

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRONICA**

---



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**

Contribución a la mejora de los sistemas de  
medida basados en el IEEE Std 1459-2000.

**TESIS DOCTORAL**

Doctorando:

José Carlos Alfonso Gil

Dirigida por:

Dr. D. Francisco J. Gimeno Sales

Dr. D. Salvador Orts Grau.

**Valencia, 2010**



# AGRADECIMIENTOS

*Desde estas líneas quiero expresar mi sincero agradecimiento a todos aquellos que de alguna forma han contribuido a la conclusión de este trabajo. En especial, a mis directores por su guía y consejo, a mis compañeros del grupo de trabajo por su colaboración, y a mis personas más queridas por su incondicional apoyo.*

*Gracias.*



# RESUMEN

La presente tesis doctoral abarca el área de los sistemas de medidas de la potencia eléctrica basados en la teoría de la potencia eléctrica definida por el IEEE Std.1459-2000, en sistemas trifásicos a cuatro hilos. Se analiza y se implementa un sistema de medidas digital basado en dicha teoría que permite medir cada uno de los términos propuestos en el IEEE Std.1459-2000 que representan los distintos fenómenos eléctricos eficientes y no eficientes que se pueden dar en este tipo de sistemas.

Se realiza un análisis sobre las teorías de la potencia eléctrica más actuales y se analiza en profundidad la teoría de la potencia eléctrica definida en el IEEE Std.1459-2000 para los distintos tipos de sistemas eléctricos. Se aporta en la tesis una nueva descomposición de la potencia de desequilibrio definida en el IEEE Std.1459-2000, dando lugar a unos nuevos términos que cuantifican de forma independiente el desequilibrio provocado por los usuarios (cargas no equilibradas) y el desequilibrio debido a las tensiones de la red eléctrica. Se incluyen además unos nuevos factores de mérito que permiten cuantificar de una forma más eficiente cada uno de estos desequilibrios los cuales pueden ser incluidos en los equipos de medidas basados en dicha teoría para medir o penalizar a los usuarios.

Para la implementación del sistema de medidas digital se propone en esta tesis la utilización de un sistema de sincronización capaz de sincronizarse con la componente fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red. El sistema de sincronización está compuesto por: un filtro pasabanda SOGI (Second Order Generalized Integrator), un sistema para la obtención de la secuencia positiva a través del método de la DSC (Delayed Signal Cancellation) y por un SPLP (PLL software).

Se presenta el análisis y diseño de cada uno de los subsistemas (sistema de sincronización y sistema de medidas) que integran el sistema de medidas completo. El sistema de sincronización se encarga de sincronizarse con la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red y el algoritmo de medidas, se encarga de realizar todos los cálculos necesarios para llevar a cabo la cuantificación de los términos de potencia, definidos en el IEEE Std.1459-2000, donde a partir de las tensiones y corrientes muestreadas en el punto de conexión, se llevan a cabo todas las operaciones necesarias para obtener los términos definidos en dicho estándar y los nuevos términos propuestos en esta tesis.

Para la visualización de los términos medidos por el sistema de medidas propuesto, se desarrolla un sistema monitor implementado en el lenguaje de programación Visual Basic.NET, que a través de un PC permite visualizar y almacenar todas las variables medidas.

Se presentan los resultados de simulación y experimentales del sistema de medidas diseñado para diferentes tipos de carga y condiciones de alimentación para contrastar el cumplimiento de

la IEEE Std1459 y las aportaciones de la presente tesis. Además se presenta una comparativa entre el sistema de medidas digital desarrollado en esta tesis y un sistema de medidas comercial para distintas condiciones de tensión de alimentación y corrientes de carga que se han llevado a cabo.

Finalmente se incluyen las conclusiones, aportaciones, líneas de trabajo futuro y las publicaciones derivadas de los resultados de investigación de la tesis doctoral.

# RESUM

Aquesta tesi doctoral tracta sobre els sistemes de mesura de la potència elèctrica basats en la teoria de la potència elèctrica definida per el IEEE Std. 1459-2000, en sistemes trifàsics a quatre fils. Es presenta l'anàlisi e implementació d'un sistema de mesures digital basat en aquesta teoria que permet mesurar els diferents termes proposats al IEEE Std. 1459-2000 que representen als diferents fenòmens elèctrics eficients i no eficients que poden ocórrer en aquest tipus de sistemes.

Es realitza un anàlisi de les mes actuals teories de la potència elèctrica, especialment de la teoria definida en el IEEE Std. 1459-2000, per als diferents tipus de sistemes elèctrics. Es proposa en aquesta tesi, una nova descomposició de la potència de desequilibri definida en el IEEE Std. 1459-2000, derivant-se d'aquesta descomposició nous termes que quantifiquen de forma independent el desequilibri causat pels usuaris (càrregues desequilibrades) i el desequilibri degut a les tensions presents a la xarxa. S'inclouen noves taxes de mèrit que permeten quantificar cadascun d'aquests termes, podent ser implementats als equips de mesura basats en aquesta teoria per tal de mesurar o penalitzar als usuaris.

Per al desenvolupament de sistemes de mesures digitals es proposa en aquesta tesi la utilització d'un sistema de sincronisme amb la component fonamental i de seqüència positiva de les tensions de la xarxa. El sistema de sincronisme es compon de un filtre passabanda SOGI (Second Order Generalized Integrator) , un sistema d'obtenció de la seqüència positiva DSC (Delayed Signal Cancellation) i un SPLL (PLL per software).

Es presenta l'anàlisi de cadascun del subsistemes (sistema de sincronisme i sistema de mesures) que integren el sistema de mesures complet. El sistema de sincronisme es l'encarregat de obtenir la sincronització amb la component fonamental i de seqüència positiva de les tensions de la xarxa i, el algorisme de mesures du a terme tots els càlculs necessaris per a quantificar els termes de potència definits al IEEE Std. 1459-2000, on a partir de les tensions i corrents mostrejades al punt de connexió, es duen a terme totes les operacions necessàries per a obtenir els termes definits a l'estàndard i els nous termes proposats en la tesi.

Per la visualització dels termes mesurats pel sistema de mesures proposat, s'ha desenvolupat un sistema monitor implementat en llenguatge de programació Visual Basic.NET, que permet, via PC, visualitzar i emmagatzemar totes les variables mesurades.

Es presenten els resultats de simulació i experimentals del sistema de mesures dissenyat per als diferents tipus de càrregues i condicions d'alimentació. Es presenta una comparativa entre el sistema de mesures desenvolupat i un sistema de mesures comercial per a les diferents condicions de tensions d'alimentació i corrents de càrrega que s'han utilitzat.

Finalment, s'inclouen les conclusions, aportacions, línies de treball futur i les publicacions derivades dels resultats d'investigació de la tesi doctoral.



## **ABSTRACT**

This Ph.D work focuses on systems of electric power measures based on the theory of electric power defined by the IEEE Std.1459-2000, in three-phase four-wire systems. In this Ph.D is developed a measurement system based on this theory, to measure each of the terms proposed in IEEE Std.1459-2000 that represent the different electrical phenomena efficient and inefficient that can occur in such systems.

In this Ph.D is performed a review of the theories of electric power is more recent and detailed analysis of the theory of electric power defined in IEEE Std.1459 for various types of electrical systems. Will the proposed of the power unbalance defined in the IEEE Std.1459-2000, leading to some new terms that quantify independently the unbalance caused by the users (unbalanced loads) and the unbalance due to voltages. Also included are some factors of merit to quantify each of these unbalances, which can be included in the measurement equipment based on this theory to measure or penalize users

To develop the system of measures, is proposed in this Ph.D the use of a synchronization system able to sync with the fundamental harmonic and direct sequence of voltages. The synchronization system comprises: a bandpass filter (SOGI), a system for obtaining direct sequence (DSC) and a SPLL (PLL software).

The analysis of each of the subsystems (synchronization system and measurement system) that comprising the system of measures is presented. The synchronization system is responsible to synchronize with the direct sequence fundamental harmonic of voltages, before any perturbation of voltages, making it a robust subsystem synchronization. The measurement system is responsible for performing all calculations necessary to carry out the measures of the terms defined in IEEE Std.1459-2000, where from the voltages and currents sampled at the point of connection, are conducted all operations for the terms defined in this standard and those proposed in this Ph.D.

For viewing the terms as measured by the proposed measurement system is developed in Visual Basic.NET a monitor system, which through a PC can display and store all the measured variables.

The results of simulation and experimental measurement system designed for different types of loads and supply conditions. Also, a comparison of the measurement system developed in this thesis and a system of trade measures for different conditions of supply voltage and load currents.

Finally, it includes the conclusions, contributions, future lines of work and publications derived from the results of Ph.D research.



## INDICE GENERAL

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL .....	1
Motivación.....	1
Objetivos.....	3
Sumario.....	5
1. INTRODUCCIÓN A LAS TEORÍAS DE LA POTENCIA ELÉCTRICA. GENERACIÓN, RECEPTORES Y EQUIPOS DE MEDIDA. ....	9
1.1. Definiciones de la Potencia Eléctrica. ....	13
1.1.1. Definiciones de potencia propuestas por Budeanu (1927). ....	15
1.1.2. Teoría de la potencia eléctrica de Fryze (1932). ....	16
1.1.3. Definiciones recogidas en el Standard 100 del IEEE. ....	18
1.1.4. Teoría de la potencia del IEEE Std. 1459-2000. ....	19
1.1.4.1. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2000 en sistemas monofásicos. ....	20
1.1.4.1.1. Sistemas monofásicos lineales.....	21
1.1.4.1.2. Sistemas monofásicos no lineales.....	23
1.1.4.2. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2000 en sistemas trifásicos .....	25
1.1.4.2.1. Sistema trifásico lineal y equilibrado.....	27
1.1.4.2.2. Sistema trifásico lineal y desequilibrado.....	29
1.1.4.2.3. Sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas. ....	31
1.1.4.2.4. Ejemplo de un sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.....	36
1.2. Causas y efectos básicos de los desequilibrios en los sistemas eléctricos. ....	40
1.3. Causas y efectos básicos de la distorsión en los sistemas eléctricos.....	42
1.4. Conclusiones .....	44

2.	ANÁLISIS Y APORTACIONES A LA TEORÍA DE LA POTENCIA ELÉCTRICA IEEE STD.1459-2000.	47
2.1.	Aportaciones a la teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2000.	49
2.1.1.	Descomposición de la potencia de desequilibrio.	50
2.1.2.	Definición de nuevos factores de mérito.	53
2.2.	Conclusiones.	53
3.	SISTEMAS DE MEDIDA DE LA POTENCIA ELÉCTRICA.	55
3.1.	Equipos de medidas y teorías de la potencia eléctrica.	55
3.2.	Equipos de medida basados en el IEEE Std.1459-2000.	57
3.2.1.	Metodología de medidas basada en la transformada Wavelet.	57
3.2.2.	Metodología de medidas basada en el algoritmo de Newton.	61
3.2.2.1.	Funcionamiento del Algoritmo de Newton.	61
3.2.2.2.	Definición de las componentes de potencia básicas propuestas por el IEEE Std.1459-2000 y descripción del algoritmo numérico de dos estados.	62
3.2.3.	Sistema de medida basado en el dominio del tiempo para la detección del armónico fundamental de tensiones y corrientes.	66
3.2.3.1.	Detección de las componentes fundamentales de secuencia positiva, negativa y cero en un sistema trifásico a cuatro hilos.	67
3.2.3.2.	Detección de las componentes fundamentales de secuencia positiva y negativa en un sistema trifásico a tres hilos con tensiones equilibradas.	70
3.2.3.3.	Detección de la componente fundamental en un sistema monofásico.	71
3.2.3.4.	Medida de las magnitudes en formato IEEE Std.1459-2000.	71
3.3.	Normativa sobre los equipos de medidas comerciales.	72
3.4.	Conclusiones.	77
4.	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDIDAS PROPUESTO.	79
4.1.	Funcionamiento del sistema digital de medidas.	80
4.2.	Análisis del sistema de sincronización con la red eléctrica.	88
4.2.1.	Diseño del filtro de red (SOGI).	89
4.2.1.1.	Discretización del filtro SOGI.	92

4.2.2.	Obtención de la secuencia positiva de la tensión de red (DSC).	94
4.2.3.	Diseño del SPLL.	98
4.2.3.1.	Modelo continuo linealizado del SPLL.	99
4.2.3.2.	Ajuste de las constantes del SPLL.	101
4.2.3.3.	Especificaciones del comportamiento en lazo cerrado.	101
4.2.3.4.	Ajuste de las constantes del modelo discreto linealizado del SPLL.	102
4.3.	Conclusiones.	105
5.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDAS.	107
5.1.	Técnicas de simulación.	108
5.2.	Simulación del sistema de sincronización con la Red Eléctrica.	109
5.2.1.	Simulación del filtro SOGI.	109
5.2.2.	Simulación de la DSC.	111
5.2.2.1.	Filtrado de la DSC y aportaciones al sistema de sincronización.	114
5.2.3.	Simulación del SPLL.	116
5.2.4.	Simulación del sistema de sincronización (SOGI+DSC+PLL).	133
5.3.	Simulación del sistema de medidas. Tipos de carga y sistema de alimentación para la medida.	143
5.3.1.	Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas.	146
5.3.2.	Carga trifásica lineal desequilibrada.	146
5.3.2.1.	Carga trifásica lineal desequilibrada resistiva.	147
5.3.2.2.	Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva.	150
5.3.3.	Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.	154
5.3.4.	Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas.	158
5.3.5.	Carga trifásica lineal desequilibrada.	158
5.3.5.1.	Carga trifásica lineal desequilibrada resistiva.	159
5.3.5.2.	Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva.	162
5.3.6.	Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.	166
5.3.7.	Otros casos significativos.	170

5.3.7.1.	Tensiones de alimentación no lineales.....	170
5.3.7.2.	Tensiones de alimentación lineales con desfase y asimetría.....	175
5.3.8.	Simulacion de la SDFT. ....	176
5.4.	Conclusiones. ....	178
6.	DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA HARDWARE. ....	181
6.1.	Descripcion de la plataforma hardware del sistema de medidas IEEE Std.1459...	181
6.2.	Especificaciones técnicas del sistema de medidas.....	185
6.3.	El entorno de programación del DSP “Code Composer Studio”.....	189
6.4.	Sistema monitor implementado para el sistema de medidas.....	190
6.5.	Conclusiones. ....	195
7.	ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES. ....	197
7.1.	Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas.....	199
7.1.1.	Carga trifásica lineal desequilibrada. ....	201
7.1.2.	Carga lineal desequilibrada con componente inductiva. ....	205
7.1.3.	Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.....	208
7.2.	Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. ....	211
7.2.1.	Carga trifásica lineal desequilibrada. ....	212
7.2.2.	Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva. ....	216
7.2.3.	Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.....	220
7.3.	Conclusiones. ....	224
8.	APORTACIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO. PUBLICACIÓN DE RESULTADOS. ....	227
8.1.	Aportaciones.....	227
	Líneas de trabajo futuro.....	228
8.2.	Resultados de la tesis doctoral.....	228
	ANEXO I. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE MEDIDAS POWER GUIA 440S DE LA MARCA COMERCIAL DRANETZ BMI. ....	231
	REFERENCIAS. ....	237

# MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL

## Motivación.

Las primeras teorías de la potencia eléctrica desarrolladas a principios del siglo XX, definían correctamente todos los fenómenos físicos (eficientes y no eficientes), presentes en la red eléctrica donde las tensiones y corrientes eran completamente senoidales y equilibradas.

Con la llegada de las cargas no lineales las cuales consumen corrientes no senoidales, aparecen en las redes eléctricas nuevos fenómenos no eficientes que las teorías clásicas no son capaces de cuantificar.

En el intento de identificar y cuantificar todos los fenómenos que actualmente se pueden dar en la red eléctrica se han propuesto diferentes teorías de la potencia eléctrica a lo largo de los años. En el año 2000, como resultado de los trabajos del “IEEE Working Group in non-sinusoidal situations”, se publicó la norma IEEE Std.1459 en su versión “trial use”, siendo ascendida a full use en el año 2002. En este estándar se incluyen las definiciones para las medidas de todas las magnitudes de potencia en los sistemas eléctricos en condiciones senoidales o no senoidales y equilibradas o desequilibradas.

Los equipos de medidas comerciales que se utilizan actualmente siguen considerando que las tensiones y corrientes son senoidales, o presentan valores de distorsión muy bajos (<2%), lo que indica que sus medidas se siguen basando en las teorías clásicas de la potencia eléctrica no contemplando todos los fenómenos físicos debidos a las cargas no lineales y desequilibradas.

Con la nueva definición de la potencia eléctrica del IEEE Std.1459 es posible identificar todas las magnitudes de potencia en cualquier tipo de sistema eléctrico. Por ello se hace necesario el diseño e implementación de nuevos medidores basados en dicha teoría, capaces de cuantificar cada uno de los términos eficientes y no eficientes presentes en la red.

La utilidad de estos nuevos equipos de medidas se hace evidente teniendo en cuenta que los medidores comerciales que se utilizan para medir y penalizar a los usuarios no eficientes, basan sus medidas en corrientes y tensiones senoidales, aumentando el error en la medida cuanto más se alejan de dichas condiciones. La necesidad del desarrollo de equipos de medida basados en la IEEE Std.1459 y la utilidad que de los mismos se espera en cuanto a la correcta medición de fenómenos y tarificación a usuarios, son las principales motivaciones de la tesis.

Las definiciones de potencia hechas en el IEEE Std.1459 recogen todas y cada una de las potencias eficientes y no eficientes que se pueden dar en cualquier sistema eléctrico. Si se tiene en cuenta que un usuario que demande potencias no eficientes será penalizado por ello, resulta necesario diferenciar en las potencias no eficientes cuales son atribuibles a los usuarios y cuales son atribuibles al sistema, ya que por estas últimas los usuarios no deberían ser penalizados.





## **Objetivos.**

El trabajo de tesis presentado se enmarca en el área de los sistemas de medidas digitales basados en el IEEE Std.1459 para la medida de la potencia eléctrica en sistemas trifásicos a cuatro hilos. La presente tesis aborda el desarrollo de un nuevo sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459 con capacidad para medir y cuantificar todas las potencias definidas en dicho estándar.

En esta tesis se plantean los siguientes objetivos:

- Analizar en profundidad las definiciones del IEEE Std.1459, sus términos y el significado físico de los mismos.
- Obtener una descomposición de la potencia de desequilibrio que identifique y cuantifique la parte debida al desequilibrio de tensiones y la debida al desequilibrio de corriente.
- Realizar un estudio de los sistemas de medidas basados en el IEEE Std.1459 y los algoritmos de medidas implementados por los mismos.
- Desarrollar un sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459, con capacidad de medir y cuantificar todos los términos definidos en dicho estándar, junto con aquellos que como resultado de los estudios de esta tesis se aportan como contribución a la mejora del IEEE Std.1459.
- Desarrollar un sistema de sincronización para el sistema de medidas, con capacidad de sincronizarse con la componente fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red, que garantice el correcto funcionamiento del sistema de medidas ante cualquier tipo de perturbación que se pueda dar en la red eléctrica.



## Sumario.

La tesis doctoral presenta la siguiente estructura:

El capítulo 1 presenta una breve descripción de la historia de la electricidad y sus fenómenos físicos. Se presentan las teorías de la potencia eléctrica de mayor difusión y se realiza una exposición completa de la teoría de la potencia eléctrica IEEE Std.1459 para sistemas monofásicos y trifásicos, centrándose en el análisis de los sistemas trifásicos a cuatro hilos, ya que son el objetivo de medida del sistema de medidas desarrollado en esta tesis.

En el capítulo 2 se realiza un análisis en profundidad de los distintos términos propuestos en el IEEE Std.1459 para los sistemas trifásicos a cuatro hilos donde se explica el significado físico de cada uno de ellos. De este análisis se deriva la necesidad de diferenciar dentro de la potencia de desequilibrio la parte de ésta atribuible al usuario de la parte impuesta por las tensiones de red en el punto de conexión (pcc). Se propone una descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$ , siguiendo la metodología aplicada en el IEEE Std.1459-2000, dando lugar a unos nuevos términos que cuantifican por separado el desequilibrio provocado por una carga desequilibrada y el desequilibrio provocado por las tensiones de red. Se proponen además unos nuevos factores de mérito teniendo en cuenta estos nuevos términos, para evaluar la ineficiencia en términos de desequilibrio de los usuarios conectados a la red y para ser usados en el diseño de equipos de compensación de ineficiencias.

En el capítulo 3 se realiza un análisis de los sistemas de medidas basados en el IEEE Std.1459 y la metodología de medida implementada en cada uno de ellos. Se analiza la normativa existente sobre los equipos de medidas comerciales centrándose en la teoría de la potencia eléctrica que deben de integrar para realizar las medidas. Se presenta una revisión de la bibliografía más reciente sobre el comportamiento de los sistemas de medidas bajo las condiciones no contempladas en la normativa y los problemas en las medidas que de ello se derivan.

En el capítulo 4 se analiza y describe el diseño del sistema de medidas completo (sistema de medidas + sistema de sincronización). Se realiza primero el análisis y diseño del sistema de medidas, donde se expone la metodología de ejecución del proceso de medidas. Se propone la utilización del método de la ventana deslizante para la obtención de la componente fundamental de las tensiones de red y corrientes de carga dentro del proceso de obtención de las medidas definidas en el IEEE Std.1459. En segundo lugar se analiza y describe el sistema de sincronización, donde se realiza el análisis y diseño de cada uno de los subsistemas que lo integran. Se propone la utilización de un filtro SOGI para asegurar la sincronización con la componente fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red ante cualquier perturbación que se produzca en las mismas.

El capítulo 5 presentan los resultados teóricos y de simulación del sistema de medidas completo utilizando el software de Mathcad, y Matlab simulink. Se realiza primero la simulación del sistema de sincronización, donde se simula por separado cada uno de los bloques que lo componen (SOGI+DSC+SPLL). A continuación se realiza la simulación del sistema de sincronización completo analizándose su comportamiento para los distintos casos que se proponen y que son representativos del funcionamiento de la red eléctrica, comparándolos con los valores teóricos obtenidos a través del programa de cálculo matemático Mathcad para los mismos valores de tensiones de alimentación y corrientes de carga. Se simula el sistema de sincronización con y sin el filtro red (SOGI), donde se observa la necesidad de dicho filtro para el correcto funcionamiento del sistema de sincronización ante cualquier perturbación en las tensiones de red eléctrica. En segundo lugar se simula el sistema de medidas completo (sistema de medidas + sistema de sincronización) para las distintas cargas y tensiones de alimentación propuestos. Además de los datos proporcionados por el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459, se calculan también en todos los casos, los valores de potencias definidos por el IEEE Std.100 (dicho estándar es el integrado en el equipo comercial Power-Guia 440s utilizado en el análisis experimental llevado a cabo en el capítulo 7) y se comparan con los proporcionados por el sistema de medidas desarrollado. Por último se presentan las simulaciones de ciertos casos significativos que no pueden ser implementados de forma experimental debido a las limitaciones del prototipo, estas simulaciones permiten analizar el funcionamiento del sistema de medidas ante las distintas perturbaciones que se puedan producir en la red eléctrica (distorsión armónica elevada en las tensiones de red y cambios de fase en dichas tensiones).

El capítulo 6 presenta una descripción de la plataforma hardware del prototipo del sistema de medidas implementado. Se describe cada uno de los elementos que integran dicha plataforma entre los que se encuentran todas las placas electrónicas diseñadas para el sensado de tensiones y corrientes junto con el hardware para acondicionamiento de las señales que llegan al procesamiento digital de señales (DSP). Se definen las características generales del DSP encargado de ejecutar todas las funciones del sistema de medidas completo. Se describen los equipos de medidas comerciales utilizados en esta tesis para monitorizar las señales de tensiones y corrientes para cada uno de los casos analizados. Por último se describe el sistema monitor, diseñado e implementado para la visualización y almacenamiento de los valores de todas las variables medidas por el sistema de medidas correspondientes al IEEE Std.1459-2000.

En el capítulo 7 se presentan los resultados experimentales obtenidos a través del sistema de medidas propuesto en la presente tesis. Se presentan los resultados experimentales correspondientes a los mismos casos de tensiones y de cargas simulados en el capítulo 5. Para cada uno de los casos se analizan los resultados obtenidos con el equipo de medidas propuesto y se comparan con los resultados medidos con un equipo de medidas comercial (Dranetz Power

Guia 440s). Para cada caso analizado se miden también con el sistema de medidas desarrollado, los nuevos términos propuestos en el capítulo 2 correspondientes a la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$ .

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones de la tesis, las aportaciones y las líneas de trabajo futuro. Así mismo, se presentan las publicaciones derivadas de la tesis, en revistas internacionales de reconocido prestigio.

En el Anexo I se muestran las características técnicas del equipo de medidas Power Guia 440S de la marca comercial DRANETZ-BMI utilizado para contrastar las medidas realizadas con el equipo de medidas propuesto.

Finalmente se recogen las referencias utilizadas en la tesis.



## 1. Introducción a las teorías de la potencia eléctrica. Generación, receptores y equipos de medida.

La primera observación científica de los efectos eléctricos se le atribuye a Tales de Mileto en el 600 antes de Cristo. Tales observó que las briznas de pasto seco se adherían a un trozo de ámbar cuando éste había sido frotado.

Miles de años después, exactamente en 1600, fue el médico y físico inglés William Gilbert quien estudió estos efectos, y tomando la palabra griega elektrón (ámbar), llamó a esas sustancias eléctricas con dicho nombre. Tratándose de un efecto al parecer estable, a menos que se lo perturbara terminó denominándose electricidad estática, o carente de movimiento.

Gilbert había escrito un libro sobre el tema del magnetismo, que se llamó "De Magnete". También Tales había estudiado el fenómeno, pero pasaría un tiempo antes de que los físicos se dieran cuenta que se trataba de un mismo fenómeno. Tanto la electricidad como el magnetismo pasarían a formar el electromagnetismo. Mientras tanto, se intentaba descubrir los secretos de este extraño fenómeno, y desentrañar el mecanismo oculto tras la electricidad.

En 1733 el francés Charles-François de Cisternay Du Fay, descubrió que dos bolas de corcho cargadas de la misma manera se repelían. Pero si cargaba cada una por medios diferentes, lograba que a veces se atrajeran; por ejemplo si cargaba una frotándola con una vara de resina y a la otra con una de vidrio. Este fenómeno de atracción y repulsión parecía indicar dos naturalezas distintas. François de Cisternay Du Fay creía que la electricidad era un fluido, y determinó que este existía en dos tipos: Resinoso o vítreo.

En el año 1747 Benjamin Franklin propuso que no había dos tipos de fluidos, sino uno, el cual podía presentarse en exceso o en defecto. En esto se acercaba más Du Fay a la realidad que Franklin. Pero rebautizó al fluido como "electricidad negativa" si faltaba para el equilibrio, y "electricidad positiva" al exceso. Estos nombres perduran hasta hoy, pero con una comprensión distinta del fenómeno que la de un fluido.

En 1780 Luigi Galvani, un anatomista italiano, observó por primera vez que una descarga eléctrica sobre las patas de una rana muerta producía contracciones de los músculos afectados. Galvani probó a exponer estos músculos a los efectos de una tormenta usando el descubrimiento de Franklin. Para conseguirlo, colgó patas de rana con ganchos en la reja de la casa. Pero las contracciones proseguían aún cuando la tormenta había pasado. Una inspección posterior lo llevó a ver que la estimulación se producía cuando el músculo tocaba simultáneamente dos metales distintos.

Galvani creyó que la electricidad así producida se generaba en el músculo, observación que resultó errónea, pero no sería él quien descubriera el error. Veinte años más tarde, en 1800, Alessandro G. Volta supuso lo contrario, es decir que era el contacto entre metales distintos lo que generaba la electricidad. Esta idea fue el comienzo de una gran revolución en el tema. Dicha hipótesis pudo comprobarse inmediatamente y le permitió dos grandes avances: construir el primer dispositivo químico generador de electricidad, que denominó batería eléctrica, hoy llamada pila y obtener por primera vez en la historia una corriente continua y suficientemente estable.

En 1820, se había dado un gran salto en la comprensión acerca de la relación entre la electricidad y el magnetismo. En ese año el físico danés Hans Christian Oersted demostró que una corriente generaba un campo magnético. Siguiendo este descubrimiento, André-Marie Ampère demostró que un solenoide aumentaba considerablemente el campo magnético generado, en proporción positiva con la cantidad de vueltas que se le diera al cable. Así, desde la pila de Volta, que permitió trabajar con una corriente, los descubrimientos se desencadenaron velozmente:

1821: (El año siguiente al descubrimiento de Oersted). Michael Faraday, otro hombre importante para la ciencia, aportó la idea fundamental de la física moderna, por primera vez para describir una fuerza electromagnética se hablaba de campo.

