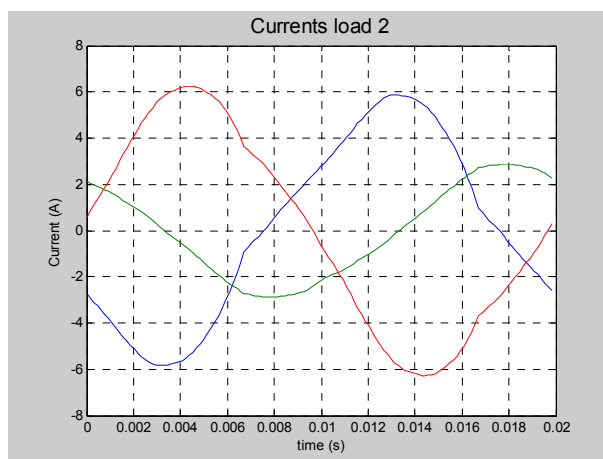
#### 4.2.2.2. Carga 2: No lineal y Desequilibrada

La figura 4.4 muestra la configuración de la carga 2. Se trata de una carga conectada en estrella y compuesta por los siguientes elementos: en la fase L<sub>1</sub> se ha conectado una resistencia de 90 Ω en paralelo con un rectificador monofásico no controlado que en el lado de continua alimenta a una carga RLC cuyos valores son: R<sub>DC</sub> = 192 Ω, L = 55 mH y C = 2200 μF. En la fase L<sub>2</sub> una resistencia de 138 Ω, y por último en la fase L<sub>3</sub> una resistencia de 45 Ω. A partir de esta configuración se ha obtenido una carga no lineal y desequilibrada, intentando modelar a pequeña escala la carga típica de un edificio con predominio de cargas monofásicas y distorsionadas.



**Figura 4.4.** Configuración de la carga 2.

En la figura 4.5 se representan las formas de ondas de las intensidades que circulan por cada fase, donde se puede observar el nivel de desequilibrio de intensidad que provoca la configuración de la carga.



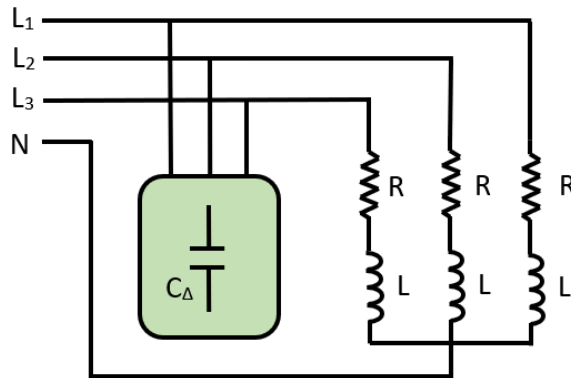
**Figura 4.5.** Formas de ondas de las intensidades que circulan por la carga 2.

En la tabla 4.2 se muestran las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* con la carga 2 conectada a la fuente *A*, donde la distorsión armónica medida alcanza unos valores de:  $THDV = 7.9\%$  y  $THDI = 12.6\%$ ; y los niveles de desequilibrio de:  $V_{neg} = 0.5\%$ ,  $V_{cero} = 20.7\%$ ,  $A_{neg} = 39.9\%$  y  $A_{cero} = 0.2\%$ .

<b>Tabla 4.2.</b> Medidas realizadas en el <i>PCC</i> con la carga 2 conectada a la fuente <i>A</i>						
<b>Fase</b>	<b>L<sub>1</sub></b>		<b>L<sub>2</sub></b>		<b>L<sub>3</sub></b>	
	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>
<b>RMS (V, A)</b>	212.4	3.9	266.8	2.0	192.5	4.1
<b>THD (%f)</b>	7.9	12.5	6.3	6.1	8.8	8.3
<b>H<sub>3</sub> (%f)</b>	7.8	12.2	6.0	5.9	8.4	1.4
<b>H<sub>5</sub> (%f)</b>	0.9	1.8	0.6	0.5	1.4	1.6
<b>H<sub>7</sub> (%f)</b>	0.5	1.9	1.3	1.3	1.5	0.6
<b>H<sub>9</sub> (%f)</b>	0.6	0.9	0.5	0.5	0.6	0.6
<b>H<sub>11</sub> (%f)</b>	0.2	0.8	0.5	0.6	0.7	0.7
<b>H<sub>13</sub>(%f)</b>	0.5	0.8	0.6	0.6	0.7	0.2
<b>THD (%f)</b>	THDV = 7.9; THDI = 12.6					
<b>Desequilibrio (%)</b>	$V_{neg} = 0.5$ ; $V_{cero} = 20.7$ ; $A_{neg} = 39.9$ ; $A_{cero} = 0.2$					
<b>P (kW)</b>	0.80		0.52		0.79	
	2.11					
<b>S (kVA)</b>	0.81		0.52		0.79	
	2.12					
<b>Q (kVar)</b>	0.13 Ind		0.01		0.02	
	0.10 Ind					
<b>PF</b>	0.97		1.00		1.00	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	0.99		1.00		1.00	

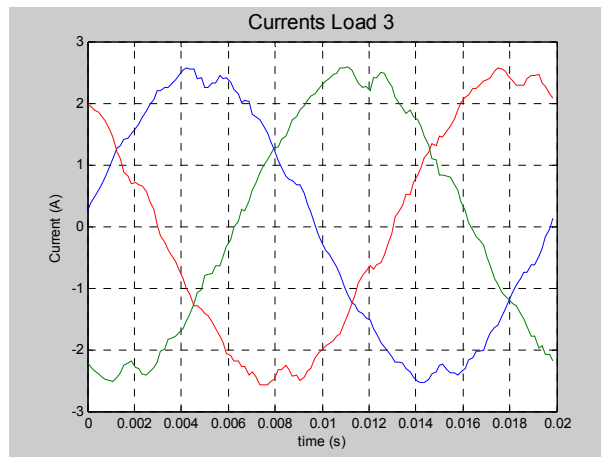
#### 4.2.2.3. Carga 3: Lineal y Equilibrada con banco de condensadores

La figura 4.6 muestra la configuración de la carga 3. Se trata de una carga inductiva, lineal y equilibrada, que incluye un banco de condensadores en cabecera para mejorar el factor de potencia de la instalación de 0,77 a 0,95 Inductivo. La carga está conectada en estrella y los valores de los componentes por fase son:  $R = 80 \Omega$ ,  $L = 0.20 \text{ H}$  y  $C = 10 \mu\text{F}$ .



**Figura 4.6.** Configuración de la carga 3.

En la figura 4.7 se muestra las formas de ondas de las intensidades de la carga 3, donde se aprecia el efecto de la amplificación armónica provocada por los condensadores ante la presencia de la distorsión armónica de la tensión en el PCC inyectada por la red eléctrica.



**Figura 4.7.** Formas de ondas de las intensidades de la carga 3.

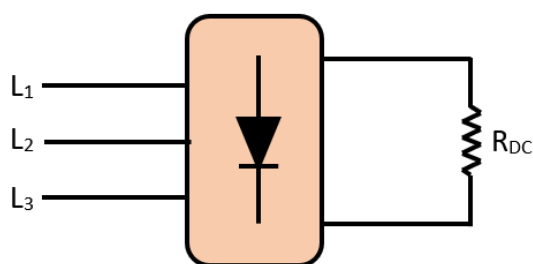
En la tabla 4.3 se muestran las medidas *EPQ* realizadas en el PCC con la carga 3 conectada a la fuente A, donde la distorsión armónica medida alcanza unos valores de:  $THDV = 2.2 \%$  y  $THDI = 4.6 \%$ ; y los niveles de desequilibrio de:  $V_{neg} = 0.1$ ,  $V_{cero} = 0.1 \%$ ,  $A_{neg} = 1.1 \%$  y  $A_{cero} = 0.1 \%$ .

**Tabla 4.3.** Medidas realizadas en el PCC con la carga 3 conectada a la fuente A

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
<b>RMS (V, A)</b>	221.3	1.7	222.2	1.7	222.3	1.8
<b>THD (%)</b>	2.1	4.4	2.4	4.5	2.3	4.9
<b>H<sub>3</sub> (%)</b>	1.7	0.2	1.9	0.2	1.8	0.1
<b>H<sub>5</sub> (%)</b>	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5
<b>H<sub>7</sub> (%)</b>	1.0	2.5	1.0	2.5	1.1	2.8
<b>H<sub>9</sub> (%)</b>	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.7
<b>H<sub>11</sub> (%)</b>	0.4	1.4	0.5	2.0	0.5	2.0
<b>H<sub>13</sub>(%)</b>	0.7	3.0	0.6	2.9	0.7	3.1
<b>THD (%)</b>	THDV = 2.2; THDI = 4.6					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 0.1; V <sub>cero</sub> = 0.1; A <sub>neg</sub> = 1.1; A <sub>cero</sub> = 0.1					
<b>P (kW)</b>	0.37		0.37		0.37	
	1.11					
<b>S (kVA)</b>	0.39		0.38		0.39	
	1.16					
<b>Q (kVAr)</b>	0.12 Ind		0.11 Ind		0.12 Ind	
	0.35 Ind					
<b>PF</b>	0.95		0.95		0.95	
	0.95					
<b>Cos φ</b>	0.95		0.95		0.95	

#### 4.2.2.4. Carga 4: No Lineal y Equilibrada

La carga 4, representada en la figura 4.8, es no lineal y equilibrada. Está compuesta por un rectificador trifásico no controlado con una resistencia en el lado de continua de 242 Ω. En la figura 4.9 se presentan las formas de onda de las intensidades que circulan por cada fase.



**Figura 4.8.** Configuración de la carga 4.

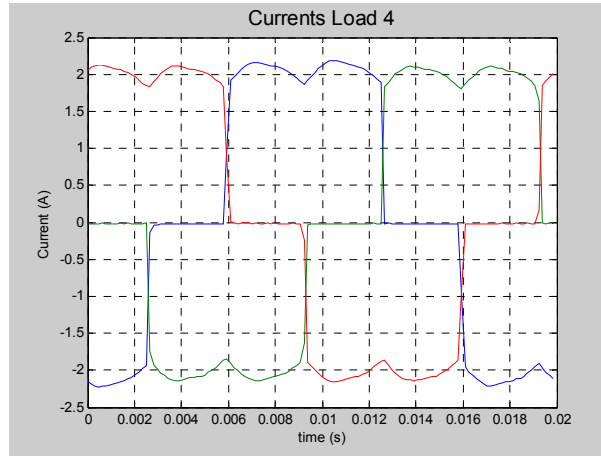


Figura 4.9. Formas de ondas de las intensidades de la carga 4.

En la tabla 4.4 se muestran las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* con la carga 4 conectada a la fuente A, donde la distorsión armónica medida alcanza unos valores de:  $THDV = 1.5\%$  y  $THDI = 29.3\%$ ; y los niveles de desequilibrio de:  $V_{neg} = 0.1$ ,  $V_{cero} = 0.1\%$ ,  $A_{neg} = 0.5\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ . Por otro lado, hay que resaltar que mientras la potencia reactiva medida es nula, se obtiene un *PF* de 0.96 mientras que el  $\cos \varphi$  es igual a la unidad.

Tabla 4.4. Medidas realizadas en el <i>PCC</i> con la carga 4 conectada a la fuente A						
Fase	$L_1$		$L_2$		$L_3$	
	$V_1$	$I_1$	$V_2$	$I_2$	$V_3$	$I_3$
<b>RMS (<math>V, A</math>)</b>	221.8	1.6	221.7	1.6	221.7	1.6
<b>THD (%)</b>	1.4	29.3	1.5	29.4	1.6	29.3
<b><math>H_3</math> (%)</b>	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3
<b><math>H_5</math> (%)</b>	0.3	22.5	0.3	22.5	0.4	22.5
<b><math>H_7</math> (%)</b>	1.0	11.3	1.1	11.5	1.2	11.3
<b><math>H_9</math> (%)</b>	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2
<b><math>H_{11}</math> (%)</b>	0.2	9.2	0.4	9.3	0.4	9.3
<b><math>H_{13}</math> (%)</b>	0.5	6.1	0.5	6.1	0.5	5.9
<b>THD (%)</b>	THDV = 1.5; THDI = 29.3					
<b>Desequilibrio (%)</b>	$V_{neg} = 0.1$ ; $V_{cero} = 0.1$ ; $A_{neg} = 0.5$ ; $A_{cero} = 0.1$					
<b>P (kW)</b>	0.35		0.35		0.35	
	1.04					
<b>S (kVA)</b>	0.35		0.35		0.35	
	1.04					
<b>Q (kVar)</b>	0.00		0.00		0.00	
	0.00					
<b>PF</b>	0.96		0.96		0.96	
	0.96					
<b>Cos <math>\varphi</math></b>	1.00		1.00		1.00	

### 4.3. ESTUDIO DE CASOS EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan una serie de casos prácticos que intentan reproducir a pequeña escala diferentes escenarios que se pueden presentar en un sistema de distribución de baja tensión. Cada caso práctico está constituido por dos test, en el test *A* las cargas se conectarán a la fuente *A*, mientras que en el test *B* las cargas se alimentarán desde la fuente *B*. Por otro lado, para analizar el comportamiento de los índices se han separado las pruebas en dos bloques. En el primer bloque se combinan escenarios de distintas cargas sin incluir aquella que contiene la batería de condensadores (carga 3), mientras que en el segundo bloque se realizan combinaciones que sí incluyen la carga 3.

#### 4.3.1. Casos prácticos sin la presencia de bancos de condensadores

En la tabla 4.5 se presentan todos los casos prácticos realizados sin incluir la carga 3 (carga con banco de condensadores). En rojo se destacan las fuentes que son origen de perturbación en el sistema, mientras que en verde se destacan las cargas consideradas ideales, y por tanto, no son origen de perturbación.

<i>Tabla 4.5.</i> Relación de casos prácticos sin la presencia de cargas capacitivas				
<i>TEST A</i>			<i>TEST B</i>	
Fuente A	Distorsionada y equilibrada		Fuente B	Distorsionada y desequilibrada
<i>Caso 1</i>				
<i>Test A.1</i>			<i>Test B.1</i>	
Carga 1	Lineal y Equilibrada		Carga 1	Lineal y Equilibrada
Carga 2	No Lineal y Desequilibrada		Carga 2	No Lineal y Desequilibrada
<i>Caso 2</i>				
<i>Test A.2</i>			<i>Test B.2</i>	
Carga 1	Lineal y Equilibrada		Carga 1	Lineal y Equilibrada
Carga 4	No Lineal y Equilibrada		Carga 4	No Lineal y Equilibrada
<i>Caso 3</i>				
<i>Test A.3</i>			<i>Test B.3</i>	
Carga 2	No Lineal y Desequilibrada		Carga 2	No Lineal y Desequilibrada
Carga 4	No Lineal y Equilibrada		Carga 4	No Lineal y Equilibrada
<i>Caso 4</i>				
<i>Test A.4</i>			<i>Test B.4</i>	
Carga 1	Lineal y Equilibrada		Carga 1	Lineal y Equilibrada
Carga 2	No lineal y Desequilibrada		Carga 2	No lineal y Desequilibrada
Carga 4	No lineal y Equilibrada		Carga 4	No lineal y Equilibrada

#### 4.3.1.1. Caso práctico 1: Carga lineal y equilibrada, y carga no-lineal y desequilibrada

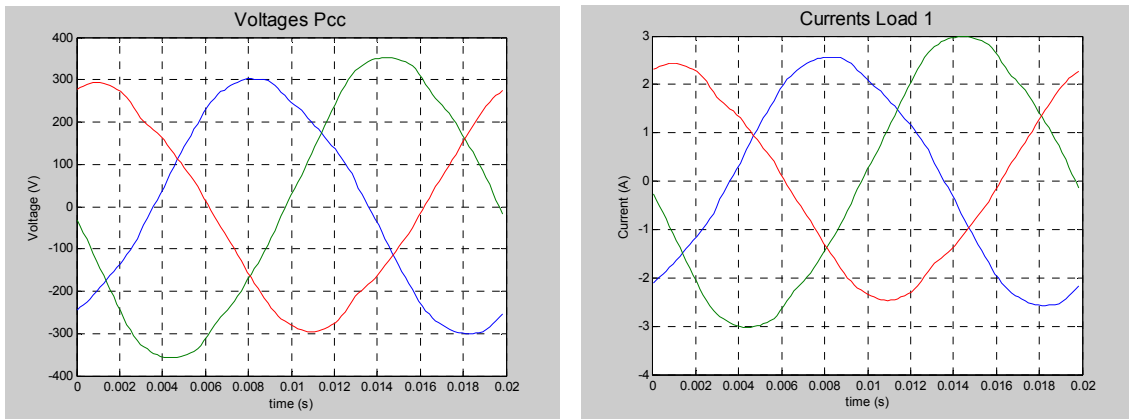
Para el caso 1 la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- Test A1: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON). Carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON) y carga no lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON). ( $S_B$ ,  $S_3$  y  $S_4$  OFF).
- Test B1: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_A$  OFF y  $S_B$  ON). Carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON) y carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON). ( $S_B$ ,  $S_3$  y  $S_4$  OFF).

Las figuras C.1.A y C.1.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.1 y el test B.1 respectivamente, mientras que en las tablas C.1.A y C.1.B (anexo C) se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* en ambos test.

En el test A.1, la fuente de alimentación con un  $THDV = 1.4 \%$  y un desequilibrio despreciable ( $V_{neg} = 0.1 \%$ ), inyecta armónicos al sistema. La carga 1 no genera perturbación, mientras que la carga 2 es fuente de distorsión y desequilibrio. Los efectos resultantes de las perturbaciones provocadas por la fuente y la carga 2 en el sistema se pueden apreciar directamente en las formas de ondas de tensión del *PCC* (figura 4.10), con un  $THDV = 5.1 \%$ ,  $THDI = 8.7 \%$ , y un nivel de desequilibrio de tensiones de  $V_{neg} = 0.4 \%$ ,  $V_{cero} = 12.9 \%$ , y de intensidades de  $A_{neg} = 24.1 \%$  y  $A_{cero} = 0.1 \%$ . Por otro lado, en la figura 4.10 también se puede apreciar como la carga resistiva y equilibrada (carga 1) es afectada de forma directa por las perturbaciones en el *PCC*, con un  $THDI = 5.1 \%$  igual al  $THDV$  del *PCC* y un nivel de desequilibrio de intensidades de igual magnitud al desequilibrio de tensiones del *PCC*.

En el caso Test.B.1 la fuente, además de alimentar al sistema con una distorsión armónica de  $THDV = 1.3 \%$ , incluye un nivel de desequilibrio de  $V_{neg} = 3 \%$ . Estas perturbaciones junto con las que introduce la carga 2, provocan en el *PCC* una distorsión armónica del mismo nivel del Test A.1, pero ahora el grado de desequilibrio de tensión en el *PCC* aumenta a  $V_{neg} = 3.3 \%$ ,  $V_{cero} = 13.1 \%$ , y el de intensidad a  $A_{neg} = 25.8 \%$  y  $A_{cero} = 0.1 \%$ .



**Figura 4.10.** Formas de ondas de las tensiones en el PCC y de las intensidades de la carga 1 medidas en el test A.1.

La tabla 4.6 presenta los valores de los índices distribuidos medidos en el caso 1. En este caso, tanto la fuente como la carga 2 son fuentes de perturbación del sistema y en ambos casos los tres índices identifican claramente la carga 1 como una carga no perturbadora (valores menores que 1) y la carga 2 como una fuente de perturbación (valores mayores que 1). Por otro lado, comparando los resultados de los índices en las dos pruebas, se puede observar que, aunque los valores de los índices Theta 1 y Theta 2 caracterizan la carga desequilibrada no lineal de una manera clara, sus valores presentan una variación mayor que la producida por el índice global Theta 3 frente al cambio de las condiciones de la fuente.

**Tabla 4.6.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 1

	<i>Test A.1</i>			<i>Test B.1</i>			
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	
<b>Carga 1</b>	0.72	0.39	0.88	<b>Carga 1</b>	0.70	0.38	0.89
<b>Carga 2</b>	1.76	1.60	1.31	<b>Carga 2</b>	2.12	1.69	1.38

#### 4.3.1.2. Caso experimental 2: Carga lineal y equilibrada, y carga no-lineal y equilibrada

Para el caso 2, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

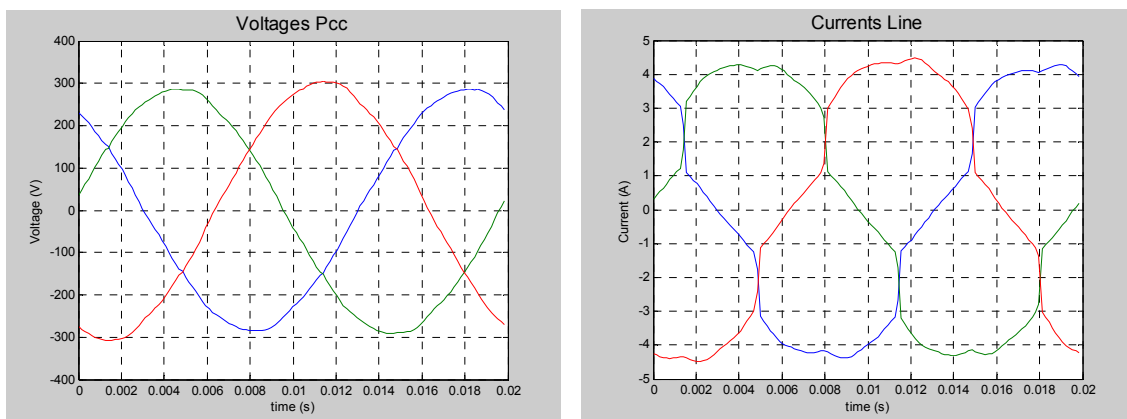
- *Test A2:* Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$ ,  $S_2$  y  $S_3$  OFF).

- **Test B2:** Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_A$ ,  $S_2$  y  $S_3$  OFF).

Las figuras C.2.A y C.2.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.2 y test B.2 respectivamente, mientras que en las tablas C.2.A y C.2.B (anexo C) se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* en ambos test.

En el test A.2 todos los agentes del sistema son prácticamente equilibrados, lo que provoca que las intensidades que circulan por la impedancia de línea formen un sistema equilibrado, de tal forma que el desequilibrio de tensión en el *PCC* es similar al que presenta la fuente de alimentación  $V_{neg} = 0.2 \%$  y  $V_{cero} = 0.7 \%$ , mientras que el grado de desequilibrio de intensidades que circulan por la línea de alimentación a las cargas es de  $A_{neg} = 0.4$  y  $A_{cero} = 0.2 \%$ . Con respecto al análisis de distorsión armónica en el sistema, son la fuente de alimentación y la carga 4 las que provocan una distorsión en el *PCC*, con valores de  $THDV = 1.5 \%$  y  $THDI = 13.4$ .

La única fuente de desequilibrio del sistema en el Test B.2 es la fuente de alimentación B, lo que provoca que las corrientes que circulan por la línea conformen un sistema desequilibrado, esto causa un grado de desequilibrio en el *PCC* de  $V_{neg} = 3.2 \%$ ,  $V_{cero} = 0.7 \%$  y  $A_{neg} = 2.9 \%$  y  $A_{cero} = 0.2 \%$ . Los valores de distorsión armónica en el *PCC* se mantienen prácticamente igual que en el caso anterior, con un  $THDV = 1.5 \%$  y  $THDI = 13.6 \%$ . En la figura 4.11 se muestran las formas de ondas de las tensiones en el *PCC* y las intensidades que circulan por la línea para el caso Test B.2.



**Figura 4.11.** Formas de ondas de las tensiones en el *PCC* e intensidades de línea para el Test B.2.

Los resultados de los índices distribuidos obtenidos en el caso 2 se presentan en la tabla 4.7. Al igual que en el caso 1, los tres índices reconocen a la carga 1 como una carga lineal y equilibrada frente a las fuentes de perturbaciones (fuente de alimentación y carga 4). En este caso, se puede apreciar como los tres índices se presentan estables para identificar las cargas frente a las variaciones de desequilibrio producidas por la red. Por otro lado, cabe destacar que el índice Theta 3 identifica la carga 1 (resistiva y equilibrada) con valores por debajo de 0.3 en ambos casos.

**Tabla 4.7.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 2

	<i>Test A.2</i>			<i>Test B.2</i>			
	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	
<b>Carga 1</b>	0.37	0.46	0.25	<b>Carga 1</b>	0.40	0.41	0.22
<b>Carga 4</b>	2.70	2.28	1.75	<b>Carga 4</b>	2.74	2.30	1.65

#### 4.3.1.3. Caso experimental 3: Carga no-lineal y desequilibrada, y carga no-lineal y equilibrada

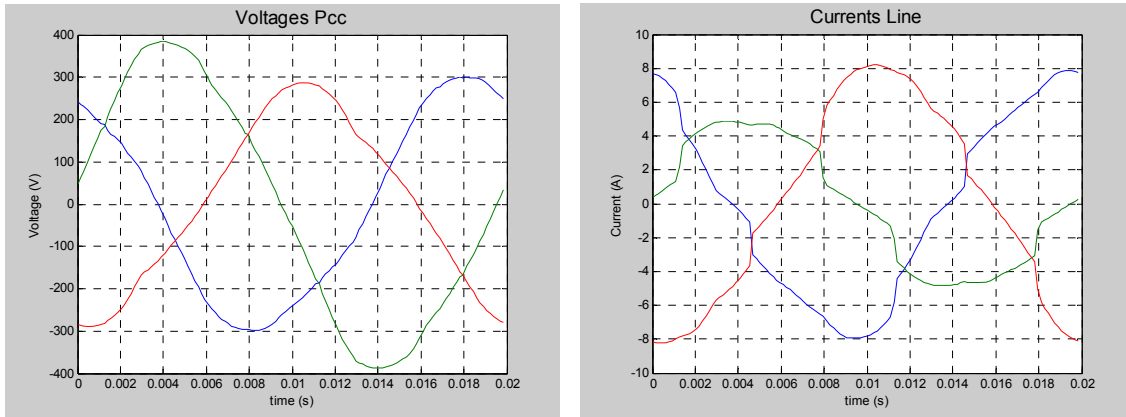
Para el caso 3, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- *Test A.3: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$ ,  $S_1$  y  $S_3$  OFF).*
- *Test B.3: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_A$ ,  $S_1$  y  $S_3$  OFF).*

Las figuras C.3.A y C.3.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.3 y test B.3 respectivamente, mientras que en las tablas C.3.A y C.3.B (anexo C) se indican los valores de las medidas  $EPQ$  realizadas en el  $PCC$  en ambos test.

En este caso las cargas y las fuentes de alimentación se pueden considerar como fuentes de distorsión y/o desequilibrio. En el test A.3, tanto las cargas como la fuente A inyectan armónicos al sistema, si bien no todos lo hacen al mismo nivel, mientras la carga 2 presenta un valor de  $THDI = 12.6\%$  (tabla 4.2), la carga 4 se caracteriza por un valor de  $THDI = 29.3\%$  (tabla 4.4) al ser alimentadas de forma independiente por la fuente A. Con respecto al análisis del grado de desequilibrio en el Test A.3, la única fuente de desequilibrio del sistema es la carga 2, mientras que la carga 4 y la fuente A son

dispositivos con un grado de desequilibrio despreciable. En la figura 4.12 se muestran las formas de ondas de la tensión en el PCC en intensidades de línea para el test A.3, en este caso los valores de distorsión armónica medidos en el PCC son:  $THDV = 7.9\%$  y  $THDI = 12.2\%$ , mientras que el grado de desequilibrio es de  $V_{neg} = 0.4\%$ ,  $V_{cero} = 20.6\%$ ,  $A_{neg} = 26.9\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ .



**Figura 4.12.** Formas de ondas de las tensiones en el PCC e intensidades de línea para el Test A.3.

Por otro lado, los valores de  $EPQ$  obtenidos en el PCC en el Test B.3 son:  $THDV = 7.9\%$  y  $THDI = 12.5\%$ , mientras que el nivel de desequilibrio es de  $V_{neg} = 3.3\%$ ,  $V_{cero} = 20.9\%$ ,  $A_{neg} = 28.4\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ .

Los resultados de los índices distribuidos obtenidos en el caso 3 se presentan en la tabla 4.8. Los índices Theta 1 y Theta 2 identifican erróneamente a la carga 4 como carga no perturbadora en el test A.3, mientras que en el test B.3 todos los índices identifican correctamente a las dos cargas. Por otro lado, cabe destacar que, si bien el índice Theta 3 presenta una mayor estabilidad en el caso 3 frente al desequilibrio de la fuente, los valores obtenidos en la identificación de la carga 2 están muy cerca del valor umbral en ambos test.

**Tabla 4.8.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 3

	<i>Test A.3</i>			<i>Test B.3</i>			
	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	
<b>Carga 2</b>	1.48	1.39	1.04	<b>Carga 2</b>	1.15	1.25	1.01
<b>Carga 4</b>	<b>0.95</b>	<b>0.90</b>	1.13	<b>Carga 4</b>	2.38	1.35	1.49

#### **4.3.1.4. Caso experimental 4: Carga lineal y equilibrada, carga no-lineal y desequilibrada, y carga no-lineal y equilibrada**

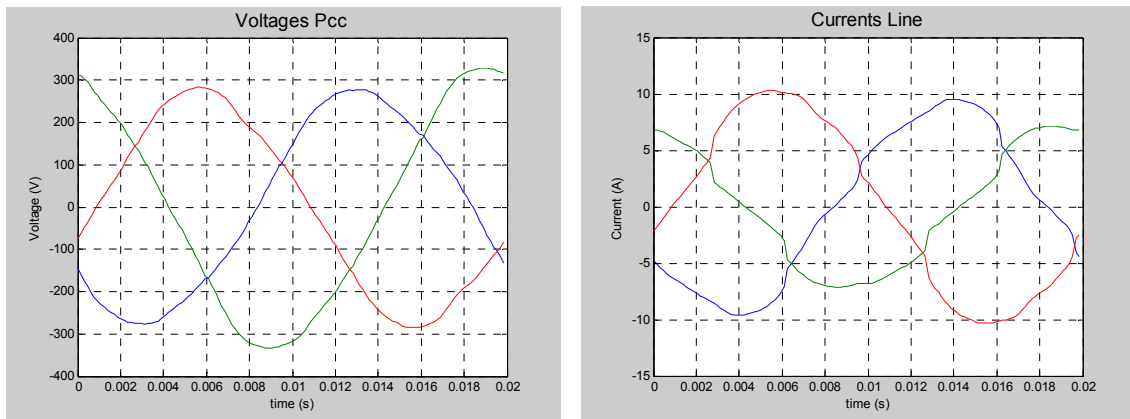
Para el caso 4, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- *Test A.4: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$  y  $S_3$  OFF).*
- *Test B.4: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$  y  $S_3$  OFF).*

Las figuras C.4.A y C.4.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.4 y test B.4 respectivamente, mientras que en las tablas C.4.A y C.4.B (anexo C) se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* en ambos test.

En este caso se conectan tres cargas a la fuente, la carga 1 es lineal y equilibrada, el resto de las cargas y el suministro eléctrico son fuentes de perturbaciones en el sistema. En el test A.4 la única carga que presenta desequilibrio de intensidades es la carga 2 mientras que la carga 4 si bien es equilibrada, presenta una distorsión armónica considerable (tabla 4.4). En este caso los valores de distorsión armónica medidos en el *PCC* son de  $THDV = 5.2\%$  y  $THDI = 9.3\%$ , mientras que los valores del nivel de desequilibrio obtenidos en el *PCC* son de:  $V_{neg} = 0.5\%$ ,  $V_{cero} = 12.9\%$ ,  $A_{neg} = 18.5\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ .

En el Test B.4, la fuente de alimentación del sistema también presenta desequilibrio al igual que la carga 2, dando lugar a unos valores del grado de desequilibrio en el *PCC* de  $V_{neg} = 3.3\%$ ,  $V_{cero} = 13.0\%$ ,  $A_{neg} = 20.4\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ . Mientras que los valores de distorsión armónica alcanzan unos niveles de:  $THDV = 5.1\%$  y  $THDI = 9.6\%$ . En la figura 4.13 se presentan las formas de onda de tensión en el *PCC* y las de intensidad de línea obtenidas en el Test B.4.



**Figura 4.13.** Formas de ondas de las tensiones en el PCC e intensidades de línea para el Test B.4.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.9, donde se puede apreciar como los tres índices identifican correctamente a todas las cargas en los dos test. Por otro lado, el índice Theta 3 identifica la carga ideal en ambos test con valores por debajo de 0.4, mientras que para la carga 2 (No lineal y desequilibrada) lo hace con valores muy cercanos al umbral. Con respecto al comportamiento del índice Theta 1, cabe destacar la variación que sufre a la hora de identificar la carga 4 en ambos test (1.42 y 2.20 respectivamente). El índice Theta 2 muestra un comportamiento más estable en ambos test.

**Tabla 4.9.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 4

	<i>Test A.4</i>			<i>Test B.4</i>			
	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	
<b>Carga 1</b>	0.80	0.48	0.35	<b>Carga 1</b>	0.77	0.45	0.35
<b>Carga 2</b>	2.40	1.99	1.02	<b>Carga 2</b>	2.61	2.01	1.04
<b>Carga 4</b>	1.42	1.19	1.52	<b>Carga 4</b>	2.20	1.39	1.67

### **4.3.2. Casos prácticos en presencia de bancos de condensadores**

En los sistemas de potencia eléctricos es generalizado el uso de condensadores, en concreto, cabe destacar el uso de batería de condensadores para la compensación del factor de potencia. La compensación de un bajo factor de potencia se traduce en un mayor rendimiento de la instalación ya que se consigue la reducción de la tensión en el sistema de generación y distribución, y una disminución de las pérdidas de potencia. Así las empresas suministradoras de energía eléctrica penalizan económicamente a las empresas con bajo factor de potencia, obligando a los consumidores a instalar bancos de condensadores en su instalación. Sin embargo, el comportamiento de los condensadores en una red que opera en condiciones de distorsión armónica puede limitar su funcionamiento pudiendo incluso causar serios problemas en el sistema de potencia [117, 118].

Además, como se ha comprobado en los casos anteriores el sistema eléctrico de potencia absorbe la corriente de convertidores y cargas electrónicas. Estas corrientes distorsionadas producen caídas de tensión en la impedancia inductiva de la red lo que provoca la aparición de picos de tensión en la forma de onda de tensión en el *PCC*. Como resultado, se produce un aumento de la corriente consumida por las cargas del sistema debido a que las cargas capacitivas tienden a amplificar los armónicos en la instalación.

A continuación, se desarrollan una serie de casos en los que se incluyen combinaciones de diferentes cargas con una carga inductiva y equilibrada con un banco de condensadores en cabecera para compensar el factor de potencia (carga 3). En la tabla 4.10 se presentan los diferentes casos estudiados, destacando en rojo las cargas perturbadoras conectadas al sistema y en verde las cargas no perturbadoras.

<b>Tabla 4.10.</b> Relación de casos realizados en presencia de bancos de condensadores			
<b>TEST A</b>		<b>TEST B</b>	
<b>Fuente A</b>	Distorsionada y equilibrada	<b>Fuente B</b>	Distorsionada y desequilibrada
<b>Caso 5</b>			
<b>Test A.5</b>		<b>Test B.5</b>	
<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada	<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada
<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)	<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)
<b>Caso 6</b>			
<b>Test A.6</b>		<b>Test B.6</b>	
<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)	<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)
<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada	<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada
<b>Caso 7</b>			
<b>Test A.7</b>		<b>Test B.7</b>	
<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada (R)	<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada (R)
<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada	<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada
<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)	<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)
<b>Caso 8</b>			
<b>Test A.8</b>		<b>Test B.8</b>	
<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada (R)	<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada (R)
<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)	<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)
<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada	<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada
<b>Caso 9</b>			
<b>Test A.9</b>		<b>Test B.9</b>	
<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada	<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada
<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)	<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)
<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada	<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada
<b>Caso 10</b>			
<b>Test A.10</b>		<b>Test B.10</b>	
<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada (R)	<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada (R)
<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada	<b>Carga 2</b>	No lineal y desequilibrada
<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)	<b>Carga 3</b>	Lineal y Equilibrada (RLC)
<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada	<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada

#### 4.3.2.1. Caso 5: Carga no-lineal y desequilibrada, y carga lineal y equilibrada con banco de condensadores

Para el caso 5, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- *Test A.5: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON). ( $S_B$ ,  $S_1$  y  $S_4$  OFF).*
- *Test B.5: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON). ( $S_A$ ,  $S_1$  y  $S_4$  OFF).*

Las figuras C.5.A y C.5.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.5 y test B.5 respectivamente, mientras que en las tablas C.5.A y C.5.B (anexo C) se indican los valores de las medidas  $EPQ$  realizadas en el  $PCC$  en ambos test.

Las perturbaciones introducidas por la fuente A y la carga 2 provocan unos valores de distorsión armónica en el  $PCC$  de:  $THDV = 6.9\%$  y  $THDI = 8.7\%$ , mientras que el grado de desequilibrio se caracteriza por unos valores de:  $V_{neg} = 0.5\%$ ,  $V_{cero} = 13.1\%$ ,  $A_{neg} = 26.0\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ .

En el Test B.5 tanto la fuente de alimentación del sistema (fuente B) como la carga 2 presentan distorsión armónica y desequilibrio, como resultado las tensiones en el  $PCC$  muestran unos valores de distorsión armónica similares al test A.5:  $THDV = 7.0\%$  y  $THDI = 8.7\%$ . Por otro lado, los valores del grado de desequilibrio medidos en el  $PCC$  son de  $V_{neg} = 3.3\%$ ,  $V_{cero} = 13.3\%$ ,  $A_{neg} = 27.7\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ .

Como se refleja en la tabla 4.11, tanto en el test A.5 como en el test B.5 los tres índices identifican a la carga 2 como fuente de perturbación, y a la carga 3 como carga lineal y equilibrada.

**Tabla 4.11.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 5

	<i>Test A.5</i>			<i>Test B.5</i>			
	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	
<b>Carga 2</b>	1.57	1.49	1.08	<b>Carga 2</b>	2.09	1.63	1.19
<b>Carga 3</b>	0.76	0.66	0.63	<b>Carga 3</b>	0.82	0.78	0.73

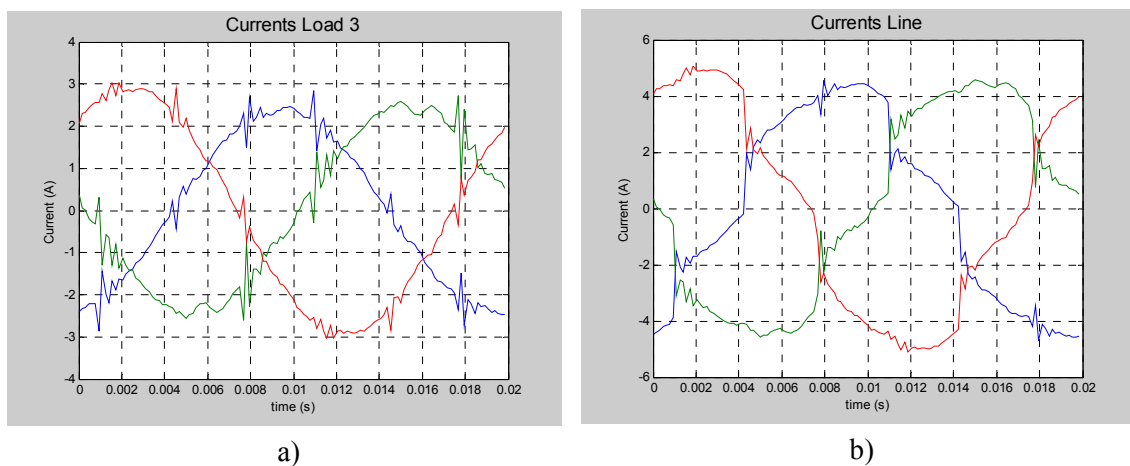
### 4.3.2.2. Caso 6: Carga lineal y equilibrada con banco de condensadores, y carga no-lineal y equilibrada

Para el caso 6, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- Test A.6: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$ ,  $S_1$  y  $S_2$  OFF).
- Test B.6: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_A$ ,  $S_1$  y  $S_2$  OFF).

Las figuras C.6.A y C.6.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.6 y test B.6 respectivamente, mientras que en las tablas C.6.A y C.6.B (anexo C) se indican los valores de las medidas  $EPQ$  realizadas en el  $PCC$  en ambos test.

El test A.6 presenta dos características destacables, la primera es que ningún elemento del sistema presenta desequilibrio, y la segunda es que la carga 4 es una carga caracterizada por una elevada distorsión. La figura 4.14 a) y b) muestran el efecto del banco de condensadores de la carga 3 sobre las intensidades que circulan por la línea que alimenta a las cargas. Los valores de distorsión armónica medidos en el  $PCC$  son:  $THDV = 2.1 \%$  y  $THDI = 14.9 \%$ , mientras que el grado de desequilibrio se caracteriza por unos valores de:  $V_{neg} = 0.2 \%$ ,  $V_{cero} = 0.1 \%$ ,  $A_{neg} = 7.4 \%$  y  $A_{cero} = 0.2 \%$ .



**Figura 4.14.** Formas de ondas de intensidad medidas en el test A.6 en:  
a) Carga 3 y b) Línea de alimentación a las cargas.

En el Test B.6 es la fuente  $B$  la única causante del grado de desequilibrio del sistema, dando lugar a unos valores de distorsión armónica en el  $PCC$  de:  $THDV = 2.5 \%$  y  $THDI = 17.6 \%$ . Mientras que el nivel de desequilibrio medido es de:  $V_{neg} = 3.1 \%$ ,  $V_{cero} = 0.0 \%$ ,  $A_{neg} = 10.4 \%$  y  $A_{cero} = 0.2 \%$ .

Los resultados de los índices obtenidos en el caso 6 se presentan en la tabla 4.12. Tanto en el test A.6 como en el test B.6 los índices Theta 1 y Theta 3 presentan a la carga 3 como carga ideal mientras que el índice Theta 2 la identifica erróneamente como fuente de perturbación. En ambos test el índice Theta 3 es el que más claramente identifica a la carga 3 como lineal. Por otro lado, los tres índices identifican de forma acertada a la carga 4 como fuente de perturbación.

**Tabla 4.12.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 6

	<i>Test A.6</i>			<i>Test B.6</i>			
	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	
<b>Carga 3</b>	0.78	<b>1.12</b>	0.65	<b>Carga 3</b>	0.82	<b>1.17</b>	0.74
<b>Carga 4</b>	2.18	1.31	1.34	<b>Carga 4</b>	2.01	1.22	1.21

#### 4.3.2.3. Caso 7: Carga lineal y equilibrada, Carga no-lineal y desequilibrada, y carga lineal y equilibrada con banco de condensadores

Para el caso 7, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- *Test A.7: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON) y carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON). ( $S_B$  y  $S_4$  OFF).*
- *Test B.7: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON) y carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON). ( $S_A$  y  $S_4$  OFF).*

Las figuras C.7.A y C.7.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.7 y test B.7 respectivamente, mientras que en las tablas C.7.A y C.7.B (anexo C) se indican los valores de las medidas  $EPQ$  realizadas en el  $PCC$  en ambos test.

En el test A.7 se han conectado dos cargas lineales y equilibradas (cargas 1 y 3) con una carga no-lineal y desequilibrada (carga 2). La distorsión armónica introducida en el

sistema por la fuente *A* y la carga 2 da como resultado unos valores de distorsión armónica en el *PCC* de:  $THDV = 4.9 \%$  y  $THDI = 6.7$ ; mientras que los valores del grado de desequilibrio obtenidos son de:  $V_{neg} = 0.4 \%$ ,  $V_{cero} = 9.5 \%$ ,  $A_{neg} = 18.9 \%$  y  $A_{cero} = 0.1 \%$ .

En el test B.7, la fuente *B* y la carga 2 contienen distorsión armónica y desequilibrio. Los valores de distorsión armónica medidos en el *PCC* se mantienen en los mismos niveles del test anterior, mientras que el grado de desequilibrio medido en el *PCC* es de:  $V_{neg} = 3.3 \%$ ,  $V_{cero} = 9.6 \%$ ,  $A_{neg} = 21.0 \%$  y  $A_{cero} = 0.1 \%$ .

En la tabla 4.13 se muestran los valores de los índices del caso 7. Los tres índices identifican a las tres cargas en ambos test. Cabe destacar que el desequilibrio introducido por la fuente *B* provoca un aumento considerable en el índice Theta 1 a la hora de identificar la carga 2, pasando de un valor de 2.48 a 4.00, mientras que el rango de valores que presentan los índices globales Theta 2 y Theta 3 en ambos test son muy reducidos en todas las cargas.