1823: William Sturgeon, aprovechando el efecto de los solenoides, inventó el electroimán. El primero de ellos pudo levantar un peso de 4 Kg.

1827: Georg Simon Ohm definió la resistencia eléctrica y propuso la ley que lleva su nombre: Ley de Ohm.

1831: Faraday desarrolla el transformador y el generador eléctrico. Joseph Henry crea el motor eléctrico y desarrolla un electroimán que levanta una tonelada de hierro.

1883: Nikola Tesla desarrolla un motor que podía funcionar con corriente alterna y ya no con continua. Tomas Alva Edison se oponía al uso de esa corriente, pero sus esfuerzos fueron vanos.

Como se puede observar la correcta comprensión de la electricidad ha contribuido al bienestar y al desarrollo tecnológico que se ha producido a lo largo de los años, por otro lado el desarrollo tecnológico ha provocado que de forma constante se necesite tener un mejor conocimiento sobre la electricidad para entender la relación entre las causas y los efectos que se producen entre generador y receptor [1].

Centrándose en la corriente alterna, desde principios del siglo XX se han desarrollado distintas teorías para definir el concepto de potencia, y su división en diferentes componentes, para



explicar la no coincidencia de la potencia activa, que se traduce directamente en vatios, con otros tipos de potencia que circulan por las redes eléctricas y que se pueden agrupar bajo el término de potencia no activa.

En un principio, aunque se desarrollaron teorías sobre la potencia en las redes eléctricas muy interesantes, bajo el punto de vista práctico, como las magnitudes que intervenían eran tensiones y corrientes senoidales y cargas perfectamente lineales, ya era suficiente la clasificación de la potencia en potencia aparente, potencia activa y potencia reactiva. Dichas potencias están definidas por el producto de los valores eficaces de la tensión e intensidad, afectados por el coseno o el seno del ángulo de desfase entre ambas, para la potencia activa y reactiva respectivamente.

Desde el último cuarto del siglo XX al sistema eléctrico se le han ido conectando cargas que no tienen un comportamiento lineal, formadas principalmente por cargas activas constituidas por convertidores electrónicos estáticos, que han incrementado extraordinariamente la existencia de corrientes no senoidales con alto contenido de armónicos.

En la actualidad, es un hecho bien conocido que las redes eléctricas tienen que soportar la presencia de cargas no lineales, con elevado contenido de armónicos, cuya energía de distorsión asociada no se traduce finalmente en energía útil, pero sí provoca la aparición de problemas en la red y en las cargas conectadas a ella.

Ya no es suficiente hablar de energía activa y energía reactiva en el sentido convencional, cuyo significado estaba determinado exclusivamente por el desfase entre las tensiones y corrientes, y tampoco es apropiado relacionar el factor de potencia con el coseno del ángulo de desfase entre tensión y la corriente, puesto que esto solamente es válido cuando las formas de onda de las tensiones y corrientes son senoidales. Es necesario considerar, además de la energía reactiva en el sentido convencional, la parte de energía que no se traduce en vatios útiles, que no queda incluida en la reactiva convencional y que es debida a la presencia de formas de onda no senoidales, es decir a los armónicos de tensiones y corrientes. Es más adecuado hablar de potencia activa, que por su carácter conservativo su concepto no admite discusiones, ya que es la que se traduce exclusivamente en vatios, y de potencia no activa, que correspondería a todas las demás posibles componentes de potencia, incluyendo la potencia reactiva convencional.

La Figura 1.1, representa las potencias que aparecen entre la red de distribución y los equipos no eficientes.

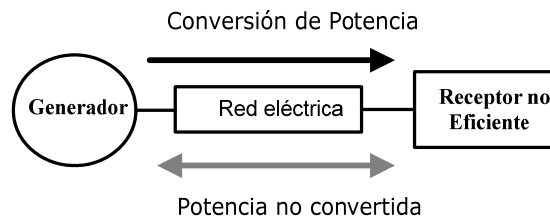


Figura 1.1 Flujos de potencia eficientes y no eficientes.

Cuando las tensiones y corrientes dejan de ser senoidales y equilibradas, las antiguas teorías de la potencia eléctrica producen resultados erróneos por no estar concebidas para tener en cuenta los nuevos fenómenos [2]-[3]-[4].

A lo largo de los años se han ido desarrollando nuevos equipos eléctricos cuyo comportamiento corresponde a una carga no lineal. El comportamiento de estas cargas no lineales provoca que las tensiones y corrientes que demandan dejen de ser senoidales, provocando que las teorías clásicas de la potencia eléctrica dejen de ser adecuadas en estos casos. Como consecuencia de esto en los últimos años se han ido proponiendo distintas teorías de la potencia eléctrica que han intentado dar respuesta a estos nuevos fenómenos con más o menos acierto y con más o menos seguidores.

Con la intención de unificar criterios y crear un estándar en el año 2000 se publicó el IEEE Std.1459 en donde se incluyen las definiciones para las medidas de las magnitudes de potencia de los sistemas eléctricos en condiciones senoidales o no senoidales y equilibradas o desequilibradas, consiguiendo de esta forma identificar cada uno de los fenómenos presentes en cualquier tipo de sistema eléctrico.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea como objetivo fundamental de la presente tesis el desarrollo de un sistema de medidas basado en la teoría de la potencia eléctrica IEEE Std. 1459 con capacidad de identificar y cuantificar todos los fenómenos presentes en un sistema eléctrico trifásico y a cuatro hilos.

La estructura de este capítulo es la siguiente: en primer lugar se presentan las teorías de la potencia eléctrica más relevantes hasta la actualidad y se expone en profundidad la teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std.1459 utilizada para implementar el sistema de medidas propuesto en esta tesis y en segundo lugar, se exponen las causas y efectos de los fenómenos de desequilibrio y distorsión.

### 1.1. Definiciones de la Potencia Eléctrica.

Desde hace más de un siglo, numerosos científicos se han preocupado de intentar explicar los fenómenos existentes en los sistemas eléctricos [5]-[6]. Sus trabajos han dado lugar a la aparición, a lo largo del tiempo, de las diferentes teorías de la potencia eléctrica existentes.

Una teoría de la potencia eléctrica debe entenderse como un conocimiento desde el nivel más básico de las propiedades de los sistemas eléctricos [7]-[8]-[9], y a su vez debe establecer las herramientas matemáticas (ecuaciones y modelos) que proporcionen una interpretación física del conjunto de fenómenos propios de los sistemas eléctricos, permitiendo su cuantificación el desarrollo de equipos de medida y el desarrollo de equipos de compensación.

Las definiciones tradicionales de la potencia eléctrica se basan en teorías que fueron establecidas durante la primera mitad del siglo XX. Durante los años 1920 a 1930 se postularon los dos enfoques tradicionales de las teorías de la potencia eléctrica. Fryze estableció las definiciones de la potencia eléctrica en el dominio temporal [10]. Por otra parte, Budeanu las estableció en el dominio de la frecuencia utilizando las series de Fourier [11]. En 1950 Buchholz extendió los trabajos de Fryze a sistemas polifásicos [12]. La teoría de Fryze está respaldada por el comité electrotécnico internacional [13], mientras que la de Budeanu encuentra su apoyo fundamental en el Std. 100 del IEEE [14].

Durante años estas teorías fueron aceptadas y utilizadas puesto que identificaban fielmente los fenómenos que se producían en los sistemas eléctricos. Sin embargo, a partir de las últimas décadas del siglo pasado se han venido produciendo importantes cambios en los sistemas eléctricos, cambios que pusieron ya entonces de manifiesto que las antiguas formulaciones no ofrecen resultados correctos cuando las tensiones y corrientes no son senoidales y equilibradas [15]-[16]. Las modernas teorías de la potencia eléctrica aparecen a partir de la década de los 70, siendo en un principio ampliaciones o modificaciones de las teorías clásicas de Fryze y Budeanu. En esta línea, cabe destacar los trabajos de Sheperd y Zakikhani [17] en 1972, Kusters y Moore [18] en 1980 y Nowomiejski [19] en 1981. Basados en estos trabajos es también destacable la aparición de equipos de compensación como C. H. Page [20] y el desarrollo de equipos de medidas como P. Filipski [21].

En 1980 Deppenbrock introdujo las bases para el cálculo instantáneo de las corrientes activas con su método llamado FBD en homenaje a Fryze y a Buchholz, aunque no fue publicado en inglés hasta 1993 [22], lo cual explica que no haya tenido tanta repercusión como otras teorías de la potencia instantánea. En 1983 H. Akagi propone la teoría de la potencia instantánea (o teoría p-q) [23] y en 1984, junto con A. Nabae proponen un modelo para obtener, a partir de la potencia instantánea, las potencias activa y reactiva en sistemas trifásicos y las tensiones y corrientes que las producen, permitiendo el control de dispositivos de compensación [24]-[25]-

[26]. La gran aceptación y su amplia utilización en el control de dispositivos de compensación y mejora de la calidad de suministro eléctrico, la han consolidado como una de las teorías de la potencia eléctrica de compensación más extendidas. Basándose en la teoría p-q de Akagi han surgido numerosas teorías que proponen diferentes modificaciones sobre la misma. Willems presentó la expansión de la teoría p-q a sistemas polifásicos en 1992 [27]. En 1994 Nabae presentó una modificación de la teoría p-q para que fuese aplicable a sistemas de cuatro hilos [28]. En 1996 Peng y Lai presentaron una generalización de la potencia reactiva instantánea [29], mientras que Nabae y Tanaka reformularon la teoría p-q en coordenadas polares. En 1999 fueron Kim y el propio Akagi quienes presentaron la teoría p-q-r que expresa las variables de la teoría p-q utilizando una transformación de coordenadas a un sistema de referencia giratorio [30].

Las teorías de la potencia instantánea surgen a partir de desarrollos matemáticos complejos, con mayor o menor grado de abstracción, en los que no se puede establecer una relación directa entre las magnitudes calculadas y los fenómenos físicos reales presentes en el sistema eléctrico.

En el año 2000, como resultado de los trabajos del “IEEE Working Group in non-sinusoidal situations” [31], se publicó la norma IEEE Std. 1459 [32] en su versión “trial use”, siendo ascendida a “full use” en 2002. En este estándar se incluyen definiciones para las medidas de las magnitudes de potencia de los sistemas eléctricos en condiciones senoidales o no senoidales y equilibradas o desequilibradas. A partir de la potencia aparente efectiva, que es la misma que la introducida por Buchholz en 1950, se presenta una elegante descomposición de los términos de potencia atendiendo a los fenómenos físicos que las producen. Se desarrolla la base matemática que permite el cálculo de las componentes de la potencia aparente debidas al fenómeno de transferencia de energía útil, al fenómeno de desfase, al de desequilibrio y al de distorsión. El IEEE Std. 1459 fue desarrollado pensando en equipos de medida, esto se debe a que necesita al menos un ciclo completo de la señal de red en régimen estacionario para alcanzar resultados correctos, alejándose de la idea de compensación instantánea de las teorías surgidas a raíz de Akagi. Sin embargo, presenta una descomposición de potencias en base a los fenómenos que tienen lugar en los sistemas eléctricos y todas las magnitudes obtenidas tienen un claro significado físico, es decir cada magnitud está asociada a un fenómeno real.

En los siguientes puntos se va a introducir brevemente los conceptos básicos de las teorías clásicas. Seguidamente se presentarán en detalle las descomposiciones de la potencia propuestas por el IEEE Std.1459, por su conveniencia para la implementación del sistema de medidas objeto de esta tesis.

### 1.1.1. Definiciones de potencia propuestas por Budeanu (1927).

Como se citó anteriormente, el origen de las teorías de la potencia eléctrica se remonta a las primeras décadas del siglo XX cuando diferentes investigadores comenzaron a interesarse por los fenómenos que ocurren en los sistemas eléctricos. Budeanu estableció las definiciones de la potencia eléctrica en el dominio de la frecuencia [11]. Basándose en las series de Fourier estableció que en un circuito monofásico de corriente alterna, la tensión y corriente de régimen estacionario se pueden expresar mediante series de Fourier. Por tanto, el valor eficaz de dichas variables se puede calcular mediante las ecuaciones (1.1) y (1.2).

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{T} \int_0^T v_n^2 dt \right)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (1.1)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{T} \int_0^T i_n^2 dt \right)} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (1.2)$$

donde  $V_n$  e  $I_n$  representan respectivamente los valores eficaces del armónico enésimo de tensión y corriente.

A partir del análisis matemático de la interacción entre tensión y corriente en el dominio de la frecuencia, Budeanu definió las siguientes potencias:

- Potencia aparente ( $U$ ) en un sistema monofásico (1.3). Esta potencia viene determinada a partir de los valores eficaces de la corriente y la tensión definidos en (1.1) y (1.2).

$$U = VI \quad (1.3)$$

- Potencia activa ( $P$ ) en un sistema eléctrico monofásico (1.4).

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\varphi_n - \theta_n) \quad (1.4)$$

Donde:  $\varphi_n$  es el ángulo del armónico “n” de la tensión, y  $\theta_n$  es el ángulo del armónico “n” de la corriente.

- Potencia reactiva ( $Q$ ) en un sistema monofásico (1.5).

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\varphi_n - \theta_n) \quad (1.5)$$

- Potencia de distorsión ( $D$ ) de un sistema monofásico. La potencia de distorsión en un circuito monofásico se define como una magnitud escalar de amplitud igual a la raíz cuadrada de la diferencia entre el cuadrado de la potencia aparente y la suma de los

cuadrados de las potencias activa y reactiva. La potencia de distorsión viene dada por la ecuación (1.6).

$$D = \sqrt{U^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.6)$$

La potencia de distorsión en un circuito monofásico es cero si la tensión y la corriente son sinusoidales y tienen la misma frecuencia o cuando el circuito está constituido por cargas lineales.

### 1.1.2. Teoría de la potencia eléctrica de Fryze (1932).

La formulación propuesta por Fryze también a principios del siglo pasado [10], se desarrolla en el dominio temporal, con lo que su aplicación práctica era más simple que la de Budeanu. A continuación se describen los conceptos básicos de su teoría.

En el dominio temporal, el valor eficaz de tensión y corriente se calcula mediante (1.7) y (1.8) respectivamente.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (1.7)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1.8)$$

A partir de los valores eficaces de tensión y corriente, y de la determinación del valor medio de la potencia instantánea, Fryze propone la siguiente descomposición de potencias en un sistema monofásico:

- La potencia aparente ( $S$ ) resulta del producto de los valores eficaces de la tensión y la corriente definidos en (1.7) y (1.8) respectivamente (1.9).

$$S = VI \quad (1.9)$$

- La potencia activa ( $P$ ) se obtiene a partir de (1.10) mediante el cálculo del valor medio en un ciclo de la potencia instantánea.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T vi dt \quad (1.10)$$

- Se define la potencia no activa ( $Q$ ) como la diferencia entre la potencia aparente y la potencia activa (1.11).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.11)$$

Además de esta descomposición, Fryze definió los factores de potencia activa y no activa que relacionan las anteriores potencias. El factor de potencia activa ( $\lambda_a$ ) expresa la relación entre las potencias activa y aparente (1.12).

$$\lambda_a = \frac{P}{S} \quad (1.12)$$

El factor de potencia no activa ( $\lambda_n$ ) expresa la relación con la potencia aparente de la potencia no activa (1.13).

$$\lambda_n = \frac{Q}{S} = \sqrt{1 - \lambda_a} \quad (1.13)$$

A partir de estos dos factores de potencia se definen en (1.14) la tensión activa y no activa  $V_a$ ,  $V_n$  como las componentes de la tensión eficaz.

$$V_a = \lambda_a V = \frac{P}{I} \quad ; \quad V_n = \lambda_n V = \frac{Q}{I} \quad (1.14)$$

De forma análoga al caso de las tensiones, se definen la corriente activa y no activa  $I_a$ ,  $I_n$  como las componentes de la corriente eficaz (1.15).

$$I_a = \lambda_a I = \frac{P}{V} \quad ; \quad I_n = \lambda_n I = \frac{Q}{V} \quad (1.15)$$

Las componentes de la tensión y la corriente eficaz verifican la relación de ortogonalidad (1.16).

$$I^2 = I_a^2 + I_n^2 \quad ; \quad V^2 = V_a^2 + V_n^2 \quad (1.16)$$

Fryze sentó las bases para la división de la corriente instantánea ( $i$ ) en dos componentes instantáneas ortogonales, activa ( $i_a$ ) y no activa ( $i_n$ ), como se expresa en (1.17).

$$i_a = \frac{P}{V^2} v \quad ; \quad i_n = i - i_a \quad (1.17)$$

Si las dos componentes de la corriente instantánea son ortogonales se cumple (1.18).

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_a i_n dt = 0 \quad (1.18)$$

Fryze verificó que el factor de potencia activo,  $\lambda_a$ , alcanza su valor máximo ( $\lambda_a = 1$ ) si y solo si, la corriente instantánea es proporcional a la tensión instantánea. En cualquier otro caso  $\lambda_a < 1$  [33].

### 1.1.3. Definiciones recogidas en el Standard 100 del IEEE.

Basadas en la teoría de Budeanu, el diccionario de términos IEEE Std. 100 [14] establece las definiciones de potencia para sistemas polifásicos que se exponen a continuación.

Se define la potencia activa en circuitos polifásicos como la suma algebraica de las potencias activas para los diversos terminales de entrada, cuando las tensiones se determinan todas respecto al mismo punto de referencia elegido arbitrariamente. Para un sistema polifásico de  $m$  fases, se considerarán  $m$  sistemas monofásicos formados por cada conductor y el punto de referencia elegido, calculándose la potencia activa tal como se obtiene en los sistemas monofásicos (1.3). La potencia activa de un sistema trifásico se calcula mediante (1.19).

$$P = \sum_{z=A,B,C} \sum_{n=1}^{\infty} V_{zn} I_{zn} \cos(\varphi_{zn} - \theta_{zn}) \quad (1.19)$$

Siendo los subíndices  $A$ ,  $B$  y  $C$  cada una de las fases del sistema trifásico.

Si las tensiones y las corrientes en la ecuación anterior constituyen un sistema simétrico y equilibrado de la misma secuencia de fases y libre de componentes armónicas, la potencia activa se puede escribir como en (1.20).

$$P = 3 V_A I_A \cos(\varphi_A - \theta_A) \quad (1.20)$$

Se define la potencia reactiva para un circuito polifásico como la suma algebraica de la potencia reactiva para los terminales de entrada individuales cuando las tensiones se determinan todas respecto al mismo punto de referencia común elegido arbitrariamente. Al igual que para la potencia activa, la potencia reactiva se determina considerando cada fase y el punto de referencia común como un circuito monofásico y encontrando la potencia reactiva de cada uno de ellos. La potencia reactiva  $Q$  para un sistema trifásico se establece en (1.21).

$$Q = \sum_{z=A,B,C} \sum_{n=1}^{\infty} V_{zn} I_{zn} \sin(\varphi_{zn} - \theta_{zn}) \quad (1.21)$$

Cuando el sistema de tensiones y corrientes constituyen un sistema simétrico de la misma secuencia de fases y compuesto únicamente por componentes fundamentales, el valor de la potencia reactiva es el expresado en (1.22).

$$Q = 3 V_A I_A \sin(\varphi_A - \theta_A) \quad (1.22)$$

La potencia de distorsión en un circuito polifásico se define como la suma de la potencia de distorsión de los circuitos monofásicos que lo forman, donde uno de los conductores es la fase



y el otro conductor es el punto de referencia común. La potencia de distorsión del sistema trifásico se define en (1.23).

$$D = \sum_{z=A,B,C} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \{V_{zm}^2 I_{zn}^2 - V_{zm} V_{zn} I_{zm} I_{zn} \cos[(\varphi_{zm} - \theta_{zm}) - (\varphi_{zn} - \theta_{zn})]\}} \quad (1.23)$$

La potencia aparente en sistemas polifásicos se define como una cantidad escalar igual a la magnitud del vector potencia. La expresión matemática de la potencia aparente según se indica en [34], se expresa en (1.24).

$$U = \sqrt{\sum_{z=A,B,C} P_z^2 + \sum_{z=A,B,C} Q_z^2 + \sum_{z=A,B,C} D_z^2} \quad (1.24)$$

Finalmente debe incluirse aquí la potencia aparente aritmética ( $U_a$ ), que aunque no se encuentra explícitamente definida en el diccionario, si que se hace referencia a la misma en diferentes lugares. El módulo del vector  $U_a$  es la suma aritmética de las potencias aparentes de las fases individuales [34]. Su expresión se muestra en (1.25).

$$U_a = \sum_{z=A,B,C} \sqrt{P_z^2 + Q_z^2 + D_z^2} \quad (1.25)$$

Por lo general  $U_a$  es mayor que la potencia aparente  $U$ . Ambas magnitudes son iguales sólo cuando el sistema polifásico es equilibrado, con fuentes de tensión del mismo valor y de la misma forma de onda. El diccionario recomienda que se utilice la potencia aparente aritmética sólo en aquellas ocasiones en que la potencia aparente no pueda ser obtenida con los aparatos de medida existentes comercialmente.

En estas definiciones, la potencia  $P$  tiene un claro significado físico ante cualquier valor de tensión y corriente, sin embargo ante magnitudes no senoidales, las potencias  $Q$  y  $D$  pueden ofrecer resultados erróneos debido a su origen empírico y lejano de una interpretación física real. Su utilidad a la hora de cuantificar el flujo de potencia no activa ha sido cuestionada por muchos investigadores [15]-[16].

#### 1.1.4. Teoría de la potencia del IEEE Std. 1459-2000.

La IEEE Std 1459-2000 es la norma en la que se encuentran las definiciones para la medida de potencias eléctricas bajo condiciones lineales, no lineales, equilibradas y no equilibradas con lo que constituye la teoría más genérica de todas, es decir, cuantifica todos los fenómenos que se puedan dar en un sistema eléctrico de cualquier tipo [32]. Las definiciones de potencia activa, reactiva y aparente que se utilizan actualmente se basan en las teorías y conocimientos desarrollados desde 1940. Inicialmente estas teorías fueron desarrolladas para sistemas de formas de onda sinusoidales; en los últimos 50 años se han producido cambios importantes en

los sistemas eléctricos, a continuación se enunciarán estos cambios en la topología de los sistemas, en la forma de detectar y medir la potencia eléctrica:

- Los equipos electrónicos de potencia tales como variadores de frecuencia, rectificadores controlados, hornos de arco y de inducción, y salas con ordenadores son las cargas no lineales que han proliferado en sistemas industriales y comerciales; estas cargas han generado problemas para las empresas suministradoras de energía eléctrica y para el usuario final causando distorsión en las formas de onda de voltaje y corriente.
- La tradicional instrumentación diseñada para la medida de formas de onda sinusoidales (50/60 Hz) tiende a producir errores cuando es utilizada para medir ondas de voltaje y corriente distorsionadas.
- Actualmente microprocesadores y sistemas de procesamiento de señales se están utilizando para medir variables eléctricas con mayor precisión basándose en modelos matemáticos complejos.
- Con el objetivo de mantener en valores apropiados la calidad de la energía, medir correctamente la distorsión causada por cargas no lineales se ha convertido en una importante necesidad.

Las definiciones de la norma IEEE Std 1459 fueron concebidas con el fin de ser una guía en la medida de variables eléctricas, tomar decisiones económicas, y determinar las fuentes de distorsión armónica. Cabe destacar que por el momento no se ha desarrollado ninguna teoría que pueda ser usada simultáneamente en los siguientes aspectos: facturación de energía, evaluación de la calidad de la energía eléctrica, detección de las mayores fuentes de distorsión armónica, y en el diseño de filtros activos o compensadores dinámicos. La IEEE Std 1459 en su análisis considera dos tipos de sistemas eléctricos, en la sección 1.1.4.1 se analizará la norma para sistemas monofásicos, y en la sección 1.1.4.2 se analizará la norma para sistemas trifásicos.

#### 1.1.4.1. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2000 en sistemas monofásicos.

Los sistemas monofásicos son aquellos que están formados por una fase y el conductor de neutro, ver Figura 1.2. En la actualidad los sistemas de potencia monofásicos son utilizados en el área de distribución de energía eléctrica a nivel doméstico y en las pequeñas empresas. La Figura 1.2 corresponde a un sistema de potencia monofásico, que está formado por una fuente de tensión genérica y una carga monofásica genérica las cuales pueden ser lineales o no lineales según el caso a analizar; con el objetivo de simplificar los resultados se supone que la línea es ideal (sin pérdidas, ni caídas de tensión).

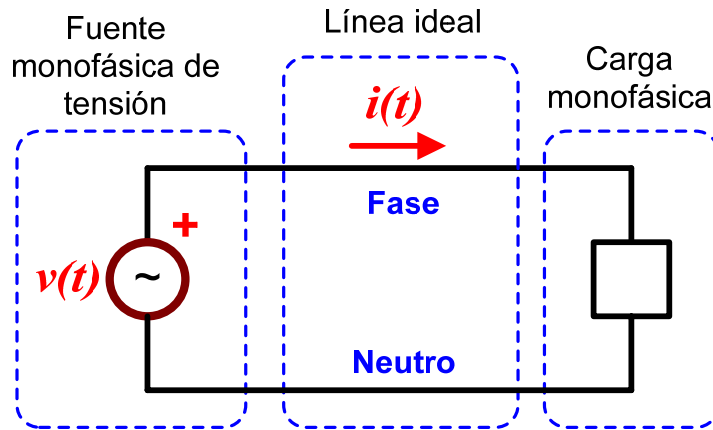


Figura 1.2 Sistema de potencia monofásico.

La IEEE Std 1459-2000 contempla dos casos particulares para los sistemas monofásicos, en la sección 1.1.4.1.1 se resumirán las ecuaciones para el caso monofásico y lineal, y en la sección 1.1.4.1.2 se resumirán las ecuaciones para el caso monofásico no lineal.

#### 1.1.4.1.1. *Sistemas monofásicos lineales*

Un sistema monofásico lineal es aquel cuyo voltaje y corriente están formados exclusivamente por componentes fundamentales de corrientes y tensiones, así en este caso la fuente de voltaje de la Figura 1.2 suministra un voltaje instantáneo fundamental  $v_1(t)$ , el cual viene dado por:

$$v_1(t) = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega_1 t) \quad (1.26)$$

Donde:  $V_1$  es el voltaje eficaz,  $\omega_1$  es la pulsación angular ( $\omega_1=2\pi f_1$ ),  $t$  es el tiempo, y  $f_1$  es la frecuencia de la red. En este caso se toma a  $v_1(t)$  como referencia para la medida de los ángulos ( $\alpha_1=0$ ).

La corriente instantánea  $i_1(t)$  demandada por la carga lineal de la Figura 1.2 es:

$$i_1(t) = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega_1 t - \beta_1) \quad (1.27)$$

Donde:  $I_1$  es la corriente eficaz, y  $\beta_1$  es el ángulo de  $i_1(t)$  con respecto al ángulo de  $v_1(t)$ , en este caso se cumple que  $\theta_1 = \beta_1 - \alpha_1 = \beta_1$ .