**Tabla 4.13.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 7

	<i>Test A.7</i>			<i>Test B.7</i>			
	$\mathfrak{g}_1$	$\mathfrak{g}_2$	$\mathfrak{g}_3$	$\mathfrak{g}_1$	$\mathfrak{g}_2$	$\mathfrak{g}_3$	
<b>Carga 1</b>	0.71	0.40	0.68	<b>Carga 1</b>	0.68	0.37	0.71
<b>Carga 2</b>	2.48	2.07	1.46	<b>Carga 2</b>	4.00	2.33	1.72
<b>Carga 3</b>	0.79	0.77	0.51	<b>Carga 3</b>	0.87	0.90	0.62

#### 4.3.2.4. Caso 8: Carga lineal y equilibrada, Carga lineal y equilibrada con banco de condensadores, y carga no-lineal y equilibrada

Para el caso 8, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

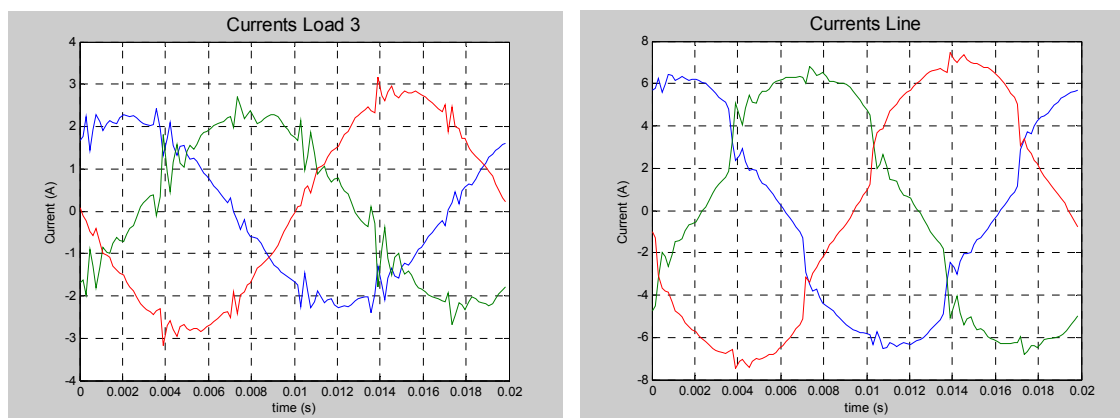
- *Test A.8: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON) y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$  y  $S_2$  OFF).*
- *Test B.8: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON). y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_A$  y  $S_2$  OFF).*

Las figuras C.8.A y C.8.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.8 y test B.8

respectivamente, mientras que en las tablas C.8.A C.8.B (anexo C) se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* en ambos test.

El caso 8 combina dos cargas lineales y equilibradas, una de ellas con banco de condensadores en su cabecera, con la carga 4 (No lineal y equilibrada), de forma que la única fuente de desequilibrio del sistema es la fuente de alimentación. Como resultado, en el *PCC* se obtienen uno valores de distorsión de:  $THDV = 1.4 \%$  y  $THDI = 9.3 \%$ . Por otro lado, los valores del nivel de desequilibrio medidos en el *PCC* son de:  $V_{neg} = 0.2 \%$ ,  $V_{cero} = 0.4 \%$ ,  $A_{neg} = 4.6 \%$  y  $A_{cero} = 0.1 \%$ .

Las formas de ondas de intensidad medidas en la carga 3 y en la línea de alimentación en el test B.8 se muestran en la figura 4.15, donde se puede apreciar el efecto del banco de condensadores sobre la intensidad de la línea que alimenta a las cargas.



**Figura 4.15.** Formas de ondas de intensidad medidas en el test B.8 en:  
a) Carga 3 y b) Línea de alimentación a las cargas.

El desequilibrio introducido por la fuente *B* provoca un grado de desequilibrio en el *PCC* de:  $V_{neg} = 3.2 \%$ ,  $V_{cero} = 0.4 \%$ ,  $A_{neg} = 7.8 \%$  y  $A_{cero} = 0.0 \%$ . Por otro lado, los valores de distorsión armónica medidos en el *PCC* son:  $THDV = 1.6 \%$  y  $THDI = 10.4 \%$ .

Los valores de los índices del caso 8 se muestran en la tabla 4.14. En este caso es el índice Theta 3 el único que identifica correctamente a todas las cargas en los dos test. Por el contrario, tanto el índice Theta 1 como el índice Theta 2 la identifican erróneamente la carga 3. Por otro lado, el índice Theta 1 identifica a la carga no lineal y equilibrada con valores muy dispares en ambos test 4.61 y 3.18, mientras que el índice Theta 3 marca la carga lineal y equilibrada con valores por debajo de 0.25 en ambos test y el índice Theta 2 con valores de 0.17 y 0.19 respectivamente.

**Tabla 4.14.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 8

	<i>Test A.8</i>			<i>Test B.8</i>			
	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	$\mathcal{I}_1$	$\mathcal{I}_2$	$\mathcal{I}_3$	
<b>Carga 1</b>	0.40	0.17	0.19	<b>Carga 1</b>	0.42	0.19	0.23
<b>Carga 3</b>	<b>1.12</b>	<b>1.81</b>	0.73	<b>Carga 3</b>	<b>1.69</b>	<b>2.04</b>	0.84
<b>Carga 4</b>	4.61	2.13	1.90	<b>Carga 4</b>	3.18	1.77	1.76

**4.3.2.5. Caso 9: Carga no-lineal y desequilibrada, carga lineal y equilibrada con banco de condensadores, y carga no-lineal y equilibrada**

Para el caso 9, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- *Test A.9: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), Carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON), y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$  y  $S_1$  OFF).*
- *Test B.9: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), Carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON), y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_A$  y  $S_1$  OFF).*

Las figuras C.9.A y C.9.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.9 y test B.9 respectivamente, mientras que en las tablas C.9.A y C.9.B (anexo C) se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* en ambos test.

La particularidad principal que se presenta en el caso 9, es que la única carga lineal y equilibrada presente en el sistema posee un banco de condensadores. Las perturbaciones inyectadas por la fuente y las cargas 2 y 4 provocan una distorsión armónica en el *PCC* de:  $THDV = 6.9\%$  y  $THDI = 9.4\%$ , y unos niveles de desequilibrio de  $V_{neg} = 0.5\%$ ,  $V_{cero} = 13.2\%$ ,  $A_{neg} = 20.0\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ .

En el test B.9 los niveles de desequilibrio medidos en el *PCC* son:  $V_{neg} = 3.3\%$ ,  $V_{cero} = 13.4\%$ ,  $A_{neg} = 22.0\%$  y  $A_{cero} = 0.1\%$ , mientras que las medidas de distorsión armónica obtenidas son prácticamente iguales, con unos valores de:  $THDV = 6.9\%$  y  $THDI = 9.9\%$ .

En la tabla 4.15 se presentan los resultados de los índices obtenidos en el caso 9. Cabe destacar que el único índice que identifica de forma correcta a todas las cargas en ambos

test es el índice Theta 3. Los índices Theta 1 y Theta 2 identifican correctamente a la carga 3 (lineal y equilibrada) en el test A.9 pero no en el test B.9. Por otro lado, el índice Theta 1 vuelve a identificar a la carga 4 con valores muy dispares frente al desequilibrio de la fuente tomando valores de 1.29 en un caso y 4.80 en el otro.

**Tabla 4.15.** Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 9

	<i>Test A.9</i>			<i>Test B.9</i>			
	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	
<b>Carga 2</b>	2.12	1.87	1.05	<b>Carga 2</b>	1.68	1.71	1.04
<b>Carga 3</b>	0.89	0.87	0.46	<b>Carga 3</b>	<b>1.23</b>	<b>1.15</b>	0.69
<b>Carga 4</b>	1.29	1.11	1.32	<b>Carga 4</b>	4.80	1.82	1.84

#### 4.3.2.6. Caso 10: Carga lineal y equilibrada, carga no-lineal y desequilibrada, carga lineal y equilibrada con banco de condensadores y carga no-lineal y equilibrada

Para el caso 10, la plataforma experimental se ha configurado de la siguiente manera:

- *Test A.10: Fuente de alimentación distorsionada y equilibrada ( $S_A$  ON), Carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON), y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_B$  OFF).*
- *Test B.10: Fuente de alimentación distorsionada y desequilibrada ( $S_B$  ON), Carga lineal y equilibrada ( $S_1$  ON), carga no-lineal y desequilibrada ( $S_2$  ON), carga lineal y equilibrada con banco de condensadores ( $S_3$  ON), y carga no-lineal y equilibrada ( $S_4$  ON). ( $S_A$  OFF).*

Las figuras C.10.A y C.10.B del anexo C, muestran las formas de ondas de tensión e intensidad medidas en los diferentes puntos del sistema durante el test A.10 y test B.10 respectivamente, mientras que en las tablas C.10.A y C.10.B (anexo C) se indican los valores de las medidas *EPQ* realizadas en el *PCC* en ambos test.

Para realizar el caso 10 se han conectado al mismo tiempo las cuatro cargas. Las formas de ondas de tensión generadas en el *PCC* y las intensidades de línea del test A.10 se muestran en la figura 4.16. Los valores de distorsión armónica medidos en el *PCC* son:  $THDV = 5.0 \%$  y  $THDI = 7.6 \%$ , mientras que los valores del grado de desequilibrio son:  $V_{neg} = 0.5 \%$ ,  $V_{cero} = 9.6 \%$ ,  $A_{neg} = 15.4 \%$  y  $A_{cero} = 0.0 \%$ .

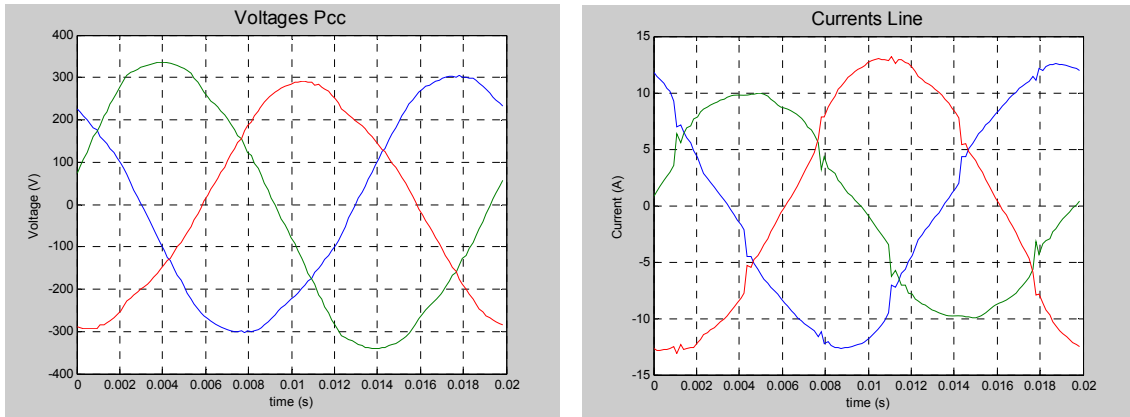


Figura 4.16. Formas de ondas de tensión medidas en el PCC y de intensidades de línea para el test A.10.

En el test B.10 el desequilibrio de la red junto con el de la carga 2, provoca un nivel de desequilibrio en el PCC de:  $V_{neg} = 3.3 \%$ ,  $V_{cero} = 9.7 \%$ ,  $A_{neg} = 17.7 \%$  y  $A_{cero} = 0.0 \%$ , mientras que los valores de distorsión medidos son:  $THDV = 4.9 \%$  y  $THDI = 8.1 \%$ .

En la tabla 4.16 se muestran los valores de los índices del caso 10. En este caso los tres índices identifican correctamente a las cargas 1,2 y 4. Sin embargo el único índice que identifica correctamente a la carga 3 (lineal y equilibrada con banco de condensadores) en los dos test es el Theta 3. El índice Theta 1 no acierta en el test B.3 a la hora de identificar la carga 3, mientras que el índice Theta 2 la identifica erróneamente en los dos test. Por otro lado, el índice Theta 3 vuelve a identificar a la carga 1 con valores por debajo de 0.35 en ambos test, mientras que el índice Theta 1 incide en la inestabilidad a la hora de identificar la carga 4 frente a la variación del desequilibrio de la red, pasando de un valor de 1.96 a 6.60.

Tabla 4.16. Valores de los índices distribuidos obtenidos en el caso 10

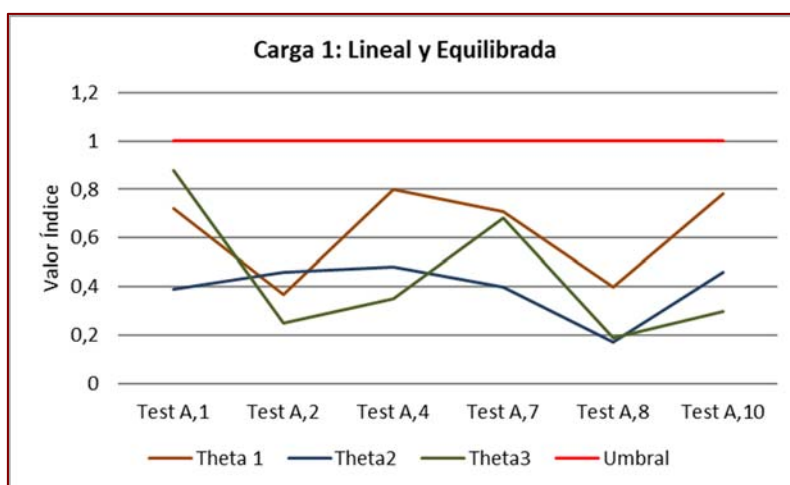
	Test A.10			Test B.10			
	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	
<b>Carga 1</b>	0.78	0.46	0.30	<b>Carga 1</b>	0.73	0.42	0.32
<b>Carga 2</b>	3.16	2.46	1.18	<b>Carga 2</b>	2.87	2.32	1.15
<b>Carga 3</b>	0.97	<b>1.05</b>	0.50	<b>Carga 3</b>	<b>1.24</b>	<b>1.22</b>	0.63
<b>Carga 4</b>	1.96	1.41	1.64	<b>Carga 4</b>	6.60	2.15	2.26

#### 4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez mostrados los resultados obtenidos en los diferentes casos realizados, se procede a estudiar el comportamiento de los índices frente a los cambios en las condiciones del sistema. Para ello, se representan las variaciones de los valores de los índices de cada carga en los dos escenarios estudiados en el apartado 4.3. En primer lugar, se presentan los resultados de los test *A*, esto es, la alimentación del sistema procedente de la fuente *A*, con el nivel de distorsión y desequilibrio propios de la red de distribución en baja tensión. Por otro lado, los resultados obtenidos a partir de la fuente *B* (test *B*), con el nivel de distorsión propio de la red, pero ajustando el grado de desequilibrio de tensión al 3%.

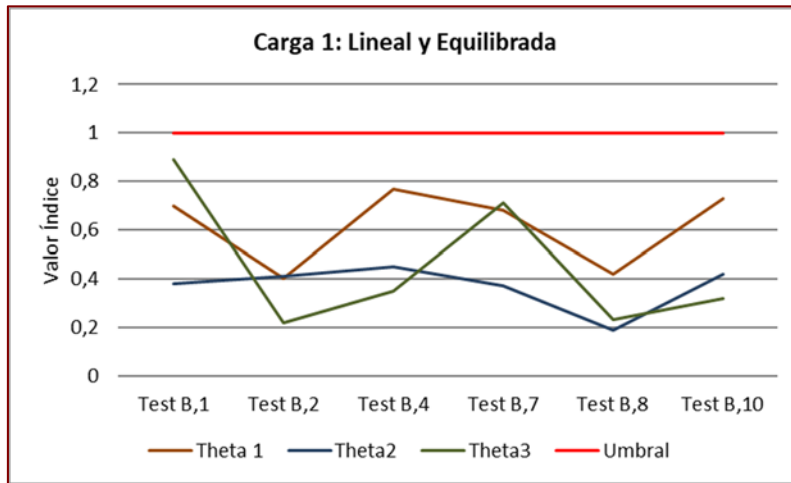
##### 4.4.1. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada

La carga 1 es lineal y equilibrada; en la figura 4.17 se muestran los resultados obtenidos en la identificación de la carga 1 cuando al sistema está alimentado por la fuente *A*. Se puede apreciar como los tres índices identifican a la carga 1 como lineal y equilibrada en todos los escenarios realizados.



**Figura 4.17.** Resultados obtenidos para identificar la carga 1 con el sistema alimentado con la fuente *A*.

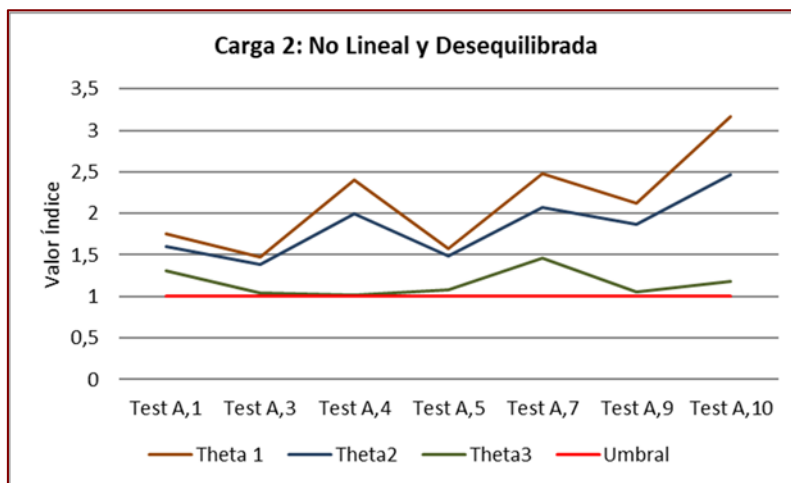
Por otro lado, en la figura 4.18 se representan los resultados obtenidos en los mismos test, pero utilizando la fuente *B*. Al igual que el caso anterior los tres índices identifican la forma clara la linealidad y el equilibrio de la carga 1.



**Figura 4.18.** Resultados obtenidos para identificar la carga 1 con el sistema alimentado con la fuente *B*.

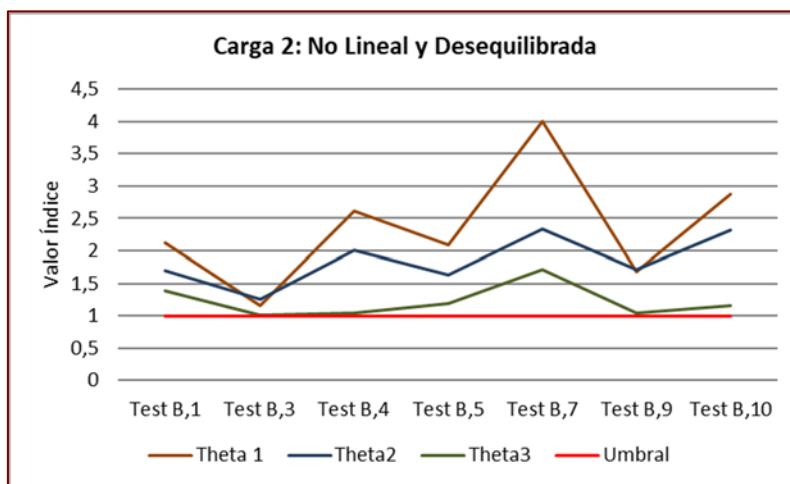
#### 4.4.2. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y desequilibrada

La carga 2 es una carga no lineal y desequilibrada; en la figura 4.19 se muestran los resultados obtenidos en la identificación de la carga 2 cuando al sistema está alimentado por la fuente *A*. En este caso, los tres índices identifican a la carga 2 como fuente de perturbación. Debido a la definición concreta de cada índice, Theta 1 y Theta 2 adquieren valores con un sesgo claramente superior a 1, mientras que Theta 3 se mueve en un rango cercano al umbral.



**Figura 4.19.** Resultados obtenidos para identificar la carga 2 con el sistema alimentado con la fuente *A*.

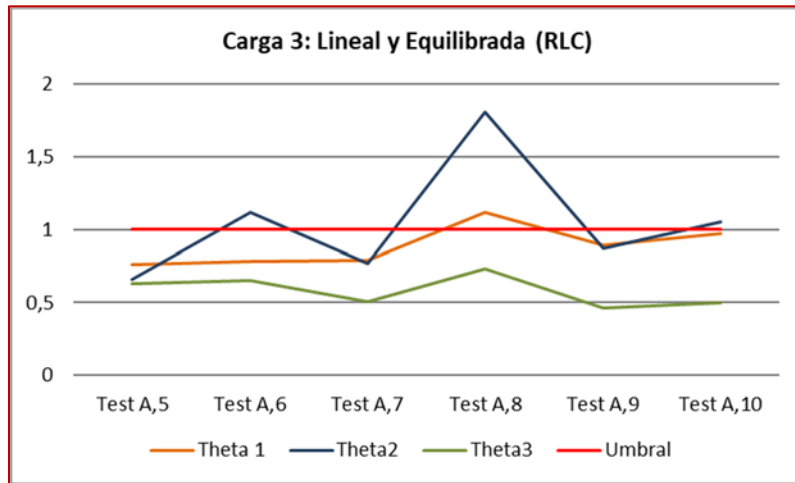
En la figura 4.20 se representan los resultados obtenidos en los mismos casos, pero ahora a través de la fuente *B*. El desequilibrio de la fuente de alimentación provoca un comportamiento diferente en los tres índices. Con respecto a los resultados que ofrece el índice Theta 1 cabe destacar que sigue identificando a la carga 2 como fuente de perturbación, si bien muestra un comportamiento poco estable, sobre todo en el caso 7 (el sistema alimenta al mismo tiempo a las cargas 1, 2 y 3) que pasa de un valor de 2.48 para el Test A.7 a un valor de 4.00 para el test B.7. El índice Theta 2 identifica a la carga 2 de forma correcta en todos los casos y muestra un comportamiento más estable que el índice Theta 1. El índice Theta 3 también identifica correctamente a la carga 2 en todos los casos estudiados, y al igual que en el caso anterior también se mueven en un rango de valores muy cercano al umbral. Esta circunstancia no representa ninguna merma desde el punto de vista de la instrumentación actual, debido a la exactitud y precisión que ofrecen.



**Figura 4.20.** Resultados obtenidos para identificar la carga 2 con el sistema alimentado con la fuente *B*.

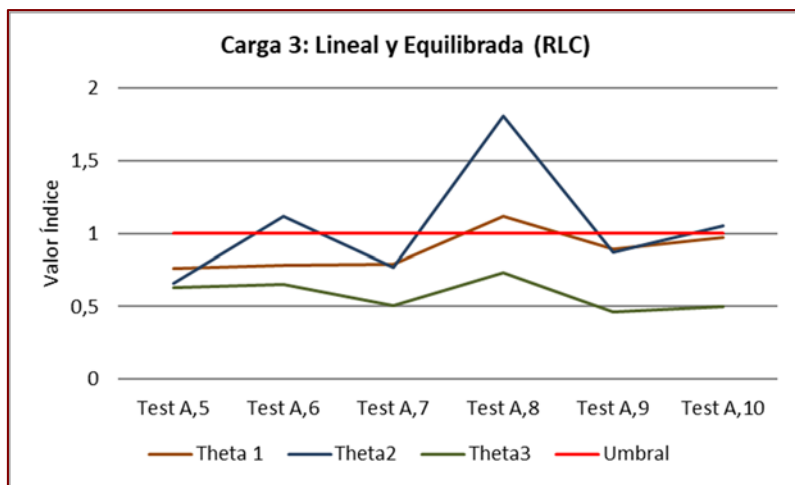
#### 4.4.3. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada con banco de condensadores

La carga 3 es una carga lineal *R-L* y equilibrada con un banco de condensadores en cabecera para compensar el factor de potencia de la carga. En la figura 4.21 se muestran los resultados obtenidos en la identificación de la carga 3 cuando el sistema es alimentado por la fuente *A*. En este caso el único índice que identifica de forma correcta a la carga 3 es el índice Theta 3, mientras que el índice Theta 1 no acierta en el test A.8, y el índice Theta 2 lo hace en el test A.6, A.8 y A.10.



**Figura 4.21.** Resultados obtenidos para identificar la carga 3 con el sistema alimentado con la fuente *A*.

El desequilibrio de la fuente provoca una fuerte variación en el comportamiento de los índices Theta 1 y Theta 2 a la hora de identificar la carga 3, tal es que los dos índices identifican de forma errónea a la carga 3 en la mayoría de los test. Por el contrario, el índice Theta 3 identifica a la carga 3 como lineal y equilibrada en todos los casos, con variaciones dentro de un rango de valores reducidos, como se muestra en la figura 4.22.

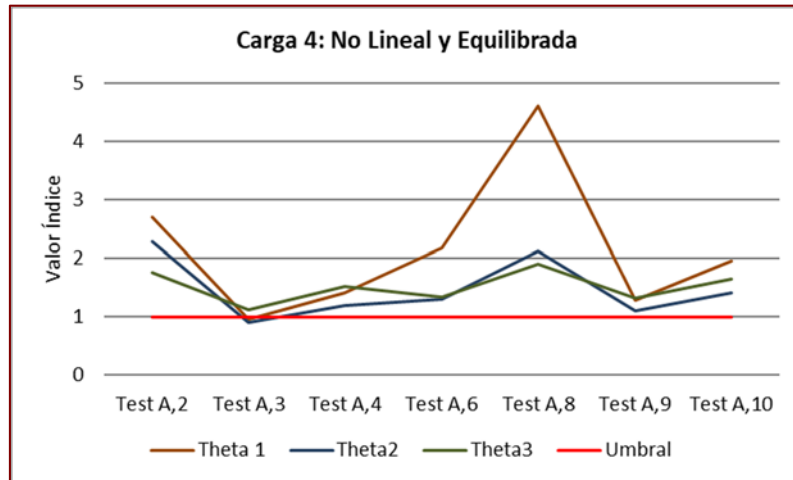


**Figura 4.22.** Resultados obtenidos para identificar la carga 3 con el sistema alimentado con la fuente *B*.

#### 4.4.4.- Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y equilibrada

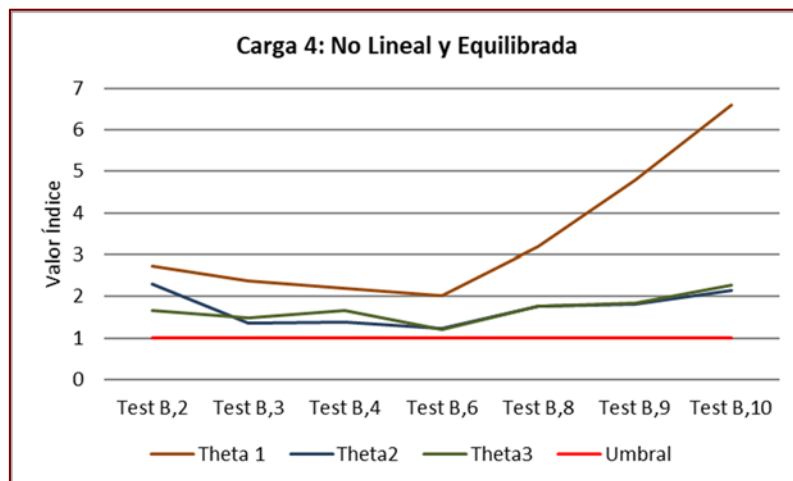
La carga 4 es no lineal y equilibrada; la figura 4.23 muestra los resultados obtenidos en la identificación de la carga 4 cuando el sistema está alimentado por la fuente *A*. El único índice que identifica de forma clara a la carga 4 en los test tipo *A* es el índice Theta 3. En

el test A.3 (el sistema alimenta al mismo tiempo a las cargas 2 y 4) los índices Theta 1 y Theta 2 identifican a la carga 4 como ideal de forma errónea.



**Figura 4.23.** Resultados obtenidos para identificar la carga 4 con el sistema alimentado con la fuente A.

La figura 4.24 se representan los resultados obtenidos para los mismos casos mediante la alimentación de la fuente B. Si bien los tres índices identifican correctamente a la carga 4, los resultados destacan la variabilidad de los valores ofrecidos por el índice Theta 1, al tomar valores muy dispares en los diferentes test realizados.



**Figura 4.24.** Resultados obtenidos para identificar la carga 4 con el sistema alimentado con la fuente B.

#### 4.5. RESPUESTA DE LOS ÍNDICES FRENTE A LA VARIACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE LA RED

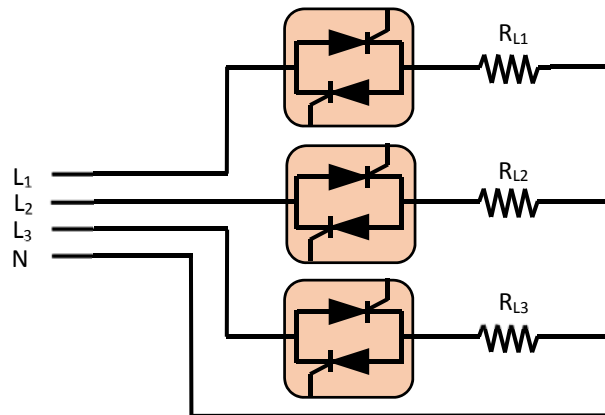
En el apartado 3.5.6 se estudió el comportamiento de los índices distribuidos multipunto frente a la variación del grado de desequilibrio de la red, a partir de los resultados obtenidos en el entorno de Matlab/Simulink. Por otro lado, en el apartado 4.3 del presente capítulo, se ha contrastado cómo los índices distribuidos multipunto varían en función de los tipos de cargas conectadas a la red. Por ello, este apartado cumple un doble objetivo, por un lado, se pretende validar los resultados obtenidos frente a la variación del desequilibrio de la red, y por otro, comparar estos resultados variando las cargas conectadas a la fuente de alimentación.

Para cumplir los objetivos planteados en esta sección, se han configurado dos casos diferentes en la plataforma experimental, denominados L.2 y L.5. De tal forma que la configuración desarrollada para cada caso es la siguiente:

- **Caso L.2:** Idéntica configuración realizada para el test B.10, donde la fuente *B* alimenta a las cargas 1, 2, 3 y 4 estudiadas en el apartado 4.2.2. (ver esquema de la figura 4.1).
- **Caso L.5:** Para configurar este caso se ha sustituido la carga no lineal y desequilibrada, de tal forma que la carga 2 se permuta por la carga 5. Así la fuente *B* alimenta en este caso a las cargas 1,3,4 y 5. La figura 4.25 muestra la configuración de la carga 5, se trata de una carga no lineal y desequilibrada compuesta por tres controladores de potencia monofásicos, así, cada controlador está constituido por un módulo de dos *SCRs* montados en antiparalelo. Los ángulos de disparo fijados en cada fase son:  $\alpha_1 = 30^\circ$ ;  $\alpha_2 = 60^\circ$  y  $\alpha_3 = 80^\circ$ . A la salida de los *SCRs* se han conectado tres resistencias conectadas en estrella cuyos valores son:  $R_{L1} = 120 \Omega$ ,  $R_{L2} = 80 \Omega$  y  $R_{L3} = 60 \Omega$ , formando así una carga no lineal y desequilibrada.

La diferencia entre las configuraciones de los casos L.2 y L.5 es la carga no lineal y desequilibrada, esto es, mientras que en el caso L.2 la carga está configurada a partir de un rectificador monofásico no controlado, la carga utilizada en el caso L.5 utiliza controladores de potencia monofásicos *SCRs* cuyos ángulos de disparo se controlan de forma independiente, permitiendo así variar el nivel de distorsión armónica de cada fase.

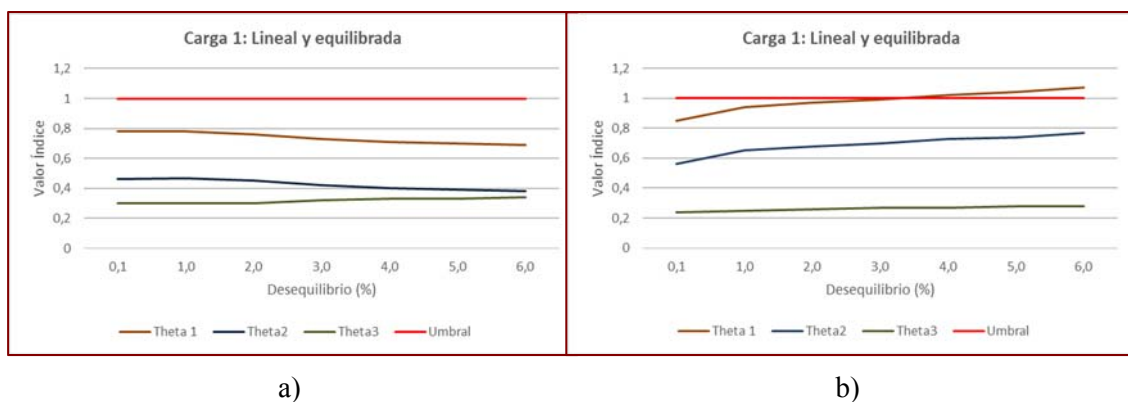
Por otro lado, el rango de nivel de desequilibrio generado a partir de la fuente  $B$ , comprende los valores de  $V_{neg} = 0.1\%$  (nivel de desequilibrio de la red en ese momento) hasta el valor máximo de  $V_{neg} = 6\%$ .



**Figura 4.25.** Esquema de la configuración de la carga no lineal y desequilibrada del caso L.5 (Carga 5).

#### 4.5.1. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada

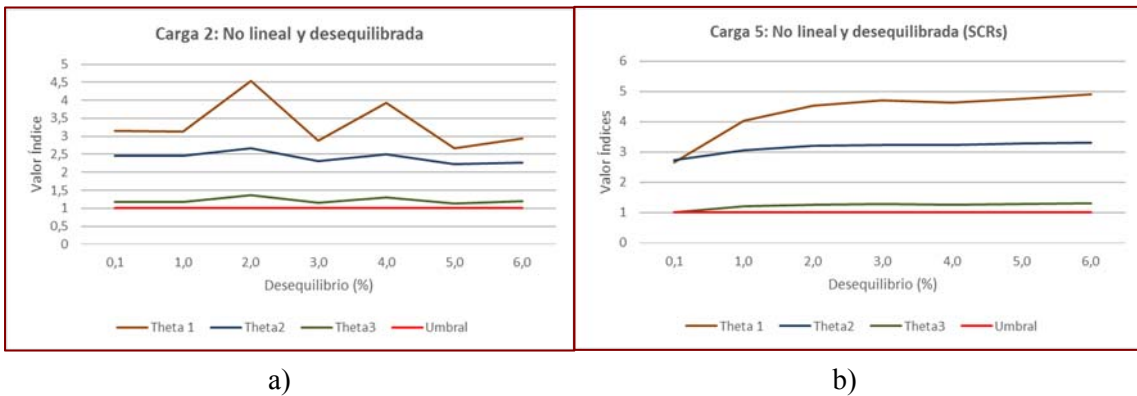
En la figura 4.26 se presenta la evolución de los índices de la carga 1 (Lineal y equilibrada) frente a la variación del nivel de desequilibrio de la fuente en el caso L.2 y en el caso L.5. A partir de los datos obtenidos se puede apreciar que los índices Theta 2 y Theta 3 identifican correctamente a la carga 1 como lineal y equilibrada en ambos casos a lo largo del rango del nivel de desequilibrio estudiado. Por el contrario, en el caso L.5 el índice Theta 1 no se muestra efectivo, ya que cambia el sentido de la identificación de la carga 1 a partir del 2 % del nivel de desequilibrio. Por otro lado, el índice Theta 3 identifica la carga 1 siempre con valores por debajo de 0.35.



**Figura 4.26.** Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 1 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del caso L.2; b) Resultados del caso L.5.

#### 4.5.2. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y desequilibrada

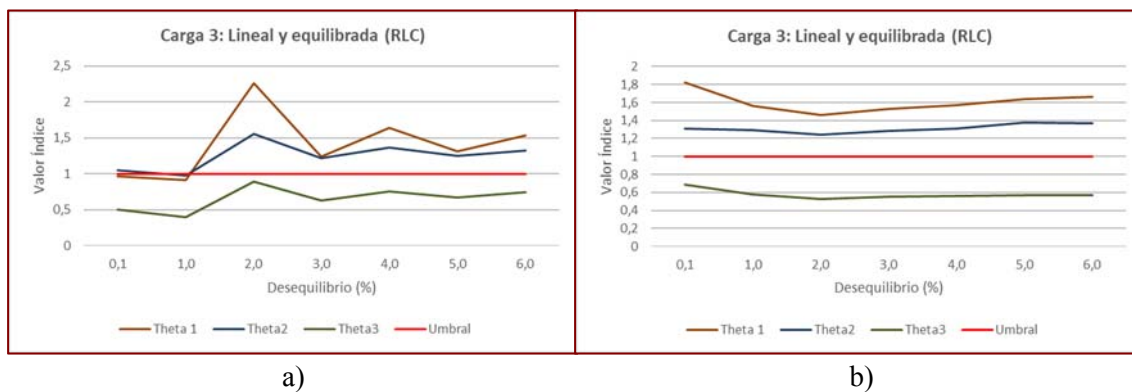
La evolución de los índices medidos en la carga 2 de la configuración del caso L.2 se muestran en la figura 4.27 a), mientras que los resultados obtenidos en la carga 5 de la configuración del caso L.5 se muestran en la figura 4.27 b). Si bien las dos cargas son no lineales y desequilibradas su configuración es diferente tal y como se explicó en el apartado 4.5. Con respecto al comportamiento de los índices se puede apreciar como los tres identifican correctamente a las cargas 2 y 5 como fuentes de perturbación. Si bien el índice Theta 1 lo hace de una forma más pronunciada que el resto de los índices, el rango de valores que toma es muy superior al rango de valores de los índices Theta 2 y Theta 3.



**Figura 4.27.** Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 2 y 5 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del caso L.2; b) Resultados del caso L.5.

#### 4.5.3. Resultados obtenidos para la identificación de la carga lineal y equilibrada con banco de condensadores

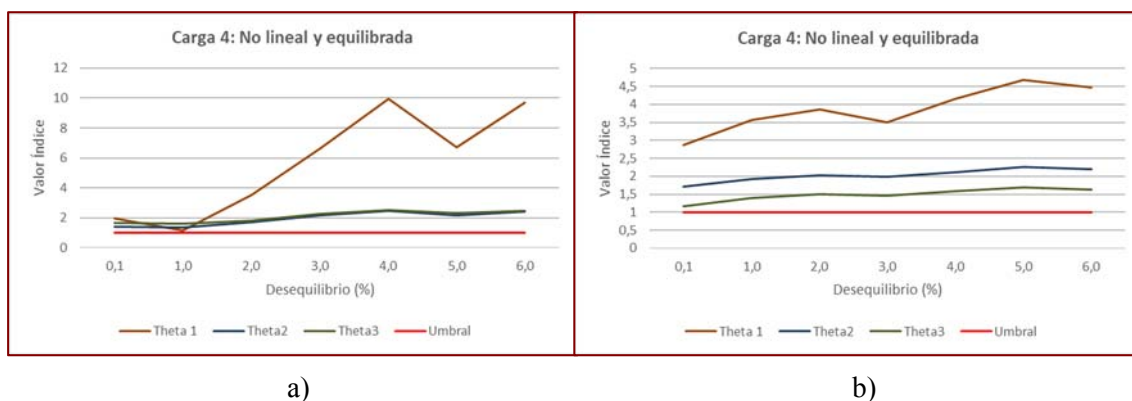
La carga 3 es una carga lineal y equilibrada con un banco de condensadores en cabecera para compensar el factor de potencia de la instalación. En la figura 4.28 se muestra la evolución de los índices medidos en la acometida de la carga 3 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la fuente. El único índice que identifica a la carga 3 como lineal y equilibrada en ambos casos es el índice Theta 3. En el caso L.2, los índices Theta 1 y Theta 2 alternan el resultado, mientras que en el caso L.5 siempre identifican a la carga como fuente de perturbación.



**Figura 4.28.** Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 3 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del caso L.2; b) Resultados del caso L.5.

#### 4.5.4. Resultados obtenidos para la identificación de la carga no lineal y equilibrada

La figura 4.29 muestra la evolución de los índices de la carga 4 (no lineal y equilibrada) frente a la variación del nivel de desequilibrio de la fuente en el caso L.2 y en el caso L.5. A partir de los resultados obtenidos se puede comprobar que los tres índices identifican a la carga 4 como fuente de perturbación en ambos casos. Sin embargo, el índice Theta 1 muestra un rango de valores notable frente a la variación del nivel de desequilibrio, sobre todo en el caso L.2. Con respecto al comportamiento de los índices Theta 2 y Theta 3 hay que destacar el reducido margen de valores que adoptan en ambos casos.



**Figura 4.29.** Evolución de los índices medidos en la cabecera de la carga 4 frente a la variación del nivel de desequilibrio de la red: a) Resultados del caso L.2; b) Resultados del caso L.5.

#### 4.6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, se puede establecer lo siguiente:

- En todas las pruebas realizadas con la fuente *A* (tensión de red), el índice Theta 3, además de identificar correctamente a las cargas lineales y equilibradas, es capaz de localizar las cargas no lineales y/o desequilibradas en todas las configuraciones del sistema que se han realizado. Por el contrario, los índices Theta 1 y Theta 2 no siempre son capaces de identificar el carácter no lineal y/o desequilibrado de estos tipos de cargas (Test A.3).
- Cabe destacar que en todas las pruebas donde se ha conectado la carga equilibrada y lineal con banco de condensadores (carga 3) con la fuente *A* (Test A5, A.6, A.7, A.8, A.9 y A.10) el nuevo índice, Theta 3, la ha identificado como una carga lineal y equilibrada, mientras que los índices Theta 1 y Theta 2 no la identifican como tal en todos los casos. El índice Theta 1 no lo hace en el test A.8, mientras que el índice Theta 2 la identifica erróneamente en el test A.8 y test A.10. Con respecto a los resultados obtenidos con la fuente *B*, con distorsión y desequilibrio (test tipo *B*), los índices Theta 1 y Theta 2 dan información errónea a la hora de identificar las cargas capacitivas (test B.8, B.9 y B.10). Por el contrario, el índice Theta 3 identifica a la carga 3 como ideal y equilibrada en todos los casos estudiados.
- Los resultados obtenidos en la respuesta de los índices frente a la variación del desequilibrio de la red ante distintas configuraciones de cargas muestran de nuevo que el único índice que identifica correctamente a todas las cargas es el índice Theta 3. El índice Theta 1 y Theta 2 alternan los resultados a la hora de identificar la carga 3 (lineal y equilibrada con banco de condensadores) en el caso L.2, mientras que califican a la carga 3 como fuente de perturbación a lo largo de todo el margen de desequilibrio estudiado. Por último, cabe destacar la estabilidad y el comportamiento que presentan los resultados de los índices Theta 2 y Theta 3 frente a las variaciones del grado de desequilibrio de la fuente en las dos configuraciones realizadas. Sin embargo, los resultados obtenidos por el índice Theta 1 presentan una alta variabilidad a la hora de identificar las cargas 2, 3 y 4 del caso L.2.

## **CAPÍTULO V**

---

### **CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS Y DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS**

---

## 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan las conclusiones en relación con los capítulos anteriores. Además, se plantean posibles vías de investigación para un futuro próximo con el objetivo de dar continuidad al trabajo desarrollado. Por último, se exponen las aportaciones científicas relacionadas directamente con la tesis y otras relacionadas con las líneas de investigación que se desarrollan dentro del grupo de investigación.

## 5.2. CONCLUSIONES

La fuerte presencia de formas de onda de tensión y corriente distorsionadas y/o desequilibradas en sistemas de energía eléctrica ha impulsado la necesidad de determinar la contribución al deterioro de la *EPQ* de los consumidores conectados a redes de suministro. Los índices de localización de fuentes de perturbación basados en el método de medida en un único punto de la red han sido utilizados ampliamente. Sin embargo, esta metodología no puede resolver esta tarea en todas las situaciones, ya que suministra información errónea en el caso de que haya múltiples fuentes de perturbación conectadas al mismo *PCC* y, especialmente ante la presencia de cargas con bancos de condensadores. Así, con el objeto de buscar una solución, aparece la metodología basada en un sistema de medidas distribuidas multipunto.

Los índices basados en medidas localizadas en un único punto de la red que han tenido mayor repercusión en la literatura técnica, han sido presentados y analizados en el capítulo II. Así, se ha podido llevar a cabo:

- Un enfoque conceptual del problema de la localización de fuentes de perturbación a partir de los índices basados en el conocimiento de los parámetros del sistema. Se ha constatado que las propuestas planteadas para determinar los parámetros del sistema, como por ejemplo los métodos de conexión/desconexión, pueden constituir un hándicap desde un punto de vista práctico.
- Los índices basados en términos de las potencias armónicas en sistemas con distorsión y/o desequilibrio son más fáciles de implementar, ya que en muchos

de los casos se podrían determinar a partir de las medidas registradas con analizadores comerciales. Tradicionalmente, el procedimiento basado en el análisis de la dirección del flujo de potencia se ha utilizado ampliamente para identificar las ubicaciones de las fuentes de perturbación. Sin embargo, ofrece información errónea cuando hay más de una carga no lineal y/o desequilibrada conectada al mismo *PCC*. Ha quedado registrado en la bibliografía que la medida de la potencia armónica puede ser positiva en los bornes de una carga no lineal, indicando erróneamente que la potencia armónica fluye desde la red hacia la carga.

Frente a esta limitación se introducen otros índices como  $\xi_{slq}$ , y  $\xi_{HGI}$  que, si bien presentan un avance en los resultados, no resuelven el problema en su totalidad, ya que ofrece información errónea cuando se conectan cargas no lineales en sistemas con desequilibrio, y ante la presencia de bancos de condensadores.