Las expresiones de potencia definidas en el IEEE Std 1459 para sistemas monofásicos lineales son obtenidas a partir de la teoría de la potencia instantánea, así la potencia instantánea fundamental  $p_1(t)$  es:

$$p_1(t) = v_1(t)i_1(t) = 2V_1 I_1 \text{sen}(\omega_1 t)\text{sen}(\omega_1 t - \theta_1) \quad (1.28)$$

Los términos sinusoidales de (1.28) pueden ser descompuestos con ayuda de identidades trigonométricas de la siguiente forma:

$$p_1(t) = 2V_1 I_1 \text{sen}(\omega_1 t) [\text{sen}(\omega_1 t)\cos(\theta_1) - \cos(\omega_1 t)\text{sen}(\theta_1)] \quad (1.29)$$

Reagrupando términos se obtiene:

$$p_1(t) = 2V_1 I_1 \text{sen}^2(\omega_1 t)\cos(\theta_1) - 2V_1 I_1 \text{sen}(\omega_1 t)\cos(\omega_1 t)\text{sen}(\theta_1) \quad (1.30)$$

Sustituyendo en (1.30)  $\text{sen}^2(\omega_1 t) = (1 - \cos(2\omega_1 t))/2$  y  $\text{sen}(\omega_1 t)\cos(\omega_1 t) = \text{sen}(2\omega_1 t)/2$  se tiene:

$$p_1(t) = V_1 I_1 \cos(\theta_1) [1 - \cos(2\omega_1 t)] - V_1 I_1 \text{sen}(\theta_1)\text{sen}(2\omega_1 t) \quad (1.31)$$

El primer término de (1.31) es la potencia activa instantánea fundamental  $p_{a1}(t)$ :

$$p_{a1}(t) = V_1 I_1 \cos(\theta_1) [1 - \cos(2\omega_1 t)] \quad (1.32)$$

El término  $p_{a1}(t)$  puede ser cuantificado con ayuda de la potencia activa fundamental ( $P_1$ ), donde  $P_1$  es el valor medio de  $p_1(t)$ :

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_1(t) dt = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (1.33)$$

Donde  $\tau$  es el tiempo inicial donde empiezan las medidas,  $k$  es un entero, y  $T$  es un periodo completo de tiempo. El segundo término de (1.33) es la potencia reactiva instantánea fundamental  $p_{q1}(t)$ :

$$p_{q1}(t) = -V_1 I_1 \text{sen}(\theta_1)\text{sen}(2\omega_1 t) \quad (1.34)$$

El término  $P_{q1}(t)$  puede ser cuantificado con la ayuda de la potencia reactiva fundamental ( $Q_1$ ), donde  $Q_1$  es la amplitud de  $P_{q1}(t)$ :

$$Q_1 = V_1 I_1 \text{sen}(\theta_1) \quad (1.35)$$

La potencia aparente fundamental  $S_1$  viene dada por:

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (1.36)$$

$S_1$  es la potencia que comúnmente es utilizada para dimensionar los sistemas eléctricos, ya que es la potencia que deben suministrar las fuentes para suplir las necesidades de la carga; en este caso,  $S_1$  debe suministrar  $P_1$  que es la potencia eficiente y  $Q_1$  que es la potencia ineficiente.

1.1.4.1.2. *Sistemas monofásicos no lineales.*

Los sistemas monofásicos no lineales son aquellos cuyos voltajes o corrientes no son sinusoidales con lo que presentarán una componente fundamental más un número determinado de componentes armónicas en tensiones o corrientes. Generalmente son producidos por cargas no lineales y (o) fuentes distorsionadas de tensión. En este caso el voltaje instantáneo  $v(t)$  de la Figura 1.2 está formado por  $v_1(t)$  y por el voltaje instantáneo armónico  $v_H(t)$  (El subíndice  $H$  de ahora en adelante es utilizado para indicar que está formado por componentes armónicas).

$$v(t) = v_1(t) + v_H(t) = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega_1 t) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t - \alpha_h) \quad (1.37)$$

Donde  $h$  denota el orden del armónico ( $h=2,3,4,\dots,\infty$ ),  $V_h$  es el voltaje eficaz de cada componente armónica de voltaje,  $\alpha_h$  es el ángulo de cada componente armónica de tensión con respecto a  $v_1(t)$ . De forma similar, la corriente instantánea  $i(t)$  está formada por  $i_1(t)$  y por la corriente instantánea armónica  $i_H(t)$ :

$$i(t) = i_1(t) + i_H(t) = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega_1 t - \beta_1) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t - \beta_h) \quad (1.38)$$

Donde  $I_h$  es el valor eficaz de cada componente armónica de corriente, y  $\beta_h$  es el ángulo de cada armónico de corriente con respecto a  $v_1(t)$ .

El voltaje eficaz ( $V$ ) viene dado por:

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v(t)^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (1.39)$$

La corriente eficaz  $I$  viene dada por:

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i(t)^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (1.40)$$

El voltaje eficaz armónico  $V_H$  viene dado por:

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (1.41)$$

La corriente eficaz armónica  $I_H$  viene dada por:

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (1.42)$$

La potencia instantánea  $p(t)$  es:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1.43)$$

Al igual que en el caso monofásico lineal,  $p(t)$  está dividida en  $p_a(t)$  y  $p_q(t)$  tal y como se muestra a continuación:

$$p_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega_1 t)] \quad (1.44)$$

$$p_q(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \operatorname{sen} \theta_h \operatorname{sen}(2h\omega_1 t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}}^{\infty} 2V_m I_n \operatorname{sen}(m\omega_1 t + \alpha_m) \operatorname{sen}(n\omega_1 t + \beta_n) \quad (1.45)$$

Donde  $m$  es el orden de los armónicos de tensión,  $n$  es el orden de los armónicos de corriente y con  $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ . La potencia activa  $P$  es el valor medio de  $p(t)$ :

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = P_1 + P_H \quad (1.46)$$

$P_H$  es la potencia activa armónica y está definida por:

$$P_H = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h) = P - P_1 \quad (1.47)$$

La potencia reactiva  $Q$  está definida en (1.48):

$$Q = Q_1 + Q_H \quad (1.48)$$

$Q_H$  es la potencia reactiva armónica y está definida en (1.49):

$$Q_H = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \operatorname{sen}(\theta_h) \quad (1.49)$$

La potencia aparente  $S$  está definida como sigue:

$$S = VI \quad (1.50)$$

Reemplazando (1.39) y (1.40) en (1.50) y elevando toda la expresión al cuadrado para facilitar el desarrollo matemático se tiene:

$$S^2 = (V_1^2 + V_H^2) \cdot (I_1^2 + I_H^2) \quad (1.51)$$

$S$  puede expandirse en los siguientes términos.

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (1.52)$$

El primer término de (1.52) es  $S_1$ , el resto de términos forman la potencia aparente no fundamental  $S_N$ :

$$S_N^2 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (1.53)$$

A su vez  $S_N$  esta dividida en la potencia producida por la distorsión de corriente  $D_I$ , la potencia producida por la distorsión de tensión  $D_V$ , y la potencia armónica aparente  $S_H$ :

$$D_I^2 = (V_I I_H)^2 \quad (1.54)$$

$$D_V^2 = (V_H I_I)^2 \quad (1.55)$$

$$S_H^2 = (V_H I_H)^2 \quad (1.56)$$

La potencia de distorsión armónica  $D_H$  es el término de la potencia armónica aparente que no contiene potencia activa armónica y está definida como sigue:

$$D_H^2 = S_H^2 - P_H^2 \quad (1.57)$$

#### 1.1.4.2. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2000 en sistemas trifásicos

Los sistemas eléctricos de mayor utilización son los sistemas trifásicos, en el IEEE Std 1459 [32] se diferencian dos tipos de configuraciones: el sistema trifásico a tres hilos (sin neutro) y el sistema trifásico a 4 hilos (con neutro). La Figura 1.3 corresponde a un sistema eléctrico trifásico a 4 hilos, que está formado por una fuente de tensión trifásica genérica, y una carga trifásica genérica, los cuales pueden ser lineales, no lineales, equilibrado o desequilibrado según el caso a analizar; con el objeto de simplificar los resultados se supone que la línea es ideal (no presenta caídas de tensión), y las tensiones se referencian al punto de conexión común (pcc).

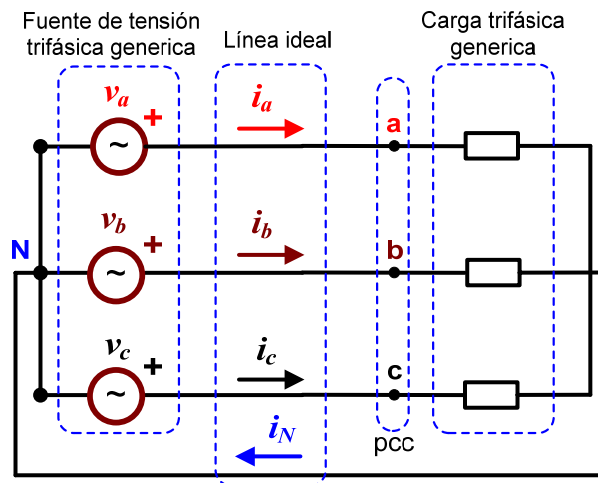


Figura 1.3 Sistema trifásico a 4 hilos

Para obtener el voltaje efectivo  $V_e$  de un sistema trifásico a 4 hilos, el IEEE Std 1459 basa el cálculo en un sistema ficticio de tensiones simétricas que provoca la misma disipación de potencia en la carga que un sistema de tensiones no simétricas; así para un sistema de conexión estrella (Y) la disipación de potencia equivalente de un sistema de tensiones no simétrico a un sistema simétrico es ( $P_Y$ ):

$$P_Y = \frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} = \frac{3V_e^2}{R_Y} \quad (1.58)$$

Donde  $V_a$ ,  $V_b$ , y  $V_c$  son los valores eficaces del voltaje para las fases  $a$ ,  $b$ , y  $c$  respectivamente;  $R_Y$  es la resistencia equivalente para un sistema de conexión estrella.

De la misma manera la disipación de potencia en la carga ( $P_\Delta$ ) para un sistema de conexión triángulo ( $\Delta$ ) es:

$$P_\Delta = \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{R_\Delta} = \frac{3(\sqrt{3}V_e)^2}{R_\Delta} \quad (1.59)$$

Donde  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , y  $V_{ca}$  son los valores eficaces de los voltajes línea-línea, y  $R_\Delta$  es la resistencia equivalente para un sistema de conexión triángulo.

Eligiendo  $R_\Delta = 3R_Y$  se cumple que  $P_\Delta = P_Y$  pudiendo escribirse la ecuación (1.60).

$$\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3R_Y} = \frac{3V_e^2}{R_Y} + \frac{3(\sqrt{3}V_e)^2}{3R_Y} \quad (1.60)$$

Despejando de (1.60), en (1.61) se obtiene la expresión general de  $V_e$  para sistemas trifásicos a 4 hilos:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)]} \quad (1.61)$$

De manera similar, para obtener la corriente efectiva ( $I_e$ ) de un sistema trifásico de cuatro hilos, el IEEE Std 1459 basa el cálculo en las pérdidas de potencia en la red del sistema de distribución ( $\Delta P$ ):

$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) + r_n I_n^2 \quad (1.62)$$

Donde  $r$  es la resistencia de los conductores de fase;  $r_n$  es la resistencia del conductor de neutro;  $I_a$ ,  $I_b$ , y  $I_c$  son los valores eficaces de la corriente para las fases  $a$ ,  $b$ , y  $c$  respectivamente; e  $I_n$  es el valor eficaz de la corriente que circula por el neutro. Para simplificar los cálculos la IEEE Std. 1459 asume  $r_n = r$ :



$$\Delta P = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2) \quad (1.63)$$

Para cualquier conjunto de corrientes desequilibradas, existe un sistema equilibrado equivalente que provoca las mismas pérdidas de potencia. En este sistema equilibrado se cumple que  $I_a=I_b=I_c=I_e$  e  $I_n=0$ . En estas circunstancias las pérdidas se obtienen en (1.64).

$$\Delta P = 3rI_e^2 \quad (1.64)$$

Igualando (1.63) y (1.64) se obtiene la expresión general de  $I_e$ :

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (1.65)$$

La potencia efectiva aparente ( $S_e$ ) se define en la siguiente ecuación:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (1.66)$$

$S_e$  representa todos los fenómenos físicos que pueden aparecer en el sistema de potencia.  $S_e$  refleja las pérdidas en el conductor de neutro en un sistema trifásico de cuatro hilos así como el fenómeno del desequilibrio.  $S_e$  es la máxima potencia que puede ser transmitida por un sistema de distribución trifásico a una carga trifásica perfectamente equilibrada, alimentada por un sistema de tensiones con una tensión efectiva igual a  $V_e$ , manteniendo las mismas pérdidas en las líneas.

Después de obtener las expresiones de  $V_e$ ,  $I_e$ , y  $S_e$  validas bajo cualquier condición de operación, en los siguientes apartados se resumen las ecuaciones del IEEE Std 1459 bajo ciertas condiciones particulares. Por lo tanto, se resumirán las ecuaciones para sistemas trifásicos lineales equilibrados; sistemas trifásicos lineales desequilibrados; sistemas trifásicos no lineales equilibrados; y sistemas trifásicos no lineales desequilibrados.

#### 1.1.4.2.1. Sistema trifásico lineal y equilibrado

En esta situación, en el sistema de potencia de la Figura 1.4 la fuente de tensión es simétrica y lineal ( $V_{a1}=V_{b1}=V_{c1}=V_1^+$ ), el superíndice “+” indica que el valor eficaz de las tensiones de fase, solo contienen valores de secuencia positiva [37]. Las tensiones de fase  $v_{z1}(t)$  en el pcc pueden verse en la siguiente ecuación:

$$v_{z1}(t) = v_{z1}^+(t) = \sqrt{2}V_1^+ \sin(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (1.67)$$

Donde el subíndice “z” indica cada una de las fases en el sistema eléctrico ( $z=a, b, c$ ),  $\omega_1$  es la frecuencia angular fundamental, y  $\varphi_z$  es la fase inicial de las tensiones línea-neutro ( $\varphi_a=0$ ,  $\varphi_b=2\pi/3$ ,  $\varphi_c=4\pi/3$ ).  $v_{a1}$  se toma como referencia de ángulos ( $0^\circ$ ), así que todos los ángulos de las tensiones y corrientes son medidos con respecto a dicha tensión.

Las corrientes son equilibradas y lineales ( $I_{a1}= I_{b1}= I_{c1}= I_1^+$ ), y la corriente que circula por el neutro es nula ( $I_N=0$ ). Las corrientes instantáneas de fase  $i_{z1}(t)$  se definen en (1.68):

$$i_{z1}(t) = i_{z1}^+(t) = \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_1^+) \quad (1.68)$$

Donde  $\beta_1^+$  es el ángulo de desfase de las corrientes con respecto a las tensiones; si  $\beta_1^+$  es positivo la corriente está adelantada con respecto a la tensión y está provocada por cargas capacitivas, si  $\beta_1^+$  es negativa la corriente se encuentra retrasada con respecto a la tensión y está provocada por cargas inductivas.

La potencia instantánea trifásica fundamental  $p(t)$ , es la contribución de la potencia instantánea de cada fase y viene dada por:

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (1.69)$$

La única expresión de potencia instantánea para esta situación que aparece en el IEEE Std 1459, es la expresión (1.69) y sólo es usada para calcular la potencia activa ( $P$ ).  $P$  en este caso coincide con la potencia activa de secuencia positiva  $P_1^+$  y se obtiene calculando el valor medio de  $p(t)$  como se muestra en (1.70):

$$P = P_1^+ = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (1.70)$$

Donde  $\theta_1^+$  es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente ( $\theta_1^+ = \beta_1^+ - \alpha_1^+$ ).  $P_1^+$  es la única potencia activa que se considera eficiente, ya que en su totalidad es transferida desde la fuente hacia la carga [36]. La potencia reactiva que en este caso es la potencia reactiva de secuencia positiva ( $Q_1^+$ ) es:

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \text{sen} \theta_1^+ \quad (1.71)$$

$S_e$  en este caso coincide con la potencia aparente de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) y puede calcularse a partir de (1.66) como sigue:

$$(S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 = (3V_1^+ I_1^+)^2 \quad (1.72)$$

El factor de potencia para este caso es la relación entre  $P_1^+$  y  $S_1^+$ :

$$P_F^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (1.73)$$

$P_F^+$  se usa como indicador de la eficiencia de este tipo de sistemas, ya que indica la parte de la potencia entregada que es aprovechada realmente.

1.1.4.2.2. Sistema trifásico lineal y desequilibrado.

En este caso las magnitudes de voltaje en el pcc de la Figura 1.4 no son iguales ( $V_{a1} \neq V_{b1} \neq V_{c1}$ ). Para este caso  $v_{z1}(t)$  en el pcc se muestra en la siguiente ecuación:

$$v_{z1}(t) = \sqrt{2}V_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) \quad (1.74)$$

Las corrientes son lineales y desequilibradas ( $I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$ ), y la corriente que circula por el neutro no es nula ( $I_N \neq 0$ ),  $i_{z1}$  está definida por:

$$i_{z1}(t) = \sqrt{2}I_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}) \quad (1.75)$$

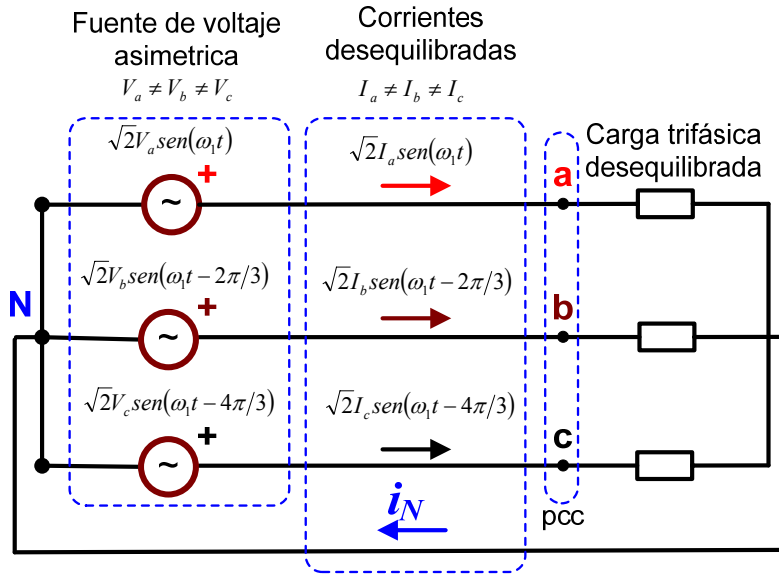


Figura 1.4 Sistema trifásico a 4 hilos lineal y desequilibrado

Usando teorema de Stokvis-Fortescue [37], las componentes simétricas para las tensiones son:

- El voltaje fundamental de secuencia positiva ( $V_1^+$ ).
- El voltaje fundamental de secuencia negativa ( $V_1^-$ ).
- El voltaje fundamental de secuencia cero ( $V_1^0$ ).

Así las componentes simétricas de un sistema desequilibrado pueden calcularse a partir de la siguiente matriz de transformación ( $\alpha=e^{i(2\pi/3)}$ ):

$$T = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (1.76)$$

$V_e$  en este caso coincide con el voltaje efectivo fundamental ( $V_{e1}$ ) y puede calcularse en términos de las componentes simétricas como sigue:

$$V_{e1} = \sqrt{(V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2}} \quad (1.77)$$

Debido a que las magnitudes de corrientes tampoco son iguales, estas pueden expresarse en términos de las componentes simétricas utilizando la misma matriz de transformación utilizada anteriormente para las tensiones: La corriente fundamental de secuencia positiva ( $I_1^+$ ), la corriente fundamental de secuencia negativa ( $I_1^-$ ), y la corriente fundamental de secuencia cero ( $I_1^0$ ),  $I_e$  coincide con la corriente efectiva fundamental ( $I_{e1}$ ) y puede calcularse en términos de las componentes simétricas como se definen en (1.78):

$$I_{e1} = \sqrt{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2} \quad (1.78)$$

$S_e$  coincide con la potencia aparente fundamental ( $S_{e1}$ ).  $S_{e1}$  está formada por  $S_1^+$  y por la potencia aparente de desequilibrio ( $S_{U1}$ ),  $S_{U1}$  contiene todas las formas de potencia producida por componentes de voltaje asimétricas o corrientes desequilibradas [38]:

$$(S_{e1})^2 = (S_1^+)^2 + (S_{U1})^2 \quad (1.79)$$

La potencia aparente fundamental de secuencia negativa ( $S_1^-$ ), y la potencia aparente fundamental de secuencia cero ( $S_1^0$ ) son parte de  $S_{U1}$ , sus expresiones son mostradas en (1.80) y (1.81) respectivamente:

$$(S_1^-)^2 = (P_1^-)^2 + (Q_1^-)^2 \quad (1.80)$$

$$(S_1^0)^2 = (P_1^0)^2 + (Q_1^0)^2 \quad (1.81)$$

La potencia activa fundamental de secuencia negativa ( $P_1^-$ ), y la potencia fundamental de secuencia cero ( $P_1^0$ ) son mostradas en (1.82) y (1.83) respectivamente:

$$P_1^- = 3V_1^- I_1^- \cos\theta_1^- \quad (1.82)$$

$$P_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \cos\theta_1^0 \quad (1.83)$$

A pesar de que  $P_1^-$  y  $P_1^0$  son producidas por componentes de voltaje y corriente de la misma secuencia de giro, estas son consideradas ineficientes ya que producen pérdidas en las líneas y transformadores [39]-[40]-[41].

La potencia reactiva fundamental de secuencia negativa ( $Q_1^-$ ) y la potencia reactiva de secuencia cero ( $Q_1^0$ ) son mostradas en (1.84) y (1.85) respectivamente:

$$Q_1^- = 3V_1^- I_1^- \sin\theta_1^- \quad (1.84)$$

$$Q_1^0 = 3V_1^0 I_1^0 \sin\theta_1^0 \quad (1.85)$$

#### 1.1.4.2.3. Sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.

Este caso corresponde al caso más genérico que se presenta en el sistema trifásico de potencia, ya que incluye sistemas no lineales o con armónicos, y con desequilibrios de corriente y voltajes asimétricos, así que cualquier sistema trifásico puede explicarse a partir de las siguientes ecuaciones.

Los voltajes instantáneos fase-neutro  $v_z(t)$  en el pcc de la Figura 1.5 están definidos por (1.86):

$$v_z(t) = \sqrt{2}V_{z1} \text{sen}(\omega_1 t - \varphi_z) + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_{zh} \text{sen}(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \alpha_{zh}) \quad (1.86)$$

Donde:  $h$  es el orden de los armónicos;  $V_{zh}$  es el voltaje eficaz por fase de cada armónico y  $\alpha_{zh}$  es el desfase entre cada armónico de tensión y  $v_{a1}(t)$ . En este caso las magnitudes de tensión fundamental son diferentes ( $V_{a1} \neq V_{b1} \neq V_{c1}$ ), también las magnitudes de tensión de cada armónico son diferentes ( $V_{ah} \neq V_{bh} \neq V_{ch}$ ).

Las corrientes de línea instantánea por fase  $i_z(t)$  están definidas por (1.87):

$$i_{z1} = \sqrt{2}I_{z1} \sin(\omega_1 t - \varphi_z + \beta_{z1}) + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_{zh} \sin(h(\omega_1 t - \varphi_z) + \beta_{zh}) \quad (1.87)$$

Donde:  $I_{zh}$  es la corriente eficaz de fase de cada armónico y  $\beta_{zh}$  es el desfase entre cada armónico de corriente y  $v_{a1}(t)$ . En este caso las magnitudes de corriente fundamental son

diferentes ( $I_{a1} \neq I_{b1} \neq I_{c1}$ ), también las magnitudes de corriente de cada armónico son diferentes ( $I_{ah} \neq I_{bh} \neq I_{ch}$ ).

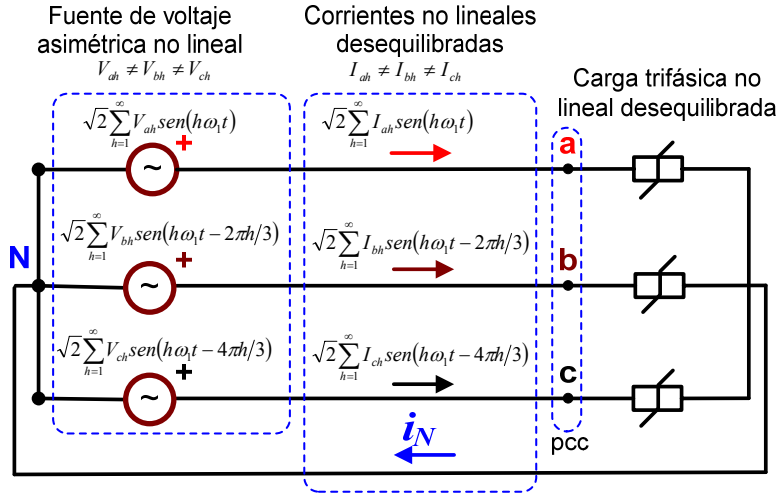


Figura 1.5 Sistema trifásico a 4 hilos no lineal y desequilibrado

El voltaje efectivo no fundamental ( $V_{eH}$ ) está formado por todas las componentes armónicas de tensión y puede calcularse a partir de (1.61) como se muestra en (1.88):

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + (V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2)]} \quad (1.88)$$

Donde  $V_{aH}$ ,  $V_{bH}$  y  $V_{cH}$  son los voltajes eficaces de cada armónico fase-neutro medidos en el pcc, ( $V_{abH}$ ,  $V_{bcH}$  y  $V_{caH}$ ) son las tensiones eficaces de línea de cada armónico en el pcc.  $V_e$  está formada por  $V_{e1}$  y por  $V_{eH}$  como se muestra a continuación:

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (1.89)$$

La corriente efectiva no fundamental ( $I_{eH}$ ) está formada por todas las componentes armónicas de corriente y puede calcularse a partir de (1.65) como se define en (1.90).

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)} \quad (1.90)$$

Donde  $I_{aH}$ ,  $I_{bH}$  y  $I_{cH}$  son las corrientes eficaces armónicas por fase e  $I_{nH}$  es la corriente eficaz armónica del neutro.  $I_e$  está formada por  $I_{e1}$  y por  $I_{eH}$  como se define en (1.91).

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (1.91)$$

Cabe destacar que debido a que las tensiones son asimétricas y las corrientes son desequilibradas,  $V_{e1}$ ,  $V_{eH}$ ,  $I_{e1}$ , e  $I_{eH}$ , pueden expresarse en términos de las componentes simétricas. Esta afirmación es útil para aclarar la naturaleza de la potencia en análisis posteriores.

En este caso,  $S_e$  puede obtenerse si (1.90) y (1.91) son reemplazadas en (1.66).

$$S_e^2 = 9(V_{e1}^2 + V_{eH}^2)(I_{e1}^2 + I_{eH}^2) \quad (1.92)$$

Expandiendo (1.92) se obtiene (1.93).

$$S_e^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 + (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2 \quad (1.93)$$

Donde el primer término corresponde a la potencia aparente efectiva fundamental ( $S_{e1}$ ) que se define en (1.94), mientras que los otros tres términos, donde intervienen corrientes o tensiones armónicas, constituyen la potencia aparente efectiva no fundamental ( $S_{eN}$ ) definida en (1.95). Por lo tanto la potencia aparente efectiva puede escribirse como en (1.96).

$$S_{e1}^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 \quad (1.94)$$

$$S_{eN}^2 = \sqrt{9V_{e1}^2I_{eH}^2 + 9V_{eH}^2I_{e1}^2 + 9V_{eH}^2I_{eH}^2} \quad (1.95)$$

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (1.96)$$

Utilizando la transformación de Fortescue [37] el IEEE Std. 1459 propone mediante (1.97) la descomposición de  $S_{e1}$  en su componente de secuencia positiva ( $S_1^+$ )(1.72) y en la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ), compuesta por las secuencias negativa y cero, y por los productos cruzados de tensiones y corrientes fundamentales de secuencias diferentes, que se atribuyen al fenómeno de desequilibrio del sistema.

$$S_{e1}^2 = (S_1^+)^2 + S_{U1}^2 \quad (1.97)$$

La potencia aparente fundamental de secuencia positiva se divide a su vez en sus componentes en fase y en cuadratura, dando lugar a la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y a la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva ( $Q_1^+$ ).

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (1.98)$$

$P_1^+$  representa el fenómeno de transferencia de energía útil, mientras que  $Q_1^+$  representa el flujo de energía bidireccional causado por el fenómeno de desfase.  $P_1^+$  y  $Q_1^+$  se calculan mediante (1.99) y (1.100) respectivamente, donde  $\theta_1^+$  es el ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de secuencia positiva de tensión y corriente.

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (1.99)$$

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (1.100)$$

La potencia aparente efectiva no fundamental ( $S_{eN}$ ) se compone de tres términos (1.52). El primer término se define como la potencia efectiva de distorsión de corriente ( $D_{el}$ ), el segundo es la potencia efectiva de distorsión de tensión ( $D_{eV}$ ), y el tercero es la potencia aparente efectiva armónica ( $S_{eH}$ ). Los tres términos se definen en (1.101)-(1.102) y (1.103).

$$D_{el} = 3V_{e1} I_{eH} \quad (1.101)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} \quad (1.102)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (1.103)$$

Se define la distorsión armónica total equivalente de corriente ( $THD_{el}$ ) como la relación entre  $I_{eH}$  e  $I_{e1}$ , definida en (1.104).

$$D_{el} = 3V_{e1} I_{eH} = S_{e1} \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = S_{e1} (THD_{el}) \quad (1.104)$$

Se define la distorsión armónica total equivalente de tensión ( $THD_{eV}$ ) como la relación entre  $V_{eH}$  y  $V_{e1}$ , definida en (1.105).