- Otra alternativa dentro de esta metodología, la conforman los índices basados en la estimación de una carga equivalente ideal (lineal y equilibrada). En concreto, se introducido el índice de desequilibrio de carga no lineal *UNL*. Esta propuesta parece apropiada para caracterizar la intensidad de una carga no lineal y/o desequilibrada y sus resultados presentan pocas variaciones a los cambios en la distorsión de la tensión de red. Sin embargo, da lugar a errores en la identificación de cargas lineales cuando se combinan diferentes topologías de cargas *RL* en paralelo, o bien se conectan cargas capacitivas a la red.

Frente a las limitaciones que presentan los métodos de localización de fuentes de distorsión y/o desequilibrio basados en medidas individuales en una sección específica del sistema, se plantea como alternativa el uso de métodos basados en medidas distribuidas multipunto. La metodología de los índices distribuidos multipunto está basada en la utilización de un determinado número de índices de calidad evaluados en todas las líneas conectadas al mismo *PCC*. De esta forma se dispone de un índice unificado que engloba los índices previos que mostraron mejor comportamiento en la identificación de la fuente que produce perturbación.

En el capítulo III, se presentó un análisis completo de tres índices de calidad de *EPQ* distribuidos multipunto. En primer lugar, el índice global *EPQ*,  $\vartheta_1$  (Theta 1), compuesto por tres índices básicos de *EPQ*:  $\xi_{slq}$ ,  $\xi_{HGI}$  y la relación  $\eta^+$ . En segundo lugar, el índice  $\vartheta_2$  (Theta 2), que plantea una modificación del índice global *EPQ*, donde la relación del índice  $\xi_{slq}$  es reemplazada por el índice de desequilibrio de carga no lineal, *UNL*. Y finalmente, un nuevo índice de medición distribuida propuesto en este documento  $\vartheta_3$  (Theta 3), basado en el marco del estándar IEEE 1459 y el índice global armónico ( $\xi_{HGI}$ ). Así, a través de los resultados obtenidos en una plataforma de simulación en el entorno de Matlab/Simulink, se ha evaluado el comportamiento de las tres propuestas frente a distintas configuraciones del sistema eléctrico de potencia.

Con el objeto de contrastar los resultados conseguidos en el entorno de Matlab/Simulink, en el capítulo IV se presentaron los resultados obtenidos en una plataforma experimental conectada a la red. Para obtener una validación más completa del índice propuesto, se han considerado varios casos que reproducen las configuraciones típicas presentes en las redes de distribución de baja tensión. Así, los resultados permiten establecer:

- El índice propuesto,  $\vartheta_3$ , identifica de forma correcta las cargas no lineales y/o desequilibradas en todos los casos realizados, mientras que los índices  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_2$  no siempre identifican correctamente a la carga no lineal y equilibrada.
- Los resultados obtenidos en la respuesta de los índices frente a la variación del desequilibrio de la red ante distintas configuraciones de carga, establecen que el único índice capaz de identificar correctamente el carácter lineal/no lineal, equilibrado/desequilibrado de todas las cargas es el índice  $\vartheta_3$ . Además, éste muestra un comportamiento más estable frente a las variaciones de la red y la presencia en el sistema de diferentes tipos de cargas no lineales y desequilibradas que los índices  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_2$ .
- Por último, cabe mencionar que en las pruebas en las que se ha conectado la carga lineal y equilibrada con banco de condensadores, el nuevo índice,  $\vartheta_3$ , la ha identificado como una carga lineal y equilibrada, mientras que los índices  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_2$  en algunos casos la identifican como una carga lineal y equilibrada y en otros no. En este punto, es necesario indicar que la presencia de condensadores en

entornos con distorsión produce una amplificación de los mismos que se transfieren a la tensión de *PCC*, [20,21]. A partir de esto, se podría argumentar que, como una carga distorsionante, debería clasificarse como una fuente de distorsión y, por tanto, e identificarse como tal. Este argumento no es aceptable, ya que los bancos de condensadores siguen siendo un elemento muy extendido para la compensación del factor de potencia y, como tal, alentados por las tarifas actuales.

### 5.3. TRABAJOS FUTUROS

A lo largo del estudio han surgido posibles vías de investigación para un futuro próximo como, por ejemplo:

- Adaptar el índice global de *EPQ* a escenarios tiempo-variantes donde la recogida de datos a lo largo de un intervalo temporal permita la definición de parámetros estadísticos adecuados con propósito de su estandarización.
- Diseño de un sistema de medidas con conexión remota enlazado por radiofrecuencia, para la identificación de perturbaciones periódicas en redes eléctricas. En la figura 5.1 se muestra un esquema genérico del sistema de medidas distribuido, el cual estará constituido por una red de instrumentos subordinados a otro que actúa de instrumento maestro y permite la sincronización en tiempo real de los parámetros *EPQ* de cada usuario.

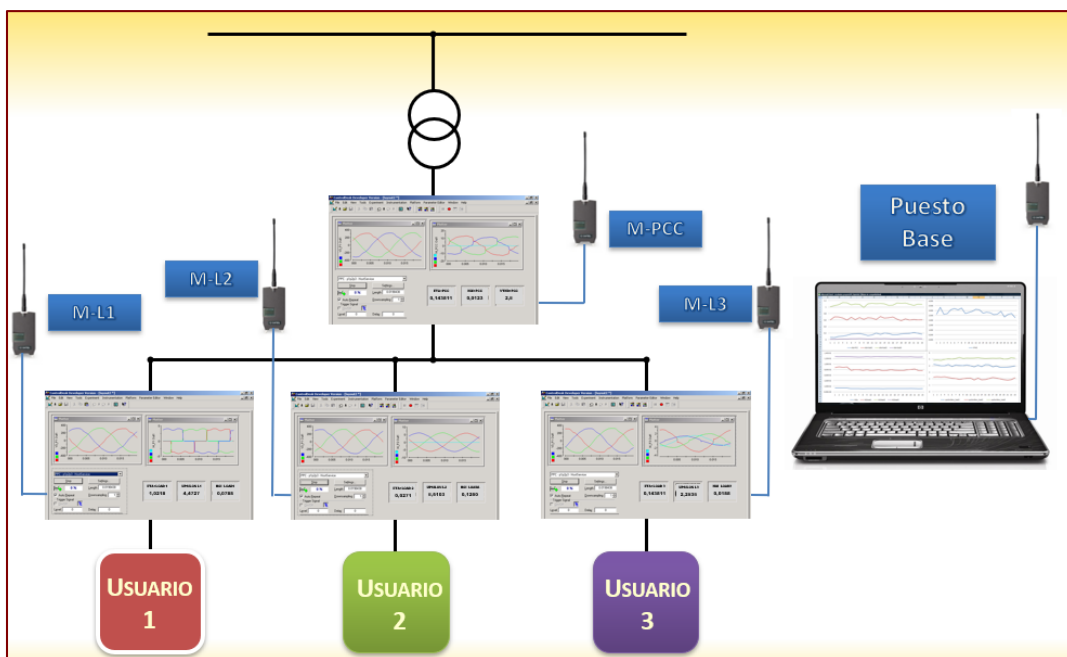


Figura 5.1. Esquema genérico de un sistema de medidas distribuidas.

#### 5.4. APORTACIONES CIENTÍFICAS RELACIONADAS DIRECTAMENTE CON LA TESIS

Los trabajos de esta tesis han tenido un largo recorrido y han sido realizados gracias al esfuerzo conjunto de diversas entidades públicas quienes, con su interés y financiación, han facilitado el desarrollo de las distintas fases de la investigación. Se destaca en este apartado el proyecto que han sustentado el trabajo, enmarcado en el ámbito institucional a través de convocatorias públicas para el fomento de la investigación.

<b>TÍTULO</b>	<b>SISTEMA DE MEDIDAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA Y DESEQUILIBRIOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA</b>
<b>ENTIDAD FINANCIADORA</b>	MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, CICYT (DIP2010-17709)
<b>ENTIDADES PARTICIPANTES</b>	UNIVERSIDAD DE HUELVA
<b>INVESTIGADOR PRINCIPAL</b>	DR. D. PATRICIO SALMERÓN REVUELTA
<b>DURACIÓN</b>	2011 -2014
<b>CUANTÍA DE LA SUBVENCIÓN</b>	71.390 €

La difusión de los resultados obtenidos ha quedado avalada con la publicación de 4 artículos en revistas internacionales, 2 artículos en revistas nacionales, 7 participaciones en congresos internacionales, 1 participación en congreso nacional y 2 capítulos de libro. Sus referencias son las siguientes:

- 4 artículos en revistas internacionales incluidas en la base de datos ISI (Institute for Scientific Information) Journal Citation Reports (JCR), en el campo de la ingeniería eléctrica y electrónica:
  - 1) Alejandro Pérez Vallés and Patricio Salmerón Revuelta. “A new distributed measurement index for the identification of harmonic distortion and/or unbalance sources based on the IEEE Std. 1459 framework”. *Electric Power Systems Research*, Vol. 172, Pp. 96-104, July-2019. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.007>
  - 2) Jaime Prieto, Patricio Salmerón, Alejandro Pérez and Salvador P. Litrán. “Practical evaluation of unbalance and harmonic distortion in power conditioning”. *Electric Power Systems Research*, Vol. 141, Pp. 487-499, December-2016. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.007>
  - 3) M. S. Herrera, P. Salmerón, S. P. Litrán and A. P. Vallés. “Análisis de las definiciones de desequilibrio de tensiones en los sistemas de potencia”. *Revista DYNA Ingeniería e Industria*, No. 2, Vol. 87, pp: 198-203. Abril-2012 <http://dx.doi.org/10.6036/4375>

- 4) P. Salmerón, R.S. Herrera, A. Pérez and J. Prieto. “New distortion and unbalanced indices based on power quality analyzer measurements”. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 24, No. 2, Pp. 501-507, April-2009. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2013378>

- 2 artículos en revistas nacionales:

- 1) J. Macías Macías y A. Pérez Vallés. “Energía eléctrica en los hospitales. Calidad y eficiencia”. *Revista todo Hospital*. N°. 222, pp. 692-723. Diciembre 2005. ISSN-0212-1972.
- 2) P. Salmerón Revuelta, A. Pérez Vallés y M<sup>a</sup> R. Sánchez Herrera. “Índices para valorar la distorsión armónica en instalaciones eléctricas”. *Revista Energía*. N°.- 171; pp. 39-45 May/Jun 2003. ISSN: 0210-2056.

- 7 Aportaciones a Congresos Internacionales:

- 1) Jaime Prieto, Patricio Salmerón, Alejandro Pérez and Salvador Pérez. “Assessment on Apparent Power Indices with Hybrid Active Power Filters”. *IEEE 11th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. IEEE CPE-POWERENG*. Cadiz, April- 2017.
- 2) J. Prieto, P. Salmerón, A. Pérez and S. Pérez. “Assessment of unbalance and distortion in power systems that include active power line conditioners”. *International conference on renewable energy and power quality, ICREPQ14*. Córdoba, 2014. ISBN: 978-84-616-8196-9.
- 3) Patricio Salmerón, Alejandro Pérez and Salvador P. Litrán. “New Approach to Assess Unbalance and Harmonic Distortion in Power Systems”. *Proceeding of International conference on renewable energies and power quality, ICREPQ'13*. Bilbao 2013. ISBN: 978-84-695-6965-8.
- 4) Patricio Salmerón, Alejandro Pérez and Salvador P. Litrán. “Index for identifying periodic disturbances in electric distribution networks using distributed measurements”. *Proceeding of 13th Spanish-Portuguese conference on Electrical Engineering 13'CHLIE*. Valencia 2013. ISBN: 978-84-695-7778-3.
- 5) R. S. Herrera, P. Salmerón and A. Pérez.” Distortion sources identification in electrical power systems”. *Proceeding of 11th Spanish-Portuguese conference on Electrical Engineering 11CHLIE*. Zaragoza 2009 ISBN: 84-613-2234-3.
- 6) P. Salmerón, Reyes S. Herrera, A. Pérez y J. Prieto. “Power quality evaluation indices in three-phase Networks”. *Proceeding of IEEE PowerTech Conference, TP'05. St. Petersburg 2005*. ISBN: 5-93208-034-0.

7) P. Salmerón, Reyes S. Herrera, A. Pérez y J. Prieto.” Distorsion and unbalance assessing indices using comercial analysers”. *Proceeding of International conference on renewable energies and power quality, ICREPQ'05*. Zaragoza 2005. ISBN: 84-609-3236-2.

- 1 Aportación a congreso nacional:

1) Alejandro Pérez Vallés, Patricio Salmerón Revuelta y M<sup>a</sup> Reyes Sánchez. ”Índices de Valoración de la Calidad de la Potencia en Instalaciones Eléctricas”. *Actas de la XII Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica*. Córdoba 2002. ISBN: 84-699-7609-5.

- 2 Capítulos de Libros internacionales:

1) Patricio Salmerón, Reyes S. Herrera, Alejandro Pérez and Jaime Prieto: “Power Quality”. Chapter 10 title: “Indices for Distortion and unbalance evaluation from time-variant”. *Edited by Cambridge Scholars Publishing, UK* 2016. ISBN 978-1-4438-9493-7.

2) Patricio Salmerón and Alejandro Pérez. Book title: “Power Quality Issues”. Chapter 10 title: “Evaluation of the distortion and unbalance emission levels in electric networks”. *Edited by Brunel University, UK*. ISBN 978-953-51-1068-2. April-2013.

## 5.5. OTRAS APORTACIONES

Otras aportaciones realizadas son:

- Participación en 2 Proyectos financiados como son:

<b>TÍTULO</b>	<b>DISEÑO Y REALIZACIÓN DE UN NUEVO EQUIPO DE COMPENSACIÓN ACTIVA DE CONEXIÓN SERIE PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DE LA ONDA ELÉCTRICA</b>
<b>ENTIDAD FINANCIADORA</b>	JUNTA DE ANDALUCÍA (P06-TEP-02354)
<b>ENTIDADES PARTICIPANTES</b>	UNIVERSIDAD DE HUELVA
<b>INVESTIGADOR PRINCIPAL</b>	DR. PATRICIO SALMERÓN REVUELTA
<b>DURACIÓN</b>	2007 -2010
<b>CUANTÍA DE LA SUBVENCIÓN</b>	65.000 €

<b>TÍTULO</b>	<b>UNA NUEVA TÉCNICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS MEDIANTE EQUIPOS DE COMPENSACIÓN ACTIVA</b>
<b>ENTIDAD FINANCIADORA</b>	MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, CICYT. (DPI 2004-03501)
<b>ENTIDADES PARTICIPANTES</b>	UNIVERSIDAD DE HUELVA
<b>INVESTIGADOR PRINCIPAL</b>	DR. PATRICIO SALMERÓN REVUELTA
<b>DURACIÓN</b>	2004 -2007
<b>CUANTÍA DE LA SUBVENCIÓN</b>	117.300 €

- 1 artículo en revista internacional incluida en la base de datos ISI (Institute for Scientific Information) Journal Citation Reports (JCR), en el campo de la ingeniería eléctrica y electrónica:
  - 1) P. Salmeron, J. C. Montano, J. R. Vazquez, J. Prieto and A. Perez. “Compensation in nonsinusoidal, unbalanced three-phase four-wire systems with active power-line conditioner”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1968-1974, Oct. 2004. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2004.829150>
- 10 Aportaciones a congresos internacionales:
  - 1) Salvador P. Litrán, Patricio Salmerón, Alejandro Pérez and Jaime Prieto. “Comparative analysis of compensation strategies for series APF based on the electric power dual formulation”. *IEEE 11th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. IEEE CPE-POWERENG*. Cadiz, April- 2017.
  - 2) Salvador P. Litrán, Patricio Salmerón, Jaime Prieto and Alejandro Pérez. “Control strategy for an interface to improve the power quality at the connection of AC microgrids”. *International conference on renewable energy and power quality, ICREPQ14*. Córdoba, 2014. ISBN: 978-84-616-8196-9.
  - 3) Salvador P. Litán, Patricio Salmerón and Alejandro Pérez. “Control strategy to improve the power factor with a hybrid filter”. *Proceeding of International conference on renewable energies and power quality, ICREPQ’13*. Bilbao 2013. ISBN: 978-84-695-6965-8.
  - 4) Salvador P. Litrán, Patricio Salmerón and Alejandro Pérez. “Electromagnetic Compatibility Test for Hybrid Active Filter According to IEC-61000”. *Proceeding of 13th Spanish-Portuguese conference on Electrical Engineering 13’CHLIE*. Valencia 2013. ISBN: 978-84-695-7778-3.

- 5) Francisco J. Alcántara, Jesús R. Vázquez, Patricio Salmeron and Alejandro Pérez. “An ANN system to on line detection of sag, swell and transient voltajes. *Proceeding of 11th Spanish-Portuguese conference on Electrical Engineering 11CHLIE*. Zaragoza 2009. ISBN: 84-613-2234-3.
  - 6) M. I. Arteaga Orozco, J. R. Vázquez, P. Salmerón, A. Pérez.” A sliding maximum power point tracker for a photovoltaic system”. *Proceeding of 11th Spanish-Portuguese conference on Electrical Engineering 11CHLIE*. Zaragoza 2009. ISBN: 84-613-2234-3.
  - 7) R. S. Herrera, P. Salmerón, J. R. Vázquez, S. P. Litrán, A. Pérez. “Generalized instantaneous reactive power theory in poly-phase power systems”. *Proceeding of 13th European Conference on Power Electronics and Applications 13'EPE*. Barcelona 2009. ISBN: 97890758115009.
  - 8) S.P. Litrán, P.Salmerón, J.R. Vázquez, R.S. Herrera, A.Pérez. “Control strategy for hybrid power to compensate unbalanced and non-linear, three-phase loads”. *Proceeding of 13th European Conference on Power Electronics and Applications 13'EPE*. Barcelona 2009. ISBN: 97890758115009.
  - 9) P. Salmerón, J.C. Montaña, J.R. Vázquez, J. Prieto y A. Pérez. “Control Algorithms for Compensation with Active Power Line Conditioner”. *Proceeding of 10th European Conference on Power Electronics and Applications 10'EPE*. Toulouse 2003. ISBN: 90-75815-07-7.
  - 10) P. Salmerón, J.C. Montaña, J.R. Vázquez, J. Prieto y A. Pérez. “Practical Application of the Instantaneous Power Theory in the Compensation of Four-Wire Three-Phase Systems”. *Proceeding of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation IECON'02*. Sevilla 2002 ISBN: 0-7803-7475-4.
- 1 Aportación a congreso nacional:
    - 1) Alejandro Pérez, Jaime Prieto, Patricio Salmerón, Jesús R. Vázquez. “Diseño y realización de un acondicionador activo de potencia para compensación estática de cargas no lineales”. *Actas de la XII Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica*. Córdoba 2002. ISBN: 84-699-7609-5.

# ANEXO A

---

## PLATAFORMA DE SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK

---

En este anexo se presenta la plataforma desarrollada en Matlab/Simulink para la realización de los casos que se presentan en el capítulo III. Además, se ha generado un programa en un archivo “.m” de Matlab (compuesto por más de tres mil líneas de código), que permite calcular los parámetros  $EPQ$ , los índices de identificación de fuentes de perturbación de cada punto de medida y los índices distribuidos multipunto, así como la representación de gráficas de distintas formas de ondas.

### A.1. CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN

En la figura A.1 se muestra el esquema del circuito de potencia realizado en Matlab/Simulink, donde la fuente trifásica alimenta a cinco cargas de distinta tipología a través del PCC, tal y como aparece descrito en el capítulo III.

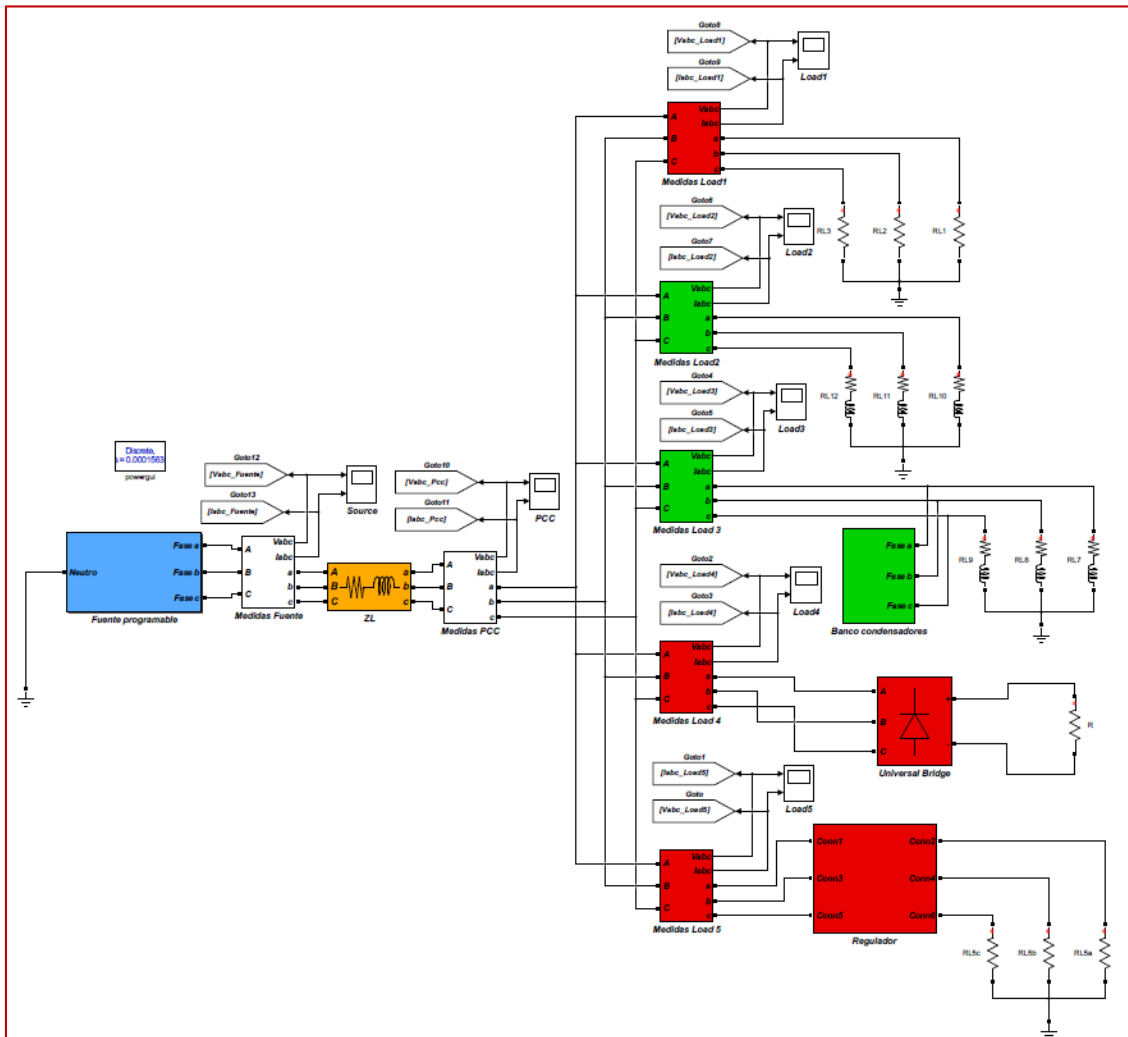
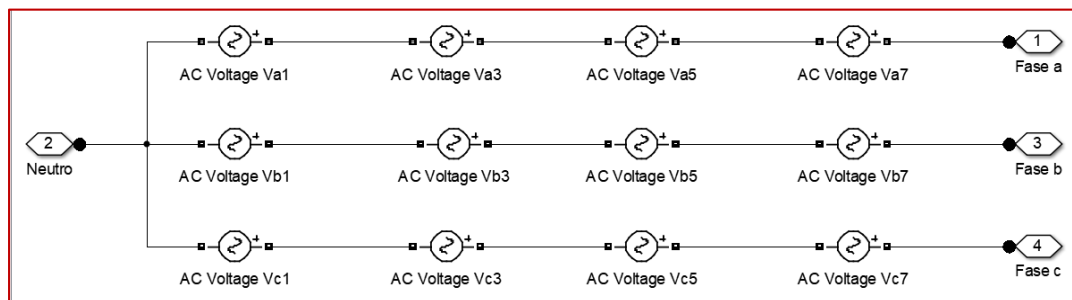


Figura A.1. Esquema en Simulink utilizado en la plataforma de simulación.

La fuente programable utilizada para variar la distorsión armónica de la red y el grado de desequilibrio se muestra en la figura A.2. Variando los valores *RMS* de las fuentes se han inyectado armónicos de orden 3, 5 y 7 al sistema hasta conformar todos los casos realizados en el capítulo III. De la misma forma se ha conseguido variar el nivel de desequilibrio de tensiones de la fuente.



**Figura A.2.** Esquema en Simulink de la fuente programable.

La configuración de las cargas es la siguiente:

- **Carga 1.**- Se trata de una carga Lineal y Desequilibrada. La carga está compuesta por tres resistencias cuyos valores son:  $165 \Omega$  en la fase  $L_1$ ,  $85 \Omega$  en  $L_2$  y  $46 \Omega$  en  $L_3$ , las tres resistencias están conectadas en estrella.
- **Carga 2.**- Carga lineal y Equilibrada. Formada por tres ramas  $R$ - $L$  conectadas en estrella, con unos valores de  $R = 60 \Omega$  y de  $L = 0.05 \text{ H}$ .
- **Carga 3.**- Carga Lineal y Equilibrada  $R$ - $L$  conectada en estrella, con un banco de condensadores en cabecera de la carga conectado en triángulo para la mejora del factor de potencia.  $R = 60 \Omega$ ,  $L = 0.05 \text{ H}$  y  $C = 4 \mu\text{F}$ .
- **Carga 4.**- Carga No Lineal y Equilibrada. Se trata de un rectificador trifásico no controlado con una resistencia en el lado  $DC$  de  $95 \Omega$ .
- **Carga 5.**- Carga No Lineal y Desequilibrada. Configurada a partir de tres reguladores por control de fase de corriente alterna monofásicos, compuesto por dos  $SCRs$  conectados en antiparalelo (ver figura A.3). Los ángulos de disparo de cada fase son:  $\alpha_{L1} = 45^\circ$ ,  $\alpha_{L2} = 75^\circ$  y  $\alpha_{L3} = 75^\circ$ . Los reguladores alimentan a tres resistencias conectadas en estrella cuyos valores son:  $R_{L1} = 104 \Omega$ ,  $R_{L2} = 85 \Omega$  y  $R_{L3} = 60 \Omega$ .

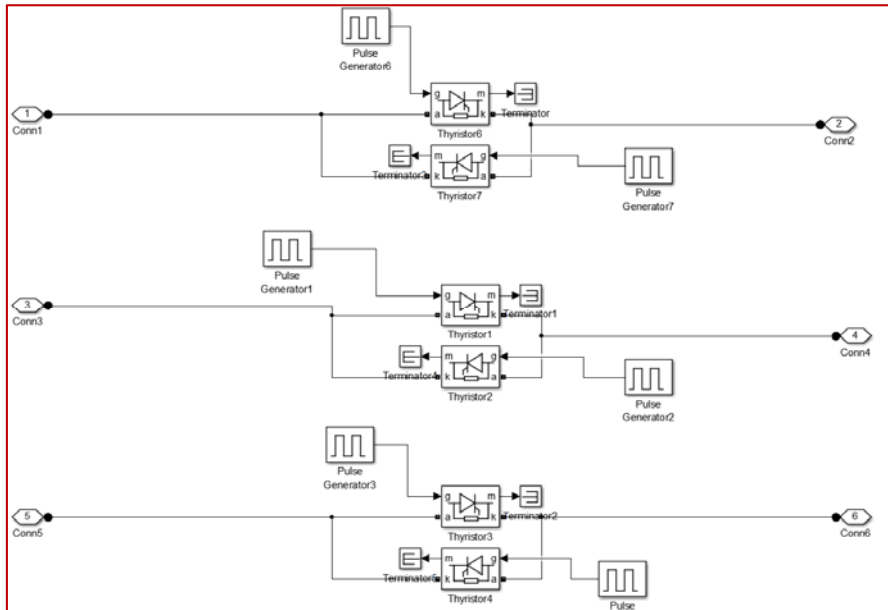


Figura A.3. Esquema en Simulink del regulador de potencia de la carga 5.

A partir de componentes pertenecientes a la librería denominada “control y medidas” incluidos en la toolbox de Simulink “SimPowerSystems”, se ha diseñado un bloque de medidas de  $EPQ$  para cada punto del sistema (ver figura A.4).

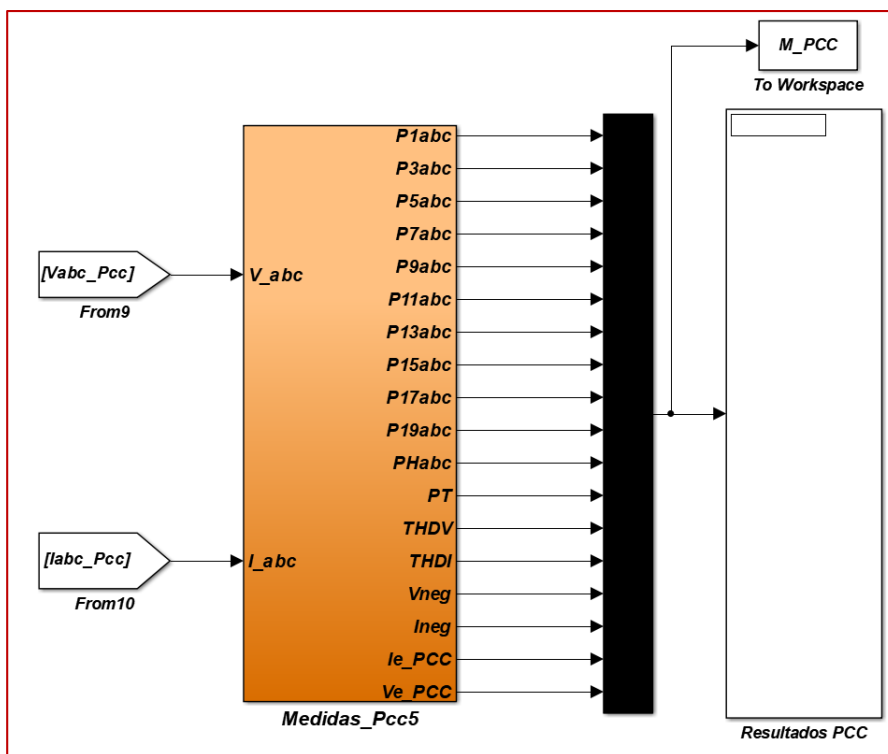
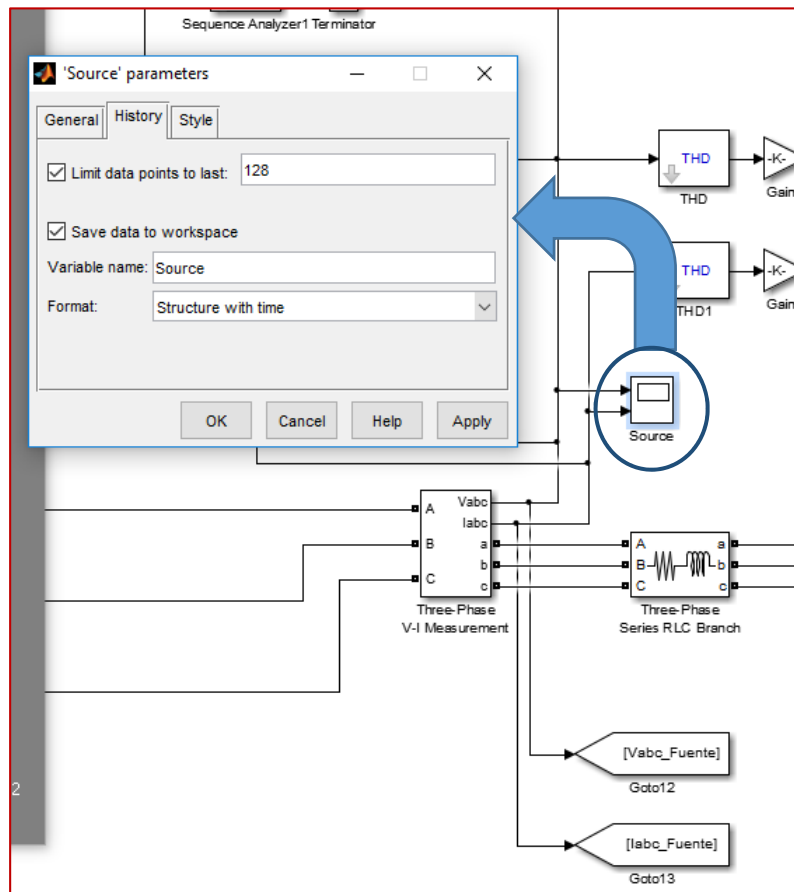


Figura A.4. Bloque de medidas de  $EPQ$  realizadas en el PCC.

Las medidas realizadas en el sistema de potencia desarrollado en Simulink se han registrado mediante los diferentes bloques scope situados en cada punto de medida. En la figura A.5 se muestra el componente y la configuración para obtener las últimas 128 muestras de las formas de ondas de tensión e intensidad.



**Figura A.5.** Detalle del bloque scope utilizado para registrar las formas de ondas de tensión e intensidad en uno de los puntos del sistema.

## A.2. PROGRAMA

La figura A.6 muestra un esquema del programa desarrollado en Matlab, donde su estructura se puede dividir en tres partes diferenciadas. Por un lado, la parte inicial del programa, donde se toman los datos bien de la plataforma de Matlab/Simulink o de la plataforma dSPACE/ControlDesk. Una vez cargados los datos, se obtienen las formas de ondas de tensión e intensidad de todos los puntos de medidas realizados en el sistema. La segunda parte del programa calcula todos los parámetros  $EPQ$  y los índices de identificación de fuentes de perturbación en cada punto de medida del sistema; por último, se calculan los índices distribuidos multipunto. La última parte del programa presenta los

resultados en Matlab y a su vez los carga en una hoja de cálculo que se ha utilizado para la presentación de las diferentes tablas y gráficas.

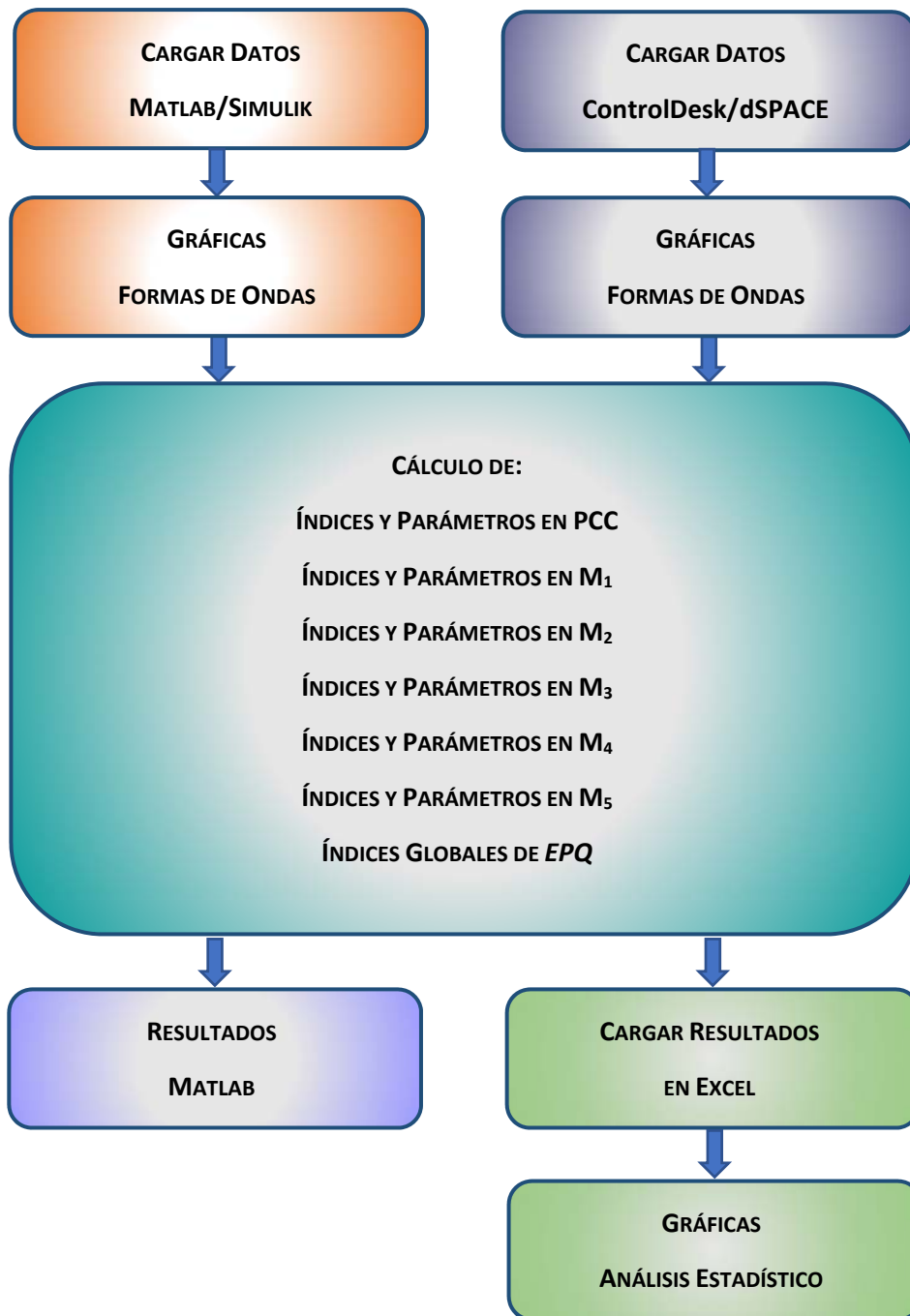


Figura A.6. Esquema del Programa diseñado para el cálculo de índices, parámetros y gráficas.

A continuación se relaciona parte del programa que permite obtener todos los resultados mostrados en esta tesis. La parte que no se detalla es la parte reiterativa que se produce en la estructura de cálculo de los parámetros e índices en cada punto de medida, de tal forma que únicamente se muestra la parte del programa que realiza los cálculos en uno de los puntos, en concreto en el *PCC*.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cargar archivo simulink %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc

load ('a0112.mat')

% Cargar datos y representación gráfica medidas fuente

VS_a=Source.signals(1).values(:,1);
VS_b=Source.signals(1).values(:,2);
VS_c=Source.signals(1).values(:,3);

IS_a=Source.signals(2).values(:,1);
IS_b=Source.signals(2).values(:,2);
IS_c=Source.signals(2).values(:,3);

tt=Source.time(:,1);

plot(tt,VS_a,tt,VS_b,tt,VS_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Source')

figure
plot(tt,IS_a,tt,IS_b,tt,IS_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Source')

% Cargar datos y representación gráfica medidas Pcc

VPcc_a=Pcc.signals(1).values(:,1);
VPcc_b=Pcc.signals(1).values(:,2);
VPcc_c=Pcc.signals(1).values(:,3);

IPcc_a=Pcc.signals(2).values(:,1);
IPcc_b=Pcc.signals(2).values(:,2);
IPcc_c=Pcc.signals(2).values(:,3);

tt=Pcc.time(:,1);

plot(tt,VPcc_a,tt,VPcc_b,tt,VPcc_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')

```

```

title ('\fontsize{14}Voltages Pcc')

figure
plot(tt,IPcc_a,tt,IPcc_b,tt,IPcc_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Pcc')

% Cargar datos y representación gráfica medidas Load 1

vload1_a=Load1.signals(1).values(:,1);
vload1_b=Load1.signals(1).values(:,2);
vload1_c=Load1.signals(1).values(:,3);

iload1_a=Load1.signals(2).values(:,1);
iload1_b=Load1.signals(2).values(:,2);
iload1_c=Load1.signals(2).values(:,3);

tt_Load1=tt;

figure
plot(tt_Load1,vload1_a,tt_Load1,vload1_b,tt_Load1,vload1_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Load 1')

figure
plot(tt_Load1,iload1_a,tt_Load1,iload1_b,tt_Load1,iload1_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 1')

% Cargar datos y representación gráfica medidas Load 2

vload2_a=Load2.signals(1).values(:,1);
vload2_b=Load2.signals(1).values(:,2);
vload2_c=Load2.signals(1).values(:,3);

iload2_a=Load2.signals(2).values(:,1);
iload2_b=Load2.signals(2).values(:,2);
iload2_c=Load2.signals(2).values(:,3);

tt_Load2=tt;

figure
plot(tt_Load2,vload2_a,tt_Load2,vload2_b,tt_Load2,vload2_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Load 2')

figure
plot(tt_Load2,iload2_a,tt_Load2,iload2_b,tt_Load2,iload2_c);
grid on
xlabel ('time (s)')

```

```
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents load 2')

% Cargar datos y representación gráfica medidas Load 3

vload3_a=Load3.signals(1).values(:,1);
vload3_b=Load3.signals(1).values(:,2);
vload3_c=Load3.signals(1).values(:,3);

iload3_a=Load3.signals(2).values(:,1);
iload3_b=Load3.signals(2).values(:,2);
iload3_c=Load3.signals(2).values(:,3);

tt_Load3=tt;

figure
plot(tt_Load3,vload3_a,tt_Load3,vload3_b,tt_Load3,vload3_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Load 3')

figure
plot(tt_Load3,iload3_a,tt_Load3,iload3_b,tt_Load3,iload3_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 3')

figure
plot(tt_Load3,iload3_a);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('voltage/Current')
title ('\fontsize{14}voltage/Current Load 3')

% Cargar datos y representación gráfica medidas Load 4

vload4_a=Load4.signals(1).values(:,1);
vload4_b=Load4.signals(1).values(:,2);
vload4_c=Load4.signals(1).values(:,3);

iload4_a=Load4.signals(2).values(:,1);
iload4_b=Load4.signals(2).values(:,2);
iload4_c=Load4.signals(2).values(:,3);

tt_Load4=tt;

figure
plot(tt_Load4,vload4_a,tt_Load4,vload4_b,tt_Load4,vload4_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Load 4')

figure
plot(tt_Load4,iload4_a,tt_Load4,iload4_b,tt_Load4,iload4_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
```

```

ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 4')

% Cargar datos y representación gráfica medidas Load 5

vload5_a=Load5.signals(1).values(:,1);
vload5_b=Load5.signals(1).values(:,2);
vload5_c=Load5.signals(1).values(:,3);

iload5_a=Load5.signals(2).values(:,1);
iload5_b=Load5.signals(2).values(:,2);
iload5_c=Load5.signals(2).values(:,3);

tt_Load5=tt;

figure
plot(tt_Load5,vload5_a,tt_Load5,vload5_b,tt_Load5,vload5_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Load 5')

figure
plot(tt_Load5,iload5_a,tt_Load5,iload5_b,tt_Load5,iload5_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 5')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cargar archivo Laboratorio %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear
clc

load C:\Users\Alejandro\work\medidas\scrok\p011234

iload1_a=p011234.Y(1).Data;
iload1_b=p011234.Y(2).Data;
iload1_c=p011234.Y(3).Data;
iload1_n=p011234.Y(4).Data;

iload2_a=p011234.Y(5).Data;
iload2_b=p011234.Y(6).Data;
iload2_c=p011234.Y(7).Data;
iload2_n=p011234.Y(8).Data;

iload3_a=p011234.Y(9).Data;
iload3_b=p011234.Y(10).Data;
iload3_c=p011234.Y(11).Data;
iload3_n=p011234.Y(12).Data;

iload4_a=p011234.Y(13).Data;
iload4_b=p011234.Y(14).Data;
iload4_c=p011234.Y(15).Data;
iload4_n=p011234.Y(16).Data;

```

```

i1oad5_a=p011234.Y(17).Data;
i1oad5_b=p011234.Y(18).Data;
i1oad5_c=p011234.Y(19).Data;
i1oad5_n=p011234.Y(20).Data;

ILa=p011234.Y(21).Data;
ILb=p011234.Y(22).Data;
ILc=p011234.Y(23).Data;
ILn=p011234.Y(24).Data;

VLa=p011234.Y(25).Data;
VLb=p011234.Y(26).Data;
VLc=p011234.Y(27).Data;

VSa=p011234.Y(28).Data;
VSb=p011234.Y(29).Data;
VSc=p011234.Y(30).Data;

tt=p011234.X.Data;

v1_Pcc = VLa;
v2_Pcc = VLb;
v3_Pcc = VLc;
tt_Pcc = tt;

i1_Pcc = ILa;
i2_Pcc = ILb;
i3_Pcc = ILc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Representación Formas de Ondas %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

plot(tt,VSa,tt,VSb,tt,VSc);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Source')

figure
plot(tt,ILa,tt,ILb,tt,ILc);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Line')

figure
plot(tt,VLa,tt,VLb,tt,VLc);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Voltage (V)')
title ('\fontsize{14}Voltages Pcc')

figure
plot(tt,i1oad1_a,tt,i1oad1_b,tt,i1oad1_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 1')

```

```
figure
plot(tt, iload2_a, tt, iload2_b, tt, iload2_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents load 2')
```

```
figure
plot(tt, iload3_a, tt, iload3_b, tt, iload3_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 3')
```

```
figure
plot(tt, iload4_a, tt, iload4_b, tt, iload4_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 4')
```

```
figure
plot(tt, iload5_a, tt, iload5_b, tt, iload5_c);
grid on
xlabel ('time (s)')
ylabel ('Current (A)')
title ('\fontsize{14}Currents Load 5')
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculos índices Pcc %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
va_Pcc=v1_Pcc;
vb_Pcc=v2_Pcc;
vc_Pcc=v3_Pcc;
ia_Pcc=i1_Pcc;
ib_Pcc=i2_Pcc;
ic_Pcc=i3_Pcc;
in_Pcc=in_Pcc;
```

```
DFT_va_Pcc=(sqrt(2)/128)*fft(va_Pcc);
DFT_vb_Pcc=(sqrt(2)/128)*fft(vb_Pcc);
DFT_vc_Pcc=(sqrt(2)/128)*fft(vc_Pcc);
DFT_ia_Pcc=(sqrt(2)/128)*fft(ia_Pcc);
DFT_ib_Pcc=(sqrt(2)/128)*fft(ib_Pcc);
DFT_ic_Pcc=(sqrt(2)/128)*fft(ic_Pcc);
```

```
Vah_Pcc=DFT_va_Pcc(2:64);
Vbh_Pcc=DFT_vb_Pcc(2:64);
Vch_Pcc=DFT_vc_Pcc(2:64);
Iah_Pcc=DFT_ia_Pcc(2:64);
Ibh_Pcc=DFT_ib_Pcc(2:64);
Ich_Pcc=DFT_ic_Pcc(2:64);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Módulos de cada uno de los fasores de cada armónico %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

RMSVa_Pcc=abs(Vah_Pcc);
RMSVb_Pcc=abs(Vbh_Pcc);
RMSVc_Pcc=abs(Vch_Pcc);
RMSIa_Pcc=abs(Iah_Pcc);
RMSIb_Pcc=abs(Ibh_Pcc);
RMSIc_Pcc=abs(Ich_Pcc);
RMSIn_Pcc=abs(Inh_Pcc);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Valores rms de tensiones e intensidades de fuente %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Vrmss_a_Pcc=norm(RMSVa_Pcc);
Vrmss_b_Pcc=norm(RMSVb_Pcc);
Vrmss_c_Pcc=norm(RMSVc_Pcc);

```

```

Irmss_a_Pcc=norm(RMSIa_Pcc);
Irmss_b_Pcc=norm(RMSIb_Pcc);
Irmss_c_Pcc=norm(RMSIc_Pcc);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Potencias complejas y potencias activas armónicas %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Ssa_Pcc=(Vah_Pcc.*conj(Iah_Pcc));
Ssb_Pcc=(Vbh_Pcc.*conj(Ibh_Pcc));
Ssc_Pcc=(Vch_Pcc.*conj(Ich_Pcc));
Sscero_Pcc=3*(Vcero_Pcc.*conj(Icero_Pcc));
Ssd_Pcc=3*(Vd_Pcc.*conj(Id_Pcc));
Ssi_Pcc=3*(Vi_Pcc.*conj(Ii_Pcc));

```

```

Psa_Pcc=real(Ssa_Pcc);
Psb_Pcc=real(Ssb_Pcc);
Psc_Pcc=real(Ssc_Pcc);
Pscero_Pcc=real(Sscero_Pcc);
Psd_Pcc=real(Ssd_Pcc);
Psi_Pcc=real(Ssi_Pcc);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculo de las Potencia total, fundamental y armónica %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

PT_Pcc=sum(Psa_Pcc+Psb_Pcc+Psc_Pcc);
PPT_Pcc=Psa_Pcc+Psb_Pcc+Psc_Pcc;
PT1_Pcc=PPT_Pcc(1);
PTH_Pcc=PT_Pcc-PT1_Pcc;
PT3_Pcc=PPT_Pcc(3);
PT5_Pcc=PPT_Pcc(5);
PT7_Pcc=PPT_Pcc(7);
PT9_Pcc=PPT_Pcc(9);
PT11_Pcc=PPT_Pcc(11);
PT13_Pcc=PPT_Pcc(13);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculo de THD Y TDDs %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Valores de fase

TDDva_Pcc=100*sqrt((norm(RMSVa_Pcc))^2-
(RMSVa_Pcc(1)^2)/norm(RMSVa_Pcc);
TDDvb_Pcc=100*sqrt((norm(RMSVb_Pcc))^2-
(RMSVb_Pcc(1)^2)/norm(RMSVb_Pcc);
TDDvc_Pcc=100*sqrt((norm(RMSVc_Pcc))^2-
(RMSVc_Pcc(1)^2)/norm(RMSVc_Pcc);
TDDia_Pcc=100*sqrt((RMSIa_Pcc.*RMSIa_Pcc)-
(RMSIa_Pcc(1)*RMSIa_Pcc(1))/norm(RMSIa_Pcc);
TDDib_Pcc=100*sqrt((RMSIb_Pcc.*RMSIb_Pcc)-
(RMSIb_Pcc(1)*RMSIb_Pcc(1))/norm(RMSIb_Pcc);
TDDic_Pcc=100*sqrt((RMSIc_Pcc.*RMSIc_Pcc)-
(RMSIc_Pcc(1)*RMSIc_Pcc(1))/norm(RMSIc_Pcc);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Valores equivalentes, TDDs y THDs %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Vel_Pcc=sqrt(RMSVd_Pcc(1)^2+RMSVi_Pcc(1)^2+(RMSVcero_Pcc(1)^2)/2);
Ve_Pcc=sqrt((norm(Vd_Pcc))^2+(norm(Vi_Pcc))^2+(norm(Vcero_Pcc)^2)/2);
VeH_Pcc=sqrt(Ve_Pcc^2-Vel_Pcc^2);
VTDD_Pcc=100*VeH_Pcc/Ve_Pcc;

VeHd_Pcc=sqrt(Ve_Pcc^2-RMSVd_Pcc(1)^2);
VTHDd_Pcc=100*VeHd_Pcc/RMSVd_Pcc(1);
VTDDd_Pcc=100*VeHd_Pcc/Ve_Pcc;
GTHDV_Pcc(1)= 100*sqrt((Ve_Pcc^2/RMSVd_Pcc(1)^2)-1);

Iel_Pcc=sqrt(RMSId_Pcc(1)^2+RMSIi_Pcc(1)^2+4*(RMSIcero_Pcc(1)^2));
Ie_Pcc=sqrt((norm(Id_Pcc))^2+(norm(Ii_Pcc))^2+4*(norm(Icero_Pcc)^2));
IeH_Pcc=sqrt(Ie_Pcc^2-Iel_Pcc^2);
ITDDs_Pcc=100*IeH_Pcc/Ie_Pcc;

IeHd_Pcc=sqrt(Ie_Pcc^2-RMSId_Pcc(1)^2);
ITHDsd_Pcc=100*IeHd_Pcc/RMSId_Pcc(1);
ITDDsd_Pcc=100*IeHd_Pcc/Ie_Pcc;
GTHDI_Pcc(1)=100*sqrt((Ie_Pcc^2/RMSId_Pcc(1)^2)-1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculo de las componentes simétricas %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a=exp(j*2*pi/3);
vp_Pcc=(sqrt(2)/3)*(va_Pcc+a*vb_Pcc+a^2*vc_Pcc);
v0_Pcc=(sqrt(2)/3)*(va_Pcc+vb_Pcc+vc_Pcc);
DFTvp_Pcc=(1/128)*fft(vp_Pcc);
DFTv0_Pcc=(1/128)*fft(v0_Pcc);

i0_Pcc=(sqrt(2)/3)*(ia_Pcc+ib_Pcc+ic_Pcc);
DFTi0_Pcc=(1/128)*fft(i0_Pcc);
ip_Pcc=(sqrt(2)/3)*(ia_Pcc+a*ib_Pcc+a^2*ic_Pcc);
DFTip_Pcc=(1/128)*fft(ip_Pcc);

```

```
Vcero_Pcc=DFTv0_Pcc(2:64);
Icero_Pcc=DFTi0_Pcc(2:64);
Vd_Pcc=DFTvp_Pcc(2:64);
Id_Pcc=DFTip_Pcc(2:64);
Vi_Pcc=flipud(DFTvp_Pcc(66:128));
Ii_Pcc=flipud(DFTip_Pcc(66:128));
```

```
RMSVd_Pcc=abs(Vd_Pcc);
RMSVi_Pcc=abs(Vi_Pcc);
RMSVcero_Pcc=abs(Vcero_Pcc);
RMSId_Pcc=abs(Id_Pcc);
RMSIi_Pcc=abs(Ii_Pcc);
RMSIcero_Pcc=abs(Icero_Pcc);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculo de SUF, SBH, SUH, STHD y STUD %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Vd_Pcc_Treshache_mas_uno=RMSVd_Pcc(1:3:63);
Vd_Pcc_Treshache_mas_dos=RMSVd_Pcc(2:3:63);
Vd_Pcc_Treshache_mas_tres=RMSVd_Pcc(3:3:63);
Vi_Pcc_Treshache_mas_uno=RMSVi_Pcc(1:3:63);
Vi_Pcc_Treshache_mas_dos=RMSVi_Pcc(2:3:63);
Vi_Pcc_Treshache_mas_tres=RMSVi_Pcc(3:3:63);
Vcero_Pcc_Treshache_mas_uno=RMSVcero_Pcc(1:3:63);
Vcero_Pcc_Treshache_mas_dos=RMSVcero_Pcc(2:3:63);
Vcero_Pcc_Treshache_mas_tres=RMSVcero_Pcc(3:3:63);
Id_Pcc_Treshache_mas_uno=RMSId_Pcc(1:3:63);
Id_Pcc_Treshache_mas_dos=RMSId_Pcc(2:3:63);
Id_Pcc_Treshache_mas_tres=RMSId_Pcc(3:3:63);
Ii_Pcc_Treshache_mas_uno=RMSIi_Pcc(1:3:63);
Ii_Pcc_Treshache_mas_dos=RMSIi_Pcc(2:3:63);
Ii_Pcc_Treshache_mas_tres=RMSIi_Pcc(3:3:63);
Icero_Pcc_Treshache_mas_uno=RMSIcero_Pcc(1:3:63);
Icero_Pcc_Treshache_mas_dos=RMSIcero_Pcc(2:3:63);
Icero_Pcc_Treshache_mas_tres=RMSIcero_Pcc(3:3:63);
```

```
V_b_Pcc=sqrt(sum(sum(Vd_Pcc_Treshache_mas_uno.^2)+sum(Vi_Pcc_Treshache
_mas_dos.^2)+(1/2)*sum(Vcero_Pcc_Treshache_mas_tres.^2)));
V_u_Pcc=sqrt(sum(sum(Vi_Pcc_Treshache_mas_uno.^2)+(1/2)*sum(Vcero_Pcc_
Treshache_mas_uno.^2)+sum(Vd_Pcc_Treshache_mas_dos.^2)+(1/2)*sum(Vcero
_Pcc_Treshache_mas_dos.^2)+sum(Vd_Pcc_Treshache_mas_tres.^2)+sum(Vi_Pc
c_Treshache_mas_tres)));
V_b1_Pcc=Vd_Pcc_Treshache_mas_uno(1);
V_u1_Pcc=sqrt((Vi_Pcc_Treshache_mas_uno(1)^2)+(1/2)*(Vcero_Pcc_Treshac
he_mas_uno(1)^2));
V_bH_Pcc= V_b_Pcc-V_b1_Pcc;
V_uH_Pcc=V_u_Pcc-V_u1_Pcc;
V_e_Pcc=sqrt((V_b1_Pcc^2)+(V_u1_Pcc^2)+(V_bH_Pcc^2)+(V_uH_Pcc^2));
```

```
VUF_Pcc= V_u1_Pcc/V_b1_Pcc;
VBH_Pcc= V_bH_Pcc/V_b1_Pcc;
VUH_Pcc= V_uH_Pcc/V_b1_Pcc;
```

```
VTHD_Pcc=sqrt(((VBH_Pcc^2)+(VUH_Pcc^2))/(1+VUF_Pcc^2));
VTUD_Pcc=sqrt(((VUF_Pcc^2)+(VUH_Pcc^2))/(1+VBH_Pcc^2));
```

```
I_b_Pcc=sqrt(sum(sum(Id_Pcc_Treshache_mas_uno.^2)+sum(Ii_Pcc_Treshache
_mas_dos.^2)+4*sum(Icero_Pcc_Treshache_mas_tres.^2)));
```

```

I_u_Pcc=sqrt(sum(sum(Ii_Pcc_Treshache_mas_uno.^2)+4*sum(Icero_Pcc_Treshache_mas_uno.^2)+sum(Id_Pcc_Treshache_mas_dos.^2)+4*sum(Icero_Pcc_Treshache_mas_dos.^2)+sum(Id_Pcc_Treshache_mas_tres.^2)+sum(Ii_Pcc_Treshache_mas_tres)));
I_b1_Pcc=Id_Pcc_Treshache_mas_uno(1);
I_ul_Pcc=sqrt((Ii_Pcc_Treshache_mas_uno(1)^2)+4*(Icero_Pcc_Treshache_mas_uno(1)^2));
I_bH_Pcc=I_b_Pcc-I_b1_Pcc;
I_uH_Pcc=I_u_Pcc-I_ul_Pcc;
I_e_Pcc=sqrt((I_b1_Pcc^2)+(I_ul_Pcc^2)+(I_bH_Pcc^2)+(I_uH_Pcc^2));

IUF_Pcc= I_ul_Pcc/I_b1_Pcc;
IBH_Pcc= I_bH_Pcc/I_b1_Pcc;
IUH_Pcc= I_uH_Pcc/I_b1_Pcc;

ITHD_Pcc=sqrt(((IBH_Pcc^2)+(IUH_Pcc^2))/(1+IUF_Pcc^2));
ITUD_Pcc=sqrt(((IUF_Pcc^2)+(IUH_Pcc^2))/(1+IBH_Pcc^2));

S_e_Pcc=sqrt((3*V_e_Pcc*I_e_Pcc)^2);
S_b1_Pcc=sqrt(9*(V_b1_Pcc^2)*(I_b1_Pcc^2));
S_ul_Pcc=sqrt(9*((V_b1_Pcc^2)*(I_ul_Pcc^2))+((V_ul_Pcc^2)*(I_b1_Pcc^2))+((V_ul_Pcc^2)*(I_ul_Pcc^2)));
S_bH_Pcc=sqrt(9*((V_b1_Pcc^2)*(I_bH_Pcc^2))+((V_bH_Pcc^2)*(I_b1_Pcc^2))+((V_bH_Pcc^2)*(I_bH_Pcc^2)));
S_uH_Pcc=sqrt((S_e_Pcc^2)-(S_b1_Pcc^2)-(S_ul_Pcc^2)-(S_bH_Pcc^2));

SUF_Pcc=S_ul_Pcc/S_b1_Pcc;
SBH_Pcc=S_bH_Pcc/S_b1_Pcc;
SUH_Pcc=S_uH_Pcc/S_b1_Pcc;

STHD_Pcc=sqrt(((SBH_Pcc^2)+(SUH_Pcc^2))/(1+(SUF_Pcc^2)));
STUD_Pcc=sqrt(((SUF_Pcc^2)+(SUH_Pcc^2))/(1+(SBH_Pcc^2)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Cálculos índices single-point %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Determinación Supply and loading Quality Index Chi_slq

Chi_slq_Pcc=PT_Pcc/Psd_Pcc(1);

% Determinación HGI y HGIm

IsdT_Pcc=[];
IldT_Pcc=[];
for d=1:63;
    if Psd_Pcc(d)>0
        IsdT_Pcc(d)=RMSId_Pcc(d);
        IldT_Pcc(d)=0;
    elseif Psd_Pcc(d)==0
        IsdT_Pcc(d)=0;
        IldT_Pcc(d)=0;
    elseif Psd_Pcc(d)<0
        IsdT_Pcc(d)=0;
        IldT_Pcc(d)=RMSId_Pcc(d);
    end
end;
IsiT_Pcc=[];

```

```

IliT_Pcc=[];
for d=1:63;
    if Psi_Pcc(d)>0
        IsiT_Pcc(d)=RMSIi_Pcc(d);
        IliT_Pcc(d)=0;
    elseif Psi_Pcc(d)==0
        IsiT_Pcc(d)=0;
        IliT_Pcc(d)=0;
    elseif Psi_Pcc(d)<0
        IsiT_Pcc(d)=0;
        IliT_Pcc(d)=RMSIi_Pcc(d);
    end
end;
IsceroT_Pcc=[];
IlceroT_Pcc=[];
for d=1:63;
    if Pscero_Pcc(d)>0
        IsceroT_Pcc(d)=RMSIcero_Pcc(d);
        IlceroT_Pcc(d)=0;
    elseif Pscero_Pcc(d)==0
        IsceroT_Pcc(d)=0;
        IlceroT_Pcc(d)=0;
    elseif Pscero_Pcc(d)<0
        IsceroT_Pcc(d)=0;
        IlceroT_Pcc(d)=RMSIcero_Pcc(d);
    end
end;
IsT_Pcc=[IsdT_Pcc,IsiT_Pcc,IsceroT_Pcc];
IlT_Pcc=[IldT_Pcc,IliT_Pcc,IlceroT_Pcc];

HGIs_Pcc=((norm(IlT_Pcc))^2/(norm(IsT_Pcc))^2)*100;
HGISM_Pcc=(norm(IlT_Pcc))/(norm(IsT_Pcc))*100;

%% Cálculo índice no lineal %%

Z1A_Pcc=Vah_Pcc(1)/Iah_Pcc(1);
RA_Pcc=abs(Z1A_Pcc)*cos(angle(Z1A_Pcc));
LA_Pcc=(abs(Z1A_Pcc)*sin(angle(Z1A_Pcc)))/(2*pi*50);
ZkA_Pcc=[];
ILkA_Pcc=[];

for l=1:63
    ZkA_Pcc(l)=RA_Pcc+j*l*2*pi*50*LA_Pcc;
    ILkA_Pcc(l)=Vah_Pcc(1)/ZkA_Pcc(l);
end
InlA_Pcc=Iah_Pcc-ILkA_Pcc;

Z1B_Pcc=Vbh_Pcc(1)/Ibh_Pcc(1);
RB_Pcc=abs(Z1B_Pcc)*cos(angle(Z1B_Pcc));
LB_Pcc=(abs(Z1B_Pcc)*sin(angle(Z1B_Pcc)))/(2*pi*50);
ZkB_Pcc=[];
ILkB_Pcc=[];
for l=1:63
    ZkB_Pcc(l)=RB_Pcc+j*l*2*pi*50*LB_Pcc;
    ILkB_Pcc(l)=Vbh_Pcc(1)/ZkB_Pcc(l);
end
InlB_Pcc=Ibh_Pcc-ILkB_Pcc;

Z1C_Pcc=Vch_Pcc(1)/Ich_Pcc(1);

```

```

RC_Pcc=abs(Z1C_Pcc)*cos(angle(Z1C_Pcc));
LC_Pcc=(abs(Z1C_Pcc)*sin(angle(Z1C_Pcc)))/(2*pi*50);
ZkC_Pcc=[];ILkC_Pcc=[];
for l=1:63
    ZkC_Pcc(l)=RC_Pcc+j*l*2*pi*50*LC_Pcc;
    ILkC_Pcc(l)=Vch_Pcc(l)/ZkC_Pcc(l);
end
InlC_Pcc=Ich_Pcc-ILkC_Pcc;

NLS_Pcc=[InlA_Pcc,InlB_Pcc,InlC_Pcc];
Is_Pcc=[Iah_Pcc,Ibh_Pcc,Ich_Pcc];
NL_s_Pcc=(norm(NLS_Pcc)/norm(Is_Pcc))*100;

%Fase a

IblA_Pcc=ILkA_Pcc;
IunlA_Pcc=Iah_Pcc-IblA_Pcc;
IuA_Pcc=IunlA_Pcc-InlA_Pcc;

%Fase b

for l=1:63
    IblB_Pcc(l)=Vbh_Pcc(l)/ZkA_Pcc(l);
end
IunlB_Pcc=Ibh_Pcc-IblB_Pcc;
IuB_Pcc=IunlB_Pcc-InlB_Pcc;

%Fase c

for l=1:63
    IblC_Pcc(l)=Vch_Pcc(l)/ZkA_Pcc(l);
end
IunlC_Pcc=Ich_Pcc-IblC_Pcc;
IuC_Pcc=IunlC_Pcc-InlC_Pcc;

% Unbalanced no linear current index

UNLs_Pcc=[IuA_Pcc,IuB_Pcc,IuC_Pcc];

UNL_s_Pcc=(norm(UCs_Pcc)/norm(NLS_Pcc))*100;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Cálculo Índices Distribuidos %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Cálculo Global Index Theta_1

theta1_Load1=(1/3)*(((Chi_slq_Load1)^(-1)/(Chi_slq_Pcc)^(-1))+(HGIs_Load1/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load1(1)/GTHDV_Load1(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta1_Load2=(1/3)*(((Chi_slq_Load2)^(-1)/(Chi_slq_Pcc)^(-1))+(HGIs_Load2/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load2(1)/GTHDV_Load2(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta1_Load3=(1/3)*(((Chi_slq_Load3)^(-1)/(Chi_slq_Pcc)^(-1))+(HGIs_Load3/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load3(1)/GTHDV_Load3(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));

```

```
theta1_Load4=(1/3)*(((Chi_slq_Load4)^(-1)/(Chi_slq_Pcc)^(-1))+
(HGIs_Load4/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load4(1)/GTHDV_Load4(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta1_Load5=(1/3)*(((Chi_slq_Load5)^(-1)/(Chi_slq_Pcc)^(-1))+
(HGIs_Load5/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load5(1)/GTHDV_Load5(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
```

**% Cálculo Global Index Theta\_2**

```
theta2_Load1=(1/3)*((UNL_s_Load1/UNL_s_Pcc)+(HGIs_Load1/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load1(1)/GTHDV_Load1(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta2_Load2=(1/3)*((UNL_s_Load2/UNL_s_Pcc)+(HGIs_Load2/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load2(1)/GTHDV_Load2(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta2_Load3=(1/3)*((UNL_s_Load3/UNL_s_Pcc)+(HGIs_Load3/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load3(1)/GTHDV_Load3(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta2_Load4=(1/3)*((UNL_s_Load4/UNL_s_Pcc)+(HGIs_Load4/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load4(1)/GTHDV_Load4(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
theta2_Load5=(1/3)*((UNL_s_Load5/UNL_s_Pcc)+(HGIs_Load5/HGIs_Pcc)+((GTHDI_Load5(1)/GTHDV_Load5(1))/(GTHDI_Pcc(1)/GTHDV_Pcc(1))));
```

**% Cálculo Global Index Theta\_3**

```
theta3_Load1=(1/4)*((S_ul_Load1/S_ul_Pcc)+(S_uH_Load1/S_uH_Pcc)+(S_bH_Load1/S_bH_Pcc)+(HGism_Load1/HGism_Pcc));
theta3_Load2=(1/4)*((S_ul_Load2/S_ul_Pcc)+(S_uH_Load2/S_uH_Pcc)+(S_bH_Load2/S_bH_Pcc)+(HGism_Load2/HGism_Pcc));
theta3_Load3=(1/4)*((S_ul_Load3/S_ul_Pcc)+(S_uH_Load3/S_uH_Pcc)+(S_bH_Load3/S_bH_Pcc)+(HGism_Load3/HGism_Pcc));
theta3_Load4=(1/4)*((S_ul_Load4/S_ul_Pcc)+(S_uH_Load4/S_uH_Pcc)+(S_bH_Load4/S_bH_Pcc)+(HGism_Load4/HGism_Pcc));
theta3_Load5=(1/4)*((S_ul_Load5/S_ul_Pcc)+(S_uH_Load5/S_uH_Pcc)+(S_bH_Load5/S_bH_Pcc)+(HGism_Load5/HGism_Pcc));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Presentación de los resultados en matlab %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

**% Valores rms de tensiones e intensidades**

```
fprintf('\n Valores rms de V e I%8.4f \n')
fprintf('\n Vrmss_a_Pcc= %8.4e Vrmss_b_Pcc %8.4e Vrmss_c_Pcc= %8.4e \n',Vrmss_a_Pcc,Vrmss_b_Pcc,Vrmss_c_Pcc)
fprintf('\n Vrmss_a_Load1= %8.4e Vrmss_b_Load1 %8.4e Vrmss_c_Load1= %8.4e \n',Vrmss_a_Load1,Vrmss_b_Load1,Vrmss_c_Load1)
fprintf('\n Vrmss_a_Load2= %8.4e Vrmss_b_Load2 %8.4e Vrmss_c_Load2= %8.4e \n',Vrmss_a_Load2,Vrmss_b_Load2,Vrmss_c_Load2)
fprintf('\n Vrmss_a_Load3= %8.4e Vrmss_b_Load3 %8.4e Vrmss_c_Load3= %8.4e \n',Vrmss_a_Load3,Vrmss_b_Load3,Vrmss_c_Load3)
fprintf('\n Vrmss_a_Load4= %8.4e Vrmss_b_Load4 %8.4e Vrmss_c_Load4= %8.4e \n',Vrmss_a_Load4,Vrmss_b_Load4,Vrmss_c_Load4)
fprintf('\n Vrmss_a_Load5= %8.4e Vrmss_b_Load5 %8.4e Vrmss_c_Load5= %8.4e \n',Vrmss_a_Load5,Vrmss_b_Load5,Vrmss_c_Load5)
fprintf('\n Irmss_a_Pcc= %8.4e Irmss_b_Pcc %8.4e Irmss_c_Pcc= %8.4e \n',Irmss_a_Pcc,Irmss_b_Pcc,Irmss_c_Pcc)
fprintf('\n Irmss_a_Load1= %8.4e Irmss_b_Load1 %8.4e Irmss_c_Load1= %8.4e \n',Irmss_a_Load1,Irmss_b_Load1,Irmss_c_Load1)
fprintf('\n Irmss_a_Load2= %8.4e Irmss_b_Load2 %8.4e Irmss_c_Load2= %8.4e \n',Irmss_a_Load2,Irmss_b_Load2,Irmss_c_Load2)
```

```

fprintf('\n Irmss_a_Load3= %8.4e Irmss_b_Load3 %8.4e Irmss_c_Load3=
%8.4e \n',Irmss_a_Load3,Irmss_b_Load3,Irmss_c_Load3)
fprintf('\n Irmss_a_Load4= %8.4e Irmss_b_Load4 %8.4e Irmss_c_Load4=
%8.4e \n',Irmss_a_Load4,Irmss_b_Load4,Irmss_c_Load4)
fprintf('\n Irmss_a_Load5= %8.4e Irmss_b_Load5 %8.4e Irmss_c_Load5=
%8.4e \n',Irmss_a_Load5,Irmss_b_Load5,Irmss_c_Load5)

% Valores equivalentes TDDs y THDs de tensión

fprintf('\n Valores Equivalentes y TDDs de tensión%8.4f \n')
fprintf('\n Ve_Pcc= %10.6f ; VTDD_Pcc= %8.4f ; VTHD+_Pcc= %8.4f ;
VTDD+_Pcc= %8.4f\n',Ve_Pcc, VTDD_Pcc,VTHDd_Pcc,VTDDd_Pcc)
fprintf('\n Ve_Load1= %10.6f ; VTDD_Load1= %8.4f ; VTHD+_Load1= %8.4f
; VTDD+_Load1= %8.4f\n',Ve_Load1, VTDD_Load1,VTHDd_Load1,VTDDd_Load1)
fprintf('\n Ve_Load2= %10.6f ; VTDD_Load2= %8.4f ; VTHD+_Load2= %8.4f
; VTDD+_Load2= %8.4f\n',Ve_Load2, VTDD_Load2,VTHDd_Load2,VTDDd_Load2)
fprintf('\n Ve_Load3= %10.6f ; VTDD_Load3= %8.4f ; VTHD+_Load3= %8.4f
; VTDD+_Load3= %8.4f\n',Ve_Load3, VTDD_Load3,VTHDd_Load3,VTDDd_Load3)
fprintf('\n Ve_Load4= %10.6f ; VTDD_Load4= %8.4f ; VTHD+_Load4= %8.4f
; VTDD+_Load4= %8.4f\n',Ve_Load4, VTDD_Load4,VTHDd_Load4,VTDDd_Load4)
fprintf('\n Ve_Load5= %10.6f ; VTDD_Load5= %8.4f ; VTHD+_Load5= %8.4f
; VTDD+_Load5= %8.4f\n',Ve_Load5, VTDD_Load5,VTHDd_Load5,VTDDd_Load5)

% Valores equivalentes y TDDs y THDs de intensidad

fprintf('\n Valores Equivalentes y TDDs de intensidad%8.4f \n')
fprintf('\n Ie_Pcc= %10.6f ; ITDDs_Pcc= %8.4f ; ITHD+_Pcc= %8.4f ;
ITDD+_Pcc= %8.4f \n',Ie_Pcc, ITDDs_Pcc,ITHDsd_Pcc,ITDDsd_Pcc)
fprintf('\n Ie_Load1= %10.6f ; ITDDs_Load1= %8.4f ; ITHD+_Load1= %8.4f
; ITDD+_Load1= %8.4f \n',Ie_Load1,
ITDDs_Load1,ITHDsd_Load1,ITDDsd_Load1)
fprintf('\n Ie_Load2= %10.6f ; ITDDs_Load2= %8.4f ; ITHD+_Load2= %8.4f
; ITDD+_Load2= %8.4f \n',Ie_Load2,
ITDDs_Load2,ITHDsd_Load2,ITDDsd_Load2)
fprintf('\n Ie_Load3= %10.6f ; ITDDs_Load3= %8.4f ; ITHD+_Load3= %8.4f
; ITDD+_Load3= %8.4f \n',Ie_Load3,
ITDDs_Load3,ITHDsd_Load3,ITDDsd_Load3)
fprintf('\n Ie_Load4= %10.6f ; ITDDs_Load4= %8.4f ; ITHD+_Load4= %8.4f
; ITDD+_Load4= %8.4f \n',Ie_Load4,
ITDDs_Load4,ITHDsd_Load4,ITDDsd_Load4)
fprintf('\n Ie_Load5= %10.6f ; ITDDs_Load5= %8.4f ; ITHD+_Load5= %8.4f
; ITDD+_Load5= %8.4f \n',Ie_Load5,
ITDDs_Load5,ITHDsd_Load5,ITDDsd_Load5)

% Valores de la potencia total, Fundamental y Armónica

fprintf('\n Valores Potencia Total, Fundamental y Armónica%8.4f \n')
fprintf('\n PT_Pcc= %8.4e PT1_Pcc%8.4e PTH_Pcc= %8.4e
\n',PT_Pcc,PT1_Pcc, PTH_Pcc )
fprintf('\n PT_Load1= %8.4e PT1_Load1= %8.4e PTH_Load1= %8.4e
\n',PT_Load1,PT1_Load1, PTH_Load1 )
fprintf('\n PT_Load2= %8.4e PT1_Load2= %8.4e PTH_Load2= %8.4e
\n',PT_Load2,PT1_Load2, PTH_Load2 )
fprintf('\n PT_Load3= %8.4e PT1_Load3= %8.4e PTH_Load3= %8.4e
\n',PT_Load3,PT1_Load3, PTH_Load3 )
fprintf('\n PT_Load4= %8.4e PT1_Load4= %8.4e PTH_Load4= %8.4e
\n',PT_Load4,PT1_Load4, PTH_Load4 )
fprintf('\n PT_Load5= %8.4e PT1_Load5= %8.4e PTH_Load5= %8.4e
\n',PT_Load5,PT1_Load5, PTH_Load5 )

```

```

% GTHDV+ y GTHDI+

fprintf('\n Valores índices GTHDV+ y GTHDI+%8.4f \n')
fprintf('\n GTHDV_Pcc+= %8.4f; GTHDI_Pcc+= %8.4f
\n',GTHDV_Pcc(1),GTHDI_Pcc(1))
fprintf('\n GTHDV_Load1+= %8.4f; GTHDI_Load1+= %8.4f
\n',GTHDV_Load1(1),GTHDI_Load1(1))
fprintf('\n GTHDV_Load2+= %8.4f; GTHDI_Load2+= %8.4f
\n',GTHDV_Load2(1),GTHDI_Load2(1))
fprintf('\n GTHDV_Load3+= %8.4f; GTHDI_Load3+= %8.4f
\n',GTHDV_Load3(1),GTHDI_Load3(1))
fprintf('\n GTHDV_Load4+= %8.4f; GTHDI_Load4+= %8.4f
\n',GTHDV_Load4(1),GTHDI_Load4(1))
fprintf('\n GTHDV_Load5+= %8.4f; GTHDI_Load5+= %8.4f
\n',GTHDV_Load5(1),GTHDI_Load5(1))

% Resultados valores Índices single-point

fprintf('\n Valores índices en un solo punto%8.4f \n')
fprintf('\n Chi_slq_Pcc= %8.4f; HGIs_Pcc= %8.4f; HGIsM_Pcc=
%8.4f;NCs_dist_Pcc= %8.4f;NCunb_s_Pcc= %8.4f;NL_s_Pcc= %8.4f;UC_s_Pcc=
%8.4f;UCm_s_Pcc= %8.4f \n', Chi_slq_Pcc, HGIs_Pcc, HGIsM_Pcc,
NCs_dist_Pcc, NCunb_s_Pcc,NL_s_Pcc,UC_s_Pcc,UCm_s_Pcc)
fprintf('\n Chi_slq_Load1= %8.4f; HGIs_Load1= %8.4f; HGIsM_Load1=
%8.4f;NCs_dist_Load1= %8.4f;NCunb_s_Load1= %8.4f;NL_s_Load1=
%8.4f;UC_s_Load1= %8.4f;UCm_s_Load1= %8.4f \n', Chi_slq_Load1,
HGIs_Load1, HGIsM_Load1, NCs_dist_Load1,
NCunb_s_Load1,NL_s_Load1,UC_s_Load1,UCm_s_Load1)
fprintf('\n Chi_slq_Load2= %8.4f; HGIs_Load2= %8.4f; HGIsM_Load2=
%8.4f;NCs_dist_Load2= %8.4f;NCunb_s_Load2= %8.4f;NL_s_Load2=
%8.4f;UC_s_Load2= %8.4f;UCm_s_Load2= %8.4f \n', Chi_slq_Load2,
HGIs_Load2, HGIsM_Load2, NCs_dist_Load2,
NCunb_s_Load2,NL_s_Load2,UC_s_Load2,UCm_s_Load2)
fprintf('\n Chi_slq_Load3= %8.4f; HGIs_Load3= %8.4f; HGIsM_Load3=
%8.4f;NCs_dist_Load3= %8.4f;NCunb_s_Load3= %8.4f;NL_s_Load3=
%8.4f;UC_s_Load3= %8.4f;UCm_s_Load3= %8.4f \n', Chi_slq_Load3,
HGIs_Load3, HGIsM_Load3, NCs_dist_Load3,
NCunb_s_Load3,NL_s_Load3,UC_s_Load3,UCm_s_Load3)
fprintf('\n Chi_slq_Load4= %8.4f; HGIs_Load4= %8.4f; HGIsM_Load4=
%8.4f;NCs_dist_Load4= %8.4f;NCunb_s_Load4= %8.4f;NL_s_Load4=
%8.4f;UC_s_Load4= %8.4f;UCm_s_Load4= %8.4f \n', Chi_slq_Load4,
HGIs_Load4, HGIsM_Load4, NCs_dist_Load4,
NCunb_s_Load4,NL_s_Load4,UC_s_Load4,UCm_s_Load4)
fprintf('\n Chi_slq_Load5= %8.4f; HGIs_Load5= %8.4f; HGIsM_Load5=
%8.4f;NCs_dist_Load5= %8.4f;NCunb_s_Load5= %8.4f;NL_s_Load5=
%8.4f;UC_s_Load5= %8.4f;UCm_s_Load5= %8.4f \n', Chi_slq_Load5,
HGIs_Load5, HGIsM_Load5, NCs_dist_Load5,
NCunb_s_Load5,NL_s_Load5,UC_s_Load5,UCm_s_Load5)

% Valores de las componentes de tensión e intensidad de distorsión y
desequilibrio

fprintf('\n IUF_Pcc= %8.4f;IBH_Pcc=%8.4f;IUH_Pcc
%8.4f;ITHD_Pcc=%8.4f;ITUD_Pcc= %8.4f
\n', IUF_Pcc, IBH_Pcc, IUH_Pcc, ITHD_Pcc, ITUD_Pcc)
fprintf('\n VUF_Pcc= %8.4f;VBH_Pcc=%8.4f;VUH_Pcc
%8.4f;VTHD_Pcc=%8.4f;VTUD_Pcc= %8.4f
\n', VUF_Pcc, VBH_Pcc, VUH_Pcc, VTHD_Pcc, VTUD_Pcc)

```

```

fprintf('\n IUF_Load1= %8.4f;IBH_Load1=%8.4f;IUH_Load1
%8.4f;ITHD_Load1=%8.4f;ITUD_Load1= %8.4f
\n', IUF_Load1, IBH_Load1, IUH_Load1, ITHD_Load1, ITUD_Load1)
fprintf('\n VUF_Load1= %8.4f;VBH_Load1=%8.4f;VUH_Load1
%8.4f;VTHD_Load1=%8.4f;VTUD_Load1= %8.4f
\n', VUF_Load1, VBH_Load1, VUH_Load1, VTHD_Load1, VTUD_Load1)
fprintf('\n IUF_Load2= %8.4f;IBH_Load2=%8.4f;IUH_Load2
%8.4f;ITHD_Load2=%8.4f;ITUD_Load2= %8.4f
\n', IUF_Load2, IBH_Load2, IUH_Load2, ITHD_Load2, ITUD_Load2)
fprintf('\n VUF_Load2= %8.4f;VBH_Load2=%8.4f;VUH_Load2
%8.4f;VTHD_Load2=%8.4f;VTUD_Load2= %8.4f
\n', VUF_Load2, VBH_Load2, VUH_Load2, VTHD_Load2, VTUD_Load2)
fprintf('\n IUF_Load3= %8.4f;IBH_Load3=%8.4f;IUH_Load3
%8.4f;ITHD_Load3=%8.4f;ITUD_Load3= %8.4f
\n', IUF_Load3, IBH_Load3, IUH_Load3, ITHD_Load3, ITUD_Load3)
fprintf('\n VUF_Load3= %8.4f;VBH_Load3=%8.4f;VUH_Load3
%8.4f;VTHD_Load3=%8.4f;VTUD_Load3= %8.4f
\n', VUF_Load3, VBH_Load3, VUH_Load3, VTHD_Load3, VTUD_Load3)
fprintf('\n IUF_Load4= %8.4f;IBH_Load4=%8.4f;IUH_Load4
%8.4f;ITHD_Load4=%8.4f;ITUD_Load4= %8.4f
\n', IUF_Load4, IBH_Load4, IUH_Load4, ITHD_Load4, ITUD_Load4)
fprintf('\n VUF_Load4= %8.4f;VBH_Load4=%8.4f;VUH_Load4
%8.4f;VTHD_Load4=%8.4f;VTUD_Load4= %8.4f
\n', VUF_Load4, VBH_Load4, VUH_Load4, VTHD_Load4, VTUD_Load4)
fprintf('\n IUF_Load5= %8.4f;IBH_Load5=%8.4f;IUH_Load5
%8.4f;ITHD_Load5=%8.4f;ITUD_Load5= %8.4f
\n', IUF_Load5, IBH_Load5, IUH_Load5, ITHD_Load5, ITUD_Load5)
fprintf('\n VUF_Load5= %8.4f;VBH_Load5=%8.4f;VUH_Load5
%8.4f;VTHD_Load5=%8.4f;VTUD_Load5= %8.4f
\n', VUF_Load5, VBH_Load5, VUH_Load5, VTHD_Load5, VTUD_Load5)

% % Valores de los términos de potencia: Se, Sb1, Su1, SbH, SuH

fprintf('\n Valores términos de potencias%8.4f \n')
fprintf('\n Se_Pcc= %10.6f ; Sb1_Pcc= %8.4f ; Su1_Pcc= %8.4f ;SbH_Pcc=
%8.4f ;SuH_Pcc= %8.4f \n' ,S_e_Pcc, S_b1_Pcc, S_ul_Pcc,S_bH_Pcc,
S_uH_Pcc)
fprintf('\n Se_Load1= %10.6f ; Sb1_Load1= %8.4f ; Su1_Load1= %8.4f
;SbH_Load1= %8.4f ;SuH_Load1= %8.4f \n' ,S_e_Load1, S_b1_Load1,
S_ul_Load1,S_bH_Load1, S_uH_Load1)
fprintf('\n Se_Load2= %10.6f ; Sb1_Load2= %8.4f ; Su1_Load2= %8.4f
;SbH_Load2= %8.4f ;SuH_Load2= %8.4f \n' ,S_e_Load2, S_b1_Load2,
S_ul_Load2,S_bH_Load2, S_uH_Load2)
fprintf('\n Se_Load3= %10.6f ; Sb1_Load3= %8.4f ; Su1_Load3= %8.4f
;SbH_Load3= %8.4f ;SuH_Load3= %8.4f \n' ,S_e_Load3, S_b1_Load3,
S_ul_Load3,S_bH_Load3, S_uH_Load3)
fprintf('\n Se_Load4= %10.6f ; Sb1_Load4= %8.4f ; Su1_Load4= %8.4f
;SbH_Load4= %8.4f ;SuH_Load4= %8.4f \n' ,S_e_Load4, S_b1_Load4,
S_ul_Load4,S_bH_Load4, S_uH_Load4)
fprintf('\n Se_Load5= %10.6f ; Sb1_Load5= %8.4f ; Su1_Load5= %8.4f
;SbH_Load5= %8.4f ;SuH_Load5= %8.4f \n' ,S_e_Load5, S_b1_Load5,
S_ul_Load5,S_bH_Load5, S_uH_Load5)

% Valores de SUF, SBH, SUH, STHD y STUD
fprintf('\n Valores índices Standar%8.4f \n')
fprintf('\n SUF_Pcc= %10.6f ; SBH_Pcc= %8.4f ; SUH_Pcc= %8.4f
;STHD_Pcc= %8.4f ;STUD_Pcc= %8.4f \n' ,SUF_Pcc, SBH_Pcc,
SUH_Pcc,STHD_Pcc, STUD_Pcc )

```

```
fprintf('\n SUF_Load1= %10.6f ; SBH_Load1= %8.4f ; SUH_Load1= %8.4f
;STHD_Load1= %8.4f ;STUD_Load1= %8.4f \n', SUF_Load1, SBH_Load1,
SUH_Load1, STHD_Load1, STUD_Load1)
fprintf('\n SUF_Load2= %10.6f ; SBH_Load2= %8.4f ; SUH_Load2= %8.4f
;STHD_Load2= %8.4f ;STUD_Load2= %8.4f \n', SUF_Load2, SBH_Load2,
SUH_Load2, STHD_Load2, STUD_Load2)
fprintf('\n SUF_Load3= %10.6f ; SBH_Load3= %8.4f ; SUH_Load3= %8.4f
;STHD_Load3= %8.4f ;STUD_Load3= %8.4f \n', SUF_Load3, SBH_Load3,
SUH_Load3, STHD_Load3, STUD_Load3)
fprintf('\n SUF_Load4= %10.6f ; SBH_Load4= %8.4f ; SUH_Load4= %8.4f
;STHD_Load4= %8.4f ;STUD_Load4= %8.4f \n', SUF_Load4, SBH_Load4,
SUH_Load4, STHD_Load4, STUD_Load4)
fprintf('\n SUF_Load5= %10.6f ; SBH_Load5= %8.4f ; SUH_Load5= %8.4f
;STHD_Load5= %8.4f ;STUD_Load5= %8.4f \n', SUF_Load5, SBH_Load5,
SUH_Load5, STHD_Load5, STUD_Load5)
```