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} = S_{e1} \frac{V_{eH}}{V_{e1}} = S_{e1} (THD_{eV}) \quad (1.105)$$

En función de los  $THD$  anteriores,  $S_{eH}$  podría escribirse tal y como se expresa en (1.106).

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} = S_{e1} \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = S_{e1} (THD_{eV})(THD_{el}) \quad (1.106)$$

Igualmente  $S_{eN}$  se escribiría como se expresa en (1.107).

$$S_{eN} = S_{e1} \sqrt{(THD_{el})^2 + (THD_{eV})^2 + (THD_{el} \cdot THD_{eV})^2} \quad (1.107)$$

Cabe destacar que estos  $THD$  son diferentes a los habitualmente computados por los equipos de medida puesto que se definen a partir de las corrientes y tensiones efectivas que se han establecido previamente.



$S_{eH}$  (1.108) puede ser a su vez descompuesta en su parte activa, correspondiente a la potencia activa armónica ( $P_H$ ) y su parte no activa ( $D_{eH}$ ). Estos dos términos se calculan mediante (1.109) y (1.110) respectivamente.

$$S_{eH}^2 = P_H^2 + D_{eH}^2 \quad (1.108)$$

$$P_H = P - P_1 = \sum_{\substack{h \neq 1 \\ i=A,B,C}} V_{ih} I_{ih} \cos \theta_{ih} \quad (1.109)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2} \quad (1.110)$$

La Figura 1.6 muestra un esquema resumen de la descomposición de potencias propuesta por la IEEE Std. 1459 en este tipo de sistemas.

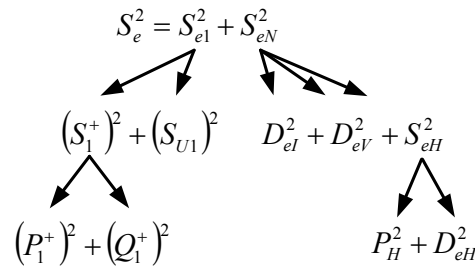


Figura 1.6 Esquema de potencias propuesta por la IEEE Std. 1459-2000.

Teniendo en cuenta todos los desarrollos realizados anteriormente se definen los siguientes factores de potencia:

- El factor de potencia efectivo relaciona la potencia activa con la potencia aparente efectiva (1.111).

$$P_{fe} = \frac{P}{S_e} \quad (1.111)$$

- El factor de potencia fundamental de secuencia positiva relaciona la potencia activa fundamental de secuencia positiva con la potencia aparente fundamental de secuencia positiva (1.112).

$$P_{f1}^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (1.112)$$

1.1.4.2.4. *Ejemplo de un sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas.*

A continuación se va a resolver un ejemplo de un sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas (caso general), aplicando la teoría de la potencia eléctrica definida por el IEEE Std. 1459.

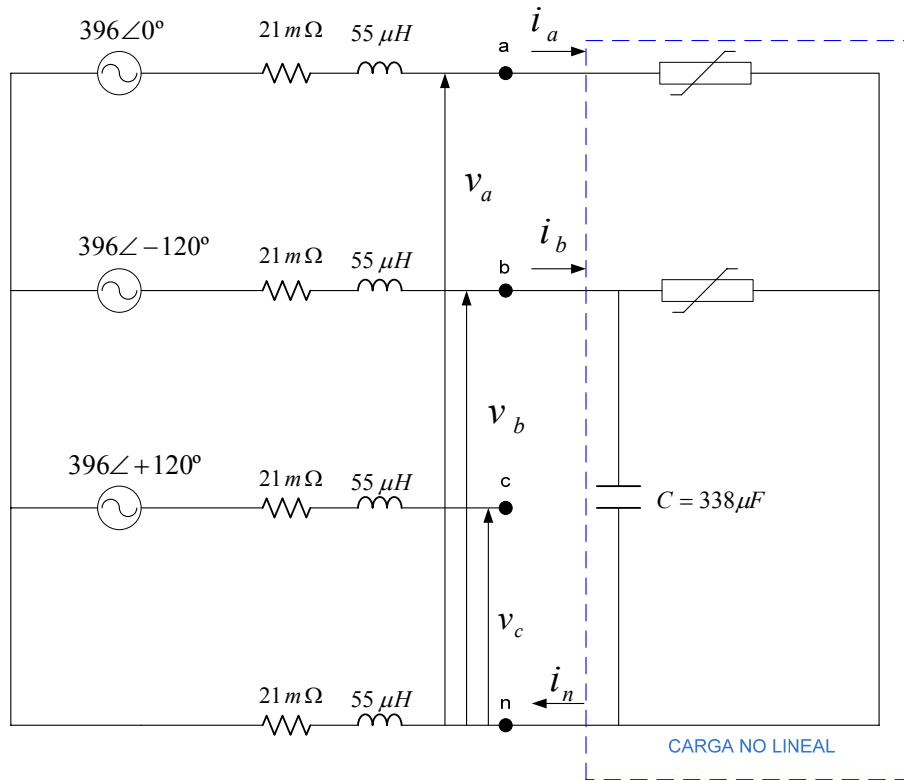


Figura 1.7 Sistema trifásico a 4 hilos no lineal y desequilibrado

Si se realiza una simulación con Matlab Simulink del circuito anterior se obtienen las siguientes corrientes y tensiones en el pcc.

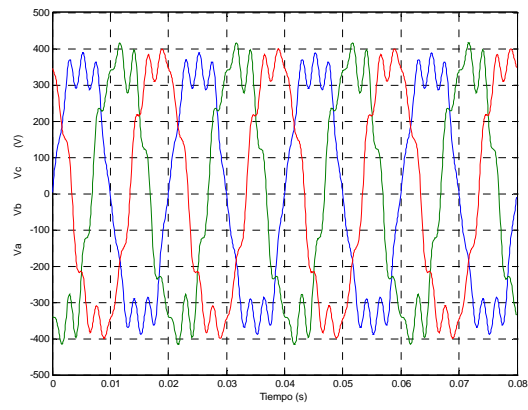


Figura 1.8 Tensiones en el pcc del circuito en análisis.

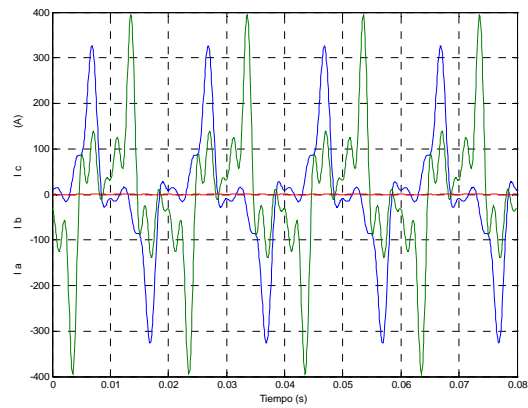


Figura 1.9 Corrientes de línea en el pcc.

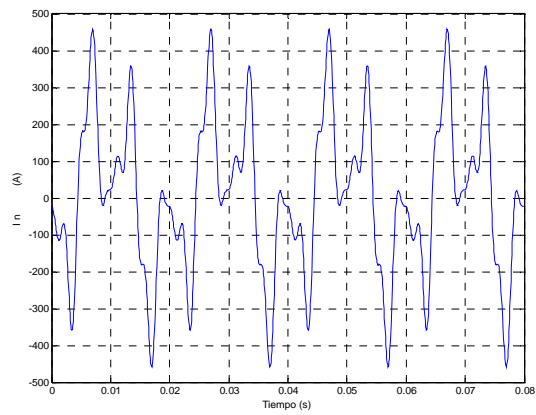


Figura 1.10 corriente del neutro

Las corrientes y tensiones que aparecen en la carga se muestran en la Tabla 1-1, para los distintos armónicos (h), en donde se ha tomado como base los siguientes valores de tensiones y corrientes:

$$V_{a1} = 271.03 \text{ V}$$

$$I_{a1} = 99.98 \text{ A}$$

Armónicos (h)	1	3	5	7	9
$V_{ah}(\%)$	100	10.28	4.92	7.44	8.64
$\alpha_{ah}(deg)$	-0.74	6.76	142.30	146.70	-47.70
$I_{ah}(\%)$	100	68.84	34.90	27.85	5.93
$\beta_{ah}(deg)$	-22	100	-175	-65	48
$V_{bh}(\%)$	104.49	10.53	5.79	8.58	11.05
$\alpha_{bh}(deg)$	-212.20	6.28	167.40	125.20	-49.19
$I_{bh}(\%)$	93.49	79.77	42.30	45.81	40.59
$\beta_{bh}(deg)$	-120.80	99.49	-65.09	-167.90	41.89
$V_{ch}(\%)$	103.73	8.69	4.30	6.58	8.22
$\alpha_{ch}(deg)$	121.30	9.70	157.70	136.50	-47.35
$I_{ch}(\%)$	0	0	0	0	0
$I_{nh}(\%)$	178.12	21.01	63.28	67.87	65.75
$V_{abh}(\%)$	177.56	0.26	2.48	3.19	2.43
$V_{bch}(\%)$	177.93	1.93	1.65	2.49	2.84
$V_{cah}(\%)$	178.28	1.67	1.36	1.51	0.41

Tabla 1-1 Valores de las distintas magnitudes del caso analizado.

De la tabla anterior se pueden extraer algunos valores significativos como:

$V_a = 274.53 \text{ V}$	$V_{a1} = 271.03 \text{ V}$	$V_{aH} = 43.70 \text{ V}$	$THD_{V_a} = 0.161$
$V_b = 287.57 \text{ V}$	$V_{b1} = 271.03 \text{ V}$	$V_{bH} = 43.70 \text{ V}$	$THD_{V_b} = 0.176$
$V_c = 283.81 \text{ V}$	$V_{c1} = 281.13 \text{ V}$	$V_{cH} = 38.85 \text{ V}$	$THD_{V_c} = 0.138$

Tabla 1-2 Valores más significativos de las tensiones de fase y factores de distorsión del caso analizado.

$V_{ab} = 481.43 V$	$V_{ab1} = 481.26 V$	$V_{abH} = 12.79 V$	$THD_{Vab} = 0.027$
$V_{bc} = 482.41 V$	$V_{bc1} = 482.25 V$	$V_{bcH} = 12.34 V$	$THD_{Vbc} = 0.026$
$V_{ca} = 483.22 V$	$V_{ca1} = 483.17 V$	$V_{caH} = 7.22 V$	$THD_{Vca} = 0.015$

Tabla 1-3 Valores más significativos de las tensiones de línea y factores de distorsión del caso analizado.

$I_a = 129.40A$	$I_{a1} = 99.98 A$	$I_{aH} = 82.25 A$	$THD_{Ia} = 0.823$
$I_b = 143.64 A$	$I_{b1} = 93.48 A$	$I_{bH} = 109.07 A$	$THD_{Ib} = 1.1067$
$I_c = 0 A$	$I_{c1} = 0 A$	$I_{cH} = 0 A$	
$I_n = 210.66 A$	$I_{n1} = 125.93 A$	$I_{nH} = 168.90 A$	$THD_{In} = 1.341$

Tabla 1-4 Valores más significativos de las corrientes de línea y factores de distorsión del caso analizado.

Los voltajes y corrientes efectivos tal y como se definen en el IEEE std 1459 son los siguientes:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)]} = 280.25V$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + (V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)]} = 278.45V$$

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 + V_{e1}^2} = 31.68 V$$

$$THD_{Ve} = 0.114$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} = 165.08A$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2)} = 107.38A$$

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 + I_{e1}^2} = 125.41A$$

$$THD_{Ie} = 1.168$$

A continuación se muestran algunos valores de los vectores que se obtienen del análisis del sistema.

$V_{a1} = 271.03\angle - 0.74^\circ V$	$V_{b1} = 283.2\angle - 121.2^\circ V$	$V_{c1} = 281.13\angle 121.3^\circ V$
$V_1^+ = 278.4\angle - 0.20^\circ V$	$V_1^- = 0.66\angle - 102.68^\circ V$	$V_1^0 = 7.48\angle - 165.67^\circ V$
$I_{a1} = 99.98\angle - 22^\circ A$	$I_{b1} = 93.48\angle - 120.8^\circ A$	$I_{c1} = 0 A$
$I_1^+ = 63.39\angle - 11.76^\circ A$	$I_1^- = 21.52\angle - 43.15^\circ A$	$I_1^0 = 42.00\angle - 69.15^\circ A$

Tabla 1-5 valores más significativos de las componentes fundamentales y secuencias de las corrientes y tensiones del caso analizado.

La potencia aparente efectiva es la siguiente:

$$S_e = 3V_e I_e = 3 * 280.25 * 165.08 = 138.79 \text{ kVA}$$

La potencia activa total es:

$$P = P_a + P_b + P_c = 29.998 + 26.335 + 0 = 51.33 \text{ Kw}$$

Y el factor de potencia efectivo, que relaciona la potencia activa con la potencia aparente efectiva es el siguiente:

$$P_{Fe} = \frac{51.33}{138.79} = 0.37$$

A la vista del valor del factor de potencia efectivo ( $P_{Fe}$ ), se deduce que el sistema no es eficiente ya que tiene un  $P_{Fe} < 1$ .

## 1.2. Causas y efectos básicos de los desequilibrios en los sistemas eléctricos.

Se define un sistema eléctrico como equilibrado cuando lo son sus generadores, líneas y receptores. Un generador trifásico es equilibrado cuando sus fuerzas electromotrices tienen el mismo valor eficaz ( $V_A = V_B = V_C$ ) y están desfasadas  $120^\circ$  entre sí, y las impedancias de sus bobinas son iguales. Esto en la realidad nunca se cumple, por lo tanto, todos los sistemas son desequilibrados por definición.

El fenómeno del desequilibrio se produce debido a la presencia en el sistema eléctrico de tensiones y cargas desequilibradas. En estos casos se produce la circulación de corrientes desequilibradas por las líneas y, en los sistemas a cuatro hilos, se produce circulación de corriente por el conductor neutro, lo que produce efectos desfavorables que, aunque hace tiempo que se han observado [42], no ha sido hasta la última década cuando se han tomado realmente en consideración en las revisiones de los estándares de medida de potencia. Tal

como se indica en [43] y [44], la causa principal de los desequilibrios en la tensión es la presencia de cargas monofásicas. Este tipo de cargas son habituales en la distribución doméstica de energía eléctrica, en la que se puede encontrar distribución a dos hilos, entre cualquiera de las tres fases y el neutro, con potencias que pueden llegar hasta los 10kW, encontrando que, tal como se indica en [45], más del 40% del consumo de energía eléctrica en la Unión Europea tiene lugar en los edificios. Este tipo de cargas es capaz de provocar desequilibrios en las tensiones, por lo que una carga trifásica equilibrada conectada a la red de suministro en ese mismo punto de conexión también presentaría un consumo de corrientes desequilibrado. En [46] se indica que la conexión de cargas monofásicas a generadores de inducción autoexcitados provocan sobrecorrientes y sobretensiones, eficiencia reducida debido al aumento excesivo de la temperatura en el generador y vibración mecánica. En [44] se explica el efecto amplificador del desequilibrio de un motor de inducción sometido a desequilibrios de tensión. Dicho efecto es debido a los diferentes valores de impedancia que presenta el motor para las componentes de secuencia positiva y negativa, provocando la menor impedancia a la secuencia negativa, un consumo de corriente de secuencia negativa que aumenta el desequilibrio en corrientes, aumenta las caídas de tensión en la impedancia de línea y contribuye a un incremento del desequilibrio de tensiones.

Para paliar el problema de los desequilibrios en las cargas, se utiliza el reparto equitativo de las cargas (difícil de realizar en algunos casos), y la conexión en estrella para utilizar el conductor neutro, aunque estos sistemas no siempre son efectivos. Existe un tercer procedimiento para eliminar o limitar los efectos no deseables del problema de los desequilibrios, además de los dos citados anteriormente. Dicho procedimiento fue estudiado por primera vez por Steinmetz (1865-1923) a finales del siglo XIX, y recientemente ha sido desarrollado matemáticamente por Vicente León en [47]. El procedimiento consiste en utilizar sistemas trifásicos pasivos, denominadas filtros de secuencia, que al ser conectados en bornes de la carga desequilibrada, le suministran los sistemas de corrientes de distinta secuencia que la secuencia de la principal (la de las f.e.m. del generador). En [48] y [49] se realiza un completo análisis de los efectos de los desequilibrios en sistemas lineales a cuatro hilos, desarrollándose un compensador activo de desequilibrios para estos sistemas.

Los efectos de los desequilibrios en los sistemas eléctricos son:

- Disminución del factor de potencia de la instalación. La aparición de desequilibrios provoca un aumento de la potencia aparente necesaria para transportar la misma potencia útil.
- Diferente valor de las tensiones y corrientes en cada fase del sistema. Para evitar este inconveniente se utiliza la conexión en estrella con conductor de neutro. Este conductor neutro se supone de una impedancia despreciable, de tal forma que las tensiones de las

fases del receptor deberían ser casi iguales. En la práctica la impedancia no es despreciable y la corriente circulante por el neutro ( $I_N$ ) provoca en dicha impedancia una caída de tensión, tanto mayor cuanto más grande sea el desequilibrio, con lo cual, los neutros del generador y receptor dejan de estar al mismo potencial y aparecen desequilibrios de tensión entre las fases.

- Funcionamiento defectuoso de los aparatos y máquinas eléctricas. En los centros de transformación, donde la configuración de los transformadores suele ser triángulo-estrella para facilitar la conexión de un conductor de neutro, la presencia de desequilibrios en la instalación da lugar a corrientes de secuencia cero en el secundario. Estas corrientes, reflejadas en el primario, quedan encerradas dentro del triángulo tal como se indica en [50] y [51] provocando un calentamiento en el transformador. Este hecho provoca el aumento de las caídas de tensión y de las pérdidas por efecto Joule. Desequilibrios de tensión del 3.5% pueden resultar en un 25% de incremento en la temperatura de un motor, debido al aumento sustancial de las pérdidas de potencia y la disminución de la eficiencia [44]. Los desequilibrios de tensión pueden provocar además la aparición de problemas mecánicos en los generadores eólicos (vibraciones en el par mecánico, estrés y sobrecalentamiento en partes mecánicas) [52], provocando su desconexión cuando el desequilibrio de tensión entre fases excede del 6%, cuando se presenta una bajada de tensión superior al 10% o cuando aparezcan sobretensiones por encima del 5%.
- Incorrecto funcionamiento de los equipos de compensación de reactiva (implementados mediante componentes pasivos) debido a la aparición de resonancias.
- Si el desequilibrio es muy grande se puede provocar la desconexión de alguna fase o de todas ellas para evitar la sobrecarga del sistema [53]. Este fenómeno se conoce como “apagón energético” y se produce aun cuando existe suficiente potencia de suministro.

### **1.3. Causas y efectos básicos de la distorsión en los sistemas eléctricos.**

Las corrientes armónicas circulantes por la red de distribución pueden estar producidas por los equipos de las instalaciones conectadas a la red, o bien por componentes armónicas presentes en las tensiones de la propia red de distribución [54]-[55]. Una red con tensiones distorsionadas hará que una carga eficiente consuma corrientes distorsionadas. Sin embargo, el origen de los armónicos de tensión se encuentra en la demanda de corrientes armónicas que solicitan las cargas no lineales, siendo las caídas de tensión provocadas por estas corrientes las que distorsionan las tensiones de la red de suministro.

Como ya se ha introducido, la aparición de componentes armónicas en las corrientes está íntimamente ligada al nacimiento y posterior desarrollo de la electrónica de potencia. Los



convertidores electrónicos de potencia son sistemas utilizados para modificar las características eléctricas de la fuente de energía primaria para adaptarla a las características requeridas por el proceso industrial, receptor o carga que se debe controlar o alimentar. Estos convertidores utilizan semiconductores de potencia trabajando en conmutación, de forma que los convertidores electrónicos de potencia son sistemas intrínsecamente no lineales. Esta no linealidad hace que las corrientes demandadas a la fuente primaria presenten discontinuidades y, por lo tanto, un alto contenido armónico. Desde el punto de vista de la red de distribución alterna senoidal, las corrientes suministradas a receptores controlados o alimentados mediante convertidores electrónicos de potencia dejan de ser senoidales, pudiendo descomponerse en corrientes con componentes armónicas de diferentes frecuencias.

Los efectos que producen los armónicos de corriente son variados y siempre perjudiciales para los equipos conectados a la red eléctrica [56]. Estos efectos van ligados a los armónicos de tensión que los armónicos de corriente producen en las tensiones de la red de distribución, y que debido a las componentes inductivas de las líneas de transmisión, producen mayores caídas de tensión cuanto mayor es la frecuencia de las componentes armónicas provocando desequilibrio de tensión. En los equipos o receptores, los armónicos suelen dar lugar a un aumento de los calentamientos provocado por el aumento de la disipación de potencia, empeorado la eficiencia energética.

La presencia de componentes armónicas en las corrientes produce efectos diferentes en procesos industriales o elementos que incluyan componentes inductivas y resistivas. Sobre las partes resistivas, la presencia de armónicos de corriente provoca caídas de tensión del mismo orden y en fase con las componentes armónicas de las corrientes que las generan. Este hecho provoca la aparición de potencias activas armónicas residuales que se convierten en calor contribuyendo al sobrecalentamiento de los receptores. En las partes inductivas, las caídas de tensión provocadas por las componentes armónicas de las corrientes producirán sobretensiones debido a la dependencia de la reactancia inductiva con la frecuencia. Para una misma componente inductiva, a mayor frecuencia mayor reactancia, y por lo tanto, una misma corriente provocará mayor caída de tensión. Las componentes de alta frecuencia en las corrientes provocan también el conocido efecto pelicular que consiste en la localización de la conducción en las partes externas de los conductores, produciendo el sobrecalentamiento de estas zonas y el aumento de la resistencia de los conductores que hará aumentar las pérdidas. La presencia de armónicos de corriente puede provocar resonancias en las bancadas de condensadores de los equipos de compensación pasiva de reactiva, induciendo calentamientos y pudiendo provocar fallos de aislamiento por tratarse de capacidades diseñadas para el funcionamiento a la frecuencia fundamental.

Los armónicos de corriente pueden provocar fallos o modificar las condiciones de funcionamiento de ciertos equipos. Por ejemplo, en el diseño de una instalación eléctrica convencional no se tienen en consideración las posibles cargas o equipos generadores de armónicos de corriente. El poder de corte de los interruptores magneto-térmicos de protección instalados puede verse superado a causa del aumento de la corriente provocado por la circulación de armónicos, lo cual puede dificultar su apertura e incluso impedir la extinción del arco eléctrico. También los denominados armónicos de secuencia cero (armónicos de orden  $3n$ , con  $n=1,2,\dots$ ) pueden producir las desconexiones no deseadas de los interruptores diferenciales de las instalaciones eléctricas al inducir corrientes elevadas por el neutro. Hoy en día existen diferenciales inmunizados que están especialmente diseñados para evitar estos problemas.

Resulta muy destacable el efecto que los armónicos pueden llegar a provocar sobre ciertos aparatos de medida del tipo inducción pensados para realizar medidas eléctricas a partir de corrientes y tensiones alternas y senoidales fundamentales. Se pueden producir grandes errores de medida dependiendo de la magnitud de los armónicos presentes [57]-[58]-[59].

En equipos que utilizan la detección del cruce por cero de la tensión de red como punto de sincronización, como son los controles de fase en rectificadores controlados o para reguladores de alterna, incluso en equipos de medida o compensación activa digitales, la presencia de tensiones distorsionadas por componentes armónicas en la red de alimentación puede provocar el error en la detección del cruce por cero y con ello el mal funcionamiento de los equipos [60]-[61].

#### 1.4. Conclusiones

La descomposición de potencias propuesta por la IEEE Std. 1459-2000 parte de la base de que “*Las plantas modernas generan sistemas de tensiones libres de armónicos y de componentes de secuencia negativa y cero*”, por ello el Std.1459 distingue entre diferentes potencias activas y considera que el fenómeno de la transferencia de energía útil sólo viene representado por la potencia activa fundamental de secuencia positiva  $P_1^+$ . Este es un punto diferenciador muy importante con respecto al resto de teorías de la potencia eléctrica. Se considera que, a partir de un sistema de tensiones libre de armónicos y de secuencia positiva, un receptor eficiente sólo consumiría corrientes en fase y con la misma forma de onda que dichas tensiones, es decir, la única potencia en juego sería  $P_1^+$ . Cuando por las líneas del sistema de distribución circulen corrientes armónicas, se producirán en las mismas caídas de tensión armónicas, apareciendo las diferentes potencias debidas al fenómeno de distorsión ( $D_{el}$ ,  $D_{eV}$ ,  $S_{eH}$ ), y apareciendo también la potencia activa armónica  $P_H$ . Aún cuantificando un flujo de energía unidireccional,  $P_H$  aparece debido a la presencia de componentes armónicas en las corrientes y tensiones del sistema. Es decir, de no existir distorsión en el sistema,  $P_H$  no existiría y es por ello que se considera como

una potencia activa residual. Igualmente, cuando por el sistema circulen corrientes desequilibradas, se producirán caídas de tensión diferentes en las líneas provocando el desequilibrio de las tensiones entre las fases del sistema de distribución. Esto dará lugar a la aparición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$ , que implícitamente incluye a las potencias activas  $P_1^-$  y  $P_1^0$  fruto del producto de tensiones y corrientes fundamentales de secuencias negativas y cero (1.113)-(1.114).

$$P_1^- = V_1^- I_1^- \cos \theta_1^- \quad (1.113)$$

$$P_1^0 = V_1^0 I_1^0 \cos \theta_1^0 \quad (1.114)$$

Por ser causadas por el fenómeno no eficiente del desequilibrio, estas potencias activas son consideradas como potencias activas residuales y no forman parte del fenómeno de transferencia de energía útil.

El IEEE Std. 1459-2000 está pensado para el desarrollo de nuevos equipos de medida y para ser aplicado con fines de penalización por el consumo de potencias no eficientes. Los nuevos equipos de medida diseñados a partir de este estándar servirán para la tarificación y penalización:

- Por consumo de reactiva a partir de las mediciones de  $Q_1^+$ . El fenómeno de desfase se considera únicamente entre las componentes fundamentales de secuencia positiva de las tensiones y las corrientes. El resto son provocados bien por el desequilibrio o bien por la distorsión, por lo que se engloba en estos fenómenos.
- Por consumo de corrientes distorsionadas, a partir de las mediciones de  $D_{el}$ , que es una parte de la potencia aparente efectiva no fundamental  $S_{eN}$ . La distinción entre la potencia de distorsión de tensión y de corriente, permite no penalizar al usuario final por el global de la distorsión del sistema. Esto resulta de gran importancia, puesto que el usuario deberá consumir corrientes libres de armónicos ( $D_{el} = 0$ ) y, siendo así, no será responsable de la posible distorsión que presenten las tensiones de la red en su punto de conexión ( $D_{eV} \neq 0$ ). De esta forma la potencia  $D_{el}$ , debe ser el factor a medir y la base de la penalización a aplicar.
- Por desequilibrio en el sistema. La medición de  $S_{U1}$  será la base de la tarificación y penalización por desequilibrio en el sistema. Sin embargo, y analizando el caso de la distorsión, resultaría lógico pensar en una descomposición del fenómeno de desequilibrio en sus componentes debidas al desequilibrio de las tensiones de suministro y al de las corrientes consumidas por la instalación de usuario. Las tensiones desequilibradas impuestas por la red de suministro influyen en el cálculo de  $S_{U1}$  y por este motivo, una

instalación que consume corrientes equilibradas no debe ser penalizada cuando  $S_{U1}$  sea distinto de cero a causa de los desequilibrios de tensión en el pcc, ya que esta instalación no estará contribuyendo a la aparición de desequilibrios entre las fases del sistema eléctrico.

Desde el punto de vista de los sistemas de medidas, la IEEE Std. 1459-2000 presenta importantes implicaciones:

- La necesidad del cálculo de las tensiones y corrientes fundamentales y de sus componentes de secuencia positiva para la correcta determinación de los fenómenos eléctricos, implica que los valores correctos de las magnitudes se obtendrán en condiciones de régimen estacionario.

# Capítulo 2

## 2. Análisis y aportaciones a la teoría de la potencia eléctrica IEEE Std.1459-2000.

Tal y como se ha explicado en el capítulo 1 el IEEE Std. 1459-2000 [32] determina y cuantifica todos los fenómenos existentes en un sistema eléctrico. Como resumen se presenta la Figura 2.1.

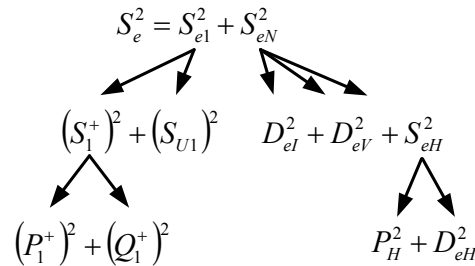


Figura 2.1 Esquema de potencias propuesta por la IEEE Std. 1459-2000.

Si nos centramos en un sistema trifásico los fenómenos cuantificados por el IEEE Std.1459 son los mostrados en la Figura 2.1 y su explicación es la siguiente:

- Las potencias fundamentales están cuantificadas todas juntas por el término de la potencia aparente efectiva fundamental ( $S_{e1}$ ). La  $S_{e1}$  incluye la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ), la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva ( $Q_1^+$ ) y la potencia de desequilibrio fundamental ( $S_{U1}$ ).
- Las potencias no fundamentales, están cuantificadas por el término  $S_{eN}$ . Dicho término cuantifica la potencia aparente de la carga producida por las componentes armónicas de la corriente que demanda dicha carga y las componentes armónicas de las tensiones presentes en el pcc.
- La potencia aparente efectiva ( $S_e$ ), se obtiene con los valores del voltaje efectivo ( $V_e$ ) y de la corriente efectiva ( $I_e$ ), tal y como se definen en dicho estándar.(ver apartado 1.1.4.2.3)

Sólo  $P_1^+$ , es considerada como potencia útil, mientras el resto ( $Q_1^+$ ,  $S_{U1}$  y  $S_{eN}$ ) se consideran como potencias no eficientes porque no están asociadas con la transferencia de potencia útil entre el generador y las cargas [62].

Teniendo en cuenta el IEEE Std. 1459, los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes de carga, el valor de  $S_{eN}$  se descompone en los términos que se muestran en (2.1).

$$S_{eN}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (2.1)$$

$S_{eN}$  está descompuesta en los siguientes términos.

- La potencia de distorsión de corriente ( $D_{eI}$ ). Este término está calculado como el producto del voltaje efectivo fundamental ( $V_{e1}$ ), y la corriente efectiva armónica ( $I_{eH}$ ), tal y como se muestra en (2.2).  $D_{eI}$ , cuantifica la parte de  $S_{eN}$ , producida por la distorsión de corriente. Este término suele ser la componente dominante de ( $S_{eN}$ ).

$$D_{eI} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2.2)$$

- La potencia de distorsión de voltaje ( $D_{eV}$ ). Este término está calculado en (2.3), como el producto de la corriente efectiva fundamental ( $I_{e1}$ ), y el voltaje efectivo armónico ( $V_{eH}$ ).  $D_{eV}$  cuantifica la parte de  $S_{eN}$ , producida por la distorsión de tensión.

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2.3)$$

- La potencia aparente armónica ( $S_{eH}$ ). Este término está calculado en (2.4), como el producto de la corriente efectiva armónica ( $I_{eH}$ ), y el voltaje efectivo armónico ( $V_{eH}$ ).  $S_{eH}$ , cuantifica la parte de  $S_{eN}$ , producida por las componentes armónica de corriente y tensión.

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (2.4)$$

$S_{eH}$ , incluye la potencia activa armónica ( $P_H$ ) y la potencia aparente armónica residual ( $D_{eH}$ ), definidas en (2.5),(2.6) y (2.7).

$$S_{eH}^2 = P_H^2 + D_{eH}^2 \quad (2.5)$$

$$P_H = 3 \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (2.6)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2} \quad (2.7)$$

Donde  $V_h$ , es el valor eficaz de la componente armónica del voltaje.  $I_h$  es el valor eficaz de la componente armónica de la corriente y  $\theta_h$ , es el desplazamiento de fase entre la corriente y el voltaje para los armónicos del mismo orden.

$S_{eN}$ , cuantifica la potencia armónica efectiva demandada por la carga de la red en el pcc. Esta magnitud es usada para evaluar el nivel de polución existente en la red debido a las componentes armónicas y también para definir la potencia aparente de los filtros activos que puedan compensar o reducir el valor de la  $S_{eN}$ , presentes en el pcc.

En relación con la presencia de componentes armónicas en la instalación se definen algunos factores como son: la distorsión armónica total equivalente de corriente ( $THD_{eI}$ ) y la distorsión armónica total equivalente de voltaje ( $THD_{eV}$ ). Estas definiciones se muestran en (2.8) y (2.9).

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \rightarrow D_{eI} = S_{e1} \cdot (THD_{eI}) \quad (2.8)$$

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \rightarrow D_{eV} = S_{e1} \cdot (THD_{eV}) \quad (2.9)$$

Otros valores de potencia definidos en el IEEE Std. 1459-2000, son la potencia activa fundamental de secuencia negativa ( $P_1^-$ ), y la potencia activa fundamental de secuencia cero ( $P_1^0$ ). Las dos potencias están incluidas en  $S_{U1}$ , pero la resolución de la  $S_{U1}$ , no está desarrollada en el IEEE Std. 1459 tal y como se muestra en la Figura 2.1.

## 2.1. Aportaciones a la teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459-2000

Una de las aplicaciones del IEEE Std 1459 es penalizar a los consumidores con una demanda elevada de corriente no activa. Para la mayor parte de los usuarios que demandan una potencia pequeña en comparación con la potencia disponible en el pcc, el voltaje fase neutro está impuesto por la red eléctrica y su capacidad de modificación de voltaje es nula o muy pequeña. En esta situación la  $S_{eN}$ , cuantifica algunas magnitudes de potencia que no están causadas por el usuario final, por lo que la  $S_{eN}$ , no es un factor adecuado para la evaluación y penalización de la polución producida por los usuarios finales. En este sentido es necesario distinguir entre que parte de  $S_{eN}$ , es producida por el usuario y que parte viene impuesta por la red eléctrica. Si un usuario final usa un compensador activo en su instalación para eliminar la polución introducida en la red, el uso del factor  $D_{eI}$ , para la medida de dicha polución es la mejor opción ya que las otras dos cantidades ( $S_{eH}$  y  $D_{eV}$ ), están directamente influenciadas por los armónicos de tensión presentes en el pcc e impuestos por la red eléctrica. Por la misma razón la distorsión armónica total equivalente de corriente ( $THD_{eI}$ ) es preferible como ratio para la evaluación de la polución producida por los usuarios que incluyan un compensador activo para compensar o reducir la potencia no activa.

### 2.1.1. Descomposición de la potencia de desequilibrio.

Del mismo modo, que el caso anterior, la potencia de desequilibrio incluye tanto los desequilibrios producidos por las tensiones como los producidos por las corrientes, no existiendo distinción alguna en el IEEE Std.1459 al respecto.

Si  $S_{U1}$  fuese utilizada para evaluar la eficiencia de una instalación un usuario con compensador activo consumiendo corrientes senoidales y equilibradas, no estaría provocando ningún desequilibrio y el valor de  $S_{U1}$ , no sería el adecuado para evaluar la eficiencia de dicha instalación.

Se propone a continuación una nueva descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$ , obteniéndose nuevos términos que cuantifican el desequilibrio producido por las corrientes de carga y el desequilibrio producido por las tensiones presentes en el pcc.

La potencia de desequilibrio cuantifica el efecto de la corriente fundamental de desequilibrio de la carga junto con el voltaje fundamental de asimetría presente en el pcc.  $S_{U1}$  es la potencia fundamental que está calculada de la resolución de la  $S_{e1}$ .

$S_{e1}$  puede ser expresada como una función de  $V_{e1}$  e  $I_{e1}$ , o como la suma cuadrática de todas las potencias fundamentales tal y como se muestra en (2.10).

$$(S_{e1})^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 + (S_{U1})^2 \quad (2.10)$$

El valor de  $S_{U1}$ , es calculado a partir de (2.10) y mostrado en (2.11).

$$(S_{U1})^2 = (S_{e1})^2 - (P_1^+)^2 - (Q_1^+)^2 = (S_{e1})^2 - (S_1^+)^2 \quad (2.11)$$

Para el cálculo de los nuevos términos de potencia se propone en esta tesis una nueva descomposición de  $V_{e1}$ , e  $I_{e1}$ , separando sus componentes de secuencia positiva del resto, que queda englobado en dos nuevos términos que son: la corriente de desequilibrio fundamental ( $I_{u1}$ ), y el voltaje de desequilibrio fundamental ( $V_{u1}$ ). Teniendo en cuenta esto los valores de  $V_{e1}$  e  $I_{e1}$ , se expresan de la siguiente manera.

$$(I_{e1})^2 = (I_1^+)^2 + (I_{u1})^2 \quad (2.12)$$

$$(V_{e1})^2 = (V_1^+)^2 + (V_{u1})^2 \quad (2.13)$$

$S_1^+$ , es calculada usando  $I_1^+$ , y  $V_1^+$ , con lo que se puede obtener la ecuación (2.14)



$$(S_{U1})^2 = (S_{e1})^2 - (S_1^+)^2 = (S_{e1})^2 - (3 \cdot V_1^+ I_1^+)^2 \quad (2.14)$$

Despejando los valores de  $I_1^+$  y la  $V_1^+$  en (2.12) y (2.13), y sustituyendo en (2.14) el valor de  $S_{U1}$  queda como se muestra en (2.15)

$$S_{U1}^2 = S_{e1}^2 - 9(V_{e1}^2 - V_{U1}^2) \cdot (I_{e1}^2 - I_{U1}^2) \quad (2.15)$$

Resolviendo  $S_{e1}$ , como una función de  $V_{e1}$ , e  $I_{e1}$ , y simplificando términos  $S_{U1}$ , queda como

$$S_{U1}^2 = (3 \cdot V_{e1} I_{U1})^2 + (3 \cdot V_{U1} I_{e1})^2 - (3 \cdot V_{U1} I_{U1})^2 \quad (2.16)$$

El primer término de (2.16), representa el desequilibrio producido por las corrientes demandadas por el usuario con una carga desequilibrada. El segundo término representa el desequilibrio producido por la asimetría de las tensiones en el pcc. El tercer término es debido a los desequilibrios en las cargas y las asimetrías en las tensiones. A partir de la descomposición de  $S_{U1}$ , incluye las siguientes potencias.

- Potencia de desequilibrio de corriente ( $S_{U1I}$ ). Este término se calcula como el producto del voltaje efectivo fundamental ( $V_{e1}$ ), y de la corriente de desequilibrio fundamental ( $I_{U1}$ ), tal y como se representa en (2.17).  $S_{U1I}$  cuantifica la parte de  $S_{U1}$  debido al desequilibrio de la corriente fundamental demandada por el usuario.

$$S_{U1I} = 3V_{e1}I_{U1} \quad (2.17)$$

- La potencia de desequilibrio de tensión ( $S_{U1V}$ ). Este término se calcula como el producto de la corriente efectiva fundamental ( $I_{e1}$ ) y el voltaje de desequilibrio fundamental ( $V_{U1}$ ) tal y como se representa en (2.18).  $S_{U1V}$  cuantifica la parte de  $S_{U1}$  debida a la asimetría del voltaje fundamental presente en el pcc.

$$S_{U1V} = 3V_{U1}I_{e1} \quad (2.18)$$

- La potencia aparente de desequilibrio ( $S_{U1U}$ ). Este término se calcula como el producto de  $I_{U1}$  y  $V_{U1}$ , tal y como se representa en (2.19). ( $S_{U1U}$ ) cuantifica la parte de  $S_{U1}$ , debida al desequilibrio de las componentes fundamentales de tensión y corriente.

$$S_{U1U} = 3V_{U1}I_{U1} \quad (2.19)$$

Utilizando estos nuevos términos,  $S_{U1}$  se descompone como se muestra en (2.20).

$$S_{U1}^2 = S_{U1U}^2 + S_{U1V}^2 - S_{U1W}^2 \dots \quad (2.20)$$

$S_{U1U}$  incluye la potencia activa de secuencia negativa ( $P_1^-$ ), la potencia activa de secuencia cero ( $P_1^0$ ) y la potencia de desequilibrio residual definida como ( $S_{U1e}$ ) tal y como se muestra en (2.21)

$$S_{U1W}^2 = (P_1^- + P_1^0)^2 + S_{U1e}^2 \quad (2.21)$$

Donde ( $P_1^-$ ) y ( $P_1^0$ ), están definidas en el IEEE Std.1459 y  $S_{U1e}$ , se calcula utilizando las definiciones anteriores según se muestra en (2.22)

$$S_{U1e}^2 = S_{U1W}^2 - (P_1^- + P_1^0)^2 \quad (2.22)$$

Teniendo en cuenta la Figura 2.1, la descomposición completa de la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ) de acuerdo con el IEEE Std.1459 incluyendo la descomposición propuesta de  $S_{U1}$ , se muestra en la Figura 2.2.

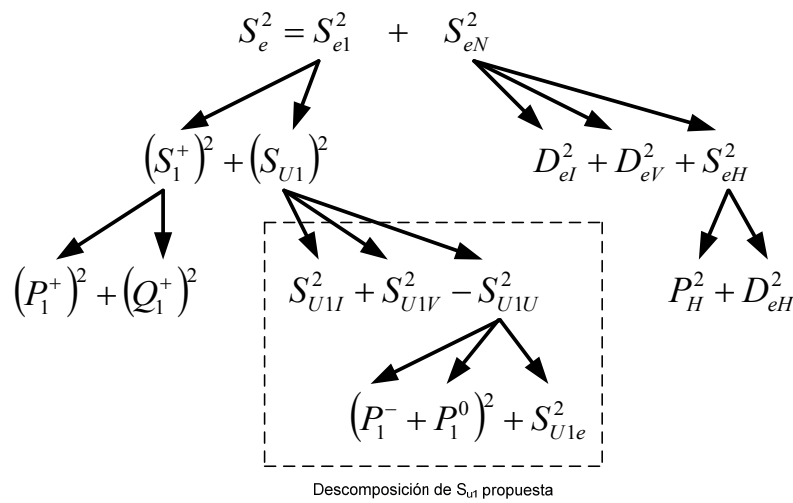


Figura 2.2 Descomposición de  $S_e$ , incluyendo la nueva descomposicion de  $S_{U1}$

Con estas nuevas magnitudes de potencia los diferentes términos de  $S_{U1}$  son medidos individualmente, y permiten una identificación por separado de la potencia de desequilibrio, debido a los desequilibrios de la corriente fundamental o debido a las asimetrías del voltaje fundamental. Estos nuevos términos debidos a la potencia de desequilibrio son cuantificados por el sistema de medidas propuesto en la presente tesis doctoral.

### 2.1.2. Definición de nuevos factores de mérito.

Usando las definiciones anteriores se aportan unos factores de mérito al IEEE Std. 1459 para la medida de la calidad de la potencia eléctrica de la instalación desde el punto de vista de desequilibrios fundamentales y asimetrías.

- Factor de desequilibrio de corriente total ( $TU_I$ ):

$$TU_I = \frac{I_{U1}}{I_{e1}} \quad (2.23)$$

- Factor de desequilibrio de voltaje total ( $TU_V$ ):

$$TU_V = \frac{V_{U1}}{V_{e1}} \quad (2.24)$$

Con estos nuevos factores las expresiones (2.17) a (2.19), se pueden reescribir como se expresan en (2.26) a (2.27).

$$S_{UI} = S_{e1} \cdot (TU_I) \quad (2.25)$$

$$S_{UV} = S_{e1} \cdot (TU_V) \quad (2.26)$$

$$S_{UIV} = S_{e1} \cdot (TU_I) \cdot (TU_V) \quad (2.27)$$

Estas magnitudes de potencia y los factores que las relacionan, pueden ser usadas para nuevos propósitos, como decisiones económicas en la ingeniería para la determinación de fuentes de polución, eficiencia del sistema eléctrico y para determinar el dimensionamiento de los compensadores activos (SAPC). En los capítulos (5) y (7), correspondientes a las simulaciones del sistema de medidas y los resultados experimentales respectivamente se han añadido en cada uno de los casos simulados y experimentales una tabla en la cual se expresa el valor de todos los términos que integran la  $S_{U1}$ , para cada uno de los casos simulados y ensayados de forma experimental. El sistema de medidas además de todos los términos definidos por el IEEE Std. 1459 cuantifica también los términos extendidos proporcionando de esta forma toda la información correspondiente a la  $S_{U1}$ .

## 2.2. Conclusiones.

En este capítulo se ha realizado un análisis del IEEE Std.1459. De este análisis se concluye la necesidad de una descomposición pormenorizada de la  $S_{U1}$ . debido a que cuantifica de forma conjunta la parte de desequilibrio provocado por las tensiones presentes en el pcc y el desequilibrio de las corrientes provocada por una carga desequilibrada. Para diferenciar cada uno de estos desequilibrios se ha realizado una descomposición de la  $S_{U1}$  siguiendo la misma

metodología que el propio IEEE Std.1459 y se ha llegado a la obtención de unos nuevos términos que cuantifican cada uno de dichos desequilibrios. Con estos nuevos términos se consigue identificar por separado los fenómenos de desequilibrio provocados por la red (y que no son atribuibles a los usuarios), y los desequilibrios provocados por los usuarios debido a la utilización de cargas desequilibradas y no atribuibles a la red eléctrica de suministro.

La descomposición de la potencia de desequilibrio propuesta (2.1) constituye una herramienta fundamental a la hora de diseñar equipos de compensación ya que permite definir la potencia total del compensador de forma exacta. Al poder cuantificar la parte de desequilibrio provocada por las corrientes de carga y separarla de la provocada por las tensiones de red, supone que el compensador sólo tendrá que encargarse de compensar la parte de desequilibrio correspondiente a las corrientes de carga y tener presente solo esta parte de la  $S_{U1}$ , en el diseño de dicho compensador. De esta forma se pueden diseñar compensadores activos selectivos de cada uno de los términos ineficientes explicados.

Asociados a estos nuevos términos se proponen dos nuevos factores de mérito para evaluar las tasas de desequilibrio y se proponen como términos indicativos a la hora de penalizar a los usuarios que provoquen desequilibrios en tensiones o corrientes en el pcc.

# Capítulo 3

---

## **3. Sistemas de medida de la potencia eléctrica.**

En el presente capítulo se realiza una introducción a los sistemas de medidas y a las distintas teorías de la potencia eléctrica que se han ido implementando en dichos equipos.

Se realiza un análisis de los equipos de medidas basados en el IEEE Std.1459 propuestos por los distintos autores y de las estrategias de medida implementada por cada una de ellos a la hora de realizar las medidas.

A continuación se revisa la normativa existente para ver cuáles son las condiciones técnicas exigibles a los equipos de medida comerciales. En este capítulo se presenta la normativa básica que debe cumplir un dispositivo de medida como el que se pretende desarrollar en esta tesis desde el punto de vista de las magnitudes eléctricas que debe cuantificar (teoría de la potencia eléctrica que debe integrar) en un sistema trifásico a cuatro hilos.

Se analiza dicha normativa y se identifica el estándar de medida que implementan los equipos de medida comerciales. Se describe la problemática existente en los equipos de medidas comerciales a la hora de medir en sistemas cuyas características de funcionamiento no corresponden con las descritas en la normativa y sus consecuencias, ya que en el capítulo 5 (Simulación del sistema de medidas), y el capítulo 7 (resultados experimentales), se utiliza un equipo de medidas comercial (Power Guia 440s Dranetz-BMI), para contrastar los resultados simulados y los experimentales respectivamente del sistema de medidas desarrollado en la presente tesis.

Finalmente se resumen las conclusiones como síntesis de lo analizado en el presente capítulo.

### **3.1. Equipos de medidas y teorías de la potencia eléctrica.**

A lo largo de la historia se han desarrollado múltiples equipos de medida basados en las distintas teorías de la potencia eléctrica que han sido propuestas por los distintos autores [62]. A día de hoy la mayor parte de los equipos de medidas comerciales siguen las recomendaciones propuestas en el IEEE Std. 100 (1.1.3) para identificar las magnitudes eléctricas. Dichas magnitudes están pensadas para casos de corrientes y tensiones que sean completamente senoidales y equilibradas en el caso trifásico, no teniendo en cuenta las demás situaciones que se puedan dar con respecto a tensiones, corrientes. El desarrollo de las distintas teorías de la potencia eléctrica ha estado ligado a la evolución que ha sufrido el sistema eléctrico a lo largo de la historia y como se ha comentado en el capítulo 1 las primeras teorías de la potencia eléctrica definían los fenómenos físicos en los sistemas eléctricos con corrientes y tensiones completamente senoidales y equilibradas en el caso trifásico. A medida que las

cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico han ido aumentando, han surgido diferentes teorías de la potencia eléctrica en donde se ha intentado dar explicación a los nuevos fenómenos físicos que han surgido [62].

Aunque como se ha comentado a lo largo de la historia se han desarrollado distintos equipos de medidas de la potencia eléctrica basados en las distintas teorías que se han ido desarrollando, a día de hoy los equipos de medidas comerciales se siguen diseñando teniendo en cuenta que las medidas se realizarán sobre sistemas de tensiones y corrientes senoidales y equilibrados en el caso trifásico, considerando únicamente los errores máximos cometidos en la medida en los casos de distorsión de tensión o corriente [65]. Existe un gran discusión entre la comunidad científica sobre la necesidad de adaptar los sistemas de medidas a las nuevas condiciones de funcionamiento de la red eléctrica, y de cómo los sistemas de medidas deben de garantizar una correcta medición bajo cualquier situación que se pueda dar en la red eléctrica, además de ser capaces de medir las distintas magnitudes correspondientes a los distintos fenómenos físicos presentes en ese momento en la red.

En los tradicionales medidores electromecánicos de energía eléctrica resultaba imposible integrar el contenido armónico en la medida realizada ya que su comportamiento en régimen estacionario correspondía a un filtro para todos los armónicos excepto el fundamental [69]. La llegada en la década de los 80 de los medidores estáticos de energía basados en microprocesadores supuso la capacidad de integrar en las medidas los distintos fenómenos presentes en la red eléctrica y con ello, el debate sobre la necesidad de hacerlo. Las nuevas posibilidades ofrecidas por los medidores estáticos han provocado que los distintos fabricantes de equipos hayan integrado en sus dispositivos de medidas distintas fórmulas correspondientes a las distintas teorías de la potencia eléctrica para la medida de los diferentes fenómenos que se puedan dar en la red. La integración de dichas fórmulas se hace de forma complementaria a la integración de las ecuaciones que exige la normativa de equipos de medidas, en donde como se analizará en el apartado (3.3), los equipos de medidas deben de presentar un correcto funcionamiento bajo condiciones de tensiones y corrientes senoidales. En el Anexo I se presentan las características técnicas del equipo de medidas comercial Power-Guia 440s de la casa comercial Dranetz-BMI, en dicho Anexo se pueden ver las ecuaciones que integra para la medida de las distintas magnitudes eléctricas.

### **3.2. Equipos de medida basados en el IEEE Std.1459-2000.**

En la actualidad los equipos de medida comerciales siguen las recomendaciones del IEEE Std.100 a la hora de realizar sus medidas, es decir, consideran que las corrientes y tensiones a medir son senoidales puras (o con una distorsión muy baja). Como consecuencia del aumento de las cargas no lineales se ha producido un aumento de dicha distorsión armónica (aun cuando se encuentra limitada por la normativa [67] y [68]). El aumento de dicha distorsión supone unas nuevas condiciones para las tensiones y corrientes a medir, en donde la teoría de IEEE Std.100 provocará errores en la cuantificación de las magnitudes medidas, al no cumplir con las condiciones de distorsión que impone el propio IEEE Std.100.

La nueva teoría del IEEE Std.1459 da solución a dichos problemas y es capaz de identificar todos los fenómenos presentes en la red a partir de las tensiones y corrientes presentes en el punto de medida. Como consecuencia de ello han sido desarrollados en los últimos años diferentes equipos de medidas basados en dicho estándar [70]-[71]-[72]-[73] (unos virtuales y otros implementados de forma física), en donde cada autor propone una metodología de diseño y medida para conseguir en unos casos mayor inmunidad frente a determinados errores en la medida, y en otros casos, conseguir mayor sencillez en los cálculos. Se presentan a continuación las distintas propuestas realizadas por diferentes autores al desarrollo de sistemas de medidas basados en el IEEE Std.1459-2000.

#### **3.2.1. Metodología de medidas basada en la transformada Wavelet.**

Las definiciones sobre las potencias realizadas en el IEEE Std. 1459-2000 están basadas en el análisis frecuencial de las tensiones y corrientes medidas. Para llevar a cabo dicho análisis se suele utilizar la Transformada de Fourier (FFT) o la versión discreta (DFT), sin embargo el comportamiento de dicha transformada frente a las perturbaciones no periódicas en las señales puede provocar algunos errores en la medida [74]. Los autores en [75], proponen utilizar la transformada Wavelet para realizar dicho análisis permitiendo obtener información de las perturbaciones de tensiones y corrientes que no sean estacionarias.

La transformada wavelet es una herramienta para el procesado de señales que se puede utilizar en el análisis de los sistemas de potencia. La aplicación de la transformada wavelet en los sistemas de potencia incluye el análisis y la detección de transitorios electromagnéticos, calidad de la potencia y detección de huecos [76]-[77]. La ventaja de usar la transformada wavelet reside en la capacidad que tiene dicha transformada de proporcionar diferentes frecuencias de resolución manteniendo la información en el dominio del tiempo y la frecuencia, permitiendo de esta forma el análisis de las perturbaciones no estacionarias [78]-[79]-[80].

La transformada Wavelet ha sido usada para representar cualquier señal  $x(t)$ , en el dominio tiempo-frecuencia. La función básica de esta transformación es llamada “transformación madre  $\psi(t)$ ”, la cual puede ser comprimida (estrechada), o trasladada para producir otras transformadas wavelet.

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.1)$$

Variando los valores del parámetro  $a = 2^j$ , de la ecuación (3.1), se pueden obtener diferentes anchos de banda. La traslación del parámetro  $b = ak$ , permite obtener toda la información de la señal  $x(t)$  en el dominio del tiempo.

En la Transformada Wavelet Discreta (DWT) la señal original puede ser descompuesta en aproximaciones y detallar cada nivel de descomposición. La aproximación de la DWT y los coeficientes de detalle  $c_{j,k}^{DWT}$ ,  $d_{j,k}^{DWT}$  a cualquier nivel de descomposición ( $j$ ), e índice de muestreo ( $k \in \mathbb{Z}$ ), son extraídos mediante el filtrado de la señal original  $x(t)$  de longitud  $N$  a través de un filtro paso bajo y un filtro paso alto ( $g$  y  $h$ ), antes de reducir el muestreo tal y como se muestra en la Figura 3.1.

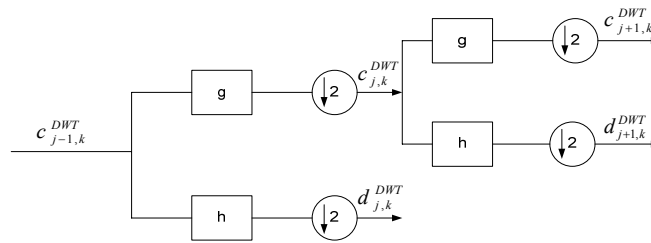


Figura 3.1 Aproximación y proceso de extracción de los coeficientes de detalle en la DWT.

$$c_{j,k}^{DWT} = \sum_n c_{j-1,n}^{DWT} g(n - 2k) \quad (3.2)$$

$$d_{j,k}^{DWT} = \sum_n c_{j-1,n}^{DWT} h(n - 2k) \quad (3.3)$$

El efecto de disminuir la frecuencia de muestreo en la DWT, es el de reducir la longitud de los coeficientes a la mitad, después de cada nivel de descomposición. Con esto se consigue que el tiempo de procesado y la memoria necesaria para el procesado se reduzcan considerablemente.

La propiedad de la invarianza en el tiempo es importante para ayudar a identificar y detectar los cambios rápidos, transitorios o cualquier otra característica variable en el tiempo de la señal. Esta propiedad de invarianza en el tiempo puede ser restaurada simplemente subiendo el



muestreo de los coeficientes del filtro como se muestra en la Figura 3.2 en vez de disminuir el muestreo de los coeficientes extraídos de la DWT.

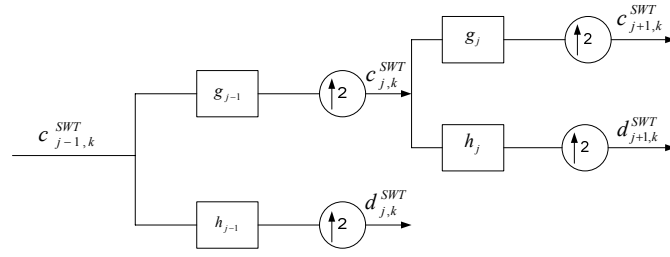


Figura 3.2 Aproximación y proceso de extracción de los coeficientes de detalle en la SWT.