% Valores de índices distribuidos

```
fprintf('\n Valores Índices Distribuidos %8.4f \n')
fprintf('\n theta1_Load1= %8.4f ;theta2_Load1= %8.4f ; theta3_Load1=
%8.4f \n', theta1_Load1, theta2_Load1, theta3_Load1)
fprintf('\n theta1_Load2= %8.4f ;theta2_Load2= %8.4f ; theta3_Load2=
%8.4f \n', theta1_Load2, theta2_Load2, theta3_Load2)
fprintf('\n theta1_Load3= %8.4f ;theta2_Load3= %8.4f ; theta3_Load3=
%8.4f \n', theta1_Load3, theta2_Load3, theta3_Load3)
fprintf('\n theta1_Load4= %8.4f ;theta2_Load4= %8.4f ; theta3_Load4=
%8.4f \n', theta1_Load4, theta2_Load4, theta3_Load4)
fprintf('\n tetha1_Load5= %8.4f ;theta2_Load5= %8.4f ; theta3_Load5=
%8.4f \n', theta1_Load5, theta2_Load5, theta3_Load5)
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Presentación de los resultados en Excel %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Vrms = [Vrmss_a_Pcc,Vrmss_b_Pcc,Vrmss_c_Pcc;
Vrmss_a_Load1,Vrmss_b_Load1,Vrmss_c_Load1;
Vrmss_a_Load2,Vrmss_b_Load2,Vrmss_c_Load2;
Vrmss_a_Load3,Vrmss_b_Load3,Vrmss_c_Load3;
Vrmss_a_Load4,Vrmss_b_Load4,Vrmss_c_Load4];
Vrmss_a_Load5,Vrmss_b_Load5,Vrmss_c_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', Vrms, 'Hojal', 'B3:D8');
```

```
Irms = [Irmss_a_Pcc,Irmss_b_Pcc,Irmss_c_Pcc;
Irmss_a_Load1,Irmss_b_Load1,Irmss_c_Load1;
Irmss_a_Load2,Irmss_b_Load2,Irmss_c_Load2;
Irmss_a_Load3,Irmss_b_Load3,Irmss_c_Load3;
Irmss_a_Load4,Irmss_b_Load4,Irmss_c_Load4];
Irmss_a_Load5,Irmss_b_Load5,Irmss_c_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', Irms, 'Hojal', 'G3:I8');
```

```
VTDDs = [Ve_Pcc, VTDD_Pcc,VTHDd_Pcc,VTDDd_Pcc; Ve_Load1,
VTDD_Load1,VTHDd_Load1,VTDDd_Load1; Ve_Load2,
VTDD_Load2,VTHDd_Load2,VTDDd_Load2; Ve_Load3,
VTDD_Load3,VTHDd_Load3,VTDDd_Load3; Ve_Load4,
VTDD_Load4,VTHDd_Load4,VTDDd_Load4; Ve_Load5,
VTDD_Load5,VTHDd_Load5,VTDDd_Load5]
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', VTDDs, 'Hojal', 'B11:E16');
```

```
ITDDs = [Ie_Pcc, ITDDs_Pcc,ITHDsd_Pcc,ITDDsd_Pcc; Ie_Load1,
ITDDs_Load1,ITHDsd_Load1,ITDDsd_Load1; Ie_Load2,
```

```

ITDDs_Load2,ITHDsd_Load2,ITDDsd_Load2; Ie_Load3,
ITDDs_Load3,ITHDsd_Load3,ITDDsd_Load3; Ie_Load4,
ITDDs_Load4,ITHDsd_Load4,ITDDsd_Load4; Ie_Load5,
ITDDs_Load5,ITHDsd_Load5,ITDDsd_Load5]
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', ITDDs, 'Hojal', 'G11:J16');

GTHDplus = [GTHDV_Pcc(1),GTHDI_Pcc(1); GTHDV_Load1(1),GTHDI_Load1(1);
GTHDV_Load2(1),GTHDI_Load2(1); GTHDV_Load3(1),GTHDI_Load3(1);
GTHDV_Load4(1),GTHDI_Load4(1)];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', GTHDplus, 'Hojal', 'B18:C22');

Potencia = [PT_Pcc,PT1_Pcc,PTH_Pcc;PT_Load1,PT1_Load1,
PTH_Load1;PT_Load2,PT1_Load2, PTH_Load2; PT_Load3,PT1_Load3,
PTH_Load3;PT_Load4,PT1_Load4, PTH_Load4; PT_Load5,PT1_Load5,
PTH_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', Potencia, 'Hojal', 'G18:I23');

MI =
[Chi_slq_Pcc,HGIs_Pcc,HGIsm_Pcc,NCs_dist_Pcc,NCunb_s_Pcc,NL_s_Pcc,UC_s
_Pcc,UCm_s_Pcc ;
Chi_slq_Load1,HGIs_Load1,HGIsm_Load1,NCs_dist_Load1,NCunb_s_Load1,NL_s
_Load1,UC_s_Load1,UCm_s_Load1 ;
Chi_slq_Load2,HGIs_Load2,HGIsm_Load2,NCs_dist_Load2,NCunb_s_Load2,NL_s
_Load2,UC_s_Load2,UCm_s_Load2 ;
Chi_slq_Load3,HGIs_Load3,HGIsm_Load3,NCs_dist_Load3,NCunb_s_Load3,NL_s
_Load3,UC_s_Load3,UCm_s_Load3 ;
Chi_slq_Load4,HGIs_Load4,HGIsm_Load4,NCs_dist_Load4,NCunb_s_Load4,NL_s
_Load4,UC_s_Load4,UCm_s_Load4];
Chi_slq_Load5,HGIs_Load5,HGIsm_Load5,NCs_dist_Load5,NCunb_s_Load5,NL_s
_Load5,UC_s_Load5,UCm_s_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', MI, 'Hojal', 'B25:I30');

StandarV = [VUF_Pcc,VBH_Pcc,VUH_Pcc,VTHD_Pcc,VTUD_Pcc;
VUF_Load1,VBH_Load1,VUH_Load1,VTHD_Load1,VTUD_Load1;
VUF_Load2,VBH_Load2,VUH_Load2,VTHD_Load2,VTUD_Load2;
VUF_Load3,VBH_Load3,VUH_Load3,VTHD_Load3,VTUD_Load3;
VUF_Load4,VBH_Load4,VUH_Load4,VTHD_Load4,VTUD_Load4];
VUF_Load5,VBH_Load5,VUH_Load5,VTHD_Load5,VTUD_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', StandarV, 'Hojal', 'B32:F37');

StandarI = [IUF_Pcc,IBH_Pcc,IUH_Pcc,ITHD_Pcc,ITUD_Pcc;
IUF_Load1,IBH_Load1,IUH_Load1,ITHD_Load1,ITUD_Load1;
IUF_Load2,IBH_Load2,IUH_Load2,ITHD_Load2,ITUD_Load2;
IUF_Load3,IBH_Load3,IUH_Load3,ITHD_Load3,ITUD_Load3;
IUF_Load4,IBH_Load4,IUH_Load4,ITHD_Load4,ITUD_Load4];
IUF_Load5,IBH_Load5,IUH_Load5,ITHD_Load5,ITUD_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', StandarI, 'Hojal', 'I32:M36');

StandarS = [S_e_Pcc, S_bl_Pcc, S_ul_Pcc,S_bh_Pcc, S_uH_Pcc;S_e_Load1,
S_bl_Load1, S_ul_Load1,S_bh_Load1, S_uH_Load1; S_e_Load2, S_bl_Load2,
S_ul_Load2,S_bh_Load2, S_uH_Load2;S_e_Load3, S_bl_Load3,
S_ul_Load3,S_bh_Load3, S_uH_Load3; S_e_Load4, S_bl_Load4,
S_ul_Load4,S_bh_Load4, S_uH_Load4; S_e_Load5, S_bl_Load5,
S_ul_Load5,S_bh_Load5, S_uH_Load5];
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', StandarS, 'Hojal', 'I40:M45');

Indices_Standar = [SUF_Pcc, SBH_Pcc, SUH_Pcc,STHD_Pcc,
STUD_Pcc;SUF_Load1, SBH_Load1, SUH_Load1, STHD_Load1,
STUD_Load1;SUF_Load2, SBH_Load2, SUH_Load2, STHD_Load2,

```

```
STUD_Load2;SUF_Load3, SBH_Load3, SUH_Load3, STHD_Load3,  
STUD_Load3;SUF_Load4, SBH_Load4, SUH_Load4, STHD_Load4, STUD_Load4];  
STUD_Load3;SUF_Load5, SBH_Load5, SUH_Load5, STHD_Load5, STUD_Load5];  
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', Indices_Standar, 'Hoja1', 'B40:F45');
```

```
MedidasD = [Theta_1_Load1, Theta_2_Load1, Theta_3_Load1;  
Theta_1_Load2, Theta_3_Load2, Theta_3_Load2; Theta_1_Load3,  
Theta_2_Load3, Theta_3_Load3; Theta_1_Load4, Theta_2_Load4,  
Theta_3_Load4; Theta_1_Load5, Theta_2_Load5, Theta_3_Load5];  
xlswrite('Plataforma_M.xlsx', MedidasD, 'Hoja1', 'B48:J52');
```

## **ANEXO B**



### **PLATAFORMA EXPERIMENTAL**



Para contrastar los resultados obtenidos a través de las simulaciones realizadas en Matlab/Simulink, se ha desarrollado una plataforma experimental en el laboratorio de potencia del grupo de investigación. En este anexo se describe el montaje implementado que permite configurar a pequeña escala las diferentes condiciones de trabajo que se pueden dar en una línea de distribución en baja tensión. Como se muestra en la figura B.1, se trata de cuatro cargas alimentadas por un sistema trifásico (400/230 V, 50 Hz) a través de una línea de cuatro conductores ( $Z_L$ ). La topología del sistema puede modificarse para ver el comportamiento de los índices en diferentes configuraciones del sistema a través de una serie de interruptores. Mediante los interruptores “ $S_A$ ” y “ $S_B$ ”, las cargas pueden ser alimentadas directamente desde la red eléctrica que da suministro eléctrico al laboratorio, fuente “ $A$ ” ( $S_A$  ON y  $S_B$  OFF) con la distorsión y el desequilibrio propio de la red, o bien con una fuente con la distorsión de la red y desequilibrio controlado, fuente “ $B$ ” ( $S_A$  OFF y  $S_B$  ON). Las cargas pueden ser conectadas o desconectadas del sistema a través de los interruptores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$ . Los detalles de la plataforma experimental, así como el sistema empleado para tomar las diferentes medidas se detallan a continuación.

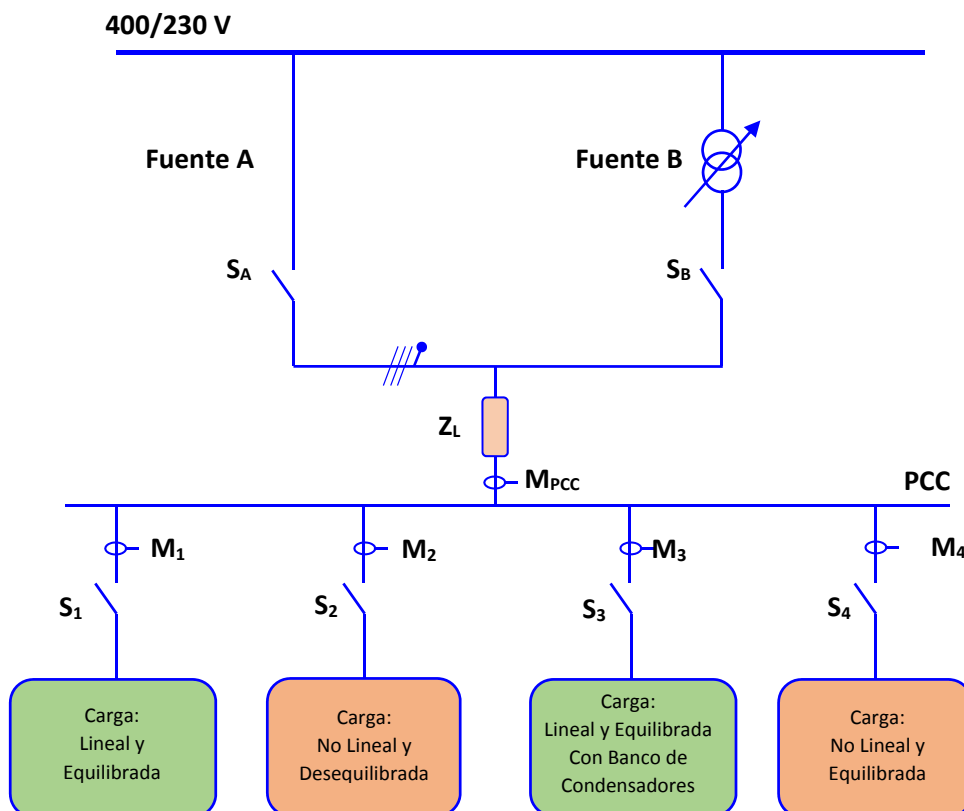


Figura B.1. Esquema de la plataforma experimental

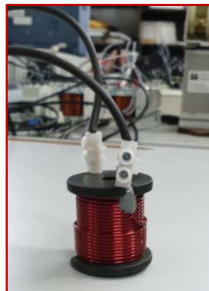
## B.1. CONFIGURACIÓN DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN

La alimentación de las cargas se puede realizar de dos formas diferentes, conectando la plataforma de experimentación directamente del suministro eléctrico que alimenta el laboratorio (fuente *A*), o bien a través de tres autotransformadores variables que nos permiten modificar el desequilibrio de la red (fuente *B*). La fuente *A* alimenta a las cargas con los niveles de distorsión armónica y desequilibrio de tensiones propios del suministro eléctrico en ese momento. Por otro lado, la fuente *B* se muestra en la figura B.2, donde a partir de tres autotransformadores se puede modificar el nivel de tensión de cada fase de la red del suministro eléctrico de forma independiente. El nivel de distorsión armónica de la fuente *B* viene dado por la red eléctrica al igual que la fuente *A*. El nivel de desequilibrio de tensiones a circuito abierto de la fuente *B* se ha medido con un analizador de *EPQ* trifásico Fluke 430 clase *A*.



**Figura B.2.** Fuente variable trifásica utilizada para modificar el nivel de desequilibrio de tensiones (Fuente *B*).

Para conformar la impedancia de línea se han utilizado una serie de bobinas, ver figura B.3, cuyas características nominales son:  $R_L = 0.15 \Omega$  y  $L_L = 0.21 \text{ mH}$ , con una intensidad nominal de 17 A.



**Figura B.3.** Bobina empleada para implementar la impedancia de línea de una de las fases de la plataforma experimental.

## B.2. CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS

Para realizar los distintos ensayos se han utilizado varias configuraciones de cargas de diferentes topologías. A continuación se describen las cargas utilizadas:

- **Carga Lineal y Equilibrada (Carga 1):** Se trata de una carga lineal y equilibrada compuesta por tres resistencias conectadas en estrella ( $R1 = R2 = R3 = 120 \Omega$ ). En la figura B.4 se muestra la carga 1, mientras que en la tabla B.1 sus características nominales.



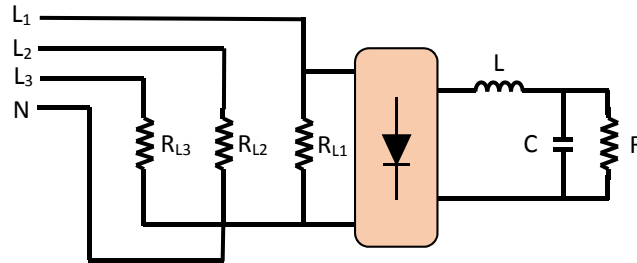
Figura B.4. Carga 1 implementada en el laboratorio.

**Tabla B.1.** Características nominales R-L-C

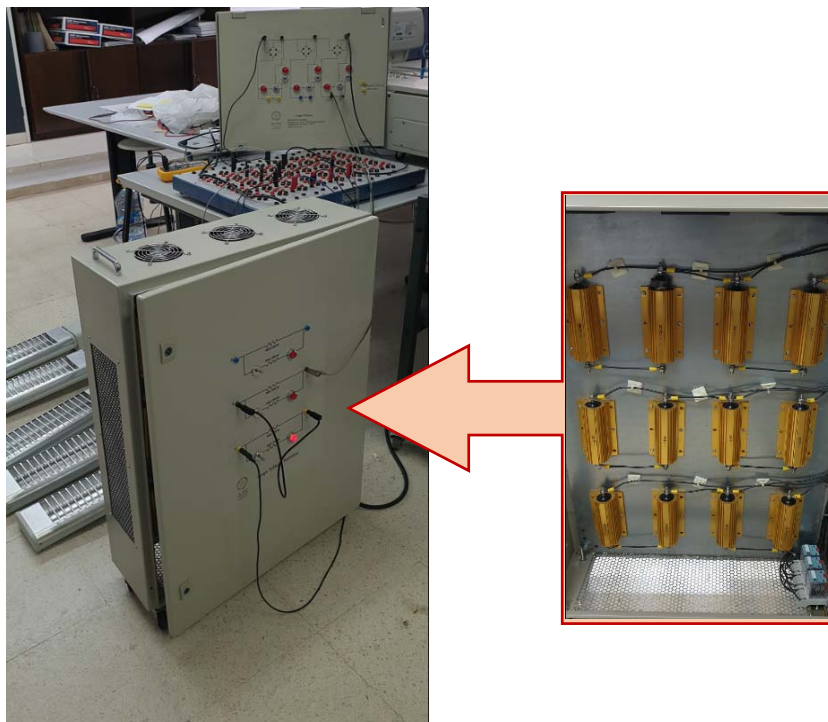
Posición	R ( $\Omega$ )	L (H)	C ( $\mu F$ )
	$I_n = 6 A$	$I_n = 10 A$	$I_n = 2 A$
1	240	1	10
2	120	0.5	20
3	80	0.35	30
4	60	0.25	40
5	48	0.2	50
6	40	0.17	60

- **Cargas No Lineales y Desequilibradas (Cargas 2 y 5).**- Se han utilizado dos cargas diferentes, la carga 2 y la 5:
  - **Carga 2:** En la figura B.5 se representa la configuración de la carga no lineal y desequilibrada compuesta por una carga trifásica conectada en estrella. En la fase  $L_1$  se ha conectado una resistencia de  $90 \Omega$  en paralelo con un rectificador monofásico no controlado que, en el lado de continua, alimenta a una carga RLC cuyos valores son:  $R_{DC} = 192 \Omega$ ,  $L = 55 \text{ mH}$  y  $C = 2200 \mu F$ . En la fase  $L_2$  una resistencia de  $138 \Omega$ , y por último en la

fase  $L_3$  una resistencia de  $45 \Omega$ . Las resistencias  $R_{L1}$ ,  $R_{L2}$  y  $R_{L3}$  tienen una potencia de  $1500 \text{ W}$  mientras que la resistencia  $R_{DC}$   $600 \text{ W}$ . En la figura A.6 se muestra la carga 2 implementada en el laboratorio.



**Figura B.5.** Configuración de la carga 2.



**Figura B.6.** Carga 2 implementada en el laboratorio.

El rectificador utilizado se muestra en la figura B.7, está compuesto por un módulo rectificador *GBPC2510* de Internacional Rectifier. Se trata de un rectificador monofásico en puente que soporta una corriente máxima en el lado de continua de  $25 \text{ A}$  y una tensión máxima de pico repetitivo de  $1000 \text{ V}$ .

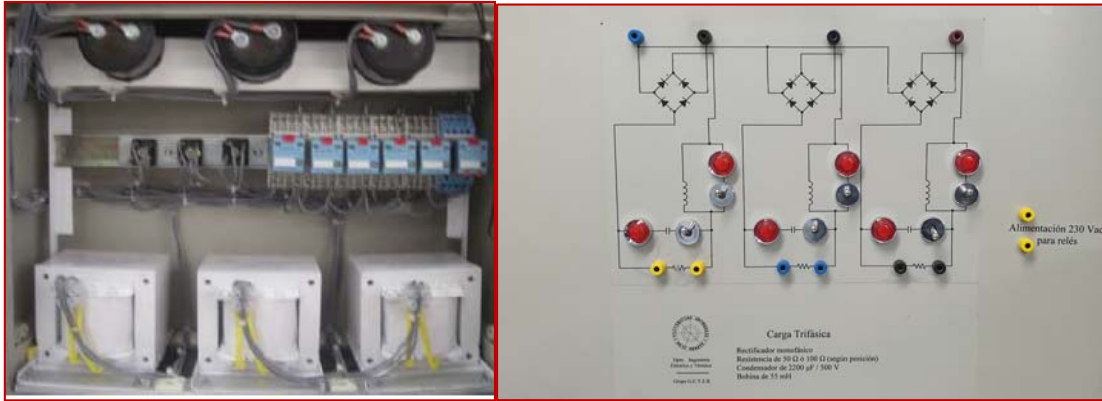


Figura B.7. Rectificadores monofásicos no controlados.

- **Carga 5.-** La segunda configuración de carga no lineal y desequilibrada utilizada se muestra en la figura B.8, mientras el montaje en el laboratorio en la figura B.9. La carga está compuesta por tres módulos de dos *SCRs* conectados en antiparalelo cada uno, de la marca Semikron de 100 A y 1700 V, cuyos ángulos de disparo se controlan de forma independiente a partir de tres módulos tipo *FC11BL* (figura B.10). A la salida de los *SCRs* se han conectado tres resistencias de valor  $R_{L1} = 120 \Omega$ ,  $R_{L2} = 80 \Omega$  y  $R_{L3} = 60 \Omega$ , conectadas en estrella.

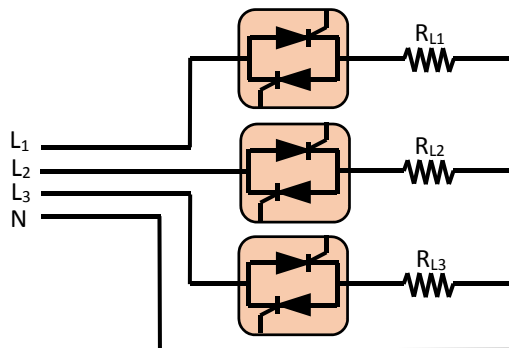
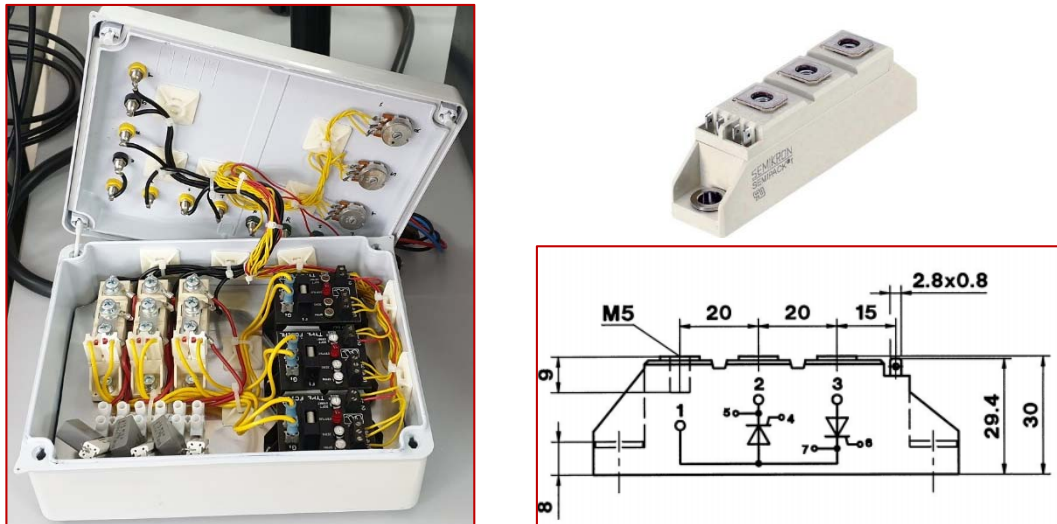


Figura B.8. Configuración de la carga 5.

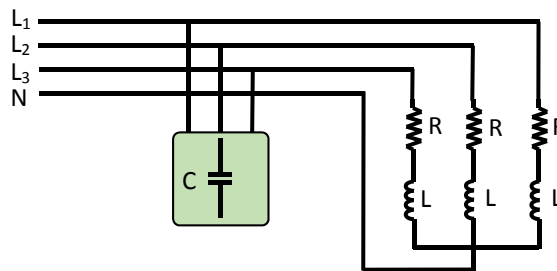


Figura B.9. Montaje de la carga 5 en el laboratorio.



**Figura B.10.** Módulo compuesto por tres reguladores de potencia monofásicos. Esquema del módulo proporcionado por la documentación técnica del fabricante.

- **Carga Lineal y equilibrada con banco de condensadores.-** Se trata de una carga lineal y equilibrada con un banco de condensadores para compensar el factor de potencia. En la figura B.11 se muestra el esquema de la carga 3, se trata de tres ramas  $R$ - $L$  ( $R = 80 \Omega$  y  $L = 0.2 \text{ H}$ ) conectadas en estrella y un banco de condensadores trifásico configurado en triángulo ( $C = 10 \mu\text{F}$ ) situado en la cabecera de la carga. En la figura A.12 se muestra la carga 3 mientras que en la tabla A.1 sus valores nominales.



**Figura B.11.** Configuración de la carga 3.



**Figura B.12.-** Montaje de la carga 3 en el laboratorio.

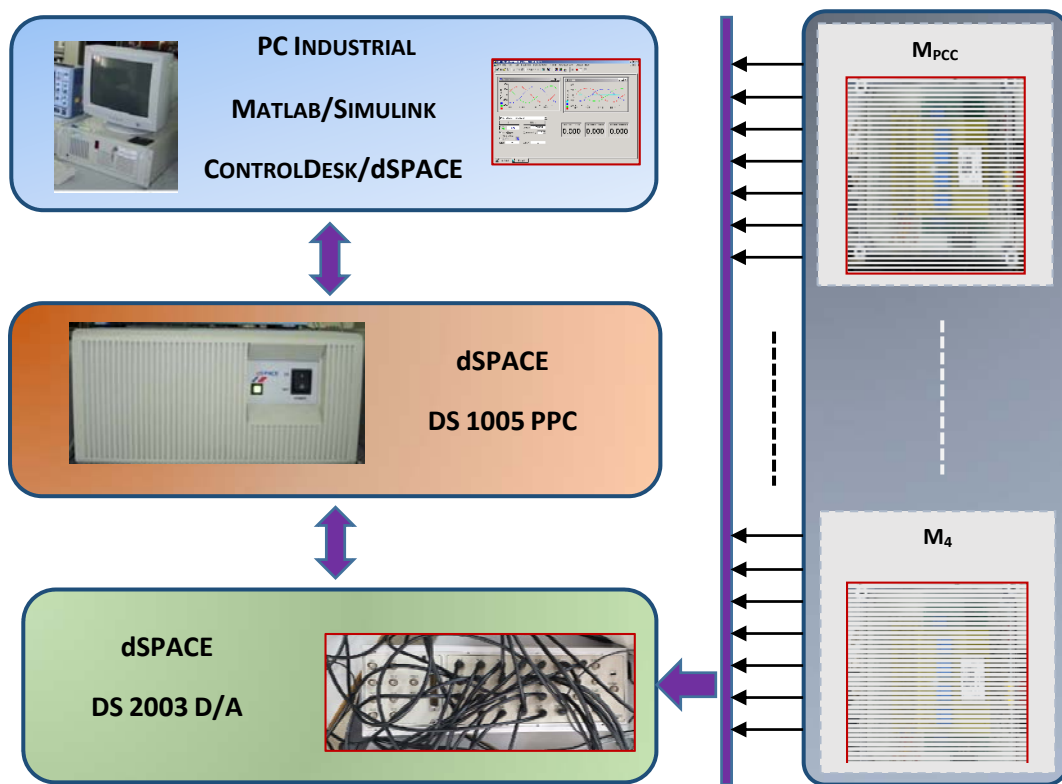
- **Carga No Lineal y Equilibrada.-** Carga no lineal y equilibrada compuesta por un módulo rectificador trifásico no controlado 36MT60 de Internacional Rectifier. La corriente máxima admisible en el lado de continua de este dispositivo es de 35 A y la máxima tensión de pico repetitivo de 600 V. Como se aprecia en la figura B.13, a partir de una serie de interruptores se puede configurar la salida de continua con un condensador de 2200  $\mu\text{F}$  y una bobina de 55 mH, que en este caso no se han utilizado. La configuración necesaria de la carga se ha complementado con una resistencia externa al conjunto de  $R = 242 \Omega$ .



**Figura B.13.** Carga trifásica no lineal y equilibrada compuesta por un rectificador trifásico no controlado.

### B.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

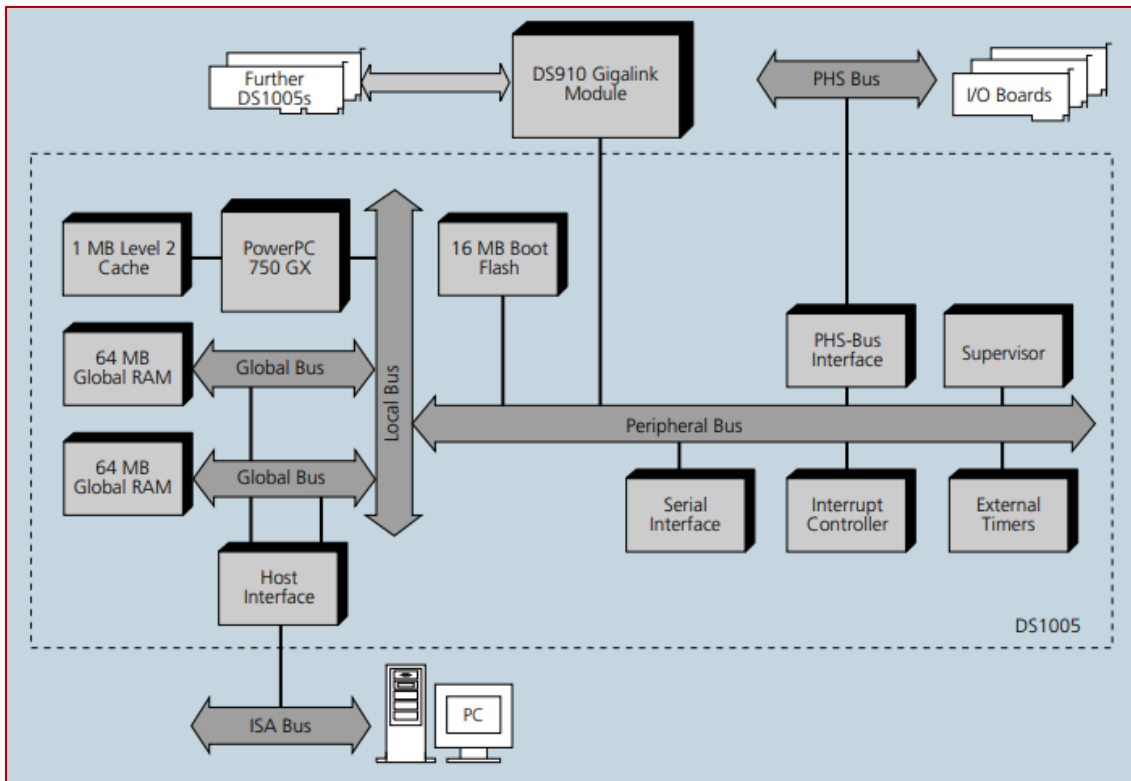
Las medidas de todos los puntos de la plataforma experimental se han realizado con un sistema modular de dSPACE representado en la figura B.14. Este sistema integra la tarjeta *DS1005 PPC* que dispone de un procesador *PowerPC 750GX*, que funciona a 1 GHz. La figura A.15 muestra la tarjeta, mientras que en la figura B.16 se muestra el diagrama de bloques de la tarjeta proporcionado por la documentación técnica del fabricante. La tarjeta de entradas-salidas se conectan a la *DS1005* a través de un bus de alta velocidad, (*PHS bus, Peripheral High-Speed*) de 32 bits y una velocidad de transferencia de 22 MB/s.



**Figura B.14.** Esquema del sistema modular de adquisición de datos implementado.

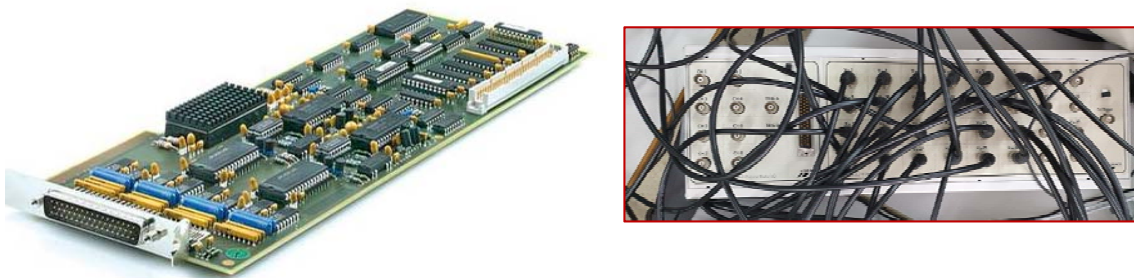


**Figura B.15.** Tarjeta *DS 1005 PPC* de dSPACE.

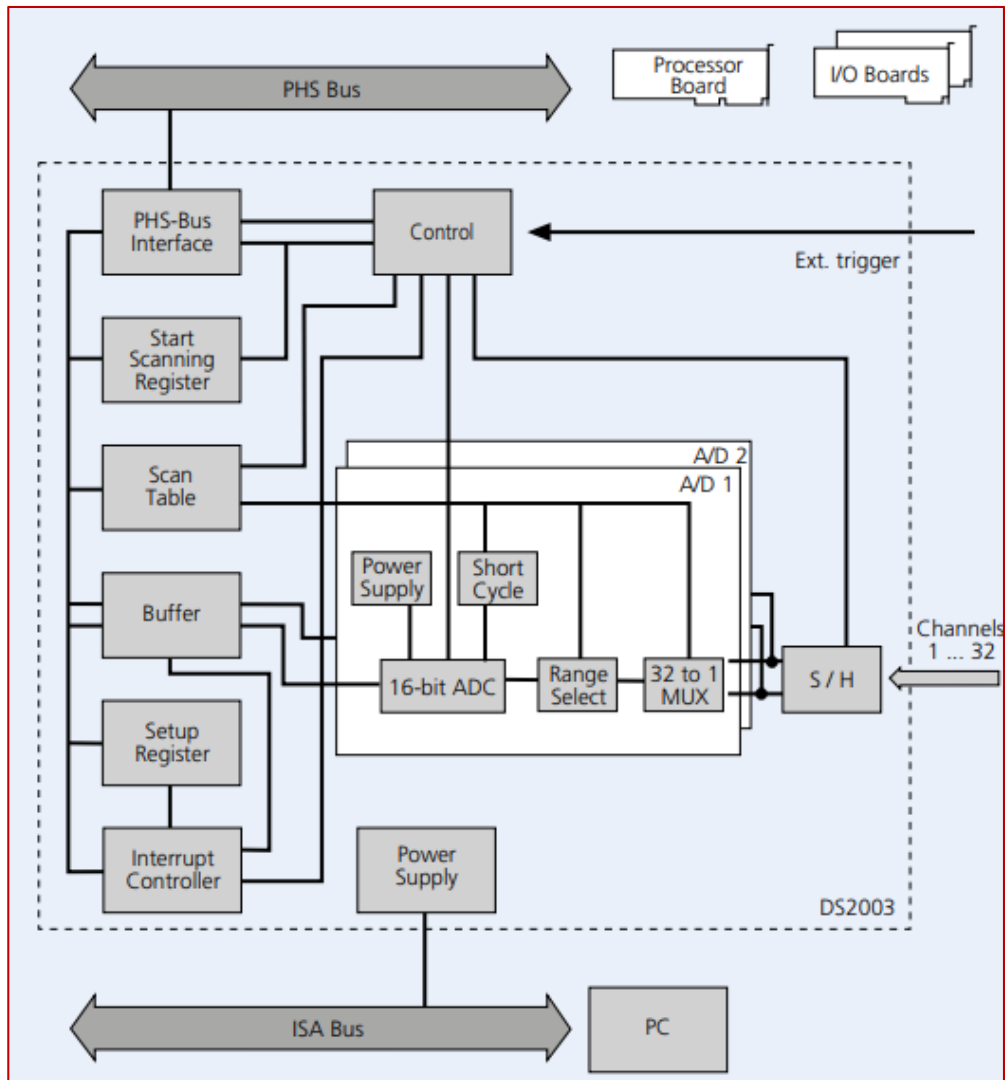


**Figura B.16.** Diagrama de bloques de la tarjeta *DS 1005 PPC* de dSPACE. Diagrama proporcionado por la documentación técnica del fabricante.

Como tarjeta de entrada se utiliza el modelo *DS 2002/2003 MUX*, figura B.17. Ésta dispone de 32 canales de entrada multiplexadas, con un convertidor *A/D* con una resolución configurable de hasta 16 bits. El tiempo de muestreo de la tarjeta cuando se utilizan todos los canales a la máxima resolución es de 5.6  $\mu$ s. Cada canal dispone de un buffer de hasta 16384 valores. Para la conversión de los datos medidos ofrece dos modos de funcionamiento: modo continuo y por eventos. En el primero, cuando finaliza la conversión, automáticamente comienza la siguiente. En el segundo, la conversión comienza al recibir un evento (por software o trigger). La conexión con la tarjeta *DS 1005 PPC* se realiza a través del bus *PHS*. En la figura B.18 se muestra el diagrama de bloques de la tarjeta proporcionado por la documentación técnica del fabricante.



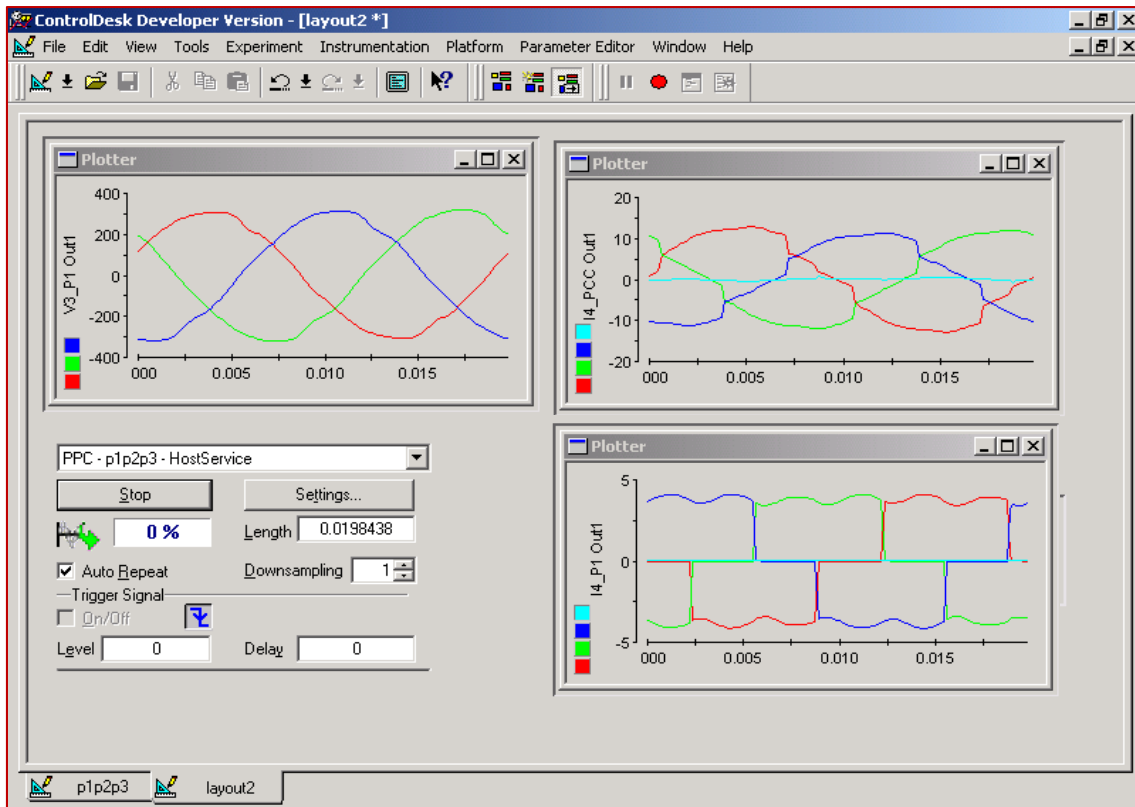
**Figura B.17.** Tarjeta de entrada *DS 2002/2003 MUX* de dSPACE.



**Figura B.18.** Diagrama de bloques de la tarjeta 2003 MUX de dSPACE. Diagrama proporcionado por la documentación técnica del fabricante.

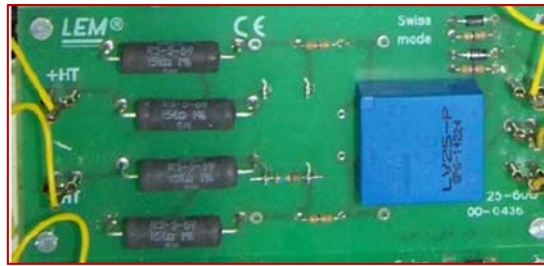
Todas las tarjetas pueden ser configuradas y programadas gráficamente utilizando MATLAB/Simulink. El lazo de unión entre software y hardware es el interfaz de tiempo real *RTI* (Real Time Interface) de dSPACE. De tal forma que cuando se dispone de un modelo en MATLAB/Simulink, el bloque de librerías de *RTI* permite la conexión de las tarjetas con los bloques de Simulink. La librería de bloques de *RTI* permite la parametrización de las entradas y salidas de las tarjetas. Una vez conectadas y configuradas las entradas y salidas al modelo, se genera el código en C a través de la toolbox Real Time Workshop (*RTW*) de MATLAB. El modelo en tiempo real es compilado y leído, comenzando a ejecutarse de forma automática en el hardware de tiempo real.

Para interactuar con el sistema en tiempo real se ha utilizado el programa ControlDesk perteneciente a dSPACE. Para ello se ha monitorizado el conjunto de variables de interés, convirtiendo el *PC* en un instrumento virtual que permite controlar el sistema en tiempo real. En la figura B.19 se muestra la pantalla principal de la aplicación diseñada para controlar la plataforma experimental del laboratorio.



**Figura B.19.** Pantalla ControlDesk.

Las señales de tensión e intensidad en cada punto de medida se registran a través de un sistema de acondicionamiento de señal formado por tres sensores de tensión (*LEM LV25-P*), y cuatro sensores de intensidad (*LEM LA35-NP*). Los sensores *LV-25-P* se utilizan para las señales de tensión y entre sus características hay que destacar que se trata de un transductor de tensión de efecto Hall de lazo cerrado, de tal forma que permite reducir el efecto de la histéresis magnética, proporcionando una característica prácticamente lineal y una gran exactitud. También proporciona aislamiento galvánico entre el primario y secundario. En la figura B.20 se muestra el sensor de tensión *LV-25-P*.



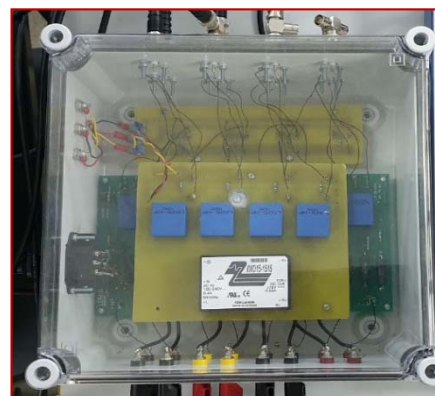
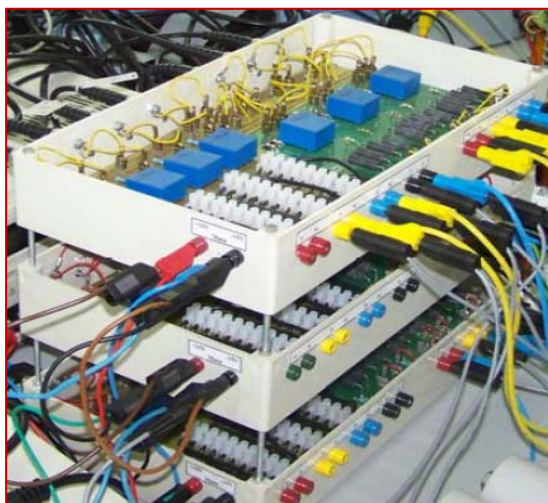
**Figura B.20.** Sensor de tensión *LV25-P* de *LEM*.

Para adaptar la señal de intensidad se ha utilizado el sensor *LA35-NP* de *LEM*. Al igual que el de tensión, se trata de un sensor de efecto Hall de lazo cerrado, que permite configurar diferentes relaciones de corrientes dependiendo de la conexión de sus pines. La corriente nominal del primario es de 35 A. En la figura B.21 se muestra el sensor de intensidad *LA35-NP*.



**Figura B.21.** Sensor de intensidad *LA25-NP* de *LEM*.

Los sensores se han agrupado para facilitar la alimentación de sus componentes. En la figura B.22 se muestra el montaje final.



**Figura B.22.** Agrupación de sensores de tensión e intensidad.

Por otro lado, también se ha utilizado el analizador de redes trifásico Fluke 434. En la figura B.23 se muestra el dispositivo que dispone de la capacidad de medir prácticamente todos los parámetros del sistema eléctrico, como por ejemplo: tensión, corriente, potencia, energía, desequilibrio, flicker y armónicos. Dispone de cuatro canales en los que se miden simultáneamente la tensión y la corriente en las tres fases y el neutro. Este instrumento ofrece una precisión de la tensión del 0.1 % y cumple todos los requisitos de la norma CEI 61000-4-30 Clase A.



**Figura B.23.** Analizador de redes Fluke 434

En la figura B.24 se muestra parte del esquema general creado en *Simulink* donde se han incluido los canales de entrada utilizados con la tarjeta *DS 2002/2003 MUX*. Este esquema ha sido utilizado para todos los prototipos experimentales desarrollados. Todas las entradas incluyen un factor de escala de 2400 para las señales de tensión y de 20 para las señales de intensidad debido a la configuración de los *LEM* de tensión e intensidad.