El algoritmo resultante es de tipo redundante y se llama transformada wavelet estacionaria (SWT). La aproximación y coeficientes de detalle definidos en [81] pueden ser expresados como en (3.4) y (3.5).

$$c_{j,k}^{SWT} = \sum_m c_{j-1,k+2^{j-1}m}^{SWT} g(m) \quad (3.4)$$

$$d_{j,k}^{SWT} = \sum_m c_{j-1,k+2^{j-1}m}^{SWT} h(m) \quad (3.5)$$

Donde  $m$  es un entero arbitrario.

A partir de la definición hecha de la transformada wavelet los autores en [75], utilizan dicha transformación para la obtención de los valores de  $P$  y  $Q$  definidos en el IEEE Std.1459-2000, donde la aproximación a la potencia activa en el dominio SWT puede ser definida como:

$$P_A^{SWT} = P_{j_0}^{SWT} = \frac{1}{T} \sum_K c_{j_0,k}^{(v)SWT} c_{j_0,k}^{(i)SWT} \quad (3.6)$$

La potencia activa de detalle es:

$$P_D^{SWT} = \sum_{j \geq j_0} P_j^{SWT} = \frac{1}{T} \sum_{j \geq j_0} \sum_K d_{j,k}^{(v)SWT} d_{j,k}^{(i)SWT} \quad (3.7)$$

Y la potencia activa total es:

$$P^{SWT} = P_A^{SWT} + P_D^{SWT} \quad (3.8)$$

La potencia aparente de aproximación puede ser definida como:

$$S_A^{SWT} = V_A^{SWT} I_A^{SWT} = V_{j_0}^{SWT} I_{j_0}^{SWT} \quad (3.9)$$

$$S^{SWT} = V^{SWT} I^{SWT} \quad (3.10)$$

Donde los valores de tensión y corriente son:

$$V^{SWT} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_K [c_{j_0,k}^{(v)SWT}]^2 + \frac{1}{T} \sum_{j \geq j_0} \sum_K [d_{j,k}^{(v)SWT}]^2} \quad (3.11)$$

$$I^{SWT} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_K [c_{j_0,k}^{(i)SWT}]^2 + \frac{1}{T} \sum_{j \geq j_0} \sum_K [d_{j,k}^{(i)SWT}]^2} \quad (3.12)$$

Y la potencia reactiva de aproximación en el dominio SWT, puede ser definida por.

$$Q_A^{SWT} = \sqrt{[S_A^{SWT}]^2 - [P_A^{SWT}]^2} \quad (3.13)$$

Junto con las ecuaciones anteriores los autores definen una serie de ecuaciones que cuantifican los términos definidos en el IEEE Std.1459, basados en el dominio SWT. A partir de dichas ecuaciones analizan una serie de casos en los cuales introducen unas perturbaciones aleatorias en las señales de tensión y corriente y miden los valores de los términos definidos en el IEEE Std.1459 mediante las transformaciones FFT, DWT y SWT.

*Comentarios a la metodología de medida propuesta por los autores [75]:*

- Los autores no implementan de forma física el sistema de medidas, simplemente realizan a nivel de simulación la comparativa para los distintos casos que proponen.
- No evalúan el coste computacional de cada uno de los algoritmos propuestos, ni su forma de implementarlo en un sistema de medidas.
- Los errores debidos a las perturbaciones estacionarias en los tres métodos (FFT, DWT, SWT) son muy similares, sin embargo para los casos de perturbaciones no estacionarias los errores son más relevantes, pero los autores no analizan la frecuencia de aparición de cada uno de estos errores en el sistema eléctrico dejando sin justificar la importancia del método.
- Desde el punto de vista de un sistema de medidas resulta más interesante el análisis en régimen estacionario (perturbaciones estacionarias), que los valores no estacionarios pensados mas para sistemas de compensación.

### 3.2.2. Metodología de medidas basada en el algoritmo de Newton.

En [82], los autores presentan un sistema de medidas basado en el algoritmo de Newton, debido a que la utilización de la FFT para la obtención de las componentes armónicas de las tensiones y corrientes en el punto de medida, exige que la frecuencia de las tensiones y corrientes sea constante. En [83] se presenta el funcionamiento de la FFT, pero se necesita que la frecuencia sea constante. El problema de la desviación de la frecuencia de la red se puede solucionar implementando un filtro de Kalman extendido [84]-[85], sin embargo se necesita un buen conocimiento de las características estáticas de la señal de red (frecuencia, espectro, etc.). Debido al problema de estimar las características estáticas de las señales de red, se utiliza el Algoritmo de Newton el cual se utiliza para estimar aquellos parámetros a priori desconocidos.

#### 3.2.2.1. Funcionamiento del Algoritmo de Newton.

El funcionamiento del Algoritmo de Newton se basa en la utilización de un modelo de observación de la señal de entrada (tensión o corriente) como el mostrado en (3.14).

$$v(t) = h(x, t) + \xi(t) \quad (3.14)$$

Donde  $v(t)$ , es el valor instantáneo de la tensión (o corriente) en el tiempo  $t$ ,  $\xi(t)$ , es un ruido de valor medio cero,  $x$  es un vector de parámetros elegidos de forma adecuada, y  $h$  es una función no lineal expresada en (3.15)

$$h(x, t) = V_0 + \sum_{K=1}^M V_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (3.15)$$

Para un modelo genérico, se suele elegir un vector de parámetros desconocidos como el mostrado en (3.16).

$$x = [V_0, \omega, V_1, \dots, V_m, \varphi_1, \dots, \varphi_m]^T \quad (3.16)$$

Donde  $V_0$ , es la magnitud de la componente de continua;  $M$  es el armónico de mayor orden presente en la señal,  $\omega$  es la velocidad angular fundamental ( $2\pi f$ ), donde  $f$ , es la frecuencia;  $V_k$  es la magnitud del armónico de orden  $k$  y  $\varphi_k$  es la fase del armónico  $k$  ( $k=1, \dots, M$ ). El modelo elegido para la señal es una función no lineal con la frecuencia desconocida a priori, lo que implica la utilización de una técnica no lineal para la estimación de dicha frecuencia. La utilización de una estimación no lineal supone una complejidad mayor pero el beneficio de incluir la frecuencia como un parámetro a estimar significa que el algoritmo de estimación resulta insensible a los cambios de frecuencia.

Si la señal de entrada es muestreada con una frecuencia de muestreo  $f_s$ , y con un periodo de muestreo  $T_s = 1/f_s$ , el valor del índice discreto del tiempo (t), está dado por  $t_m = mT_s$ , y la representación discreta del modelo de la señal viene dado por (3.17) y (3.18).

$$v_m = h(x_m, t_m) + \xi_m \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3.17)$$

$$h(x_m, t_m) = V_{om} + \sum_{k=1}^M V_{km} \sin(k\omega_m t_m + \varphi_{km}) \quad (3.18)$$

Todos los parámetros desconocidos de (3.16), tienen ahora el subíndice m. El número de parámetros desconocidos que determinan el orden del modelo es  $n = 2M + 2$ . El orden puede ser reducido haciendo simplificaciones en el modelo, por ejemplo reduciendo el valor de M. En el caso más sencillo, el modelo que contiene solamente el armónico fundamental tiene un orden de  $n = 3$  y  $x = [\omega, V_1, \varphi_1]^T$ . Este modelo puede ser aplicado para procesar una señal que sea una senoidal pura.

Las señales de entrada son muestreadas durante un periodo finito de tiempo llamada “ventana de adquisición”, se tienen N muestras pertenecientes a dicha ventana lo cual da como resultado N ecuaciones no lineales dadas por (3.17) y (3.18). El problema de este método está en resolver el sistema de ecuaciones no lineales para estimar todos los parámetros desconocidos del modelo.

En [86], se describe el Algoritmo tipo Newton (NTA), para la estimación de los fasores de voltaje y la frecuencia del sistema, donde se supone que la tensión de entrada es un seno puro, sin embargo si no se realiza esta suposición la complejidad del método es mayor.

### 3.2.2.2. Definición de las componentes de potencia básicas propuestas por el IEEE Std.1459-2000 y descripción del algoritmo numérico de dos estados.

Las definiciones de potencia utilizadas en el algoritmo son las descritas en [32]. Para sistemas monofásicos se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$v = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) + \sqrt{2} \sum_{k \neq 1} V_k \sin(k\omega t - \alpha_k) \quad (3.19)$$

$$i = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) + \sqrt{2} \sum_{k \neq 1} I_k \sin(k\omega t - \beta_k) \quad (3.20)$$

Donde k es el orden del armónico. A través de las expresiones (3.19) y (3.20) los valores eficaces de corrientes y tensiones son:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{K \neq 1} V_K^2} = \sqrt{V_1^2 + V_H^2} \quad (3.21)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{K \neq 1} I_K^2} = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} \quad (3.22)$$

La potencia activa se define en (3.23).

$$P = P_1 + P_H \quad (3.23)$$

Donde  $P_1$  es la potencia activa fundamental definida en (3.24).

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (3.24)$$

Y  $P_H$ , es la potencia activa armónica.

$$P_H = \sum_{k \neq 1} V_k I_k \cos \theta_k \quad (3.25)$$

La potencia reactiva fundamental se define en (3.26).

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (3.26)$$

La potencia reactiva de Budeanu [11] se expresa en (3.27).

$$Q_B = Q_1 + Q_H = Q_1 + \sum_{k \neq 1} V_k I_k \sin \theta_k \quad (3.27)$$

Donde  $\theta_k$ , es el ángulo de la fase entre  $V_k$ , e  $I_k$ . Debido a la imposibilidad para cuantificar la potencia no activa armónica [32], la potencia reactiva de Budeanu no se recomienda en la práctica.

La potencia aparente se define en (3.28)

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (3.28)$$

La potencia activa fundamental se define en (3.29).

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (3.29)$$

La potencia aparente no fundamental es definida en (3.30).

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (3.30)$$

La potencia no activa puede ser definida como:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.31)$$

Para el caso trifásico se tienen las definiciones a través de los valores de tensiones y corrientes efectivas (recordar capítulo 1, pero en este caso no se tiene en cuenta la corriente del neutro)

$$V_{e,RMS} = \frac{1}{3} \sqrt{V_{ab,RMS}^2 + V_{bc,RMS}^2 + V_{ca,RMS}^2} \quad (3.32)$$

$$I_{e,RMS} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{I_{a,RMS}^2 + I_{b,RMS}^2 + I_{c,RMS}^2} \quad (3.33)$$

La potencia aparente efectiva trifásica se define en (3.34)

$$S_e = 3V_{e,RMS} I_{e,RMS} \quad (3.34)$$

Los valores efectivos de corrientes y tensiones fundamentales se definen como:

$$V_{e1,RMS} = \frac{1}{3} \sqrt{V_{ab1,RMS}^2 + V_{bc1,RMS}^2 + V_{ca1,RMS}^2} \quad (3.35)$$

$$I_{e1,RMS} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{I_{a1,RMS}^2 + I_{b1,RMS}^2 + I_{c1,RMS}^2} \quad (3.36)$$

La potencia aparente fundamental se define en (3.37).

$$S_{e1} = 3V_{e1,RMS} I_{e1,RMS} \quad (3.37)$$

Habiendo definido  $S_e$ , y  $S_{e1}$  se define la potencia aparente efectiva no fundamental (3.38).

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} \quad (3.38)$$

La potencia activa total trifásica es la suma de las potencias activas de cada una de las fases (3.39).

$$S_{e1} = 3V_{e1,RMS} I_{e1,RMS} \quad (3.39)$$

Los términos de potencia definidos anteriormente son estimados a través del algoritmo NTA de dos estados tal y como se muestra en la Figura 3.3.

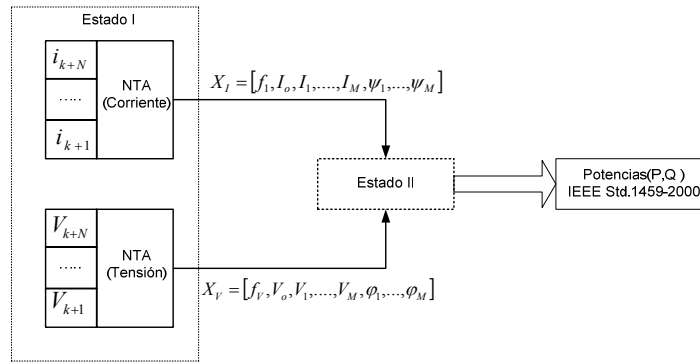


Figura 3.3 Algoritmo NTA de dos estados para un sistema monofásico.

En el primer estado del algoritmo se realiza una estimación de la frecuencia y los armónicos de las tensiones y corrientes. Como salida del primer estado se obtienen dos vectores de tensiones y corrientes ( $X_V, X_I$ ), de parámetros ya calculados (con los valores ya estimados de tensiones, corrientes, frecuencia, fases de cada uno de ellos, etc). Una vez estimados los valores de todos esos parámetros desconocidos, se obtienen los valores de las componentes de potencias en el segundo estado. Para el caso trifásico lo que se hace es utilizar el algoritmo mostrado en la Figura 3.3, para cada una de las fases.

*Comentarios a la metodología de medida propuesta por los autores [82].*

- Los autores no implementan de forma física el sistema de medidas, realizan la validación del algoritmo propuesto a nivel de simulación.
- La utilización de dicho algoritmo no exime de la utilización de la FFT ya que para determinar los vectores iniciales ( $X_V, X_I$ ), se hace un cálculo a través de una FFT.
- No se evalúa el coste computacional del algoritmo, los autores simplemente recomiendan la utilización de un microprocesador de relativa potencia, ya que se necesita una capacidad de cálculo considerable.
- En las simulaciones realizadas por los autores se observa la dependencia que tiene el algoritmo de la ventana de estimación, lo que provoca incluso la no convergencia del algoritmo en un tiempo razonable.
- Por último para el caso trifásico se necesita un algoritmo para cada una de las fases lo que supone un coste computacional mayor.

### **3.2.3. Sistema de medida basado en el dominio del tiempo para la detección del armónico fundamental de tensiones y corrientes.**

La descomposición del voltaje efectivo y la corriente efectiva en su componente fundamental y sus armónicos ( $V_{e1}, I_{e1}, y V_{eH}, I_{eH}$ ), y la evaluación de todas las cantidades de la potencia aparente según las definiciones recogidas en el IEEE Std.1459-2000 [32], requieren la separación de las componentes fundamentales de tensiones y corrientes del resto de sus componentes armónicas [87]. En el caso más general de un sistema desequilibrado y con distorsión, el contenido armónico de tensiones y corrientes se puede evaluar sin extraer las componentes fundamentales de secuencia positiva, negativa y cero de las tensiones y corrientes muestreadas. En [88], los autores proponen una estrategia para la extracción de la componente fundamental y los armónicos de los voltajes y corrientes de línea para los sistemas trifásicos a tres hilos. En [89], los autores desarrollan la estrategia presentada en [88] para la medida de las componentes fundamentales de secuencia positiva y negativa de las tensiones y corrientes de un sistema trifásico a tres hilos, sin utilizar ninguna transformación en frecuencia. En la Figura 3.4, se muestra el diagrama de bloques de la estrategia utilizada por los autores en [89], para la obtención del armónico fundamental en un sistema monofásico. La metodología utilizada para el caso trifásico (a tres y cuatro hilos), simplemente se diferencia del diagrama de bloques de la Figura 3.4, en la parte correspondiente al desplazamiento de fase (bloque “Phase Shifting - 90°”), que en el caso trifásico desaparece al no ser necesaria la transformada de Hilbert permaneciendo solamente en el caso monofásico. A continuación se analiza la extracción de las componentes fundamentales para los casos trifásico y monofásico.



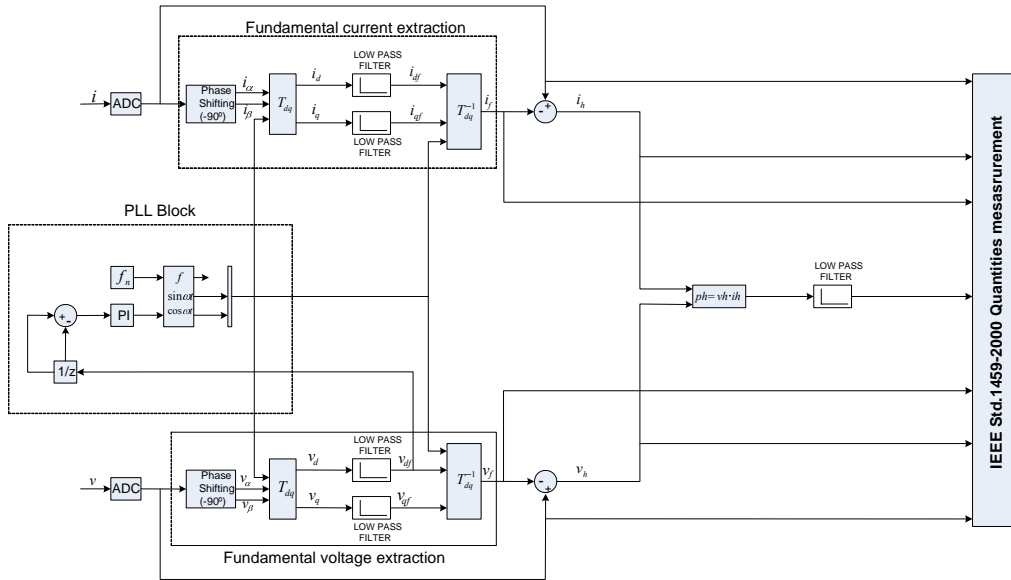


Figura 3.4 diagrama de bloques para la estrategia monofásica

### 3.2.3.1. Detección de las componentes fundamentales de secuencia positiva, negativa y cero en un sistema trifásico a cuatro hilos

La estrategia para la detección de la componente fundamental de secuencia positiva, negativa y cero está basada en las transformaciones de Park y Clarke [91]-[92]. A partir de las tensiones fase neutro ( $v_a, v_b, v_c$ ) se aplica la transformación de Clarke y se obtienen las señales transformadas ( $v_\alpha, v_\beta, v_\gamma$ ), (3.40).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [T_{\alpha\beta\gamma}] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Las señales  $v_\alpha$  y  $v_\beta$ , son las señales directa y en cuadratura correspondientes a las tensiones de entrada, formando un sistema ortogonal, mientras que  $v_\gamma$ , corresponde a la componente de secuencia cero.

La misma transformación se puede realizar para las corrientes de línea  $I_a, I_b, I_c$ , [93]-[94] por lo tanto un sistema trifásico queda perfectamente representado por un sistema ortogonal bifásico con sus componentes de tensión ( $v_\alpha, v_\beta$ ) y de corriente ( $I_\alpha, I_\beta$ ), y añadiendo la componente de secuencia cero ( $v_\gamma, I_\gamma$ ), si la hay.

Si se considera la descomposición clásica, se observa que el caso más general en el cual se tiene un sistema con distorsión armónica y desequilibrado, las componentes de secuencia positiva están representadas por  $v_\alpha$  e  $I_\alpha$ , y las componentes de secuencia negativa por  $v_\beta$ , e  $I_\beta$ , mientras que las componentes de secuencia cero solo contribuyen a los valores de  $v_0$  e  $I_0$ .

Para poder extraer las componentes de secuencia positiva, se necesita realizar una segunda transformación aplicada a las componentes ortogonales de tensiones y corrientes. Los valores instantáneos de  $v_d$  y  $v_q$  ( $i_d, i_q$ ) se obtienen a partir de los valores de  $(v_\alpha, v_\beta)$  e  $(I_\alpha, I_\beta)$ , a través de la transformación mostrada en (3.41).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_\alpha & s_\beta \\ -s_\beta & s_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t & \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = [T_{dq}] \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Los valores de  $(s_\alpha$  y  $s_\beta)$  en el sistema de ejes fijos  $(\alpha, \beta)$ , se obtienen si se sustituyen los valores de  $v_a, v_b$ , y  $v_c$ , por un sistema trifásico de tensiones equilibrado (3.42).

$$\begin{aligned} s_a &= \sin h \omega t \\ s_b &= \sin h \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ s_c &= \sin h \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3.42)$$

Donde  $h=1$  corresponde a la frecuencia fundamental, con lo que aplicando la transformación  $T_{\alpha\beta 0}$ , los valores de  $s_\alpha$  y  $s_\beta$  vienen dados por (3.43).

$$s_\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t \quad s_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \quad (s_0 = 0) \quad (3.43)$$

Después de la transformación  $[T_{dq}]$ , las componentes de la tensión  $v_d$  y  $v_q$ , las cuales corresponden con los voltajes de secuencia positiva, aparecen como señales de continua y con un filtro paso bajo son muy fáciles de extraer. Una vez obtenidos los valores de continua y aplicando las transformaciones negativas  $[T_{dq}]^{-1}$  y  $[T_{\alpha\beta 0}]^{-1}$ , se pueden obtener los valores fundamentales de secuencia positiva de las tensiones y corrientes de red.

Para la utilización de esta metodología se necesita tener un conocimiento exacto del valor de la frecuencia de las tensiones de red (para sincronizarse en la transformación  $[T_{dq}]$ ). Para llevar a cabo esto se utiliza un SPLL para generar las señales  $s_\alpha$  y  $s_\beta$  para cada una de las muestras y luego sincronizarse con la frecuencia fundamental. La estrategia del detector de fase utilizada está basada en el análisis de la señal  $v_{df}$  (ver Figura 3.4), que hay a la salida del filtro paso

bajo [88]-[90]. De hecho la señal  $v_d$ , ó  $v_q$  correspondiente a la componente fundamental de secuencia positiva de la tensiones de red, la cual es detectada a la salida del filtro paso bajo, es un valor de continua si solamente la transformación de los ejes fijos ( $\alpha, \beta$ ) a los ejes móviles ( $dq$ ), está correctamente sincronizada con la frecuencia del voltaje fundamental. La frecuencia para la generación de las coordenadas giratorias, se pone inicialmente al valor de la frecuencia de red (50Hz) y se realiza la transformación, si el valor de la señal que hay a la salida del filtro paso bajo  $v_{df}$ , no es un valor constante el sistema a través de la realimentación actúa de hasta que se consiga que dicha señal sea un valor constante, cuando esto sucede significa que el sistema está sincronizado con la frecuencia fundamental de las tensiones de red.

Las componentes fundamentales de secuencia negativa pueden ser extraídas aplicando (3.40), con respecto a un sistema ortogonal ( $s_{\alpha}^{-}$  y  $s_{\beta}^{-}$ ), sincronizado a la frecuencia fundamental pero en sentido negativo. En este caso el sistema de coordenadas fijo ( $s_{\alpha}^{-}$  y  $s_{\beta}^{-}$ ), se obtiene si la transformación  $T_{\alpha\beta 0}$ , se aplica a un sistema trifásico equilibrado de secuencia negativa (3.44).

$$\begin{aligned} s_{\alpha}^{-} &= \sin h\omega t \\ s_{\beta}^{-} &= \sin h\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ s_{\gamma}^{-} &= \sin h\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Donde, para la componente fundamental de secuencia negativa  $h=1$ , con lo que aplicando la transformación (3.41), se obtienen los sistemas ( $s_{\alpha}^{-}$  y  $s_{\beta}^{-}$ )(3.45).

$$s_{\alpha}^{-} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t \quad s_{\beta}^{-} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \quad (s_0^{-} = 0) \quad (3.45)$$

Después de la transformación a coordenadas giratorias las componentes de la señal ( $v_{\alpha}^{-}$  y  $v_{\beta}^{-}$ ), correspondientes a los voltajes fundamentales de secuencia negativa son vistos como valores de continua y pueden ser fácilmente obtenidos a través de un filtro paso bajo. Igual que en el caso anterior realizando las transformaciones negativas se obtienen los valores de las tensiones fundamentales de secuencia negativa. De igual forma se haría para las corrientes fundamentales de secuencia negativa.

La obtención de la componente fundamental de secuencia cero ( $v_0$ ,  $i_0$ ), se realiza a través de (3.41), si se crea un sistema en cuadratura ( $v_{0\alpha}$ ,  $v_{0\beta}$ ). Para realizar esto lo que se hace es desplazar la componente cero un cuarto del periodo a través de la transformada de Hilbert (3.46).

$$v_{0\beta}(n) = \frac{v_{o\alpha}(n-1) - v_{o\alpha}(n) \cos(\Omega_0)}{\sin \Omega_0} \quad (3.46)$$

Donde,  $v_{o\alpha}(n)$  y  $v_{o\beta}(n)$ , son las  $n$  muestras de la componente de tensión de secuencia cero obtenidas de (3.40) y del voltaje desplazado  $\Omega_0 = 2\pi f_0/f_s$ , donde  $f_s$ , es la frecuencia de muestreo.

Después de esta operación, se aplica la conversión  $[T_{dq}]$  a las componentes  $v_{o\alpha}$  y  $v_{o\beta}$ , las cuales están referidas a un sistema de referencia fijo  $s_\alpha$  y  $s_\beta$ , girando a la frecuencia fundamental. Las componentes  $v_{od}$  y  $v_{oq}$ , correspondientes a la componente fundamental de secuencia cero son señales de continua y se pueden extraer igual que en los casos anteriores.

Cuando se tienen los valores fundamentales de secuencia positiva, negativa y cero, de las tensiones, el contenido armónico total de las tensiones  $v_h$  se puede obtener fácilmente, restando los valores fundamentales de los valores muestreados. De igual forma se debe proceder para la corriente.

### 3.2.3.2. Detección de las componentes fundamentales de secuencia positiva y negativa en un sistema trifásico a tres hilos con tensiones equilibradas.

En el caso particular de un sistema trifásico equilibrado a tres hilos, la componente de secuencia cero de la corriente es siempre nula, y como las tensiones están equilibradas, la componente de secuencia cero de las tensiones también es nula. Cuando las componentes de secuencia cero no están presentes, el sistema trifásico se puede representar solamente por un sistema ortogonal de dos componentes  $(v_\alpha, v_\beta)$  e  $(i_\alpha, i_\beta)$ , con lo que la transformación (3.40), se convierte en (3.47).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = [T_{\alpha\beta}] \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Para la extracción de las componentes de secuencia positiva y negativa se aplica la transformación (3.41) a la frecuencia fundamental, a las componentes  $(s_\alpha, s_\beta)$  y  $(s_\alpha^-$  y  $s_\beta^-)$  de los sistemas ortogonales de voltajes y corrientes respectivamente. Después de la transformación a ejes móviles las componentes de secuencia positiva y negativa son vistas como componentes continuas (igual que en los casos anteriores), y se pueden extraer dichos valores a través de un filtro paso bajo. Aplicando las transformaciones inversas se obtienen los

valores de las secuencias positivas y negativas de tensiones y corrientes y restándolas de los valores muestreados de dichas señales se obtienen  $v_h$  (contenido armónico de las tensiones), e  $I_h$  (contenido armónico de las corrientes).

### 3.2.3.3. Detección de la componente fundamental en un sistema monofásico.

Para el caso monofásico la forma de actuar es la misma que para la extracción de la componente fundamental de secuencia cero. Utilizando la transformación (3.41), se obtiene un sistema ortogonal de dos componentes ( $v_{\alpha single}, v_{\beta single}$ ) ó ( $i_{\alpha single}, i_{\beta single}$ ). Para conseguir esto lo que se hace es elegir  $v_{\alpha single}$  el voltaje muestreado, y  $v_{\beta single}$  el voltaje muestreado desplazado un cuarto de periodo (del fundamental), a través de la transformada de Hilbert (3.48).

$$v_{\beta single}(n) = \frac{v_{\alpha single}(n-1) - v_{\alpha single}(n) \cos(\Omega_0)}{\sin \Omega_0} \quad (3.48)$$

Donde  $v_{\alpha single}(n)$  y  $v_{\beta single}(n)$ , son los voltajes muestreado y el voltaje muestreado desplazado respectivamente.  $\Omega_0 = 2\pi f_0/f_s$ , donde  $f_s$ , es la frecuencia de muestreo.

Como en los casos anteriores lo que se realiza a continuación es aplicar la transformación (3.41) a las componentes  $v_{\alpha single}$  y  $v_{\beta single}$ , a la frecuencia fundamental. Tras la transformación anterior las componentes fundamentales son vistas como valores continuos y se pueden obtener mediante un filtro paso bajo. Aplicando la transformada inversa se obtiene el valor de la componente fundamental de la tensión.