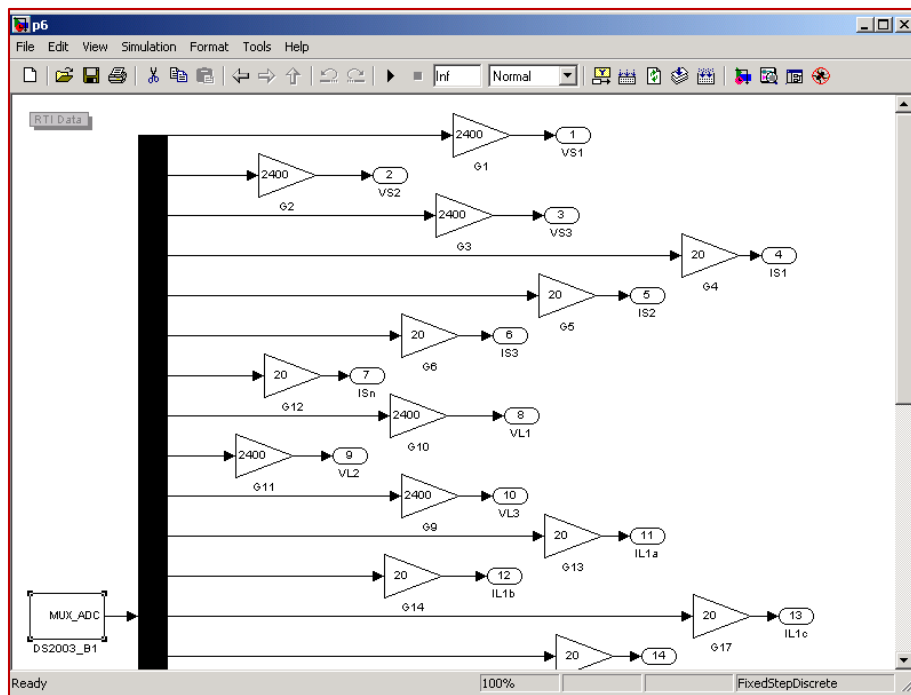


Figura B.24. Esquema general en Simulink del sistema de adquisición de datos.

## **ANEXO C**



### **RESULTADOS DE LOS CASOS EXPERIMENTALES**



En esta tesis se han desarrollado un total de 32 casos experimentales en el laboratorio. En todos ellos se han analizado los resultados presentados en el capítulo IV. En este anexo se relacionan de forma extendida los resultados *EPQ* y las formas de ondas obtenidas para cada uno de los casos. Al final del anexo se incluye una tabla resumen de todos ellos.

### C.1. RESULTADOS DE LOS CASOS REALIZADOS SIN LA PRESENCIA DE BANCOS DE CONDENSADORES

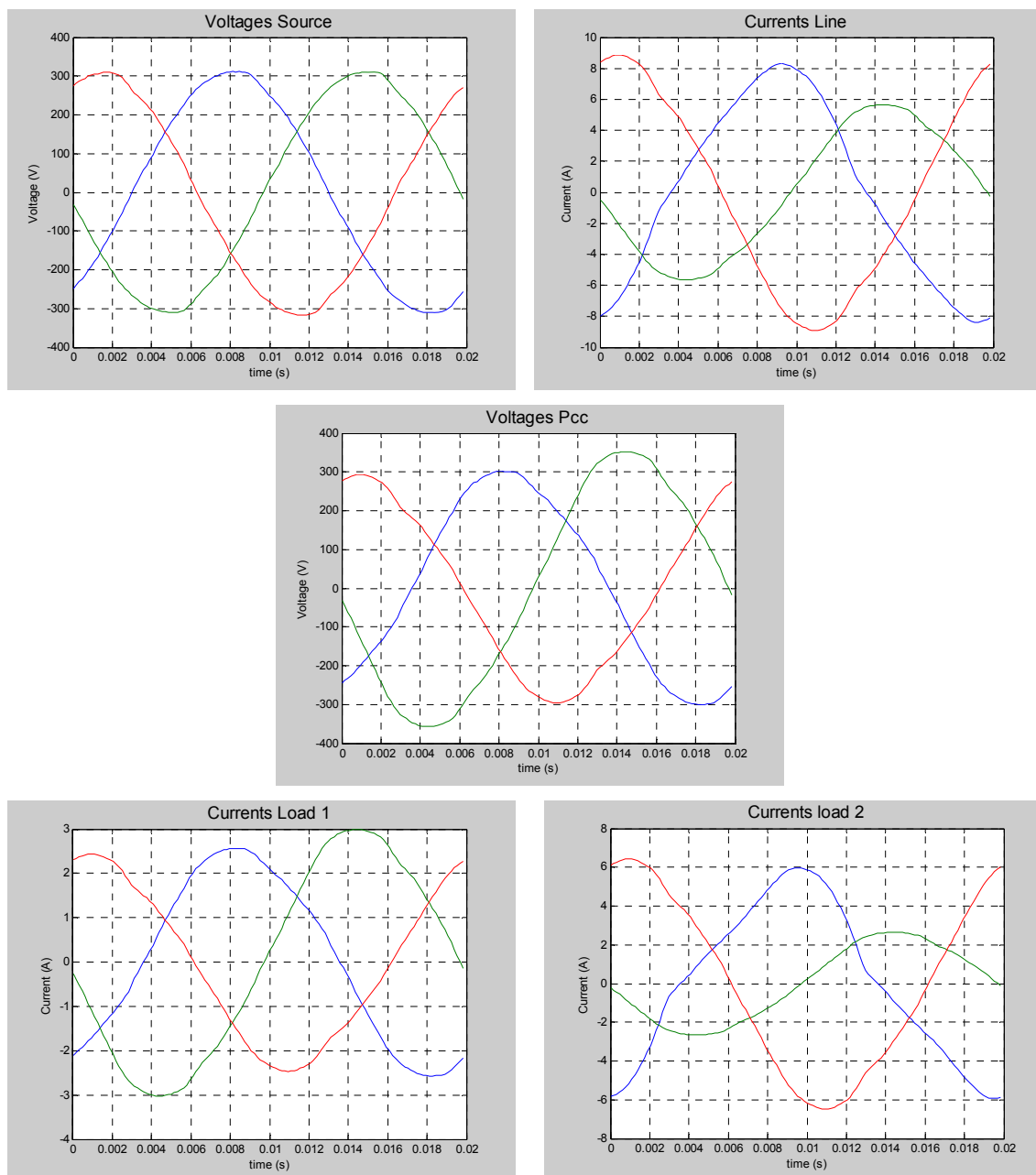
<b>Caso 1</b>				
<b>Test A.1</b>			<b>Test B.1</b>	
<b>Fuente A</b>	Distorsionada y equilibrada		<b>Fuente B</b>	Distorsionada y desequilibrada
<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada		<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada
<b>Carga 2</b>	No Lineal y Desequilibrada		<b>Carga 2</b>	No Lineal y Desequilibrada

**Tabla C.1.A.** Medidas realizadas en el PCC en el Test A.1

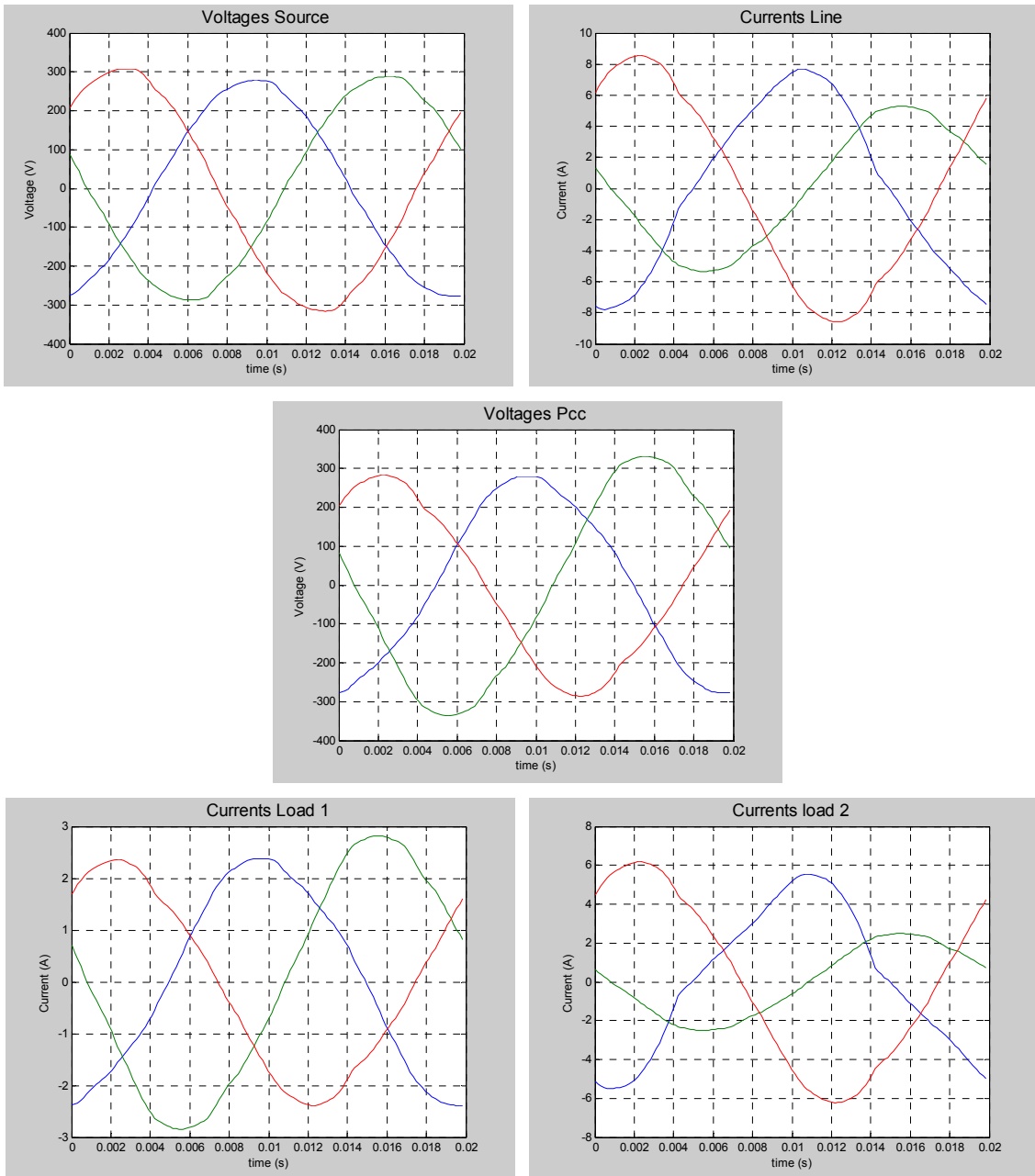
Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
<b>RMS (V, A)</b>	211.9	5.6	248.4	3.9	201.7	6.0
<b>THD (%)</b>	5.2	8.7	4.4	4.4	5.4	5.4
<b>H<sub>3</sub> (%)</b>	5.0	8.4	4.1	4.1	5.1	5.1
<b>H<sub>5</sub> (%)</b>	0.8	1.3	0.3	0.3	1.0	1.0
<b>H<sub>7</sub> (%)</b>	0.7	1.5	1.3	1.3	1.2	1.2
<b>H<sub>9</sub> (%)</b>	0.4	0.7	0.3	0.3	0.5	0.5
<b>H<sub>11</sub> (%)</b>	0.4	0.6	0.3	0.3	0.6	0.6
<b>THD (%)</b>	THDV = 5.1; THDI = 8.7					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 0.4; V <sub>cero</sub> = 12.9; A <sub>neg</sub> = 24.1; A <sub>cero</sub> = 0.1					
<b>P (kW)</b>	1.18		0.97		1.21	
	3.36					
<b>S (kVA)</b>	1.18		0.97		1.21	
	3.36					
<b>Q (kVA<sub>r</sub>)</b>	0.14 Ind		0.02		0.03	
	0.09					
<b>PF</b>	0.98		1.00		1.00	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	0.99		1.00		1.00	

**Tabla C.1.B.** Medidas realizadas en el PCC en el Test B.1

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
<b>RMS (V, A)</b>	196.9	5.2	232.2	3.7	194.8	5.8
<b>THD (%)</b>	5.2	8.7	4.3	4.3	5.3	5.2
<b>H<sub>3</sub> (%)</b>	5.0	8.4	4.0	4.0	4.9	4.9
<b>H<sub>5</sub> (%)</b>	0.8	1.2	0.3	0.3	0.9	1.0
<b>H<sub>7</sub> (%)</b>	0.6	1.6	1.2	1.2	1.3	1.2
<b>H<sub>9</sub> (%)</b>	0.4	0.6	0.3	0.3	0.4	0.4
<b>H<sub>11</sub> (%)</b>	0.2	0.6	0.4	0.4	0.6	0.6
<b>THD (%)</b>	THDV = 5.2; THDI = 8.7					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 13.1; A <sub>neg</sub> = 25.8; A <sub>cero</sub> = 0.1					
<b>P (kW)</b>	1.02		0.85		1.13	
	2.99					
<b>S (kVA)</b>	1.02		0.85		1.13	
	3.00					
<b>Q (kVA<sub>r</sub>)</b>	0.12 Ind		0.02		0.03	
	0.08					
<b>PF</b>	0.98		1.00		1.00	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	0.99		1.00		1.00	



**Figura C.1.A.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 1, Test A.1



**Figura C.1.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 1, Test B.1.

<b>Caso 2</b>					
<b>Test A.2</b>			<b>Test B.2</b>		
<b>Fuente A</b>	Distorsionada y equilibrada		<b>Fuente B</b>	Distorsionada y desequilibrada	
<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada		<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada	
<b>Carga 4</b>	No Lineal y Equilibrada		<b>Carga 4</b>	No Lineal y Equilibrada	

**Tabla C.2.A.** Medidas realizadas en el PCC en el Test A.2

<b>Fase</b>	<b>L<sub>1</sub></b>		<b>L<sub>2</sub></b>		<b>L<sub>3</sub></b>	
	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>
<b>RMS (V, A)</b>	219.3	3.5	220.4	3.4	222.3	3.5
<b>THD (%)</b>	1.5	13.3	1.5	13.2	1.7	13.2
<b>H<sub>3</sub> (%)</b>	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
<b>H<sub>5</sub> (%)</b>	0.4	10.1	0.4	10.0	0.5	10.1
<b>H<sub>7</sub> (%)</b>	1.2	5.4	1.2	5.4	1.3	5.4
<b>H<sub>9</sub> (%)</b>	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
<b>H<sub>11</sub> (%)</b>	0.4	4.3	0.4	4.3	0.5	4.2
<b>H<sub>13</sub> (%)</b>	0.6	2.5	0.6	2.5	0.7	2.5
<b>THD (%)</b>	THDV = 1.5; THDI = 13.4					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 0.2; V <sub>cero</sub> = 0.7; A <sub>neg</sub> = 0.4; A <sub>cero</sub> = 0.2					
<b>P (kW)</b>	0.75		0.75		0.76	
	2.27					
<b>S (kVA)</b>	0.75		0.75		0.76	
	2.27					
<b>Q (kVAr)</b>	0.00		0.01		0.01	
	0.02					
<b>PF</b>	0.99		0.99		0.99	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	1.00		1.00		1.00	

**Tabla C.2.B.** Medidas realizadas en el PCC en el Test B.2

<b>Fase</b>	<b>L<sub>1</sub></b>		<b>L<sub>2</sub></b>		<b>L<sub>3</sub></b>	
	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>
<b>RMS (V, A)</b>	202.1	3.2	205.5	3.2	215.5	3.3
<b>THD (%)</b>	1.5	13.6	1.4	13.4	1.5	12.4
<b>H<sub>3</sub> (%)</b>	0.0	0.9	0.1	1.0	0.1	0.8
<b>H<sub>5</sub> (%)</b>	0.4	10.5	0.3	10.4	0.5	9.0
<b>H<sub>7</sub> (%)</b>	1.1	5.2	1.0	5.0	1.2	5.8
<b>H<sub>9</sub> (%)</b>	0.1	0.7	0.1	0.6	0.2	1.1
<b>H<sub>11</sub> (%)</b>	0.1	4.5	0.3	4.6	0.3	3.4
<b>H<sub>13</sub> (%)</b>	0.6	2.1	0.6	2.2	0.6	2.8
<b>THD (%)</b>	THDV = 1.5; THDI = 13.6					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 3.2; V <sub>cero</sub> = 0.7; A <sub>neg</sub> = 2.9; A <sub>cero</sub> = 0.2					
<b>P (kW)</b>	0.64		0.64		0.71	
	2.00					
<b>S (kVA)</b>	0.64		0.65		0.71	
	2.02					
<b>Q (kVAr)</b>	0.00		0.01		0.01	
	0.01					
<b>PF</b>	0.99		0.99		0.99	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	1.00		1.00		1.00	

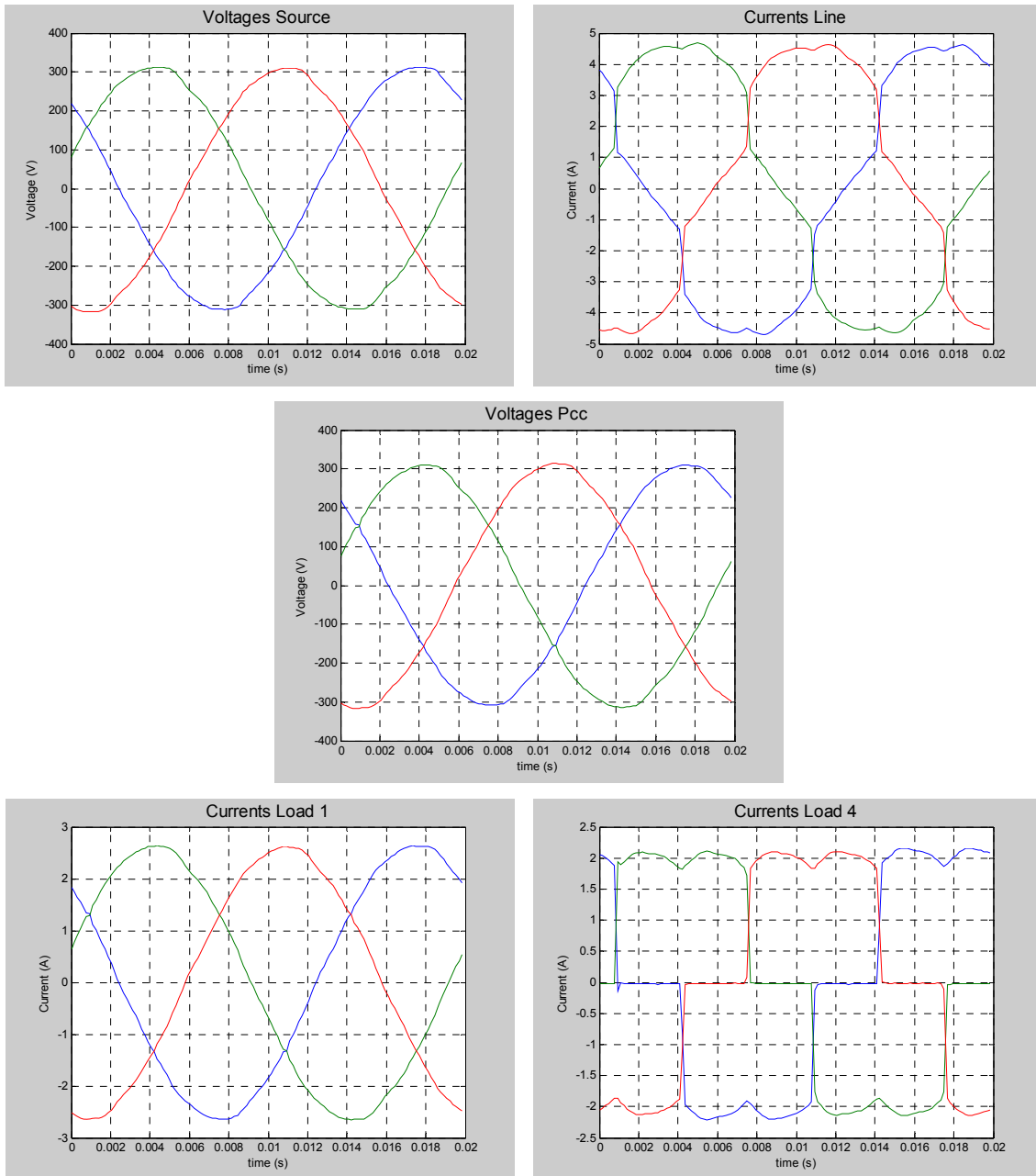
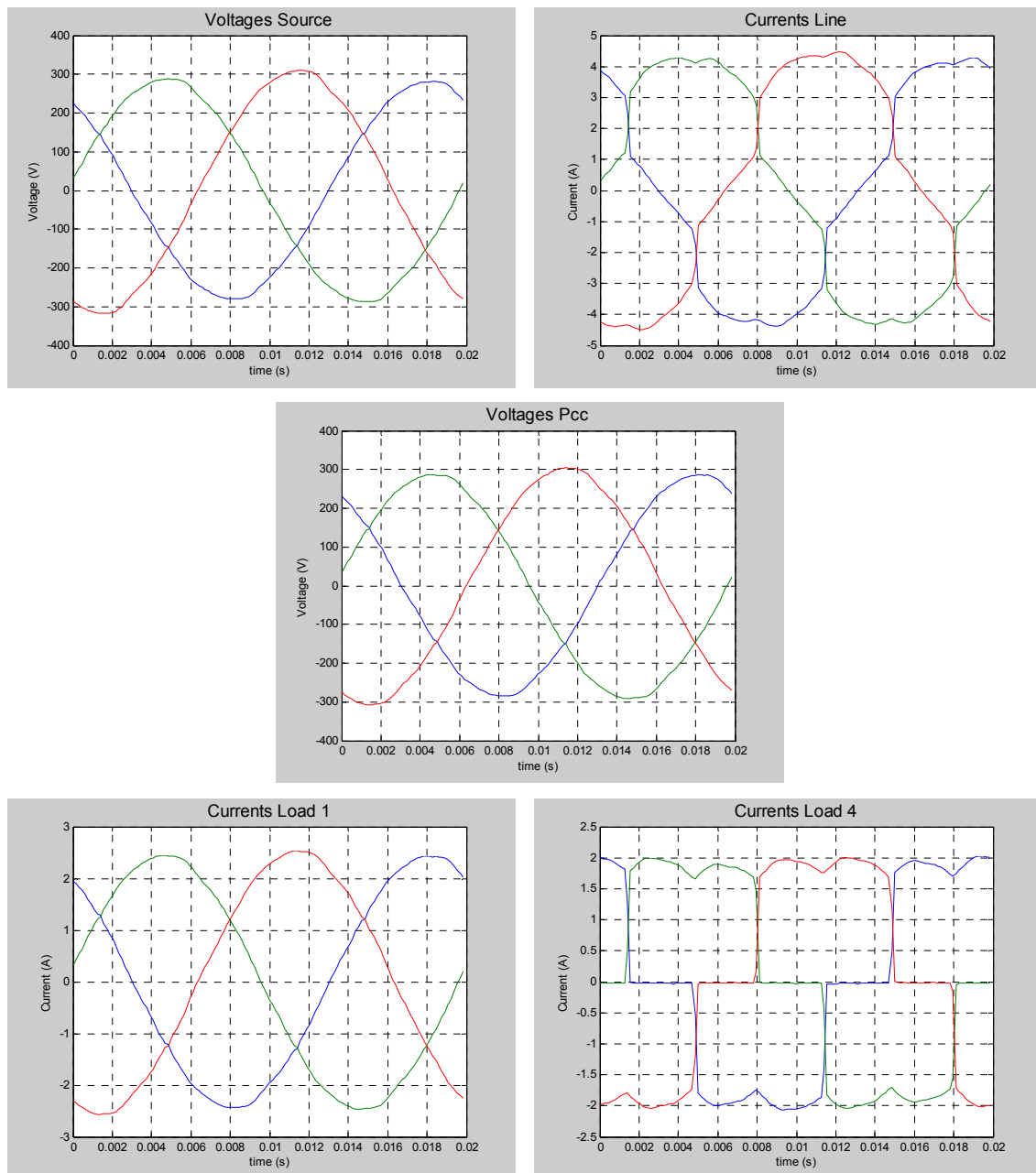


Figura C.2.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 2, Test A.2.



**Figura C.2.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 2, Test B.2.

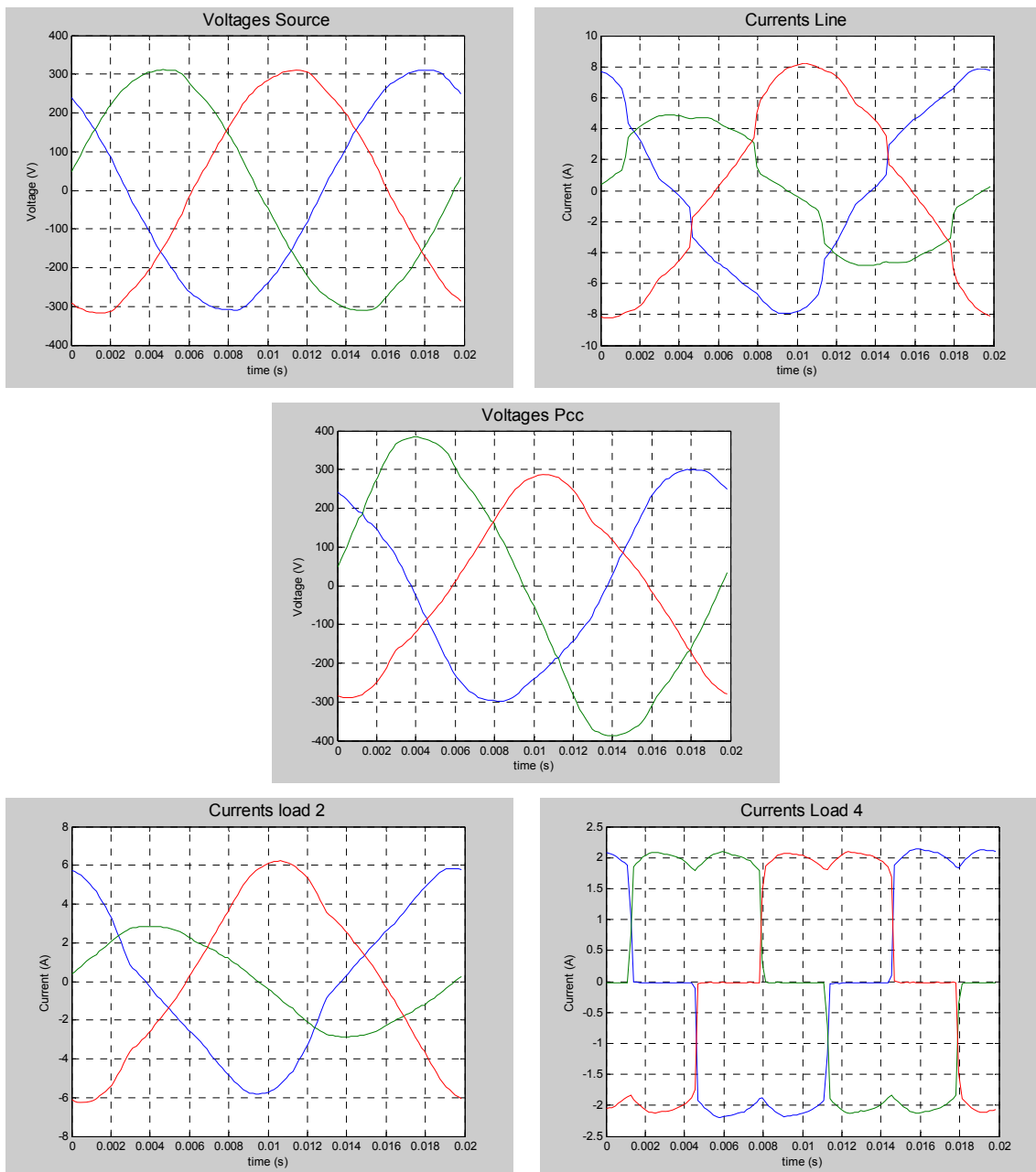
Caso 3					
TEST A			TEST B		
Fuente A	Distorsionada y equilibrada		Fuente B	Distorsionada y desequilibrada	
Carga 2	No Lineal y Desequilibrada		Carga 2	No Lineal y Desequilibrada	
Carga 4	No Lineal y Equilibrada		Carga 4	No Lineal y Equilibrada	

**Tabla C.3.A.** Medidas realizadas en el PCC en el Test A.3

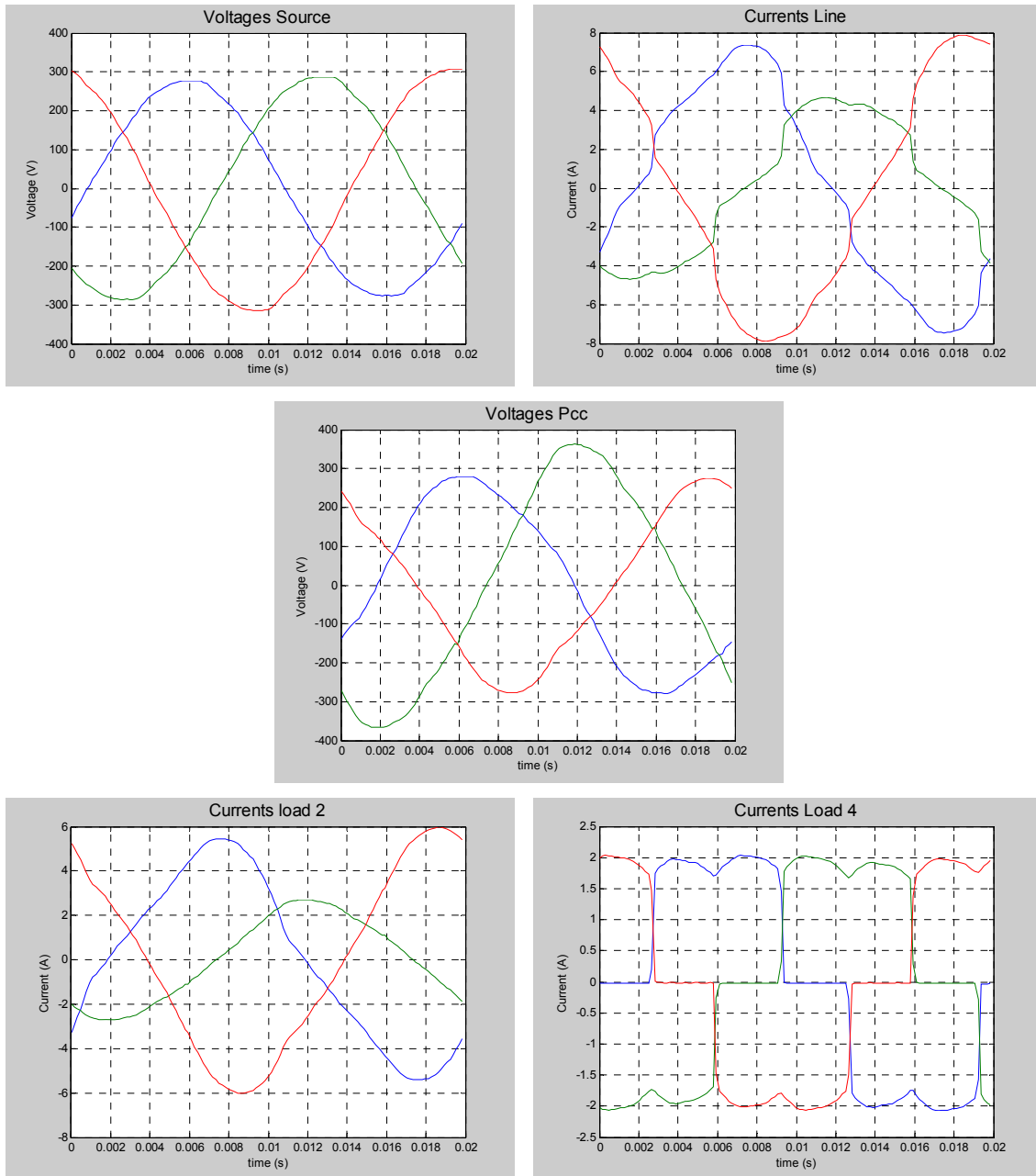
Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	211.2	5.3	265.3	3.5	191.8	5.7
THD (%)	7.9	12.2	6.3	13.4	8.8	9.9
H <sub>3</sub> (%)	7.7	8.8	6.1	3.4	8.5	6.2
H <sub>5</sub> (%)	0.9	6.1	0.6	10.0	1.4	5.2
H <sub>7</sub> (%)	0.5	3.5	1.3	5.0	1.5	3.9
H <sub>9</sub> (%)	0.7	0.7	0.5	0.3	0.6	0.5
H <sub>11</sub> (%)	0.1	2.9	0.3	4.1	0.5	2.9
H <sub>13</sub> (%)	0.4	1.8	0.5	2.6	0.7	1.3
THD (%)	THDV = 7.9; THDI = 12.2					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 0.4; V <sub>cero</sub> = 20.6; A <sub>neg</sub> = 26.9; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.11		0.92		1.07	
	3.11					
S (kVA)	1.11		0.92		1.08	
	3.11					
Q (kVAr)	0.06 Ind		0.00		0.03	
	0.10					
PF	0.98		0.99		1.00	
	0.99					
Cos φ	1.00		1.00		1.00	

**Tabla C.3.B.** Medidas realizadas en el PCC en el Test B.3

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	197.4	5.0	248.1	3.3	184.1	5.5
THD (%)	7.9	12.5	6.3	13.9	8.5	9.3
H <sub>3</sub> (%)	7.8	9.1	6.0	4.3	8.2	5.5
H <sub>5</sub> (%)	0.9	6.4	1.0	10.5	1.3	4.8
H <sub>7</sub> (%)	0.3	3.5	1.1	4.8	1.6	4.3
H <sub>9</sub> (%)	0.7	0.8	0.6	0.2	0.5	0.8
H <sub>11</sub> (%)	0.4	3.0	0.2	4.4	0.4	2.3
H <sub>13</sub> (%)	0.6	1.3	0.5	2.2	0.8	1.3
THD (%)	THDV = 7.9; THDI = 12.5					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 20.9; A <sub>neg</sub> = 28.4; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	0.97		0.81		1.00	
	2.77					
S (kVA)	0.97		0.81		1.00	
	2.78					
Q (kVAr)	0.06 Ind		0.01		0.03	
	0.09					
PF	0.98		0.99		1.00	
	0.99					
Cos φ	1.00		1.00		1.00	



**Figura C.3.A.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 3, Test A.3.

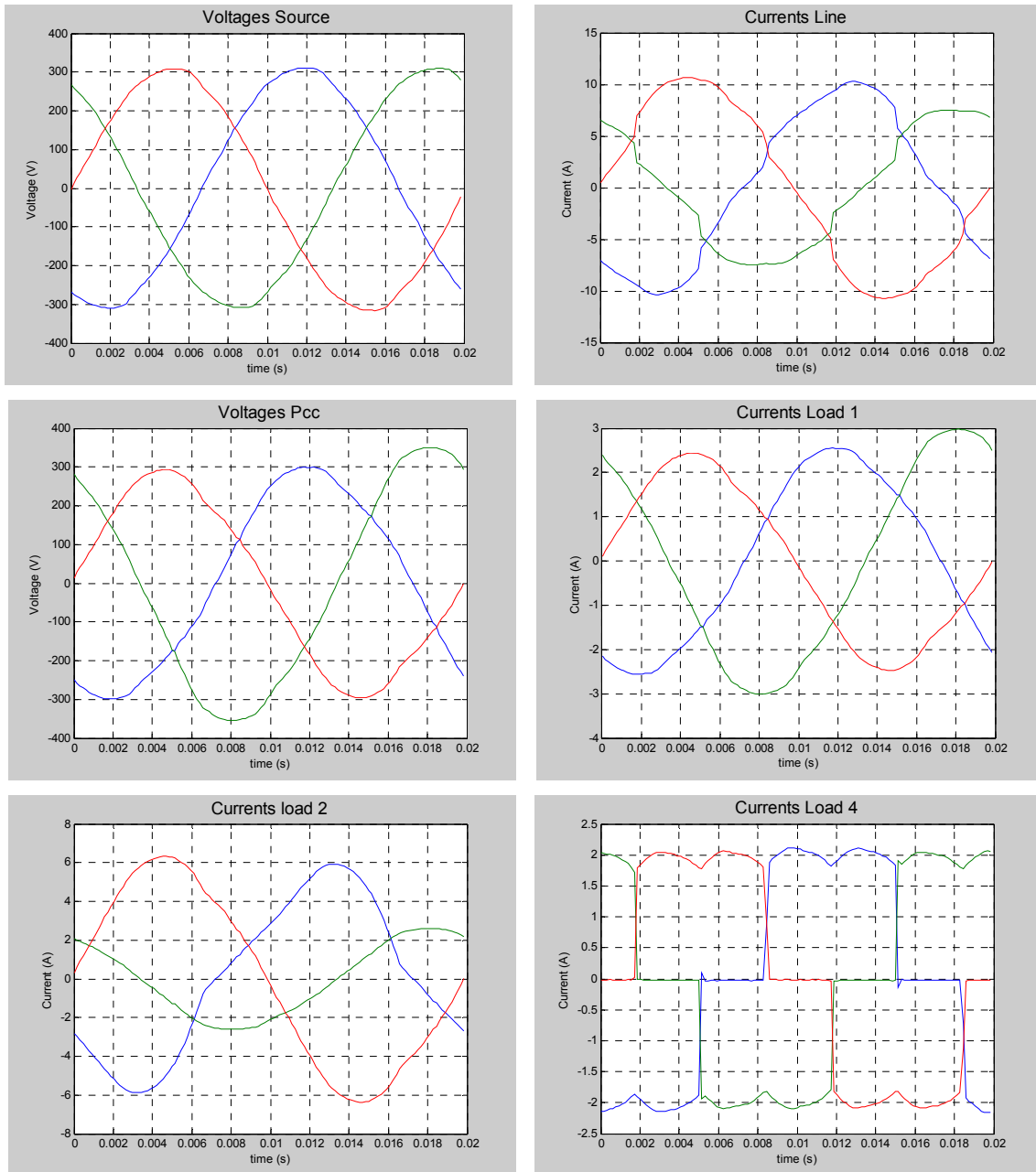


**Figura C.3.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 3, Test B.3.

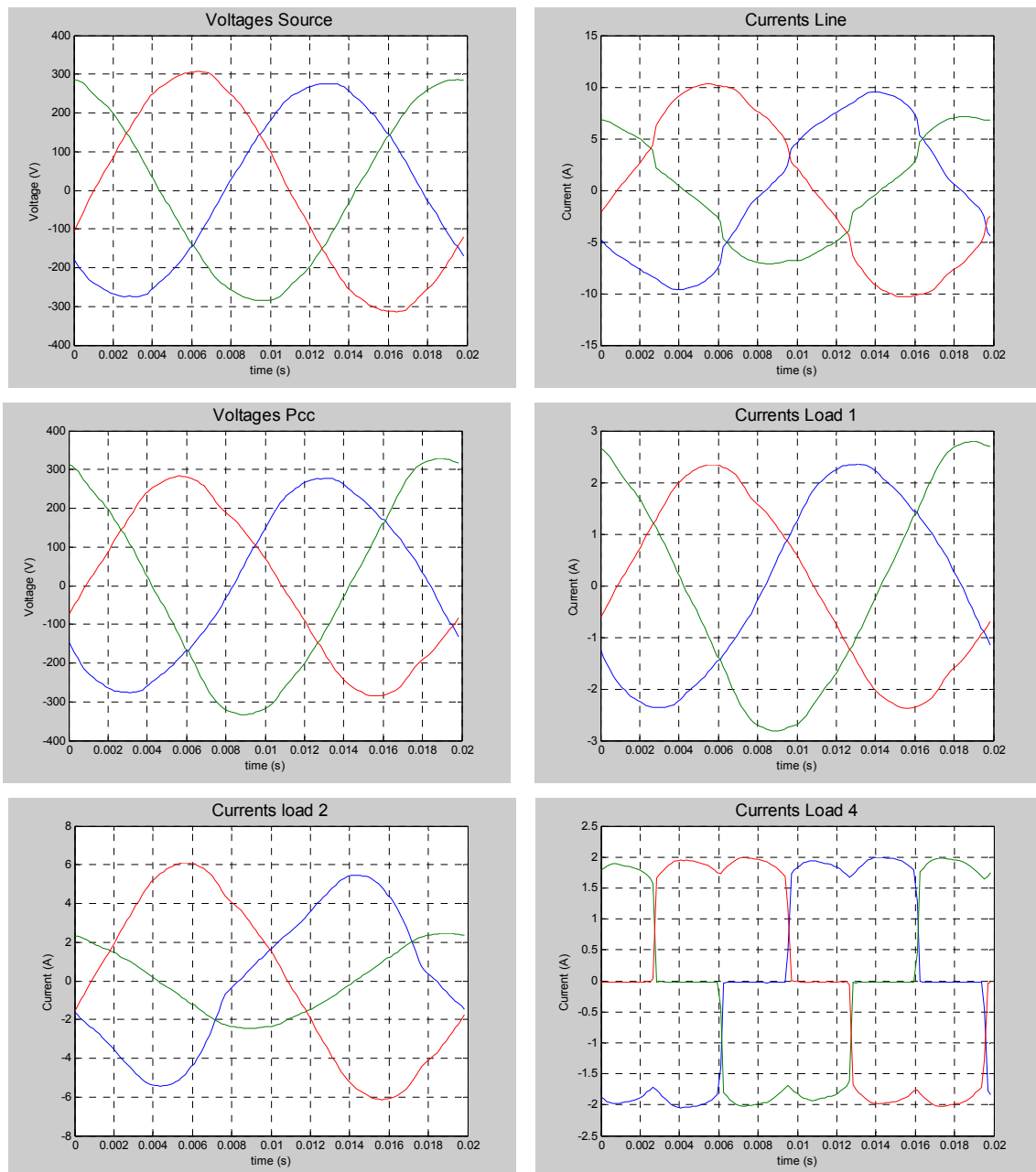
<b>Caso 4</b>					
<b>Test A.4</b>			<b>Test B.4</b>		
<b>Fuente A</b>	Distorsionada y equilibrada		<b>Fuente B</b>	Distorsionada y desequilibrada	
<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada		<b>Carga 1</b>	Lineal y Equilibrada	
<b>Carga 2</b>	No lineal y Desequilibrada		<b>Carga 2</b>	No lineal y Desequilibrada	
<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada		<b>Carga 4</b>	No lineal y Equilibrada	

<b>Fase</b>	<b>L<sub>1</sub></b>		<b>L<sub>2</sub></b>		<b>L<sub>3</sub></b>	
	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>
<b>RMS (V, A)</b>	211.0	7.1	247.1	5.4	201.2	7.5
<b>THD (%f)</b>	5.1	9.3	4.4	8.9	5.5	7.1
<b>H<sub>3</sub> (%f)</b>	5.0	6.6	4.1	2.9	5.1	4.1
<b>H<sub>5</sub> (%f)</b>	0.7	4.8	0.3	6.4	1.1	3.8
<b>H<sub>7</sub> (%f)</b>	0.8	3.0	1.4	3.5	1.2	3.0
<b>H<sub>9</sub> (%f)</b>	0.4	0.5	0.3	0.2	0.5	0.4
<b>H<sub>11</sub> (%f)</b>	0.2	1.9	0.1	2.7	0.4	2.1
<b>H<sub>13</sub>(%f)</b>	0.4	1.2	0.6	1.5	0.5	0.9
<b>THD (%f)</b>	THDV = 5.2; THDI = 9.3					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 0.5; V <sub>cero</sub> = 12.9; A <sub>neg</sub> = 18.5; A <sub>cero</sub> = 0.1					
<b>P (kW)</b>	1.49		1.34		1.51	
	4.33					
<b>S (kVA)</b>	1.49		1.34		1.51	
	4.33					
<b>Q (kVAr)</b>	0.10 Ind		0.01		0.00	
	0.09					
<b>PF</b>	0.99		1.00		1.00	
	1.00					
<b>Cos φ</b>	1.00		1.00		1.00	

<b>Fase</b>	<b>L<sub>1</sub></b>		<b>L<sub>2</sub></b>		<b>L<sub>3</sub></b>	
	<b>V<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>V<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>V<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>
<b>RMS (V, A)</b>	195.6	6.6	230.1	5.1	193.8	7.3
<b>THD (%f)</b>	5.1	9.6	4.4	9.4	5.2	6.6
<b>H<sub>3</sub> (%f)</b>	5.0	6.8	4.1	3.6	4.9	3.6
<b>H<sub>5</sub> (%f)</b>	0.6	5.2	0.8	7.0	0.8	3.6
<b>H<sub>7</sub> (%f)</b>	0.5	2.9	1.1	3.2	1.2	3.2
<b>H<sub>9</sub> (%f)</b>	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
<b>H<sub>11</sub> (%f)</b>	0.1	2.0	0.1	2.8	0.4	1.7
<b>H<sub>13</sub>(%f)</b>	0.4	0.7	0.7	1.1	0.7	0.8
<b>THD (%f)</b>	THDV = 5.1; THDI = 9.6					
<b>Desequilibrio (%)</b>	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 13.0; A <sub>neg</sub> = 20.4; A <sub>cero</sub> = 0.1					
<b>P (kW)</b>	1.28		1.16		1.40	
	3.84					
<b>S (kVA)</b>	1.28		1.16		1.40	
	3.84					
<b>Q (kVAr)</b>	0.08 Ind		0.00		0.00	
	0.09					
<b>PF</b>	0.99		1.00		1.00	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	1.00		1.00		1.00	