### 3.2.3.4. Medida de las magnitudes en formato IEEE Std.1459-2000.

Aplicando la metodología propuesta en [89] (y descrita en los párrafos anteriores), se obtienen los valores de las componentes fundamentales de tensiones y corrientes tanto de secuencia positiva como de secuencia negativa y utilizando las definiciones recogidas en [32], se obtienen los valores de las magnitudes definidas en el IEEE Std.1459-2000. A partir de los valores de las secuencias positivas de tensiones y corrientes se pueden calcular los valores de los términos  $P_1^+, Q_1^+, S_1^+$  y  $P_{f_1}^+$ . La misma metodología se puede aplicar para las componentes de secuencia negativa y secuencia cero. Una vez separados los valores de las componentes fundamentales del resto de las componentes armónicas, se pueden calcular los valores de los voltajes y corrientes efectivos en sus componentes fundamentales y sus armónicos. ( $V_{e1}, I_{e1}, V_{eH}, I_{eH}$ ), además de poder calcular el resto de los términos propuestos en el Std.1459-2000.

*Comentarios a la metodología de medida propuesta por los autores [89].*

- Los autores implementan el sistema de medidas solamente para el caso monofásico dejando sin análisis los sistemas trifásicos (tres y cuatro hilos), en presencia de armónicos y desequilibrios.
- Para la extracción de las componentes de secuencia negativa (tensiones y corrientes), se necesita duplicar toda la metodología de la secuencia positiva para la extracción de las componentes fundamentales, pero en este caso sincronizada con la secuencia negativa, con lo que los recursos de computación del sistema de medidas se elevan considerablemente.

### **3.3. Normativa sobre los equipos de medidas comerciales.**

Aunque como se ha comentado los fabricantes de equipos de medidas introducen en sus equipos cada vez más funciones nuevas para la medida de magnitudes eléctricas bajo condiciones no senoidales la normativa que debe cumplir cualquier equipo de medidas comercial no contempla la medida de otras magnitudes eléctricas que no sean las correspondientes a un sistema de tensiones y corrientes senoidales, y equilibradas en el caso trifásico.

En el análisis presentado sobre la normativa que deben cumplir los equipos de medidas de las magnitudes eléctricas (sobre todo los que se utilizan como elementos de tarificación de energía), se definen cuales deben ser los modos de funcionamiento bajo condiciones de corrientes y tensiones senoidales y se define el error máximo que puede cometer dicho equipo en el supuesto caso de que no se cumpla dicha condición.

La norma UNE-EN 62052 -11 [64] “Equipos de medida de la energía eléctrica (ca)” en su parte 11, correspondiente a los equipos de medidas, define que las normas correspondientes a potencias reactivas son sólo aplicables a intensidades y tensiones sinusoidales que contienen únicamente la frecuencia fundamental. La misma norma define la potencia reactiva como el producto del valor eficaz de la corriente por la tensión, por el seno del ángulo de fase entre ambas, y define de esta forma que es lo que debe medir un equipo comercial en lo que se refiere a la potencia reactiva. A la vista de lo que expresa la norma queda claro que cualquier equipo de medidas comercial no debe tener en cuenta la distorsión armónica o el desequilibrio presente en las tensiones y corrientes que se utilice para realizar los cálculos necesarios en la medida de la energía reactiva, ya que en la propia definición hecha por la normativa sobre la energía reactiva se supone que las tensiones y corrientes son puramente senoidales a la frecuencia fundamental.

Lo expresado por la normativa supone que los equipos de medida de energía reactiva sólo deben operar correctamente con corrientes y tensiones senoidales no habiendo exigencias por parte de la normativa en los demás casos. Este hecho provoca que los medidores de energía reactiva comerciales presenten un mal funcionamiento [69] (medida errónea) en sistemas donde no se cumplan las condiciones establecidas en la norma UNE-EN 62052-11.

Con respecto a los distintos valores medidos por los equipos de medidas se ha consultado la bibliografía técnica y en [69], los autores presentan una comparativa entre equipos de medidas estáticos de energía reactiva basados en el IEEE Std 100, en sistemas con elevada distorsión armónica. Los autores tras la comparativa llevada a cabo llegan a la conclusión de que en función del algoritmo implementado en el equipo de medidas cada dispositivo proporciona una medida distinta bajo las mismas condiciones.

En [95], los autores realizan una comparativa similar a la hecha en [69], pero además realizan un análisis de las distintas definiciones de la potencia reactiva.

En [96], el autor realiza una comparación entre medidores de energía activa y reactiva basados en las definiciones clásicas bajo condiciones no senoidales y como afectarían dichas medidas a la factura eléctrica. A continuación extiende el análisis a la nueva teoría del IEEE Std. 1459-2000.

En el caso de la potencia activa las definiciones hechas por la normativa son las recogidas en la norma UNE-EN 62052-11 y para los equipos de medidas de energía activa las normas que lo regulan son la UNE-EN 62053-21, [66] y la UNE-EN 62053-22 [65].

La norma UNE-EN 62053-21 “Equipos de medida de la energía eléctrica (ca)” en su parte 21 correspondiente a “contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)” define cuales deben ser las condiciones de referencia a la hora de ensayar (verificación de su funcionamiento normal) los contadores estáticos de energía activa, las cuales se muestran en la Tabla 3-1

<i>Magnitudes de influencia</i>	<i>Valores de referencia</i>	<i>Tolerancias admisibles para Contadores de clase</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>
Temperatura ambiente	Temperatura de referencia o, en su ausencia 23°C	± 2°C	± 2°C
Tensión	Tensión de referencia	± 1,0%	± 1,0%
Frecuencia	Frecuencia de referencia	±0,3%	±0,5%
Orden de fases	L1-L2-L3	-	-
Desequilibrio de tensiones	Todas las fases conectadas	-	-
Forma de onda (Componente Continua, armónicos pares e impares y subarmónicos)	Tensiones e intensidades sinusoidales	Factor de distorsión inferior a:	
		2%	3%
Inducción magnética continua de origen externo	Igual a cero	-	-
Inducción magnética de origen externo a la frecuencia de referencia	Inducción magnética igual a cero	Valor de inducción que causa una variación de error no mayor de:	
		± 0,2%	± 0,3%
		En todo caso debería ser menor que 0,05 mT	
Campos electromagnéticos de RF, de 30kHz a 2GHz	Igual a cero	< 1 V/m	< 1 V/m
Funcionamiento de accesorios	Sin accionar los accesorios	-	-
Perturbaciones conducidas, inducidas por campos de radiofrecuencia, de 150kHz a 80 Mhz	Igual a cero	< 1V	< 1V

Tabla 3-1 Condiciones de referencia para los ensayos de los contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)

En la Tabla 3-1 se observa en el cuadro correspondiente a la “Forma de onda (componente continua, armónicos pares e impares y subarmónicos)” que los valores de referencia corresponden a tensiones e intensidades completamente sinusoidales cuyo factor de distorsión armónica debe ser inferior al 2% y 3% para los medidores de clase 1 y 2 respectivamente. Con la condición impuesta a tensiones y corrientes para llevar a cabo los ensayos lo que se está exigiendo en la normativa es el correcto funcionamiento del medidor bajo estas condiciones de tensiones y corrientes en las cuales la distorsión armónica tiene un valor muy bajo (pudiendo considerar tensiones y corrientes casi como senoides puras).



<i>Magnitud de influencia</i>	<i>Valor de intensidad (a cargas equilibradas salvo indicación contraria) para contadores de conexión</i>		<i>Factor de potencia</i>	<i>Coefficiente medio de temperatura %/K para contadores de clase</i>	
	<i>Directa</i>	<i>A través de transformadores</i>		<i>1</i>	<i>2</i>
Variación de la temperatura ambiente	0,1 $I_b \leq I \leq I_{max}$ 0,2 $I_b \leq I \leq I_{max}$	0,05 $I_n \leq I \leq I_{max}$ 0,1 $I_n \leq I \leq I_{max}$	1 0,5 inductivo	0,05 0,07	0,10 0,15
				<i>Límites de las variaciones del error en % para contadores clase</i>	
				<i>1</i>	<i>2</i>
Variación de la tensión $\pm 10\%$	0,05 $I_b \leq I \leq I_{max}$ 0,1 $I_b \leq I \leq I_{max}$	0,02 $I_n \leq I \leq I_{max}$ 0,05 $I_n \leq I \leq I_{max}$	1 0,5 inductivo	0,7 1,0	1,0 1,5
Variación de la frecuencia $\pm 2\%$	0,05 $I_b \leq I \leq I_{max}$ 0,1 $I_b \leq I \leq I_{max}$	0,02 $I_n \leq I \leq I_{max}$ 0,05 $I_n \leq I \leq I_{max}$	1 0,5 inductivo	0,5 0,7	0,8 1,0
Orden de fases inversa	0,1 $I_b$	0,1 $I_n$	1	1,5	1,5
Desequilibrio de tensiones	$I_b$	$I_n$	1	2,0	4,0
Armónicos en los circuitos de intensidad y tensión	0,5 $I_{max}$	0,5 $I_{max}$	1	0,8	1,0
Componente continua y armónicos pares en el circuito de intensidad c.a	$\frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$	-	1	3,0	6,0
Armónicos impares en el circuito de intensidad c.a	0,5 $I_b$	0,5 $I_n$	1	3,0	6,0
Subarmónicos en el circuito de intensidad c.a	0,5 $I_b$	0,5 $I_n$	1	3,0	6,0
Inducción magnética continua de origen externo	$I_b$	$I_n$	1	2,0	3,0
Inducción magnética de origen externo 0,5mT	$I_b$	$I_n$	1	2,0	3,0
Campos electromagnéticos de RF	$I_b$	$I_n$	1	2,0	3,0
Funcionamiento de los accesorios	0,05 $I_b$	0,05 $I_n$	1	0,5	1,0
Perturbaciones conducidas, inducidas por campos RF	$I_b$	$I_n$	1	2,0	3,0
Transitorios eléctricos rápidos en ráfagas	$I_b$	$I_n$	1	4,0	6,0
Inmunidad a las ondas oscilatorias amortiguadas	-	$I_n$	1	2,0	3,0

Tabla 3-2 límites de los errores debidos a las magnitudes de influencia de los contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)

Si los valores de distorsión armónica son superiores a los valores definidos en la Tabla 3-1 lo que se permite es una variación en el error de la medida mostrada por el medidor tal y como se puede ver en la Tabla 3-2

<b>MAGNITUDES MEDIDAS.</b>	
<b>Potencia media</b>	$WATT = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n I_n$ <p>Donde:                      N= numero de muestras                      V<sub>n</sub>= Voltaje de la muestra n                      I<sub>n</sub>= Corriente de la muestra n.</p>
<b>Potencia Aparente.</b>	$VA = V_{RMS} * I_{RMS}$
<b>Potencia Aparente Fundamental</b>	$VA_{fund} = V_{fund} I_{fund}$
<b>Potencia Fundamental</b>	$WATT_{fund} = VA_{fund} \cos\theta$ <p>Donde:  <math>\theta = \theta_v - \theta_i</math>  <math>\theta_v</math>= Angulo de la tensión de fase fundamental  <math>\theta_i</math>= Angulo de la corriente de fase fundamental.</p>
<b>Potencia reactiva</b>	$VAR_{fund} = VA_{fund} \sin \theta$ <p>Donde:  <math>\theta = \theta_v - \theta_i</math>  <math>\theta_v</math>= Angulo de la tensión de fase  <math>\theta_i</math>= Angulo de la corriente de fase.</p>
<b>VALOR TOTAL DE LAS MAGNITUDES MEDIDAS.</b>	
<b>Potencia total</b>	$WATT_{Tot} = WATT_A + WATT_B + WATT_C$
<b>Potencia Fundamental Total</b>	$WATT_{Tot Fund} = WATT_{A Fund} + WATT_{B Fund} + WATT_{C Fund}$
<b>Potencia Reactiva Fundamental Total</b>	$VAR_{Tot Fund} = VAR_{A Fund} + VAR_{B Fund} + VAR_{C Fund}$

Tabla 3-3 Ecuaciones implementadas por el Power Guia 440s para la medidas de las distintas magnitudes eléctricas

La norma UNE-EN 62053-22 correspondiente a “equipos de medida de la energía eléctrica (c.a)” en su parte 22 correspondiente a “contadores estáticos de energía activa (clases 0.2s y 0.5s)” es homologa a la norma UNE-EN 62053-21 pero con unas condiciones de tolerancias de errores más restrictivas que ésta última.

Para comparar los valores medidos por el equipo de medidas desarrollado en esta tesis se ha utilizado el equipo de medidas comercial “Power Guia 440s” de la casa comercial DRANETZ-BMI donde las ecuaciones que implementa para medir las distintas magnitudes eléctricas son las mostradas en la Tabla 3-3. En el Anexo I se muestran las características completas de este equipo de medidas.

A la vista de las ecuaciones mostradas en la Tabla 3-3 se observa que para el cálculo de la potencia activa y reactiva en el caso monofásico el equipo cumple con lo exigido en la normativa ya que se utilizan los valores fundamentales de tensiones y corrientes para el cálculo de dichas potencias. Para el caso trifásico el cálculo de los valores de potencias (activa y reactiva) se realiza como suma algebraica de los valores de cada una de las fases tal y como recoge la normativa UNE-EN 62052-11. Las ecuaciones para el cálculo de las potencias implementadas por el equipo de medidas comercial, sigue las recomendaciones del IEEE Std 100 tal y como se puede observar en el apartado 1.1.3. El IEEE Std 100 sólo tiene en cuenta el fenómeno de distorsión (también cuantificado por el equipo de medidas comercial), dejando sin cuantificar el resto de fenómenos que se puedan dar en el sistema (desequilibrio, etc.). Dado que el equipo de medidas desarrollado en esta tesis sigue el IEEE Std 1459 sí es capaz de identificar todos los fenómenos presentes en el sistema. En las comparaciones llevadas a cabo con el sistema de medidas comercial y el desarrollado en la presente tesis se pueden observar las discrepancias entre los dos equipos en cada uno de los ensayos llevados a cabo tanto en las simulaciones teóricas (apartado 5.3), como en los resultados experimentales (capítulo 7).

### **3.4. Conclusiones**

Tras lo expuesto y desarrollado en el presente capítulo se destacan las siguientes conclusiones:

- Los sistemas de medidas basados en el IEEE Std.1459 propuestos en la bibliografía consultada, no se implementan de forma física los sistemas de medidas, para el caso de un sistema trifásico a cuatro hilos.
- La utilización de la transformada Wavelet permite identificar perturbaciones no estacionarias para la obtención de la componente fundamental de las tensiones y corrientes presentes en el pcc.
- El algoritmo de Newton permite calcular las componentes fundamentales de tensiones y corrientes presentes en el pcc, cuando la frecuencia de red presenta variaciones, pero no elimina la utilización de la FFT de dicho cálculo.
- La mayor parte de los equipos de medidas comerciales siguen las recomendaciones del IEEE Std.100 e implementan las ecuaciones definidas en dicho estándar para la medida de las magnitudes de potencia activa, reactiva y factor de potencia.

- La normativa actual sobre los sistemas de medidas está basada en el IEEE Std.100 y define el funcionamiento de dichos equipos para las medidas de potencia eléctrica (activa, reactiva y factor de potencia), bajo condiciones senoidales de corrientes y tensiones (distorsión armónica inferior al 3%)
- Cuando no se dan las condiciones de tensiones y corrientes senoidales la normativa define el error máximo permitido por el equipo cuando se está midiendo potencia activa, sin embargo no se contempla el error en el caso de la potencia reactiva provocando que los dispositivos de medidas comerciales muestren lecturas distintas en las mismas situaciones dependiendo del algoritmo de medidas que integren.
- Las situaciones que se puedan dar en la red eléctrica (desequilibrios, distorsiones armónicas elevadas, etc.), quedan al margen de la normativa actual y pueden provocar que las medidas proporcionadas por los equipos de medidas comerciales no sean correctas, por otro lado los equipos de medidas comerciales proporcionan las magnitudes eléctricas (potencias activas y reactivas, factores de potencia, etc.) definidas en el IEEE Std.100, integrando en algunos equipos de gama alta la posibilidad de medir otras magnitudes no contempladas en dicho estándar ni tampoco en la normativa vigente.
- Debido a que la normativa no establece criterios apropiados para desarrollar equipos de medida adecuados a las necesidades actuales, se hace necesario un cambio en la normativa de medidas. El IEEE Std.1459-2000 si cumple con todo lo necesario para la cuantificación eléctrica necesaria a la hora de implementar sistemas de medidas, y en el campo de la compensación permite obtener una mayor eficiencia del sistema eléctrico.

# Capítulo 4

## 4. Análisis del sistema de medidas propuesto.

En el presente capítulo se detalla el análisis y el diseño del sistema de medidas propuesto (sistema de sincronización + cálculo de medidas) cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 4.1. Se trata de un sistema de medidas estático basado en un DSP (Procesador Digital de Señales).

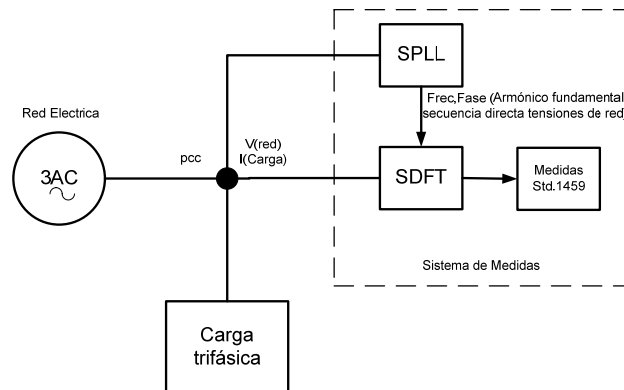


Figura 4.1 Diagrama de bloques general del sistema de medidas propuesto.

En primer lugar se describe la parte del sistema de medidas encargada de realizar los cálculos necesarios para cuantificar todos los términos definidos en el IEEE Std. 1459. Se describe el proceso seguido por el sistema de medidas, en donde a partir de los datos muestreados de tensiones y corrientes presentes en el pcc se realizan todos los cálculos necesarios para cuantificar los términos definidos en el IEEE Std. 1459.

En segundo lugar se describe el sistema de sincronización con la red (SOGI+DSC+SPLL), necesario para proporcionar la frecuencia y la fase del armónico fundamental de secuencia positiva, al sistema de medidas encargado de realizar los cálculos. Se comienza por el diseño del filtro de red SOGI (Second Order Generalized Integrator), utilizado para la obtención del armónico fundamental de las tensiones de red, a continuación se describe el método de la DSC (Delayed Signal Cancellation) para la obtención de la secuencia positiva de las tensiones de red y finalmente el diseño del SPLL (Software Phase Locked Loop), que como se ha comentado proporciona la frecuencia y la fase de la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red. En la última parte del capítulo se describe el método de la ventana deslizante SDFT (Sliding Discrete Fourier Transformer) [97]-[98], para la obtención de los valores de los armónicos fundamentales de las tensiones y corrientes de red.

En la Figura 4.1 se observa que el sistema de medidas toma los valores de tensiones y corrientes presentes en el pcc y a partir de éstos y siguiendo las definiciones del IEEE Std. 1459, cuantifica todos los términos de potencia definidos en dicho estándar.

#### **4.1. Funcionamiento del sistema digital de medidas.**

Para llevar a cabo las medidas propuestas por el IEEE Std.1459, y tras un análisis de los sistemas de medidas existentes se realiza un sistema cuyo diagrama de bloques es el mostrado en la Figura 4.2. Tal y como se puede ver se obtienen del pcc los valores de tensiones de las fases  $V_{As}$ ,  $V_{Bs}$ ,  $V_{Cs}$  y los valores de las corrientes  $I_{As}$ ,  $I_{Bs}$ ,  $I_{Cs}$  e  $I_{Ns}$ , a partir de los cuales se llevarán a cabo las medidas propuestas por el IEEE Std.1459. El sistema de sincronización es el encargado de proporcionar a la SDFT la fase de la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red, para que ésta calcule los valores de los armónicos fundamentales de las tensiones y corrientes presentes en el pcc a partir de los cuales se llevarán a cabo las medidas.

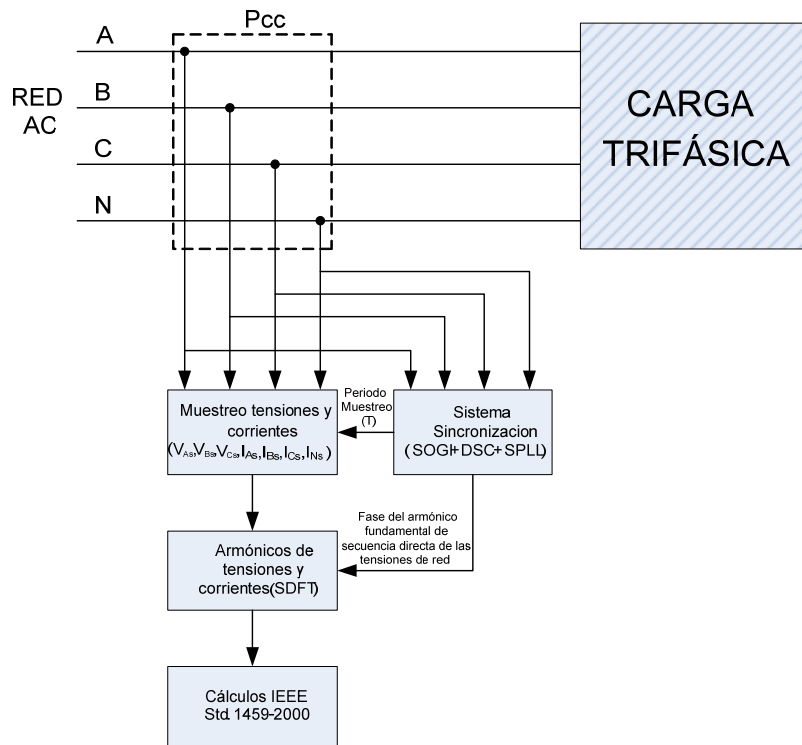


Figura 4.2 Diagrama de bloques del sistema de medidas propuesto.

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de bloques del sistema de medidas propuesto en el cual se ha desarrollado la parte de cálculos del IEEE Std. 1459 mostrado en la Figura 4.2. Se observan también todos los algoritmos que se ejecutan dentro del propio DSP (Digital Signal Processor), para poder llevar a cabo dichas medidas.

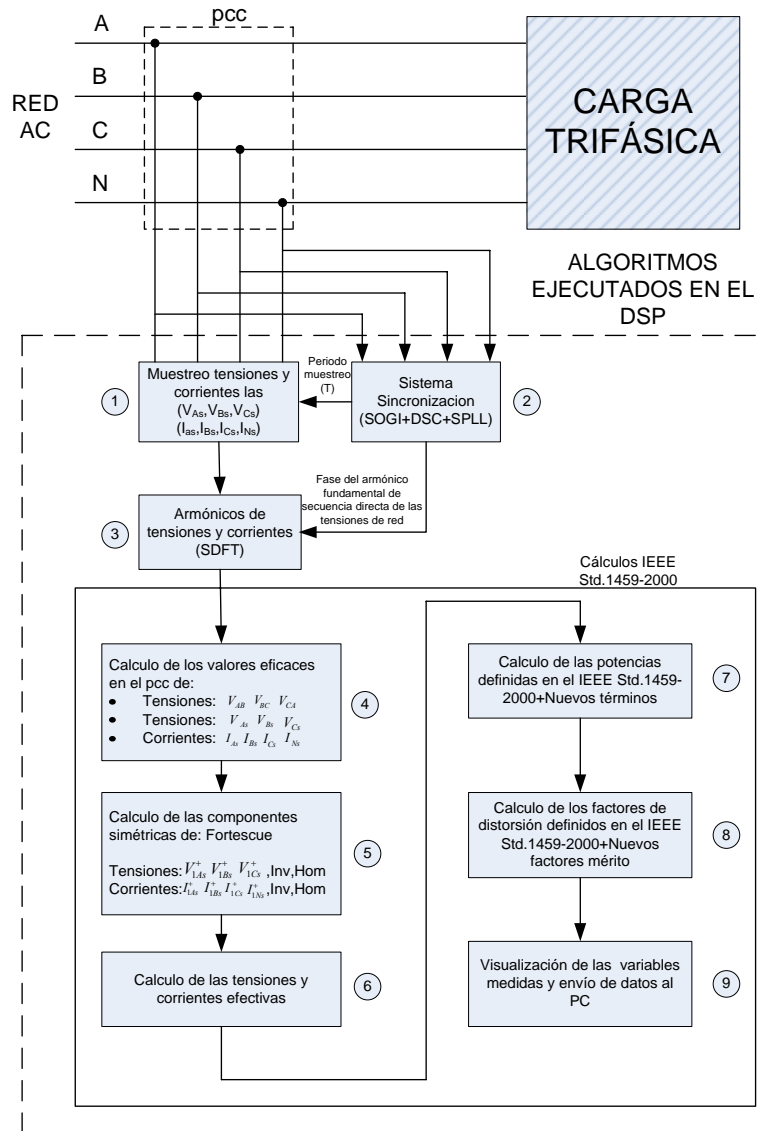


Figura 4.3 Diagrama de bloques de los algoritmos ejecutados en el DSP.

A continuación se describe la función de los bloques de la Figura 4.3 y cuál es el proceso de ejecución para realizar los cálculos.

1. En primer lugar se realiza la adquisición de las tensiones y corrientes presentes en el pcc. Se adquieren 128 muestras para cada una de las señales durante un periodo de red, lo que corresponde a una frecuencia de muestreo de 6,4kHz. La utilización de esta frecuencia de



muestreo supone poder reconstruir hasta el armónico 64 de la frecuencia de red (50Hz) con lo que el sistema de medidas cumpliría con los requerimientos definidos en la normativa UNE-EN 16000-4-7 [99], para los aparatos de medidas de armónicos e interarmónicos en las redes de suministro eléctrico la cual fija la necesidad de medir hasta el armónico de orden 50.

Las muestras que se van obteniendo se almacenan en un buffer de 128 posiciones (uno para cada tensión y corriente) disponiendo de esta forma de las muestras de un ciclo completo de cada señal.

El sistema de muestreo se ejecuta de forma continua dentro del DSP, y la frecuencia de muestreo es ajustada también de forma continua por el sistema de sincronización para que, aunque la frecuencia de red sufra una variación, se sigan teniendo 128 muestras por periodo tal y como se muestra en la Figura 4.4. Hay que tener en cuenta que la frecuencia de muestreo  $F$ , se actualiza en el ciclo siguiente al que se ha detectado la variación de la frecuencia. Así si se analiza la Figura 4.4, se observa que cuando se produce la primera variación de la frecuencia, se mantiene una frecuencia de muestreo  $F$ , y es en el segundo ciclo de periodo  $T'$  cuando se ha variado la frecuencia a  $F'$ . De la misma forma si en el siguiente ciclo el periodo vuelve a ser  $T$  la frecuencia de muestreo siguen siendo  $F'$ , y no es hasta el segundo ciclo de  $T'$  donde la frecuencia de muestreo vuelve a ser actualizada ( $F$ ).

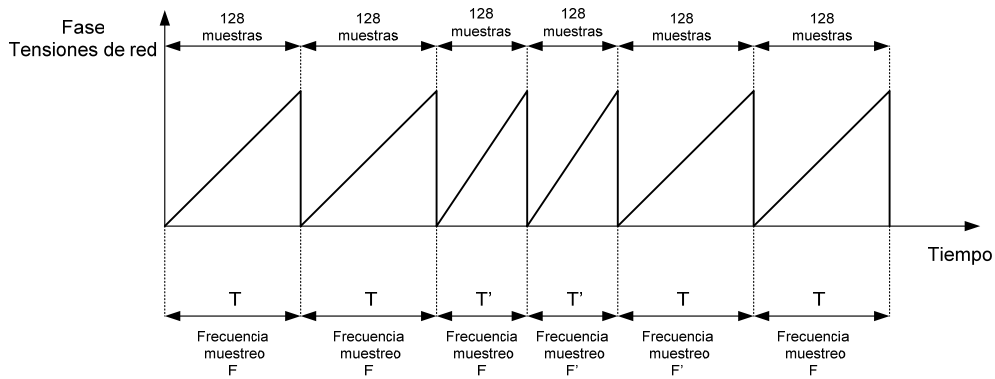


Figura 4.4 Actualización de la frecuencia de muestreo de las señales del pcc a través del sistema de sincronización

2. Para el correcto funcionamiento y cálculo de las potencias en formato IEEE Std.1459, se propone en esta tesis la utilización de un sistema de sincronización para sincronizarse con la componente fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red. El sistema de sincronización proporciona la frecuencia y fase de la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red, a partir de las muestras de las tres tensiones presentes en el pcc. La frecuencia proporcionada por el sistema de sincronización es utilizada por el sistema de adquisición de muestras tal y como se ha explicado en el apartado anterior para mantener

constante el número de muestras dentro de los buffers (128 muestras), y la fase proporcionada es utilizada por el sistema SDFT, para determinar cuál es la fase de los armónicos de tensiones y corrientes de red calculados. Hay que tener presente que cuando se calcula la SDFT (Sliding Discrete Fourier Transformer) de un número de muestras, la fase siempre se calcula con respecto a la primera de las muestras, por lo que es fundamental conocer exactamente la fase de dicha muestra para que los resultados de la SDFT no sean erróneos.