**Figura C.4.A.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 4, Test A.4.



**Figura C.4.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 4, Test B.4.

**C.2. RESULTADOS DE LOS CASOS REALIZADOS EN PRESENCIA DE BANCOS DE CONDENSADORES**

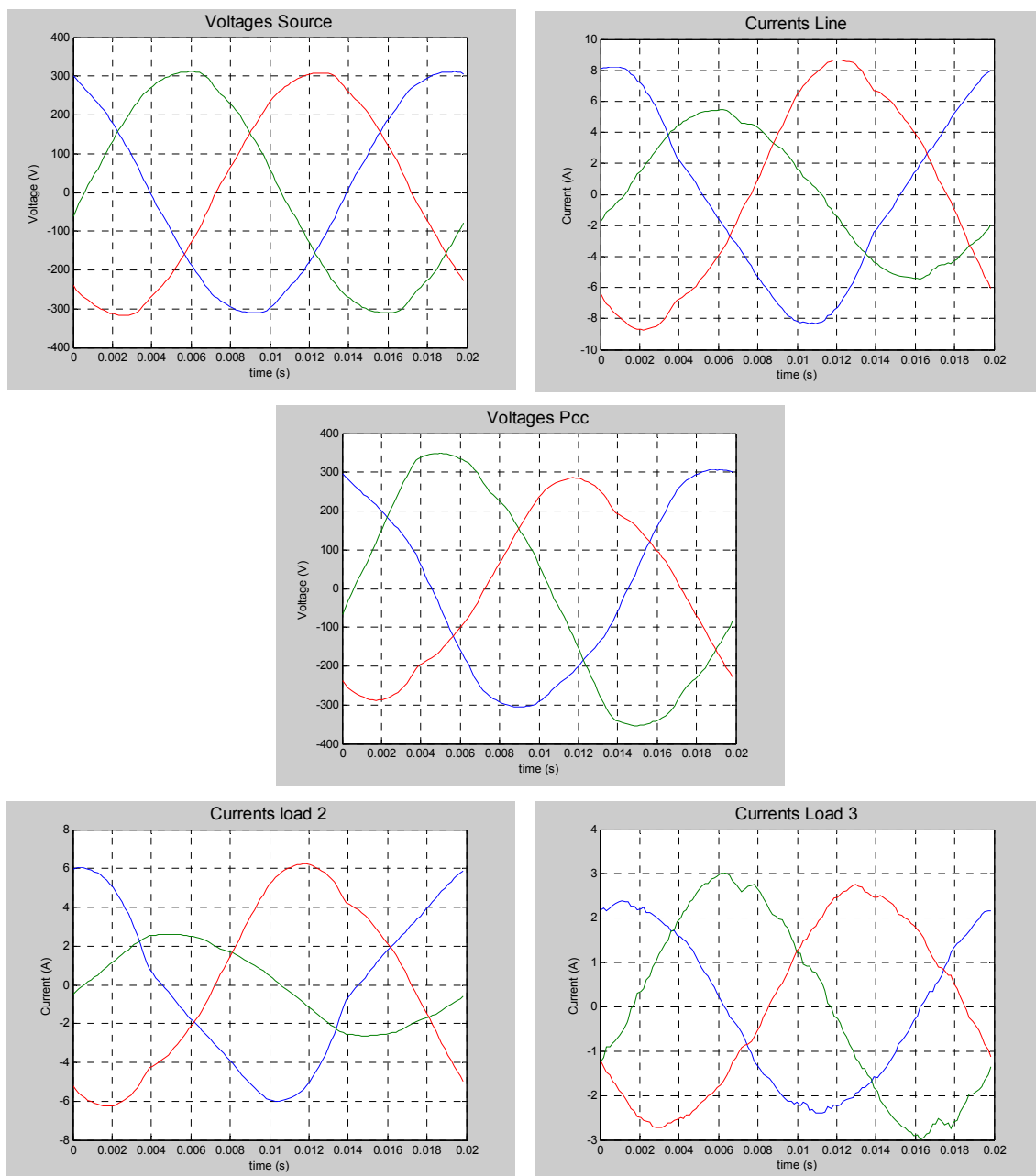
Caso 5					
Test A.5			Test B.5		
Fuente A	Distorsionada y equilibrada		Fuente B	Distorsionada y desequilibrada	
Carga 2	No lineal y desequilibrada		Carga 2	No lineal y desequilibrada	
Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)		Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)	

**Tabla C.5.A.** Medidas realizadas en el PCC en el Test A.5

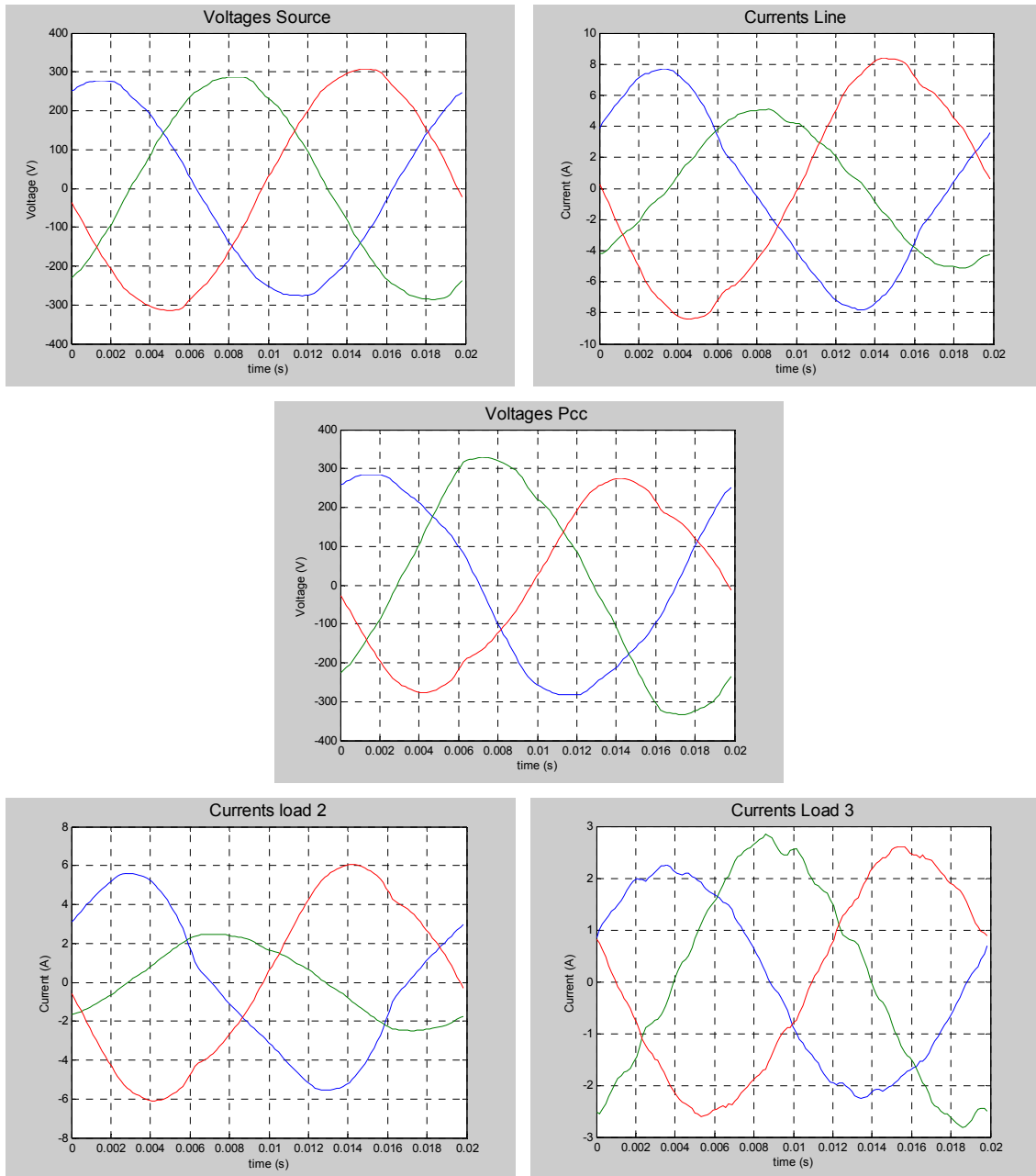
Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	219.8	5.5	247.2	3.7	196.2	6.0
THD (%)	6.9	8.7	6.2	4.3	7.6	6.0
H <sub>3</sub> (%)	6.7	8.4	5.9	3.6	7.3	5.6
H <sub>5</sub> (%)	1.2	1.4	0.7	0.3	1.4	1.1
H <sub>7</sub> (%)	0.8	1.1	1.5	1.2	1.2	1.3
H <sub>9</sub> (%)	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.4
H <sub>11</sub> (%)	0.2	0.7	0.3	0.8	0.6	0.5
H <sub>13</sub> (%)	0.5	0.5	0.8	1.5	0.6	1.0
THD (%)	THDV = 6.9; THDI = 8.7					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 0.5; V <sub>cero</sub> = 13.1; A <sub>neg</sub> = 26.0; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.16		0.91		1.16	
	3.23					
S (kVA)	1.21		0.91		1.17	
	3.23					
Q (kVAr)	0.35 Ind		0.15 Ind		0.13 Ind	
	0.63 Ind					
PF	0.95		0.99		0.99	
	0.97					
Cos φ	0.96		0.99		0.99	

**Tabla C.5.B.** Medidas realizadas en el PCC en el Test B.5

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	203.9	5.1	230.3	3.5	189.3	5.7
THD (%)	7.0	8.7	6.1	4.4	7.3	5.7
H <sub>3</sub> (%)	6.8	8.4	5.8	3.7	7.0	5.4
H <sub>5</sub> (%)	1.3	1.2	1.0	0.3	1.2	1.0
H <sub>7</sub> (%)	0.6	1.0	1.3	0.9	1.2	1.2
H <sub>9</sub> (%)	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6	0.4
H <sub>11</sub> (%)	0.1	0.7	0.4	0.8	0.6	0.4
H <sub>13</sub> (%)	0.5	0.4	0.9	1.8	0.7	1.1
THD (%)	THDV = 7.0; THDI = 8.7					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 13.3; A <sub>neg</sub> = 27.7; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.00		0.79		1.07	
	2.86					
S (kVA)	1.04		0.80		1.08	
	2.92					
Q (kVAr)	0.30 Ind		0.13 Ind		0.12 Ind	
	0.56 Ind					
PF	0.94		0.98		0.99	
	0.97					
Cos φ	0.96		0.99		0.99	



**Figura C.5.A.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 5, Test A.5.



**Figura C.5.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 5, Test B.5.

Caso 6			
Test A.6		Test B.6	
Fuente A	Distorsionada y equilibrada	Fuente B	Distorsionada y desequilibrada
Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)	Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)
Carga 4	No lineal y Equilibrada	Carga 4	No lineal y Equilibrada

Tabla C.6.A. Medidas realizadas en el PCC en el Test A.6

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	219.9	3.2	220.7	3.2	220.6	3.6
THD (%)	2.2	14.9	2.3	14.9	2.2	13.2
H <sub>3</sub> (%)	1.8	0.2	1.8	0.2	1.7	0.1
H <sub>5</sub> (%)	0.3	11.2	0.3	10.7	0.4	9.9
H <sub>7</sub> (%)	1.0	6.1	1.0	6.8	1.1	5.8
H <sub>9</sub> (%)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
H <sub>11</sub> (%)	0.2	4.6	0.3	4.3	0.3	3.6
H <sub>13</sub> (%)	0.6	2.5	0.6	1.5	0.5	1.8
THD (%)	THDV = 2.1; THDI = 14.9					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 0.2; V <sub>cero</sub> = 0.1; A <sub>neg</sub> = 7.4; A <sub>cero</sub> = 0.2					
P (kW)	0.66		0.70		0.76	
	2.11					
S (kVA)	0.69		0.71		0.78	
	2.13					
Q (kVAr)	0.19 Ind		0.11 Ind		0.19 Ind	
	0.49 Ind					
PF	0.95		0.97		0.96	
	0.96					
Cos φ	0.96		0.99		0.97	

Tabla C.6.B. Medidas realizadas en el PCC en el Test B.6

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	202.9	2.9	206.0	3.1	213.8	3.5
THD (%)	2.5	16.7	2.6	17.6	2.1	13.0
H <sub>3</sub> (%)	1.8	1.0	1.8	1.1	1.6	1.0
H <sub>5</sub> (%)	0.1	12.0	0.2	11.3	0.1	9.1
H <sub>7</sub> (%)	0.9	5.6	1.0	6.5	1.0	6.1
H <sub>9</sub> (%)	0.2	1.0	0.2	0.5	0.1	1.2
H <sub>11</sub> (%)	0.2	5.2	0.2	5.0	0.3	3.0
H <sub>13</sub> (%)	0.7	2.7	0.7	1.7	0.6	2.1
THD (%)	THDV = 2.5; THDI = 17.6					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 3.1; V <sub>cero</sub> = 0.0; A <sub>neg</sub> = 10.4; A <sub>cero</sub> = 0.2					
P (kW)	0.56		0.61		0.71	
	1.88					
S (kVA)	0.59		0.62		0.73	
	1.94					
Q (kVAr)	0.17 Ind		0.10 Ind		0.18 Ind	
	0.44 Ind					
PF	0.94		0.97		0.96	
	0.96					
Cos φ	0.96		0.99		0.97	

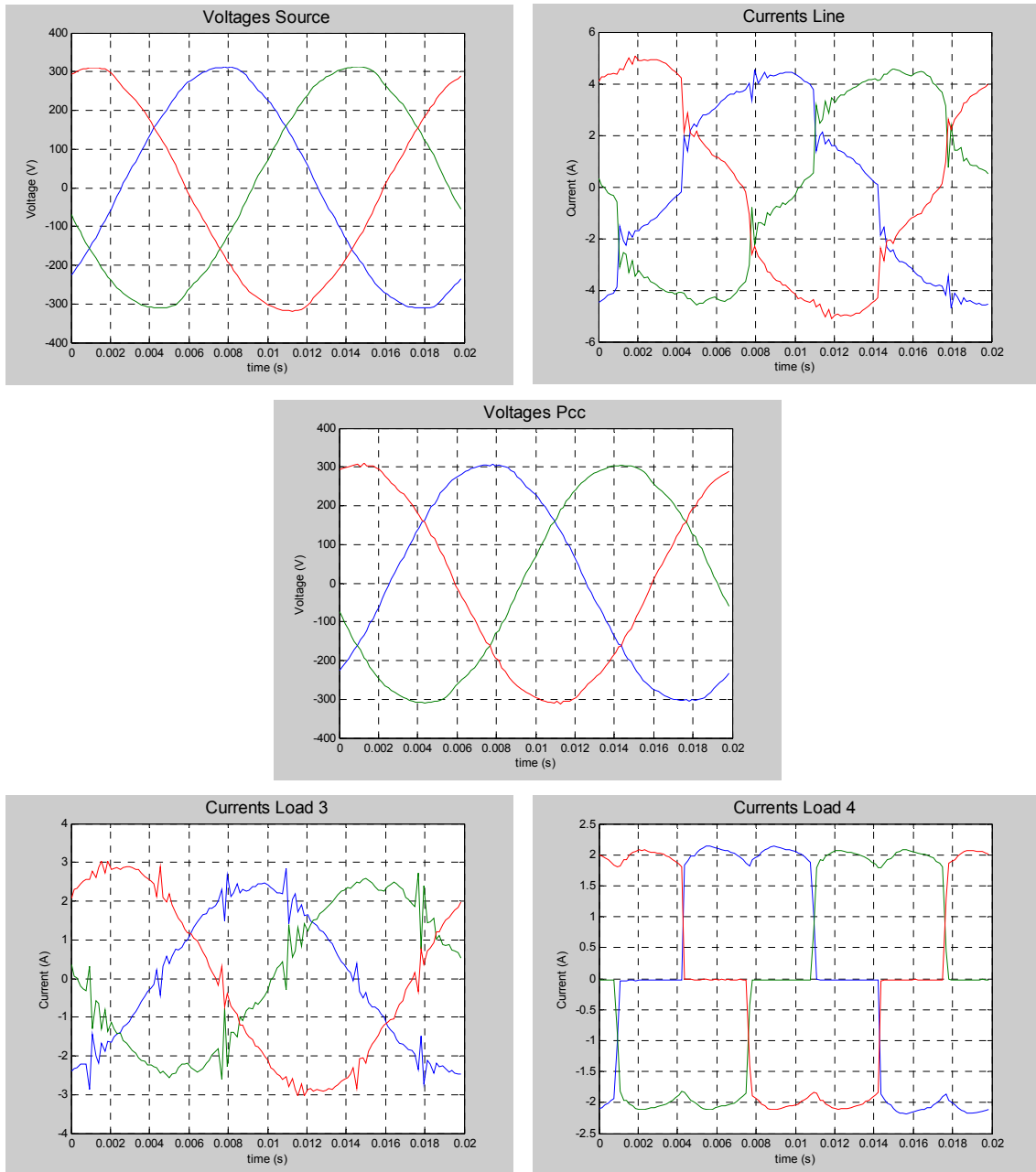
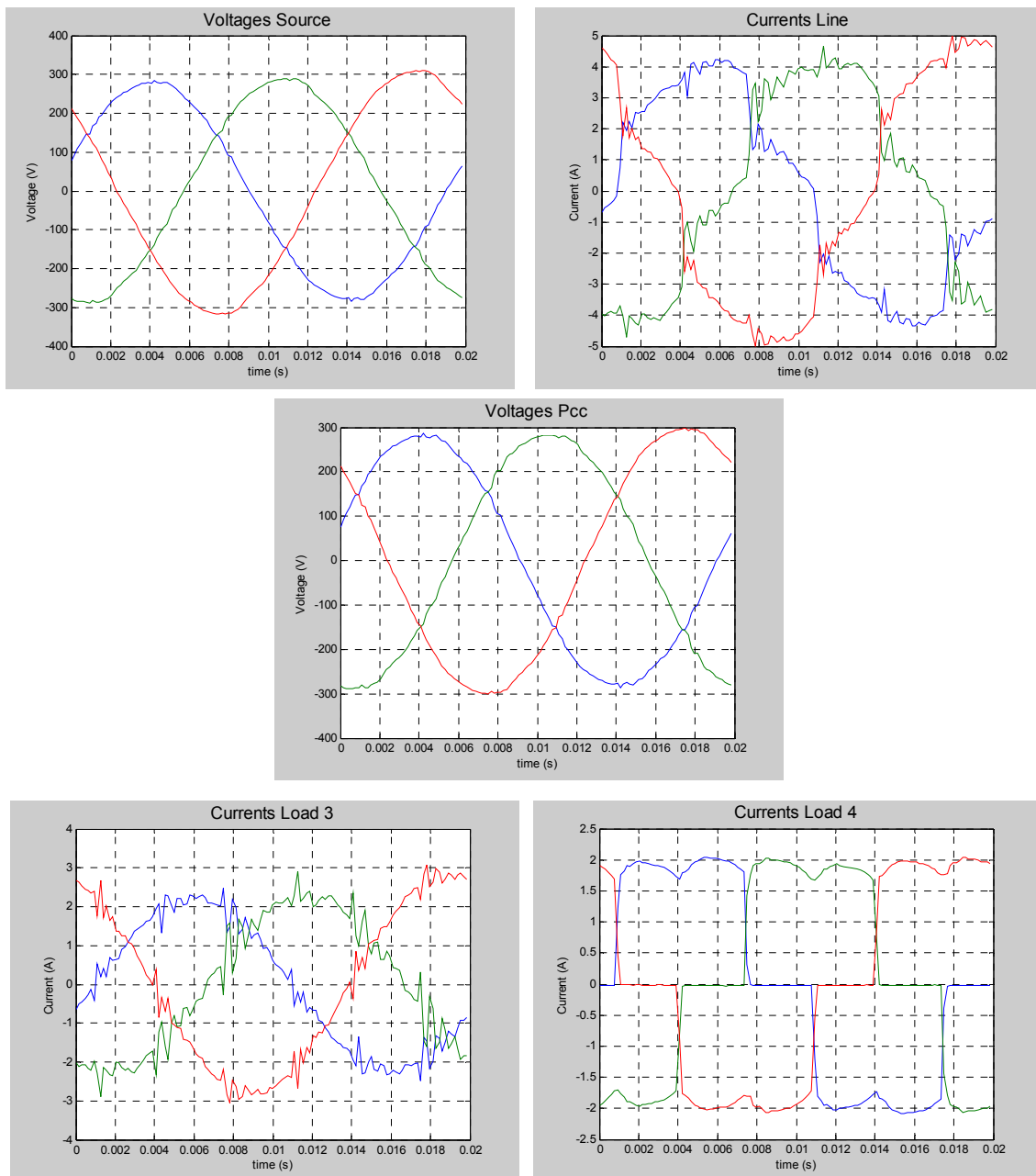


Figura C.6.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 6, Test A.6.



**Figura C.6.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 6, Test B.6.

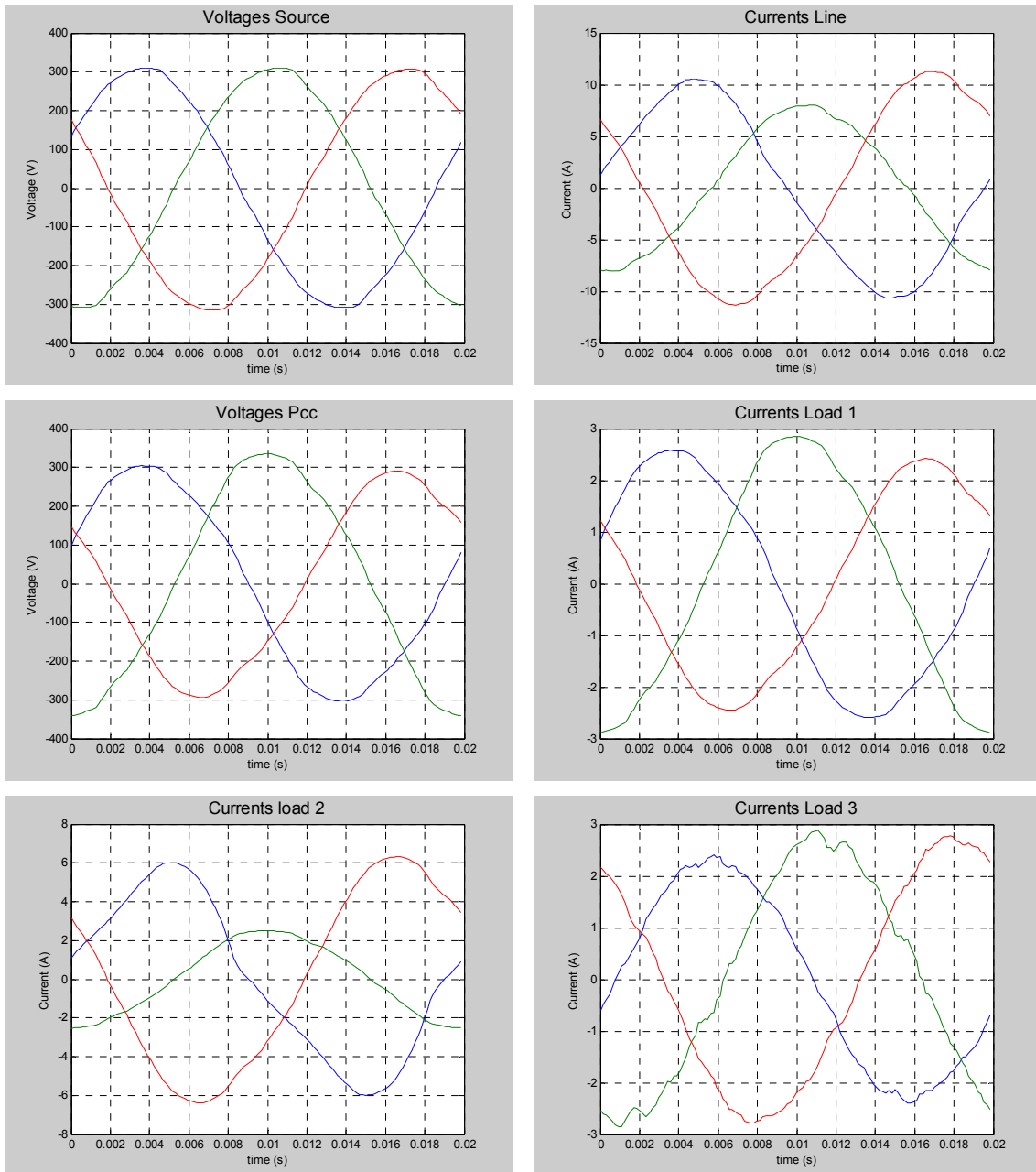
Caso 7					
Test A.7			Test B.7		
Fuente A	Distorsionada y equilibrada		Fuente B	Distorsionada y desequilibrada	
Carga 1	Lineal y Equilibrada (R)		Carga 1	Lineal y Equilibrada (R)	
Carga 2	No lineal y desequilibrada		Carga 2	No lineal y desequilibrada	
Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)		Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)	

Tabla C.7.A. Medidas realizadas en el PCC en el Test A.7

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	215.9	7.2	239.2	5.6	202.6	7.8
THD (%)	4.9	6.7	4.5	3.4	5.2	4.2
H <sub>3</sub> (%)	4.7	6.5	4.1	2.9	4.9	3.9
H <sub>5</sub> (%)	0.9	1.0	0.4	0.3	0.9	0.8
H <sub>7</sub> (%)	0.8	1.1	1.4	1.1	0.8	1.0
H <sub>9</sub> (%)	0.4	0.6	0.3	0.3	0.5	0.3
H <sub>11</sub> (%)	0.6	0.6	0.3	0.5	0.6	0.5
H <sub>13</sub> (%)	0.3	0.5	0.7	1.0	0.5	0.7
THD (%)	THDV = 4.9; THDI = 6.7					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 0.4; V <sub>cero</sub> = 9.5; A <sub>neg</sub> = 18.9; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.52		1.33		1.57	
	4.42					
S (kVA)	1.55		1.34		1.58	
	4.47					
Q (kVAr)	0.34 Ind		0.13 Ind		0.13 Ind	
	0.60 Ind					
PF	0.97		0.99		1.00	
	0.99					
Cos φ	0.98		1.00		1.00	

Tabla C.7.B. Medidas realizadas en el PCC en el Test B.7

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	199.6	6.7	222.3	5.2	195.6	7.5
THD (%)	4.9	6.7	4.3	3.3	4.9	4.0
H <sub>3</sub> (%)	4.8	6.5	4.0	2.9	4.6	3.7
H <sub>5</sub> (%)	0.9	1.0	0.8	0.5	0.6	0.6
H <sub>7</sub> (%)	0.6	1.0	1.1	0.8	1.0	1.0
H <sub>9</sub> (%)	0.4	0.6	0.3	0.4	0.4	0.3
H <sub>11</sub> (%)	0.2	0.5	0.2	0.4	0.5	0.4
H <sub>13</sub> (%)	0.5	0.4	0.7	1.0	0.6	0.8
THD (%)	THDV = 4.9; THDI = 6.7					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 9.6; A <sub>neg</sub> = 21.0; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.29		1.15		1.46	
	3.90					
S (kVA)	1.33		1.15		1.47	
	3.95					
Q (kVAr)	0.29 Ind		0.12 Ind		0.12 Ind	
	0.53 Ind					
PF	0.97		0.99		1.00	
	0.99					
Cos φ	0.98		1.00		1.00	



**Figura C.A.7.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 7, Test A.7.

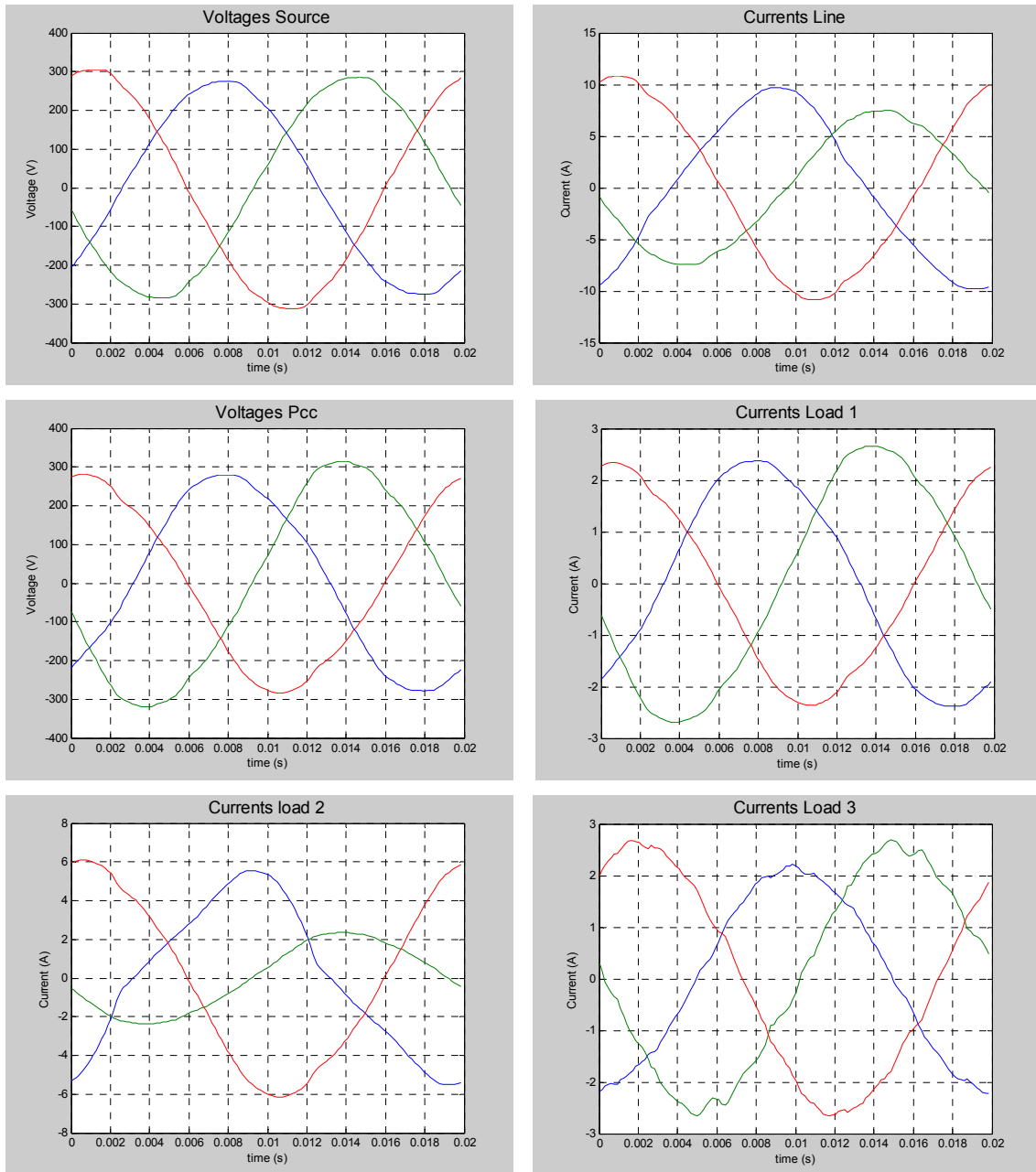


Figura C.7.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 7, Test B.7.

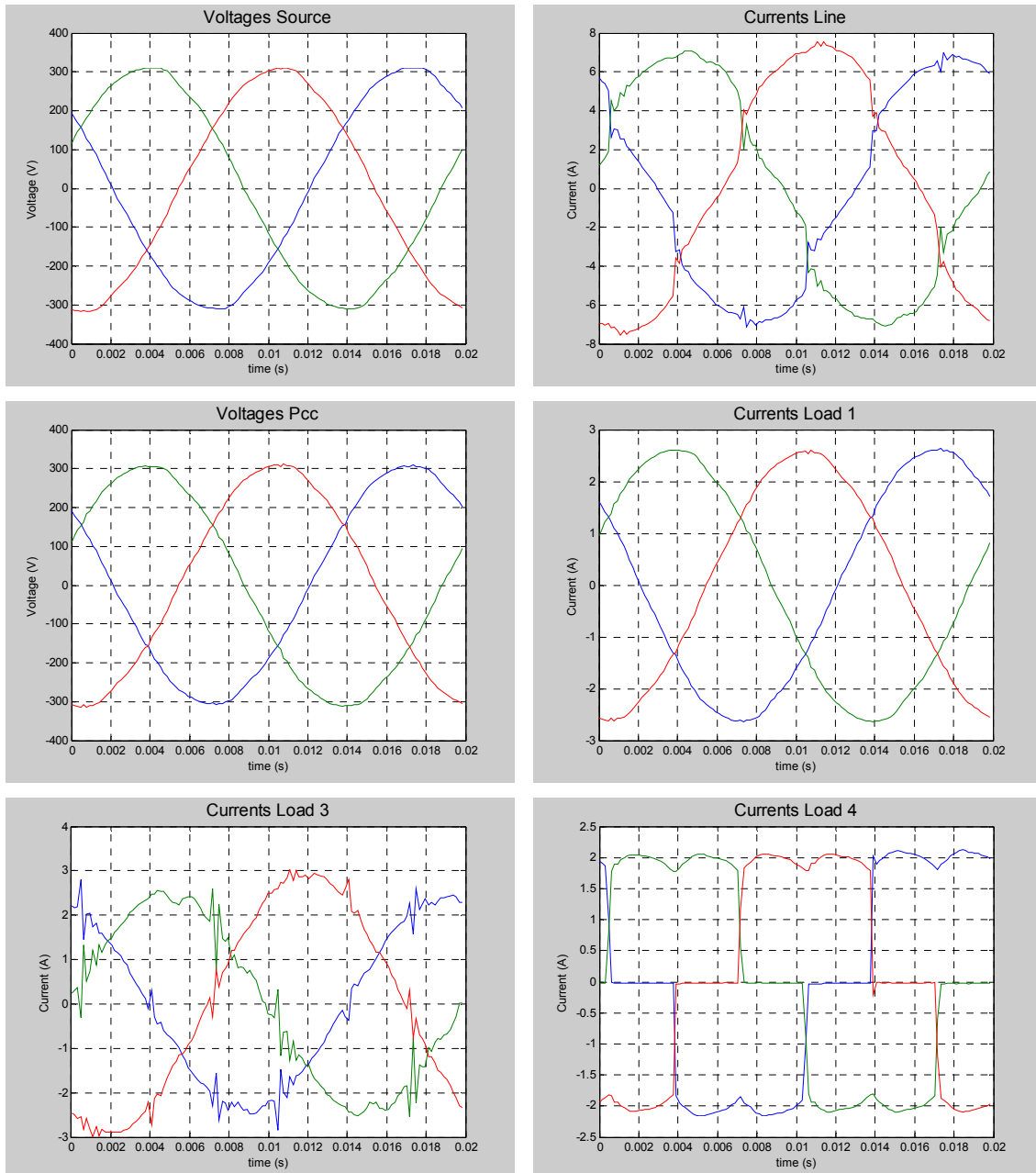
Caso 8			
Test A.8		Test B.8	
Fuente A	Distorsionada y equilibrada	Fuente B	Distorsionada y desequilibrada
Carga 1	Lineal y Equilibrada (R)	Carga 1	Lineal y Equilibrada (R)
Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)	Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)
Carga 4	No lineal y Equilibrada	Carga 4	No lineal y Equilibrada

**Tabla C.8.A.** Medidas realizadas en el PCC en el Test A.8

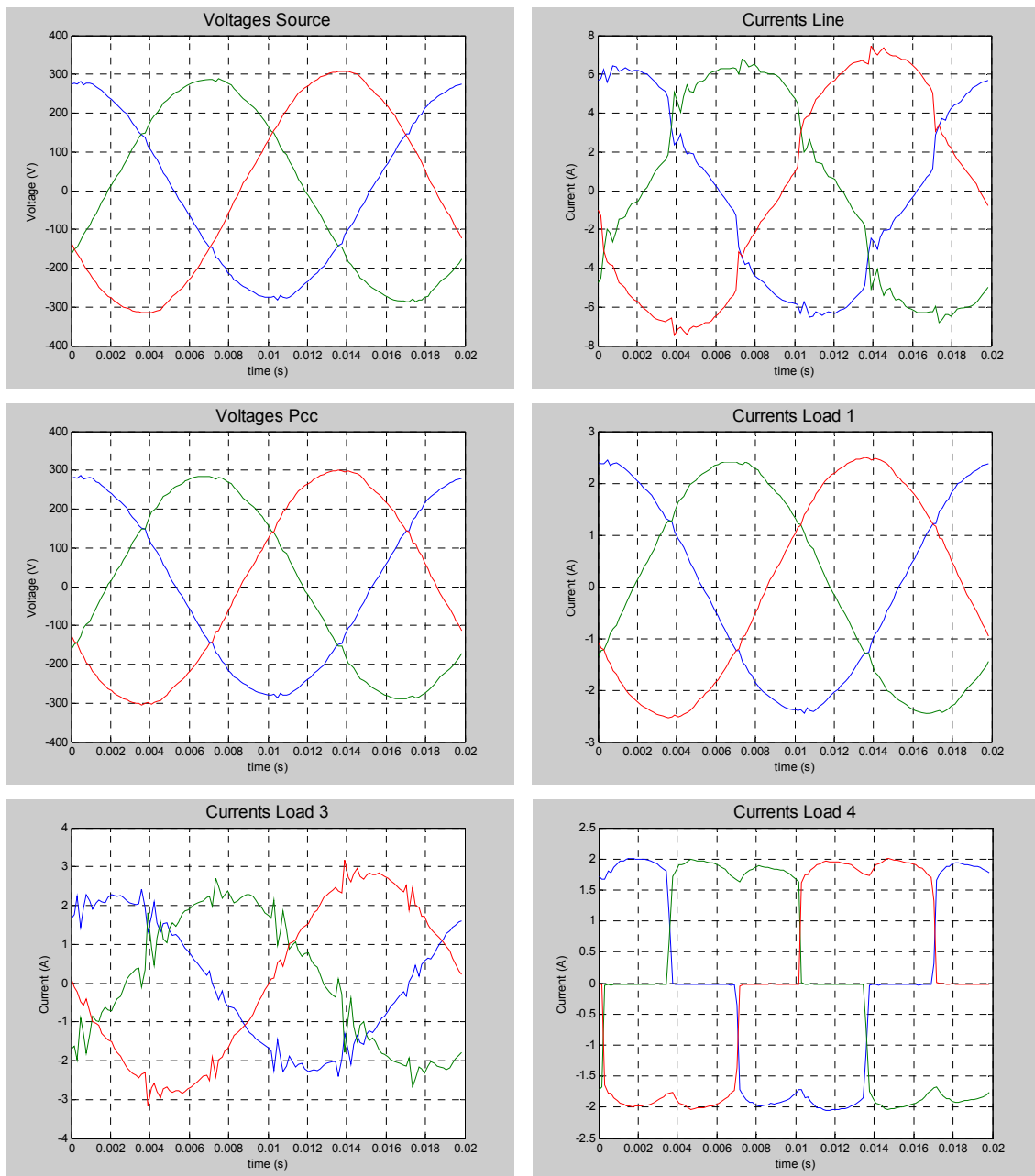
Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	218.3	4.9	219.8	5.1	220.3	5.3
THD (%)	1.4	9.3	1.5	9.4	1.6	8.6
H <sub>3</sub> (%)	0.7	0.1	0.8	0.1	0.8	0.0
H <sub>5</sub> (%)	0.2	6.9	0.3	6.7	0.4	6.4
H <sub>7</sub> (%)	1.0	3.8	1.0	4.3	1.1	3.8
H <sub>9</sub> (%)	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
H <sub>11</sub> (%)	0.2	3.0	0.3	2.8	0.3	2.5
H <sub>13</sub> (%)	0.5	1.5	0.6	0.9	0.5	1.3
THD (%)	THDV = 1.4; THDI = 9.3					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 0.2; V <sub>cero</sub> = 0.4; A <sub>neg</sub> = 4.6; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.06		1.10		1.16	
	3.31					
S (kVA)	1.07		1.11		1.17	
	3.35					
Q (kVAr)	0.19 Ind		0.10 Ind		0.18 Ind	
	0.47 Ind					
PF	0.98		0.99		0.98	
	0.98					
Cos φ	0.98		1.00		0.99	

**Tabla C.8.B.** Medidas realizadas en el PCC en el Test B.8

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	200.7	4.5	204.5	4.7	213.4	5.2
THD (%)	1.6	10.4	1.8	10.9	1.5	8.5
H <sub>3</sub> (%)	0.7	0.7	0.9	0.8	0.6	0.6
H <sub>5</sub> (%)	0.2	7.6	0.2	7.3	0.1	5.9
H <sub>7</sub> (%)	0.9	3.6	0.9	4.1	1.0	4.1
H <sub>9</sub> (%)	0.1	0.7	0.1	0.4	0.2	0.8
H <sub>11</sub> (%)	0.1	3.3	0.3	3.3	0.3	2.0
H <sub>13</sub> (%)	0.5	1.6	0.7	0.9	0.6	1.3
THD (%)	THDV = 1.6; THDI = 10.4					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 3.2; V <sub>cero</sub> = 0.4; A <sub>neg</sub> = 7.8; A <sub>cero</sub> = 0.0					
P (kW)	0.89		0.95		1.08	
	2.93					
S (kVA)	0.91		0.96		1.09	
	2.96					
Q (kVAr)	0.16 Ind		0.09 Ind		0.17 Ind	
	0.42 Ind					
PF	0.98		0.99		0.98	
	0.98					
Cos φ	0.98		1.00		0.99	



**Figura C.8.A.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 8, Test A.8.



**Figura C.8.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 8, Test B.8.

Caso 9					
Test A.9			Test B.9		
Fuente A	Distorsionada y equilibrada		Fuente B	Distorsionada y desequilibrada	
Carga 2	No lineal y desequilibrada		Carga 2	No lineal y desequilibrada	
Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)		Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)	
Carga 4	No lineal y Equilibrada		Carga 4	No lineal y Equilibrada	

**Tabla C.9.A.** Medidas realizadas en el PCC en el Test A.9

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	218.8	7.0	246.7	5.3	195.8	7.5
THD (%)	6.9	9.4	6.1	9.4	7.7	7.4
H <sub>3</sub> (%)	6.7	6.6	5.8	2.5	7.3	4.4
H <sub>5</sub> (%)	1.1	4.8	0.6	6.6	1.5	3.8
H <sub>7</sub> (%)	0.9	3.0	1.6	4.2	1.3	3.3
H <sub>9</sub> (%)	0.6	0.6	0.5	0.3	0.7	0.4
H <sub>11</sub> (%)	0.3	2.0	0.1	2.6	0.5	2.0
H <sub>13</sub> (%)	0.4	1.0	0.6	0.9	0.6	0.7
THD (%)	THDV = 6.9; THDI = 9.4					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 0.5; V <sub>cero</sub> = 13.2; A <sub>neg</sub> = 20.0; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.48		1.28		1.45	
	4.21					
S (kVA)	1.51		1.29		1.46	
	4.26					
Q (kVAr)	0.30 Ind		0.17 Ind		0.15 Ind	
	0.62 Ind					
PF	0.97		0.99		0.99	
	0.98					
Cos φ	0.98		0.99		0.99	

**Tabla C.9.B.** Medidas realizadas en el PCC en el Test B.9

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
RMS (V, A)	202.8	6.4	229.0	4.9	188.8	7.2
THD (%)	6.9	9.9	5.7	10.8	7.4	7.1
H <sub>3</sub> (%)	6.7	6.9	1.1	3.2	7.0	4.0
H <sub>5</sub> (%)	1.0	5.1	1.4	7.0	1.4	3.4
H <sub>7</sub> (%)	0.7	2.8	0.6	3.9	1.4	3.5
H <sub>9</sub> (%)	0.7	0.6	0.1	0.2	0.6	0.5
H <sub>11</sub> (%)	0.2	2.3	0.7	3.1	0.5	1.6
H <sub>13</sub> (%)	0.4	1.0	0.1	1.1	0.6	0.6
THD (%)	THDV = 6.9; THDI = 9.9					
Desequilibrio (%)	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 13.4; A <sub>neg</sub> = 22.0; A <sub>cero</sub> = 0.1					
P (kW)	1.27		1.10		1.34	
	3.72					
S (kVA)	1.30		1.11		1.35	
	3.76					
Q (kVAr)	0.26 Ind		0.15 Ind		0.13 Ind	
	0.55 Ind					
PF	0.97		0.99		0.99	
	0.98					
Cos φ	0.98		0.99		0.98	

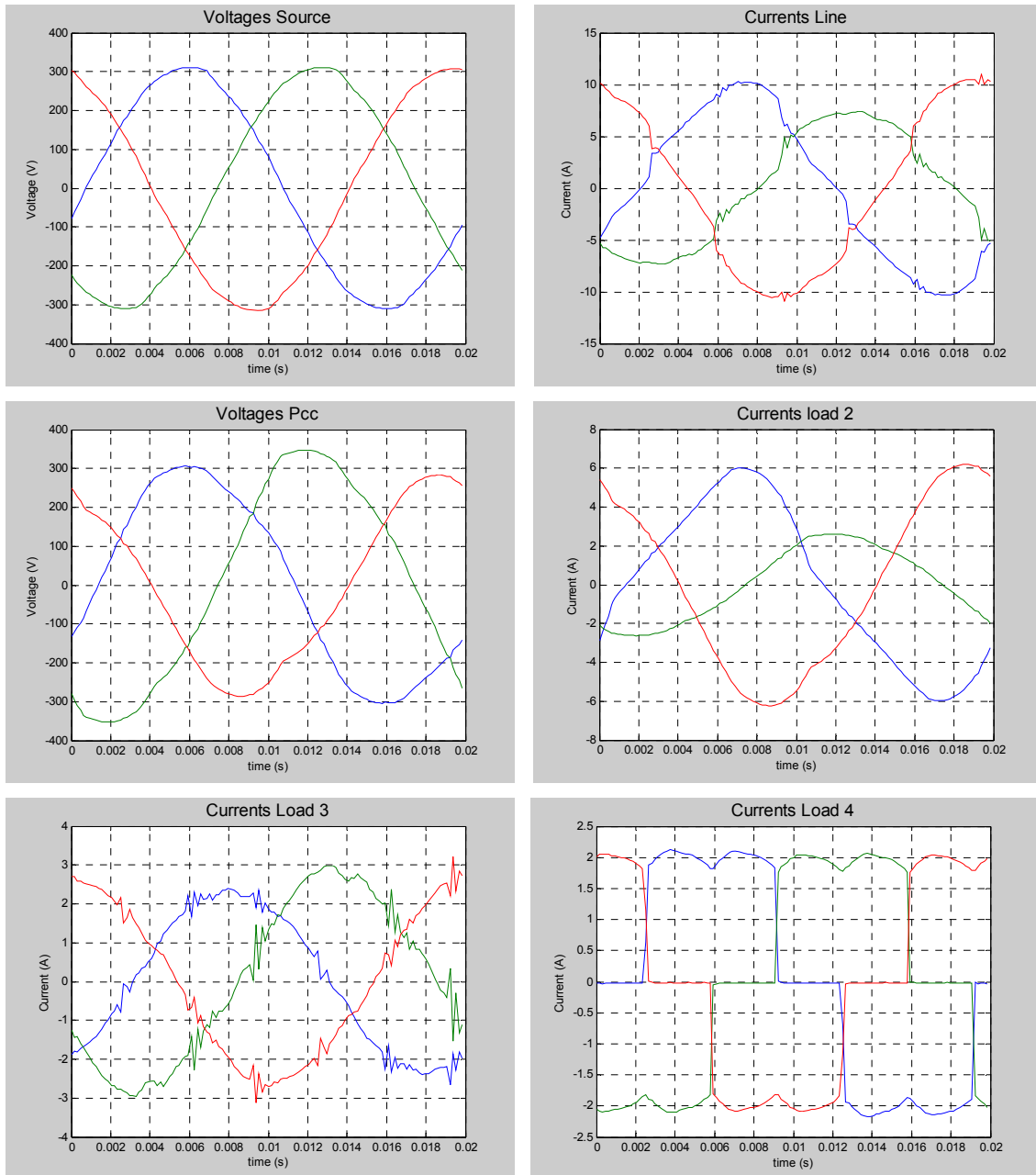


Figura C.9.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 9, Test A.9.

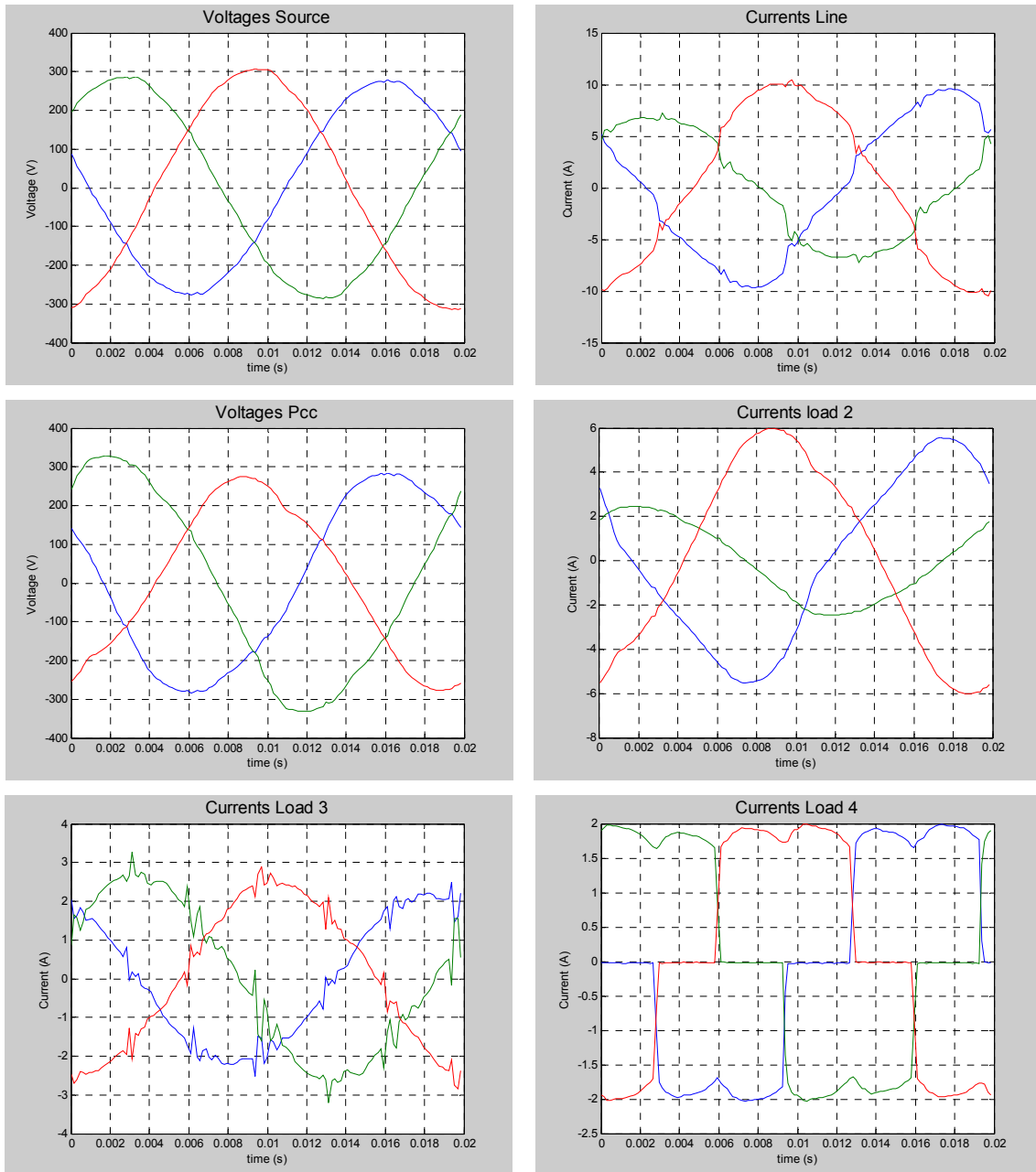


Figura C.9.B. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 9, Test B.9.

Caso 10					
Test A.10			Test B.10		
Fuente A	Distorsionada y equilibrada		Fuente B	Distorsionada y desequilibrada	
Carga 1	Lineal y Equilibrada (R)		Carga 1	Lineal y Equilibrada (R)	
Carga 2	No lineal y desequilibrada		Carga 2	No lineal y desequilibrada	
Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)		Carga 3	Lineal y Equilibrada (RLC)	
Carga 4	No lineal y Equilibrada		Carga 4	No lineal y Equilibrada	

Tabla C.10.A. Medidas realizadas en el PCC en el Test A.10

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
<b>RMS</b> (V, A)	215.4	8.7	239.0	7.1	202.2	9.3
<b>THD</b> (%)	5.0	7.6	4.5	7.2	5.2	5.8
<b>H<sub>3</sub></b> (%)	4.7	5.3	4.1	2.3	4.9	3.2
<b>H<sub>5</sub></b> (%)	0.8	4.0	0.3	4.9	1.1	3.1
<b>H<sub>7</sub></b> (%)	1.0	2.5	1.5	3.2	1.1	2.6
<b>H<sub>9</sub></b> (%)	0.4	0.4	0.3	0.2	0.5	0.3
<b>H<sub>11</sub></b> (%)	0.3	1.6	0.2	2.1	0.5	1.6
<b>H<sub>13</sub></b> (%)	0.6	0.7	0.8	0.4	0.6	2.0
<b>THD</b> (%)	THDV = 5.0; THDI = 7.6					
<b>Desequilibrio</b> (%)	V <sub>neg</sub> = 0.5; V <sub>cero</sub> = 9.6; A <sub>neg</sub> = 15.4; A <sub>cero</sub> = 0.0					
<b>P</b> (kW)	1.84		1.69		1.87	
	5.41					
<b>S</b> (kVA)	1.86		1.70		1.88	
	5.44					
<b>Q</b> (kVAr)	0.30 Ind		0.14 Ind		0.15 Ind	
	0.59 Ind					
<b>PF</b>	0.98		1.00		1.00	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	0.99		1.00		1.00	

Tabla C.10.B. Medidas realizadas en el PCC en el Test B.10

Fase	L <sub>1</sub>		L <sub>2</sub>		L <sub>3</sub>	
	V <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>
<b>RMS</b> (V, A)	198.7	8.0	221.3	6.6	194.8	9.0
<b>THD</b> (%)	4.9	8.1	4.5	8.1	4.9	5.5
<b>H<sub>3</sub></b> (%)	4.7	5.6	4.1	2.8	4.6	2.9
<b>H<sub>5</sub></b> (%)	0.6	4.4	0.8	5.4	0.8	2.9
<b>H<sub>7</sub></b> (%)	0.8	2.4	1.3	2.9	1.1	2.8
<b>H<sub>9</sub></b> (%)	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
<b>H<sub>11</sub></b> (%)	0.1	1.7	0.1	2.3	0.4	1.3
<b>H<sub>13</sub></b> (%)	0.3	0.6	0.7	0.6	0.6	0.4
<b>THD</b> (%)	THDV = 4.9; THDI = 8.1					
<b>Desequilibrio</b> (%)	V <sub>neg</sub> = 3.3; V <sub>cero</sub> = 9.7; A <sub>neg</sub> = 17.7; A <sub>cero</sub> = 0.0					
<b>P</b> (kW)	1.56		1.45		1.74	
	4.74					
<b>S</b> (kVA)	1.58		1.45		1.74	
	4.78					
<b>Q</b> (kVAr)	0.26 Ind		0.12 Ind		0.13 Ind	
	0.52 Ind					
<b>PF</b>	0.98		0.99		1.00	
	0.99					
<b>Cos φ</b>	0.99		1.00		1.00	

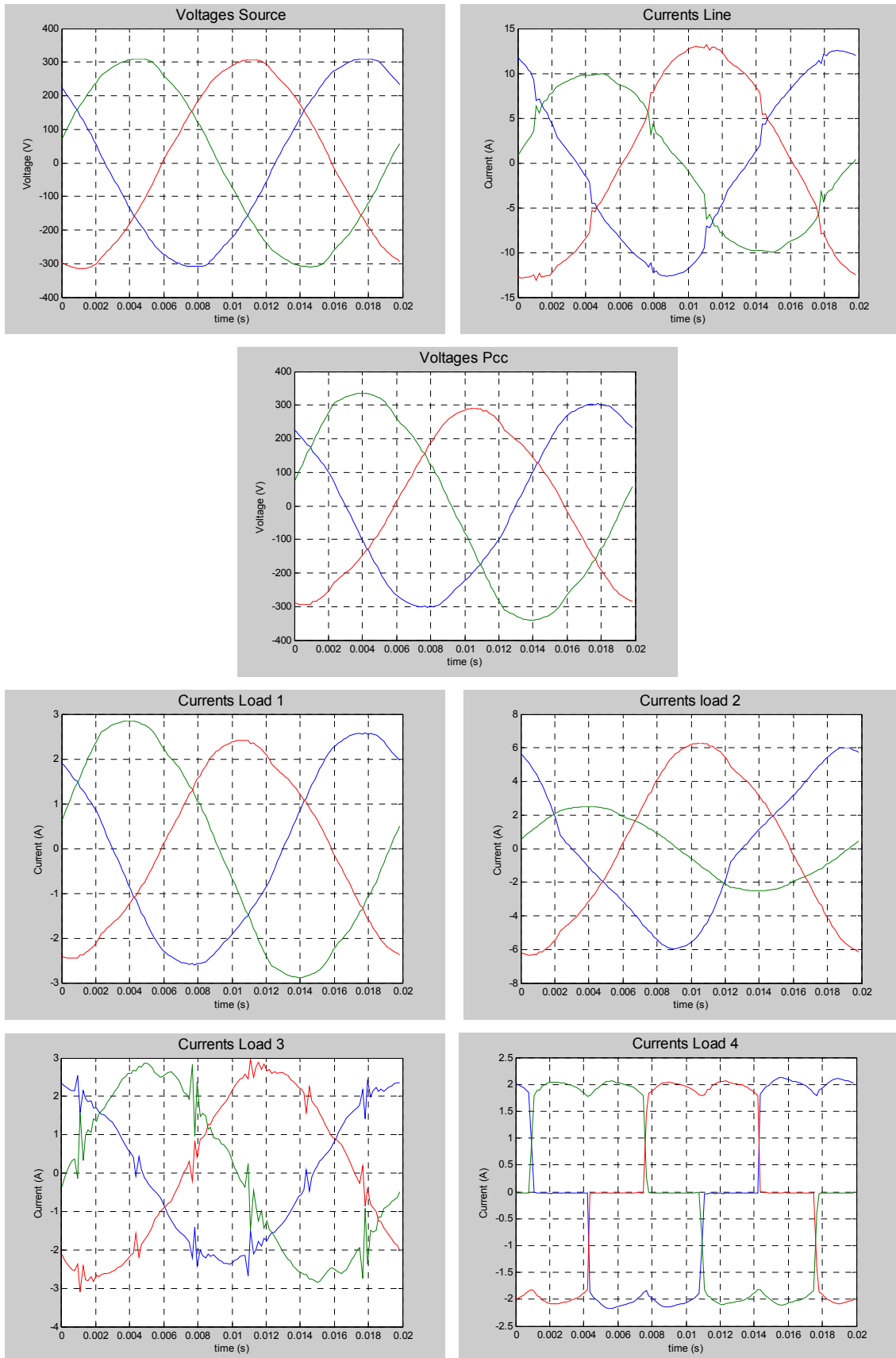
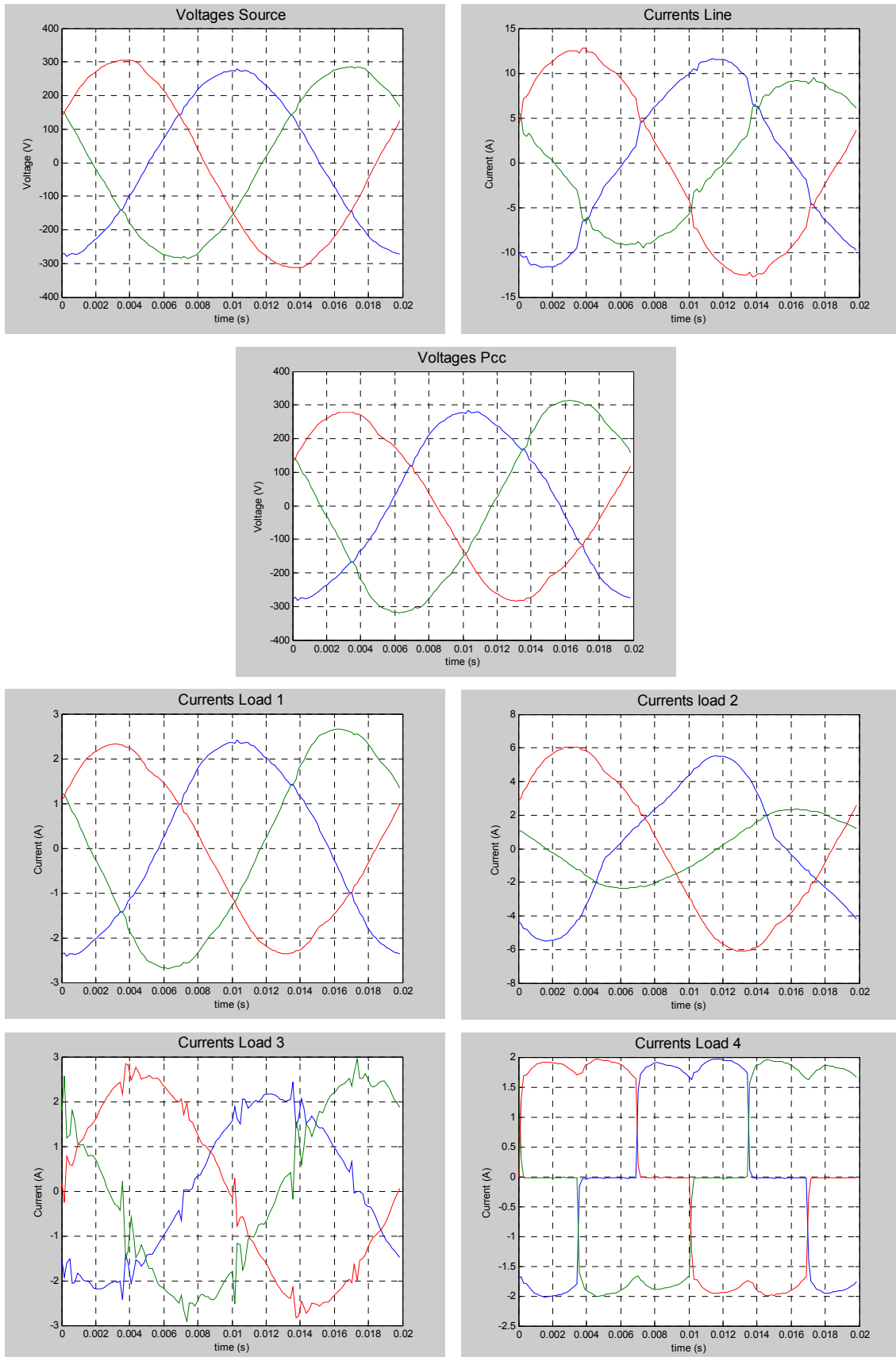


Figura C.10.A. Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 10, Test A.10.



**Figura C.10.B.** Formas de ondas de tensión e intensidad del sistema en el caso 10, Test B.10.

C.3. RESUMEN DE LOS DISTINTOS CASOS PRESENTADOS EN EL CAPÍTULO IV

TABLA C.11. Resultados de los distintos casos presentados en el capítulo IV.							
Test A,1 ( $V_{neg} = 0 \%$ )				Test B,1 ( $V_{neg} = 3 \%$ )			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 1	0,72	0,39	0,88	Carga 1	0,70	0,38	0,89
Carga 2	1,76	1,60	1,31	Carga 2	2,12	1,69	1,38
Test A,2				Test B,2			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 1	0,37	0,46	0,25	Carga 1	0,40	0,41	0,22
Carga 4	2,70	2,28	1,75	Carga 4	2,74	2,30	1,65
Test A,3				Test B,3			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 2	1,48	1,39	1,04	Carga 2	1,15	1,25	1,01
Carga 4	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	1,13	Carga 4	2,38	1,35	1,49
Test A,4				Test B,4			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 1	0,80	0,48	0,35	Carga 1	0,77	0,45	0,35
Carga 2	2,40	1,99	1,02	Carga 2	2,61	2,01	1,04
Carga 4	1,42	1,19	1,52	Carga 4	2,20	1,39	1,67
Test A,5				Test B,5			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 2	1,57	1,49	1,08	Carga 2	2,09	1,63	1,19
Carga 3	0,76	0,66	0,63	Carga 3	0,82	0,78	0,73
Test A,6				Test B,6			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 3	0,78	<b>1,12</b>	0,65	Carga 3	0,82	<b>1,17</b>	0,74
Carga 4	2,18	1,31	1,34	Carga 4	2,01	1,22	1,21
Test A,7				Test B,7			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 1	0,71	0,40	0,68	Carga 1	0,68	0,37	0,71
Carga 2	2,48	2,07	1,46	Carga 2	4,00	2,33	1,72
Carga 3	0,79	0,77	0,51	Carga 3	0,87	0,90	0,62
Test A,8				Test B,8			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 1	0,40	0,17	0,19	Carga 1	0,42	0,19	0,23
Carga 3	<b>1,12</b>	<b>1,81</b>	0,73	Carga 3	<b>1,69</b>	<b>2,04</b>	0,84
Carga 4	4,61	2,13	1,90	Carga 4	3,18	1,77	1,76
Test A,9				Test B,9			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 2	2,12	1,87	1,05	Carga 2	1,68	1,71	1,04
Carga 3	0,89	0,87	0,46	Carga 3	<b>1,23</b>	<b>1,15</b>	0,69
Carga 4	1,29	1,11	1,32	Carga 4	4,80	1,82	1,84
Test A,10				Test B,10			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$		$g_1$	$g_2$	$g_3$
Carga 1	0,78	0,46	0,30	Carga 1	0,73	0,42	0,32
Carga 2	3,16	2,46	1,18	Carga 2	2,87	2,32	1,15
Carga 3	0,97	<b>1,05</b>	0,50	Carga 3	<b>1,24</b>	<b>1,22</b>	0,63
Carga 4	1,96	1,41	1,64	Carga 4	6,60	2,15	2,26

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- [1] S. H. Hashemi, M. H. Ashouian, H. Pirpiran and R. Karami, "Impact of distributed generation on unbalanced distribution networks," *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2013.1039.
- [2] P. Juanuwattanakul, M. A. S. Masoum and P. S. Moses, "Voltage analysis for placement of DG in unbalanced distribution networks," *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Lisbon, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/EPQU.2011.6128868
- [3] H. K. Miyamoto, F. R. Braga, G. R. Souza, M. Z. Fortes and D. H. N. Dias, "Impacts on distributed generation with harmonics analysis — Case study," *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, Niteroi, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395868
- [4] T. Zhong-zheng and S. Yang-zi, "Study on unbalanced power flow in distribution network with distributed generators of power grid," *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Xi'an, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/CICED.2016.7575977
- [5] B. Singh and N. M. Pindoriya, "Impact Assessment of Distributed Solar PV Integration in Low-Voltage Unbalanced Distribution Network: A Case Study," *5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gorakhpur, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/UPCON.2018.8596976
- [6] A. Menchetti, R. Sasdelli, "Measurement Problems in Power Quality Improvement". *European Transactions on Electrical Power*, vol. 4, No. 6, Nov/Dec, 1994.
- [7] A. Ferrero, A. Menchetti, R. Sasdelli. "Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems". *European Transactions on Electrical Power*. Vol. 6, No. 6, November/December 1996. doi:10.1002/etep.4450060607
- [8] H. Renner, "Voltage unbalance emission assessment". *Electric Power Quality Supply Reliability Conference*. Jun. 2010, vol. 16, no. 18, pp. 43–48.
- [9] UNE-EN 50160, "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución", AENOR 2015.

- [10] 5th Int. Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, *European Transactions on Electrical Power* (5 and 6) (2001);12 (1) (2002).
- [11] J. Meyer, A. Blanco, M. Domagk and P. Schegner. "Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low-Voltage Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 962-970, April 2017. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2558187
- [12] S. Vora and D. Bhatt. "A comprehensive review of harmonics effects on electrical power quality". *International Journal of Engineering Development and Research*. Vol. 1 no. 3, pp. 14–21, Dec. 2014.
- [13] P. Pillay and M. Manyage, "Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 4, pp. 813-822, Dec. 2006. doi: 10.1109/TEC.2005.853724
- [14] Pablo Donolo, Guillermo Bossio, Cristian De Angelo, Guillermo García, Marcos Donolo. "Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations". *Electric Power Systems Research*. 140 (2016) 866–873, doi:10.1016/j.epsr.2016.04.018.
- [15] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "Effects of voltage unbalance on induction motors". *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN, USA, 2004*, pp. 26-29. doi: 10.1109/ELINSL.2004.1380430
- [16] A. Kalyuzhny and G. Kushnir, "Analysis of Current Unbalance In Transmission Systems With Short Lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1040-1048, April 2007. doi: 10.1109/TPWRD.2006.883011
- [17] R. F. Woll, "Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-11, no. 1, pp. 38-42, Jan. 1975. doi: 10.1109/TIA.1975.349255
- [18] A. von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 782-790, Oct. 2001. doi: 10.1109/61.956770
- [19] Jaime Prieto Thomas, Patricio Salmerón Revuelta, Alejandro Pérez Vallés and Salvador Pérez Litrán, "Practical evaluation of unbalance and harmonic distortion in power conditioning". *Electric Power Systems Research*. 141 (2016) 487–499. doi: 10.1016/j.epsr.2016.08.012.

- [20] Alessandro Ferrero. "Measuring electric power quality: Problem and perspectives". *Measurement*. Volume 41, Issue 2, February 2008, Pages 121-129. doi: 10.1016/j.measurement.2006.03.004
- [21] L. Cristaldi and A. Ferrero, "A digital method for the identification of the source of distortion in electric power systems," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 44, no. 1, pp. 14-18, Feb. 1995. doi: 10.1109/19.368109J.
- [22] Arrillaga, L.I. Eguíluz, "Armónicos en Sistemas de Potencia", *Servicios de Publicaciones de la universidad de Cantabria*, 1994.
- [23] UNE-EN 61000-3-2, "CEM Part 3-2: límites para las emisiones de corriente armónica equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase", AENOR 2019.
- [24] IEC 61000-3-4. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: "Limits - Section 4: Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A. 1998.
- [25] IEC 61000-3-6, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems, 2008.
- [26] IEEE Standard 519. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, (Revision IEEE Standard 519-1992), 2014, pp. 1–29.
- [27] IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Limits – Section 30: "Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods". 2015.
- [28] IEEE Std. 1159. "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". (Revision of IEEE Std 1159-1995), pp.1-94, 26 June 2009. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067.
- [29] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, and J. L. Gutierrez, "Assessment of unbalance emission level produced by loads using the apparent power components," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 6, pp. 381–386, 1996.
- [30] S.F. De Paula Silva, J. De Oliveira, "The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: a case study". *Electric Power Systems Research*. 78 (11) (2008) 1959–1964. doi: 10.1016/j.epsr.2008.04.003.

- [31] P. Salmeron, R. S. Herrera, A. Perez Valles and J. Prieto, "New Distortion and Unbalance Indices Based on Power Quality Analyzer Measurements," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 501-507, April 2009. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2013378
- [32] J. E. Farach, W. M. Grady and A. Arapostathis, "An optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1303-1310, July 1993. doi: 10.1109/61.252656
- [33] P. H. Swart, M. J. Case, and J. D. Van Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 4, no. 6, pp. 485-489, 1994. doi: 10.1002/etep.4450060605
- [34] T. Tanaka and H. Akagi, "A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 4, pp. 1737-1742, Oct. 1995. doi: 10.1109/61.473386
- [35] Swart, P.H., van Wyk, J.D. and Case, M.J."On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks", *European Transactions on Electrical Power*, pp: 391-396. 1996.
- [36] G. T. Heydt and E. Gunther, "Post-measurement processing of electric power quality data," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 4, pp. 1853-1859, Oct. 1996. doi: 10.1109/61.544267
- [37] D. D. Sabin, D. L. Brooks and A. Sundaram, "Indices for assessing harmonic distortion from power quality measurements: definitions and benchmark data," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 489-496, April 1999. doi: 10.1109/61.754093
- [38] Wilsun Xu and Yilu Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804-811, April 2000. doi: 10.1109/61.853023
- [39] W. Xu, "Power direction method cannot be used for harmonic source detection," *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, Seattle, WA, 2000, pp. 873-876 vol. 2. doi: 10.1109/PESS.2000.867472

- [40] A. de Oliveira, J. C. de Oliveira, J. W. Resende and M. S. Miskulin, "Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1721-1726, Oct. 1991. doi: 10.1109/61.97712
- [41] L. S. Czarnecki and Z. Staroszczyk, "On-line measurement of equivalent parameters for harmonic frequencies of a power distribution system and load," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, no. 2, pp. 467-472, April 1996. doi: 10.1109/19.492769
- [42] E. Thunberg and L. Soder, "A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 1, pp. 272-277, Jan. 1999. doi: 10.1109/61.736738
- [43] CIGRE'36.05/CIRED 2 joint WG CC02 (Voltage Quality) "Review of Methods for Measurement and Evaluation of the Harmonic Emission Level from an Individual Distorting Load", January, 1999.
- [44] J.P.V. Du Toit, J.H.C. Pretorius y W.A. Cronje. "Non Linear Load Identification under Non-Sinusoidal Conditions". *Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions*, Milano, October 13-15, 2003.
- [45] Wilsun Xu, Xian Liu and Yilu Liu, "An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 214-219, Jan. 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2002.803842
- [46] Wilsun Xu, Chun Li and T. Tayjasanant, "A "critical impedance" based method for identifying harmonic sources," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004., Denver, CO, 2004, pp. 917 Vol.1-. doi: 10.1109/PES.2004.1372959
- [47] Chaoying Chen, Xiuling Liu, D. Koval, Wilsun Xu and T. Tayjasanant, "Critical impedance method - a new detecting harmonic sources method in distribution systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 288-297, Jan. 2004. doi: 10.1109/TPWRD.2003.820424
- [48] Whei-Min Lin, Chia-Hung Lin, Keng-Pang Tu and Chien-Hsien Wu, "Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 2166-2173, July 2005. doi: 10.1109/TPWRD.2004.843462

- [49] T. Pfajfar, B. Blazic, and I. Papic, "Methods for estimating customer voltage harmonic emission levels," in *Proc. 13th Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, 2008, pp. 1–6.
- [50] A. Ferrero, S. Salicone and G. Todeschini, "A Fuzzy method for the identification of the sources producing harmonic pollution in the electric network," 2007 *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, Warsaw, 2007, pp. 1-6. doi: 10.1109/IMTC.2007.379396
- [51] A. P. J. Rens and P. H. Swart, "On techniques for the localisation of multiple distortion sources in three-phase networks: Time domain verification," *European Transactions on Electrical Power* 11(5):317 - 322 · September 2001. doi: 10.1002/etep.4450110506
- [52] J. Mazumdar, R. Harley, F. Lambert, G. K. Venayagamoorthy and M. L. Page, "Intelligent Tool for Determining the True Harmonic Current Contribution of a Customer in a Power Distribution Network," *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, Tampa, FL, 2006, pp. 664-671. doi: 10.1109/IAS.2006.256597
- [53] T. J. Browne, V. J. Gosbell and S. Perera, "Allocated harmonic quantities as the basis for source detection," 2009 *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, AB, 2009, pp. 1-6. doi: 10.1109/PES.2009.5275468
- [54] K. Vaid, P. Srikanth, and Y. R. Sood, "Critical impedance based automatic identification of harmonic sources in deregulated power industry," in *Proc. Int. Conf. Signal Process., Commun., Comput. Netw. Technol. (ICSCCN)*, 2011, pp. 653–658.
- [55] L.S. Czarnecki. "Current and power equations on bidirectional Flow of harmonic active power in circuits with rotating machines". *European Transactions on Electrical Power* 3 (1)(1993)67-74.
- [56] T. Pfajfar and I. Papič, "Harmonic emission level estimation based on measurements at the point of evaluation," 2011 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-5. doi: 10.1109/PES.2011.6039642
- [57] A. Ferrero, M. Prioli and S. Salicone, "Fuzzy Metrology-Sound Approach to the Identification of Sources Injecting Periodic Disturbances in Electric Networks," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 9, pp. 3007-3017, Sept. 2011. doi: 10.1109/TIM.2011.2158146

- [58] D. Stevanović and P. Petković, "A new method for detecting source of harmonic pollution at grid," in *Proc. 16th Int. Symp. Power Electron.*, vol. 26, no. 28, pp. 1–4, 2011.
- [59] P. Supriya and T. N. P. Nambiar, "Review of harmonic source identification techniques". *International Review of Electrical Engineering* 7(3):4525-4531 June 2012.
- [60] A. R. Abdullah, G. Z. Peng, S. A. Ghani and M. H. Jopri, "A new vector draft method for harmonic source detection at point of common coupling," *2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014)*, Langkawi, 2014, pp. 110-114. doi: 10.1109/PEOCO.2014.6814409
- [61] M. Bazina and T. Tomiša, "Comparison of various methods for determining direction of harmonic distortion by measuring in point of common coupling," *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, 2014, pp. 392-399. doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850457
- [62] B. Peterson, J. Rens, G. Botha and J. Desmet, "A discriminative approach to harmonic emission assessment," *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, 2015, pp. 7-12. doi: 10.1109/AMPS.2015.7312730
- [63] D. Stevanović and P. Petković, "A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters". *Electrical Engineering*, vol. 97, no. 2, pp. 165–174, 2015. December 2014. doi: 10.1007/s00202-014-0324-z
- [64] F. Karimzadeh, S. Esmaili and S. H. Hosseinian, "A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1843-1852, Aug. 2015. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2398820
- [65] K. Malekian, "A novel approach to analyze the harmonic behavior of customers at the point of common coupling," *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Costa da Caparica, 2015, pp. 31-36. doi: 10.1109/CPE.2015.7231045
- [66] Ö. Gül and T. Gündođdu, "Harmonic contributions of utility and customer based on load model using field measurements". *Journal of Power and Energy Engineering* 03(05):11-28 January 2015. doi: 10.4236/jpee.2015.35002

- [67] Xiao Chupeng, Qiu Zejing, Ding Sheng, Xu Chaoyang, Wang Zhiqi and Leng Yue, "Effectiveness analysis of determining the main harmonic source by harmonic active power direction method," *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Shanghai, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICPRE.2016.7871117
- [68] X. Zhao and H. Yang, "A New Method to Calculate the Utility Harmonic Impedance Based on FastICA," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 1, pp. 381-388, Feb. 2016. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2491644
- [69] S.-Z. Jiang, N. Su, L.-P. Ding, and S.-Y. Qiu, "Assessment method of harmonic emission level based on the improved weighted support vector machine regression," in *Proc. Int. Conf. Appl. Mech. Mechatron. Intell. Syst. (AMMIS)*, 2016, pp. 853–863.
- [70] F. Karimzadeh, S. Esmaili and S. Hossein Hosseinian, "Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 526-534, 4 2 2016. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0997
- [71] Chang-Song Li, Zhi-Xuan Bai, Xian-Yong Xiao, Ya-Mei Liu and Yi Zhang, "Research of harmonic distortion power for harmonic source detection," *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, 2016, pp. 126-129. doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783437
- [72] J. P. Srividhya, D. Sivakumar and T. Shanmathi, "A Review on causes, effects, and detection techniques of harmonics in the power system," *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, Chennai, 2016, pp. 680-686. doi: 10.1109/ICCPEIC.2016.7557309
- [73] S. Cieřlik, "On the problem of harmonic source detection in electric power networks," *2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Bydgoszcz, 2016, pp. 82-87. doi: 10.1109/CPE.2016.7544163
- [74] Y. Wang, C. Wang, T. Zhao and Z. Ding, "A Dynamic Approach for Harmonic Sources Identification with Time Delay in Distribution Networks," *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, OR, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2018.8585949

- [75] M. Domagk, J. Meyer, M. Hoven, K. Malekian, F. Safargholi and K. Kuech, "Probabilistic comparison of methods for calculating harmonic current emission limits," *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/PTC.2017.7981206
- [76] B. Peterson, J. Rens, G. Botha and J. Desmet, "A discriminative approach to harmonic emission assessment," *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, 2015, pp. 7-12. doi: 10.1109/AMPS.2015.7312730
- [77] A. Špelko et al., "CIGRE/CIRED JWG C4.42: Overview of common methods for assessment of harmonic contribution from customer installation," *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/PTC.2017.7981195
- [78] A. Špelko, I. Papič and S. Z. Djokic, "A voltage-only method for assessing harmonic contribution from a customer installation," *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, 2018, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378909
- [79] B. Wang, G. Ma, J. Xiong, H. Zhang, L. Zhang and Z. Li, "Several Sufficient Conditions for Harmonic Source Identification in Power Systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 3105-3113, Dec. 2018. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2870051
- [80] F. Xu, H. Yang, J. Zhao, Z. Wang and Y. Liu, "Study on Constraints for Harmonic Source Determination Using Active Power Direction," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 2683-2692, Dec. 2018. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2828034
- [81] F. Safargholi, K. Malekian and W. Schufft, "On the Dominant Harmonic Source Identification— Part I: Review of Methods," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1268-1277, June 2018. doi: 10.1109/TPWRD.2017.2751663
- [82] R. Lin, L. Xu, and X. Zheng, "A method for harmonic sources detection based on harmonic distortion power rate," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 322, no. 7, Art. no. 072038, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/322/7/072038
- [83] I. Papič et al., "A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 23-31, Feb. 2019. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2817542

- [84] G. Cai, L. Wang, D. Yang, Z. Sun, and B. Wang, "Harmonic detection for power grids using adaptive variational mode decomposition," *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 232, 2019. doi:10.3390/en12020232
- [85] D. Carta, C. Muscas, P. A. Pegoraro and S. Sulis, "Identification and Estimation of Harmonic Sources Based on Compressive Sensing," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 1, pp. 95-104, Jan. 2019. doi: 10.1109/TIM.2018.2838738
- [86] C. Muscas, L. Peretto, S. Sulis and R. Tinarelli, "Effects of load unbalance on multipoint measurement techniques for assessing the responsibility for PQ degradation," *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power* (IEEE Cat. No.04EX951), Lake Placid, NY, USA, 2004, pp. 759-764. doi: 10.1109/ICHQP.2004.1409448.
- [87] F. J. Alcantara and P. Salmeron, "A new technique for unbalance current and voltage estimation with neural networks," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 852-858, May 2005. doi: 10.1109/TPWRS.2005.846051
- [88] IEC 61000-3-13 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-13: Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems. 2008/COR1:2010.
- [89] P. Paranavithana, S. Perera, D. Sutanto and R. Koch, "A systematic approach towards evaluating voltage unbalance problem in interconnected sub-transmission networks: Separation of contribution by lines, loads and mitigation," *2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, NSW*, 2008, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICHQP.2008.4668829
- [90] Yuanyuan Sun, Peixin Li, Yixuan Wang and Zhiming Yin, "Determination of the main unbalance sources on PCC in the distribution system," *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO*, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2015.7285893
- [91] P. Paranavithana and S. Perera, "Location of sources of voltage unbalance in an interconnected network," *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB*, 2009, pp. 1-6. doi: 10.1109/PES.2009.5275641
- [92] Arlt, D. & (BR, H. & (NL/CN, R. & De Jaeger, Emmanuel & BE, & Emin, Zia & (US, M. & (FR, F. & Papic, Igor & (AU, P. & Perera, Sarath & Renner, Herwig & Zavoda, Francisc. "Review of Disturbance Emission Assessment Techniques". *CIGRE/CIRED C4.109 Working Group Rep.* 468, Jun. 2011. ISBN: 978- 2-85873- 158-9

- [93] F. Shahnian, R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich and F. Zare, "Sensitivity analysis of voltage imbalance in distribution networks with rooftop PVs," *IEEE PES General Meeting*, Providence, RI, 2010, pp. 1-8. doi: 10.1109/PES.2010.5590149
- [94] S. M. Brahma, "Fault Location in Power Distribution System With Penetration of Distributed Generation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1545-1553, July 2011. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2106146
- [95] U. Jayatunga, S. Perera and P. Ciufu, "Voltage unbalance emission assessment in radial power systems," *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, 2013, pp. 1-1. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672490
- [96] A. von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 782-790, Oct. 2001. doi: 10.1109/61.956770
- [97] R. Yan and T. K. Saha, "Investigation of Voltage Imbalance Due to Distribution Network Unbalanced Line Configurations and Load Levels," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1829-1838, May 2013. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2225849
- [98] Caramia P., Carpinelli G., Verde P. "Power Quality Indices in Liberalized Markets". *John Wiley & Sons, Ltd*, 2009. doi:10.1002/9780470994405
- [99] C. Muscas, *Assessment of Electrical Power Quality: Indices for Identifying Disturbing Loads*, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 8, No. 4, July/August 1998. doi: 10.1002/etep.4450080411
- [100] P. Salmerón, A. Pérez and S. Pérez. "New approach to assess unbalance and harmonic distortion in power systems". *International conference on renewable energy and power quality*, ICREPQ13. Córdoba, 2013. doi: 10.24084/repqj11.493
- [101] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, "A new technique to detect harmonic sources in polluted power systems". *XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development*. Vol. 6, pp. 1-6, September, 2006
- [102] P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino and S. Nuccio, "A Novel Approach Based on Nonactive Power for the Identification of Disturbing Loads in Power Systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1782-1789, July 2007. doi: 10.1109/TPWRD.2007.899624

- [103] A. Cataliotti, V. Cosentino and S. Nuccio, "Comparison of Nonactive Powers for the Detection of Dominant Harmonic Sources in Power Systems," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 8, pp. 1554-1561, Aug. 2008. doi: 10.1109/TIM.2008.925338
- [104] A. Cataliotti and V. Cosentino, "A New Measurement Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems Based on the Approach of the IEEE Std. 1459–2000," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 332-340, Jan. 2010. doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034480
- [105] K. Srinivasan, "On separating customer and supply side harmonic contributions," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 1003-1012, April 1996. doi: 10.1109/61.489362
- [106] K. Srinivasan and R. Jutras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 212-217, Jan. 1998. doi: 10.1109/61.660880
- [107] K. Srinivasan, "Attributing harmonics in private power production," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 887-892, Sept.-Oct. 1998. doi: 10.1109/28.72042
- [108] A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli and P. Zanchetta, "New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1284-1290, July 2004. doi: 10.1109/TPWRD.2004.829928
- [109] L. Cristaldi, A. Ferrero and S. Salicone, "A distributed system for electric power quality measurement," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 51, no. 4, pp. 776-781, Aug. 2002. doi: 10.1109/TIM.2002.803300
- [110] D. Castaldo, A. Ferrero, S. Salicone and A. Testa, "A power-quality index based on multipoint measurements," *IEEE Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, Italy, 2003, pp. 5 pp. Vol.4-. doi: 10.1109/PTC.2003.1304806
- [111] C. Muscas, L. Peretto, S. Sulis and R. Tinarelli, "Investigation on Multipoint Measurement Techniques for PQ Monitoring," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 5, pp. 1684-1690, Oct. 2006. doi: 10.1109/TIM.2006.880954

- [112] C. Muscas, L. Peretto, S. Sulis and R. Tinarelli, "Effects of load unbalance on multipoint measurement techniques for assessing the responsibility for PQ degradation," *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power* (IEEE Cat. No.04EX951), Lake Placid, NY, USA, 2004, pp. 759-764. doi: 10.1109/ICHQP.2004.1409448
- [113] P. Salmerón, A. Pérez and S. Pérez. "Index for identifying periodic disturbances in electric distribution networks using distributed measurements". *13th Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering, XIII CHLIE*. Valencia 2013.
- [114] Alejandro Pérez Vallés and Patricio salmerón Revuelta. "A new distributed measurement index for the identification of harmonic distortion and/or unbalance sources based on the IEEE Std. 1459 framework". *Electric Power Systems Research*, Vol. 141, Pp. 487-499, December-2016. doi: 10.1016/j.epsr.2019.03.007
- [115] A. Ferrero and G. Superti-Furga, "A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, no. 3, pp. 568-577, June 1991. doi: 10.1109/19.87021
- [116] IEEE Standard "Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in *IEEE Std 1459-2010* (Revision of IEEE Std 1459-2000), vol., no., pp.1-50, 19 March 2010. doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5439063
- [117] Reyes S. Herrera, Patricio Salmerón. *Harmonic disturbance identification in electrical systems with capacitor banks*. *Electric Power Systems Research*, Volume 82, Issue 1, January 2012, Pages 18-26. doi: 10.1016/j.epsr.2011.08.013
- [118] N. Locci, C. Muscas and S. Sulis, "On the Measurement of Power Quality Indexes for Harmonic Distortion in the Presence of Capacitors," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Ottawa, Ont., 2005, pp. 1600-1605. doi: 10.1109/IMTC.2005.1604437
- [119] N. Munoz-Galeano, J.C. Alfonso-Gil, S. Orts-Grau, S. Seguí-Chilet, F.J. Gimeno-Sales, "Instantaneous approach to IEEE Std. 1459 power terms and quality indices", *Electric Power Systems Research*. 125 (2015) 228-234. doi:10.1016/j.epsr.2015.04.012
- [120] O. Boudebbouz, A. Boukadoum, S. Leulmi, "Effective apparent power definition based on sequence components for non-sinusoidal electric power quantities". *Electric Power Systems Research*. 117 (2014) 210-218. doi:10.1016/j.epsr.2014.08.017.

- [121] O. Boudebbouz, A. Boukadoum, A. Medoued, "Effective electric power quantities and the sequence reference frame: a comparison study2. *Electric Power Systems Research* 140(2016) 485–492. doi:10.1016/j.epsr.2016.05.027.
- [122] Tongxin Zheng, E. B. Makram and A. A. Girgis, "Evaluating power system unbalance in the presence of harmonic distortion," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 393-397, April 2003. doi: 10.1109/TPWRD.2002.807460
- [123] R. Langella, A. Testa and A. E. Emanuel, "Unbalance analysis for electrical power systems in the presence of harmonics and interharmonics," *2011 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, 2011, pp. 1-6. doi: 10.1109/AMPS.2011.6090567