3. Una vez que se han llenado los distintos buffers de las corrientes y tensiones el siguiente paso consiste en ejecutar la SDFT (Sliding Discrete Fourier Transformer) para cada uno de ellos y obtener de esta forma los armónicos fundamentales de tensiones y corrientes necesarios para llevar a cabo las medidas según el IEEE Std.1459.

En la Figura 4.5, se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento de de la SDFT, en donde se observa que a partir de los valores de tensiones y corrientes que se tiene en cada uno de los buffers, se realiza el cálculo de los armónicos fundamentales de tensiones y corrientes muestradas.

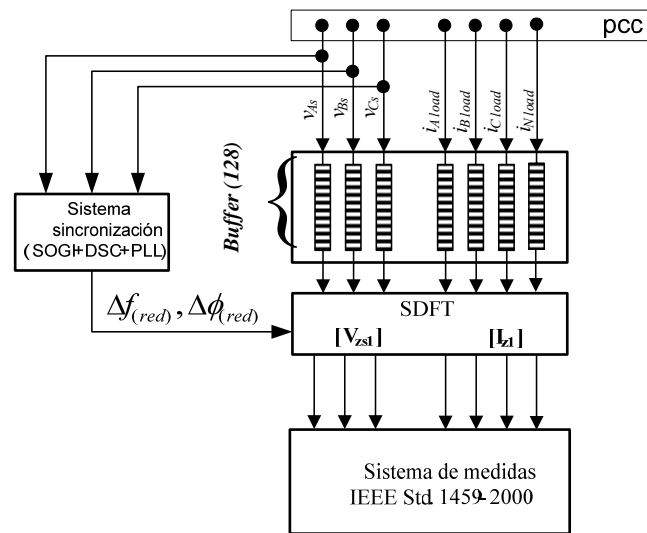


Figura 4.5 Diagrama de bloques del sistema de medidas con SDFT.

El método de la SDFT realiza la DFT de N puntos dentro de una ventana que se va desplazando muestra a muestra. Cada nueva DFT se calcula directamente a partir de los resultados de la anterior DFT, con el consiguiente ahorro en el número de operaciones.

El funcionamiento de la SDFT se basa en una de las propiedades de la DFT, que establece que si la DFT de una secuencia finita de puntos es  $X_k$ , entonces la DFT de dicha secuencia, circularmente desplazada una muestra, es  $X_k e^{j2\pi k/N}$ . Por lo tanto las componentes espectrales

de una secuencia circularmente desplazada son las componentes espectrales originales (sin desplazar) multiplicadas por  $e^{j2\pi k/N}$ , siendo  $k$ , la componente frecuencial a analizar.

Esto se expresa de la siguiente forma: dada una secuencia  $\{x_i\}$ , se aplica la DFT para calcular la componente frecuencial  $k$ , de las  $N$  primeras muestras de dicha frecuencia:

$$X_k(1) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{-nK} = x(0)W_N^0 + x(1)W_N^{-k} + x(2)W_N^{-2k} + \dots + x(N-1)W_N^{-(N-1)k} \quad (4.1)$$

Si se mueve la ventana una muestra y se aplica nuevamente la DFT se tiene que:

$$X_k(2) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{n+1} W_N^{-nK} = x(1)W_N^0 + x(2)W_N^{-k} + x(3)W_N^{-2k} + \dots + x(N)W_N^{-(N-1)k} \quad (4.2)$$

Multiplicando (4.1) por  $e^{j2\pi k/N} = W_N^k$  se tiene

$$\begin{aligned} X_k(1)W_N^k &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n W_N^{-nK} W_N^k = x(0)W_N^0 W_N^k + x(1)W_N^{-k} W_N^k + x(2)W_N^{-2k} W_N^k + \dots + x(N-1)W_N^{-(N-1)k} W_N^k \\ &= x(0)W_N^k + x(1)W_N^0 + x(2)W_N^{-k} + \dots + x(N-1)W_N^{-Nk} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Restando las expresiones (4.2) y (4.3) se tiene:

$$X_k(2) - X_k(1)W_N^k = x(N)W_N^{-(N-1)k} - x(0)W_N^k \quad (4.4)$$

Y por tanto:

$$X_k(2) = X_k(1)W_N^k + x(N)W_N^{-(N-1)k} - x(0)W_N^k \quad (4.5)$$

Si se generaliza el cálculo de la frecuencia  $k$  en el instante  $q$

$$X_k(q) = [X_k(q-1) - x(q-N)]W_N^k + x(q)W_N^{-(N-1)k} \quad (4.6)$$

Por tanto:

$$X_k(q) = [X_k(q-1) - x(q-N)]e^{j2\pi k/N} + x(q)e^{-j2\pi k(N-1)/N} \quad (4.7)$$

Siendo  $X_k(q)$ , la nueva componente frecuencial y  $X_k(q-1)$ , la componente frecuencial anterior.

La nueva componente frecuencial  $X_k(q)$  se calcula realizando un desplazamiento de fase de la anterior componente  $X_k(q-1)$  y añadiendo la nueva muestra  $x(q)$ . Para calcular la nueva componente frecuencial se requiere dos multiplicaciones complejas y dos sumas (en lugar de las  $2N$  sumas de la DFT). La ecuación (4.7) conduce a una estructura de filtro IIR seguido de un resonador complejo (si se quiere computar más de una componente frecuencial debe de añadirse resonadores anidados) tal y como se muestra en la Figura 4.6.

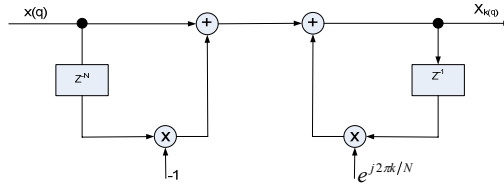


Figura 4.6 Estructura del filtro (IIR) de la SDFT para una componente.

4. El siguiente paso en la realización de las medidas consiste en calcular los valores eficaces de tensiones y corrientes presentes en el pcc, a partir de las muestras de dichas señales. Para obtener los valores eficaces se utiliza la ecuación (4.8), aplicada a las muestras almacenadas en los distintos buffers.

$$X(k) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n))^2} \quad (4.8)$$

5. A continuación se realiza el cálculo de las componentes simétricas de las corrientes y tensiones del pcc aplicando el teorema de Fortescue [37], para las componentes fundamentales de cada una de ellas a través de las ecuaciones definidas en (4.9).

$$\begin{aligned} [X_1^+(k)] &= \frac{1}{3} ([X_{A1}(k)] + a \cdot [X_{B1}(k)] + a^2 \cdot [X_{C1}(k)]) \\ [X_1^-(k)] &= \frac{1}{3} ([X_{A1}(k)] + a^2 \cdot [X_{B1}(k)] + a \cdot [X_{C1}(k)]) \\ [X_1^0(k)] &= \frac{1}{3} ([X_{A1}(k)] + [X_{B1}(k)] + [X_{C1}(k)]) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Donde:  $a = e^{(j\frac{2\pi}{3})}$

6. Con los cálculos hechos anteriormente ya se está en condiciones de calcular los valores de tensiones y corrientes efectivas definidos en el IEEE Std1459, donde no hay mas que con los valores de tensiones y corrientes eficaces aplicar la ecuación (4.10) y (4.11) respectivamente.

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)]} \quad (4.10)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (4.11)$$

7. Con los valores de tensiones y corrientes calculados en los apartados anteriores no hay más que aplicar las ecuaciones definidas en el apartado 1.1.4.2.3 y obtener así los términos de potencias definidos en el IEEE Std1459.

8. Además de los términos definidos en el IEEE Std.1459 se calculan los nuevos términos propuestos y que han sido definidos en el apartado 2.1.2.

9. Por último lo que se hace es visualizar y almacenar los valores de las magnitudes medidas mediante dos procedimientos. El primero de ellos consiste en un display que a través de unos cursores permite seleccionar la variable que se desea visualizar. El segundo método permite la visualización y almacenamiento de los datos a través de un PC, en el cual se ha diseñado una interfaz gráfica en Visual Basic.Net en donde se muestran todas las magnitudes medidas así como la base de datos donde se almacenan (ver apartado 6.1)

En la Figura 4.7, se muestra el diagrama de secuencia de tiempo de las acciones que se llevan a cabo dentro del DSP. Como se puede observar todos los pasos definidos anteriormente se llevan a cabo entre muestra y muestra de las tensiones y corrientes en el pcc consiguiendo de esta forma un sistema de medidas capaz de seguir de forma continua las evoluciones de las tensiones de red y corrientes de carga.

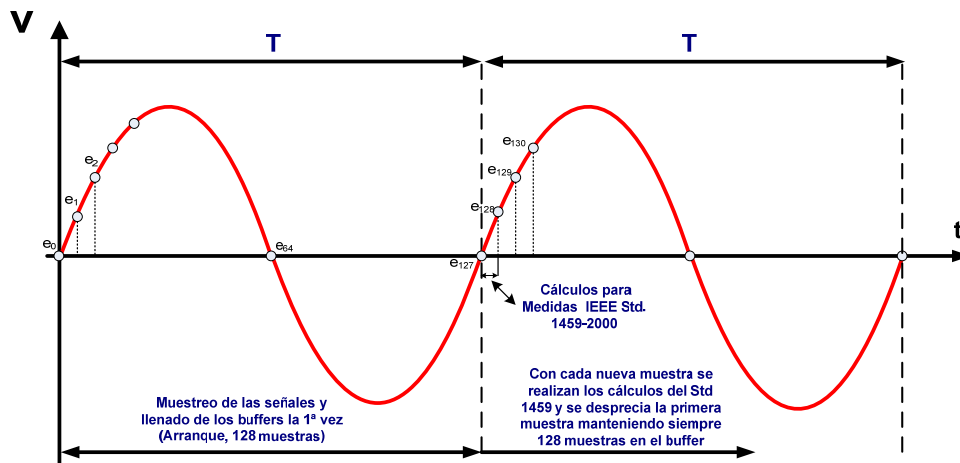


Figura 4.7 Secuencia de tiempos de acciones

En el apartado 5.3.8, se ha llevado a cabo la simulación de la SDFT para verificar su correcto funcionamiento, donde se observa la evolución de los valores de las variables medidas ante una perturbación en las tensiones de la red eléctrica.

#### **4.2. Análisis del sistema de sincronización con la red eléctrica.**

En el apartado 1.1.4, se han detallado todas las magnitudes que define el IEEE Std. 1459 para cualquier sistema de tensiones de alimentación y corrientes de carga. Para llevar a cabo la cuantificación de dichas magnitudes es necesario procesar las tensiones y corrientes que están presentes en el pcc, tal y como determina el propio IEEE Std. 1459.

Este procesado debe obtener, los valores eficaces de las tensiones y corrientes, las componentes fundamentales de las tensiones y corrientes y los valores de las componentes de secuencias positivas, negativas y cero de las tensiones y corrientes presentes en el pcc. Para la obtención de las componentes fundamentales de secuencia positiva tanto de tensiones como de corrientes se utiliza en esta tesis la transformada discreta de Fourier de ventana deslizante (SDFT), la cual por sus prestaciones permite la obtención de la amplitud y fase de los armónicos fundamentales con cada nueva muestra que se adquiera de tensión y corriente, obteniendo de este modo un seguimiento continuo de las variaciones de las componentes fundamentales de tensiones y corrientes.

En un sistema real, la frecuencia y la fase de las tensiones presentes en el pcc pueden presentar unos valores que los alejen bastante de las condiciones definidas en la norma UNE-EN 50160 [108]. Para el correcto funcionamiento de la SDFT y el cálculo de las componentes simétricas, se necesita tener un conocimiento exacto de la frecuencia y la fase de las tensiones de red, ya que de lo contrario los valores proporcionados de las componentes fundamentales de la SDFT no serían los adecuados.

Para la sincronización con la red eléctrica (obtención de frecuencia y fase), después de un análisis de los sistemas de sincronización hardware y software [102]-[103]-[104]-[107], se propone en esta tesis un sistema de sincronización con la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red, basado en un SPLL (Software PLL), que junto con la utilización de un filtro de red SOGI y el método de la DSC para la obtención de la secuencia positiva de las tensiones de red permiten la sincronización con dicha componente fundamental y de secuencia directa.

Así en un sistema con elevado desequilibrio entre fases y con una elevada distorsión armónica, el SPLL deberá, sincronizarse con la fase de la componente fundamental y de secuencia positiva de la tensión en el pcc. En la Figura 4.8 se presenta el diagrama de bloques del sistema de sincronización con la red eléctrica, en el cual a partir de las tensiones medidas en el pcc, y

tras un filtrado (SOGI) para la obtención del armónico fundamental de las tensiones, se obtiene la secuencia positiva de las tensiones de red a través del método de la Delayed Signal Cancellation (DSC). A la salida de la DSC se dispone de la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones der red, siendo esta la referencia del SPLL el cual obtendrá su frecuencia y fase.

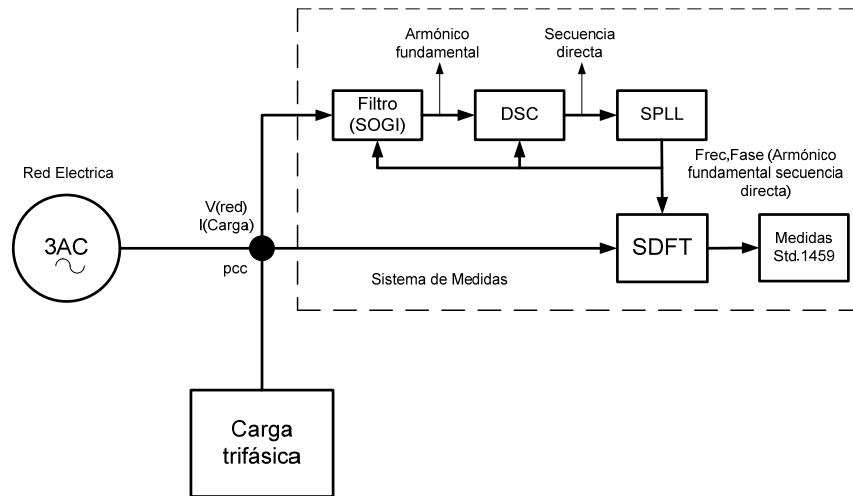


Figura 4.8 diagrama de bloques del sistema de medidas con DSC y Filtro SOGI.

La DSC trabaja en ejes fijos  $\alpha, \beta$ , mientras que el SPLL lo hace en ejes móviles  $d, q$ , (magnitudes continuas), para obtener error de posición cero. El diagrama de bloques detallado se muestra en la Figura 4.9.

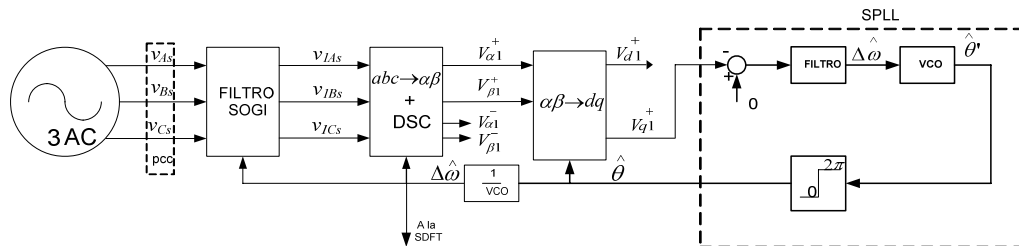


Figura 4.9 Sistema de sincronización con la red eléctrica.

#### 4.2.1. Diseño del filtro de red (SOGI)

El objetivo del filtro SOGI, es obtener las componentes fundamentales de las tensiones de red, para que el funcionamiento de la DSC sea el adecuado. En [108] se determinan los niveles de tensiones armónicas permitidas en las redes de baja tensión, que corresponden con los mostrados en la Tabla 4-1. En dicha tabla sólo se muestra hasta el armónico 25 aunque por

convenio se suelen tener en cuenta los primeros 40 armónicos, para calcular la distorsión armónica total (THD), cuyo valor no debe sobrepasar el 8%. De forma teórica la norma indica cuales son los niveles de distorsión de tensión que cabría esperar en la red, pero de forma práctica estos niveles de distorsión se pueden ver alterados por las distintas cargas conectadas a dicha red.

El sistema de sincronización propuesto, debe estar sincronizado en todo momento con la componente fundamental y de secuencia positiva de la tensión en el pcc. Para obtener el armónico fundamental se propone la implementación de un filtro de red.

La función del filtro de red, no es otra que proporcionar a su salida el armónico fundamental de la tensión con ganancia unitaria y fase nula, filtrando todos los demás armónicos presentes en dicha señal. Si las únicas exigencias del filtro, fuesen estas, se podría utilizar cualquier filtro cuya respuesta en frecuencia garantizase las especificaciones anteriores y el funcionamiento del filtro sería el adecuado siempre que se mantuviese constante la frecuencia de la red. El problema al que se enfrenta el filtro es que la frecuencia de la red está sujeta a variaciones [108], que si el filtro no es capaz de tener en cuenta provocarán que a su salida no se obtenga el armónico fundamental de la tensión, ya que el filtro introducirá un cierto desfase (mayor o menor dependiendo del tipo de filtro), y además se tendrá una atenuación de dicho armónico.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3		Orden h	Tensión relativa ( $U_n$ )
Orden h	Tensión relativa ( $U_n$ )	Orden h	Tensión relativa ( $U_n$ )		
5	6.0%	3	5.0%	2	2.0%
7	5.0%	9	1.5%	4	1.0%
11	3.5%	15	0.5%	6...24	0.5%
13	3.0%	21	0.5%		
17	2.0%				
19	1.5%				
23	1.5%				
25	1.5%				

Tabla 4-1 Valores de las tensiones de armónicos individuales en los puntos de suministro, hasta el armónico de orden 25, expresados en porcentaje de la tensión fundamental  $U_1$

El filtro utilizado en esta tesis es el propuesto en [110]. Se trata de un filtro SOGI (Second Order Generalised Integrator) cuyo diagrama de bloques es el mostrado en la Figura 4.10. Donde  $\omega$ , representa la pulsación de resonancia del filtro SOGI. Tal y como se representa en la Figura 4.9, la pulsación es realimentada de la salida del SPLL, con lo que el filtro SOGI se convierte en un filtro cuya frecuencia de resonancia es variable y consigue de este modo



resolver el problema de que la frecuencia de red pueda sufrir variaciones adaptándose en todo momento a dichas variaciones.

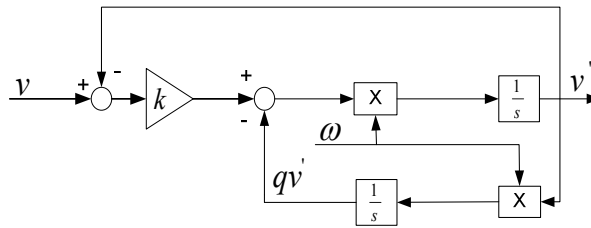


Figura 4.10 diagrama de bloques del filtro SOGI

La ecuación (4.12), representa la función de transferencia en lazo cerrado del filtro SOGI, donde  $k$ , representa la ganancia del filtro y afecta directamente al ancho de banda tal y como se muestra en la Figura 4.11.

$$H_d(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (4.12)$$

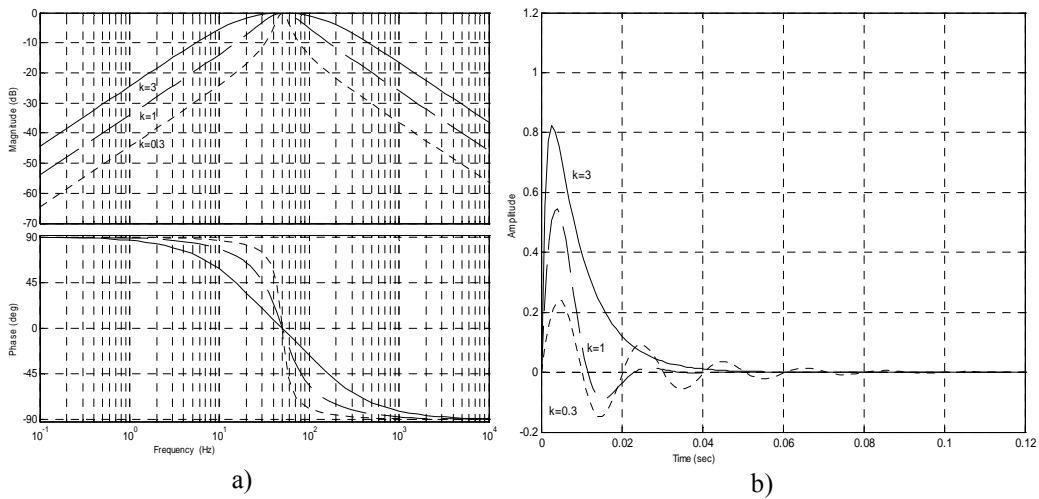


Figura 4.11 a) diagrama de bode del filtro SOGI b) Respuesta ante un escalón del filtro SOGI.

En la Figura 4.11 se observa que a mayor ganancia del filtro, éste presenta una respuesta más rápida aumentando también su ancho de banda, lo cual supone un inconveniente a la hora de filtrar los armónicos de red. Por el contrario a menor ganancia, se tiene un ancho de banda más estrecho, consiguiendo así una buena característica de filtrado, sin embargo el filtro presenta una respuesta más lenta. En el capítulo 5 se han llevado a cabo distintas simulaciones del

sistema de sincronización (SOGI+DSC+PLL), en donde se han ajustado las constantes del filtro para conseguir un correcto funcionamiento de todo el sistema de medidas.

#### 4.2.1.1. Discretización del filtro SOGI.

Para la discretización del filtro, se han comparado distintos métodos teniendo en cuenta que para el correcto funcionamiento del filtro la señal  $v$  (entrada del filtro), y la señal  $qv'$ , deben estar desfasadas  $90^\circ$ , de lo contrario la señal a la salida del filtro presenta un rizado de 100Hz tal y como se demostró en [110]. Para conseguir dicho desfase se han llevado a cabo distintos métodos de discretización del filtro, en donde el más adecuado es aquel que consigue un desfase de  $90^\circ$  entre la señal  $v$ , y la señal  $qv'$ , para cualquier ancho de banda. En la Figura 4.12, se muestra la fase del filtro SOGI, de las señales  $v$  y  $qv'$  para distintos métodos de discretización.

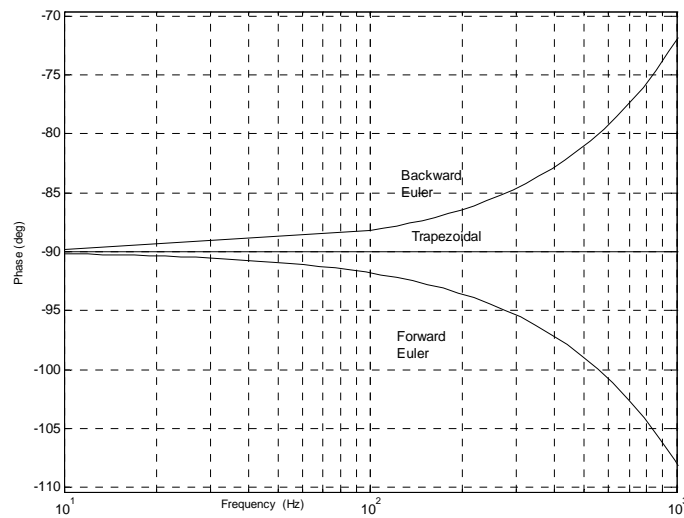


Figura 4.12 Fase del filtro SOGI (señales  $q$  y  $qv'$ ) para distintos métodos de discretización.

Los métodos de discretización comparados son el Backward Euler, Forward Euler y Trapezoidal [105], siendo este último el que presenta mejor respuesta (cambio de fase constante ( $90^\circ$ )) de los tres, tal como se observa en la Figura 4.12. Sabiendo que lo que se pretende es que las señales  $v'$  y  $qv'$  presenten un desfase de  $90^\circ$ , el método seleccionado para la discretización del integrador será entonces el Trapezoidal en el cual el integrador  $\frac{1}{s}$  es aproximado por:

$$\frac{T_s}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

Sustituyendo s en (4.12), por la aproximación anterior se tiene (4.13).

$$H_o(z) = \frac{k\omega \frac{2z-1}{T_s z+1}}{\left(\frac{2z-1}{T_s z+1}\right)^2 + k\omega \frac{2z-1}{T_s z+1} + \omega^2} \quad (4.13)$$

Resolviendo (4.13) se obtiene (4.14).

$$H_o(z) = \frac{(2k\omega T_s)(z^2 - 1)}{4(z - 1)^2 + (2k\omega T_s)(z^2 - 1) + (\omega T_s)^2(z + 1)^2} \quad (4.14)$$

A continuación se realizan las siguientes sustituciones:

$$\begin{cases} x = 2k\omega T_s \\ y = (\omega T_s)^2 \end{cases}$$

Con lo que (4.14) pasa a (4.15)

$$H_o(z) = \frac{\left(\frac{x}{x+y+4}\right) + \left(\frac{-x}{x+y+4}\right)z^{-2}}{1 - \left(\frac{2(4-y)}{x+y+4}\right)z^{-1} - \left(\frac{x-y-4}{x+y+4}\right)z^{-2}} \quad (4.15)$$

Identificando los coeficientes del filtro se tiene:

$b_0 = \frac{x}{x+y+4}$	$a_1 = \frac{2(4-y)}{x+y+4}$
$b_2 = \frac{-x}{x+y+4} = -b_0$	$a_2 = \frac{x-y-4}{x+y+4}$

Tabla 4-2 Coeficientes de la función discreta del filtro SOGI

Se obtiene (4.16).

$$H_o(z) = \frac{b_0 + b_2 z^{-2}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (4.16)$$

Que puede ser expresada como(4.17)

$$H_o(z) = b_0 \frac{1 - z^{-2}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (4.17)$$

Cuya implementación se muestra en la Figura 4.13.

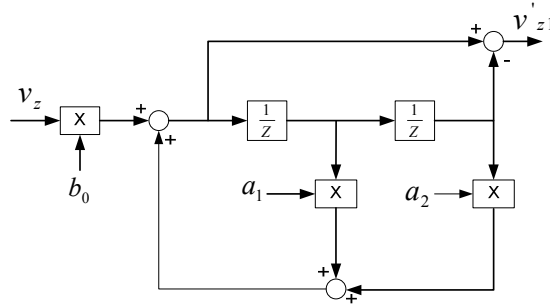


Figura 4.13 Diagrama de bloques discreto del filtro SOGI.

La ecuación en diferencias del filtro SOGI se muestra en la ecuación (4.18)

$$y(k) = b_0 x(k) - b_0 x(k - 2) + a_1 y(k - 1) + a_2 y(k - 2) \quad (4.18)$$

#### 4.2.2. Obtención de la secuencia positiva de la tensión de red (DSC).

Para la extracción de las secuencia positiva y negativa de las tensiones de red, se utiliza en esta tesis el método conocido como DSC (del inglés Delayed Signal Cancellation) [111], en el que se desplazan las componentes  $\alpha\beta$ , del vector de las tensiones de red un cuarto del periodo fundamental y se restan en cuadratura para obtener la secuencia negativa, como se muestra en (4.19).

$$v_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \left( v_{\alpha\beta}(t) - jv_{\alpha\beta} \left( t - \frac{T}{4} \right) \right) \quad (4.19)$$

En la que  $T = \frac{2\pi}{\omega_1}$ . Para obtener la secuencia positiva basta con restar  $v_{\alpha\beta}^-$ , de la tensión total, que da lugar a

$$v_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \left( v_{\alpha\beta}(t) + jv_{\alpha\beta} \left( t - \frac{T}{4} \right) \right) \quad (4.20)$$

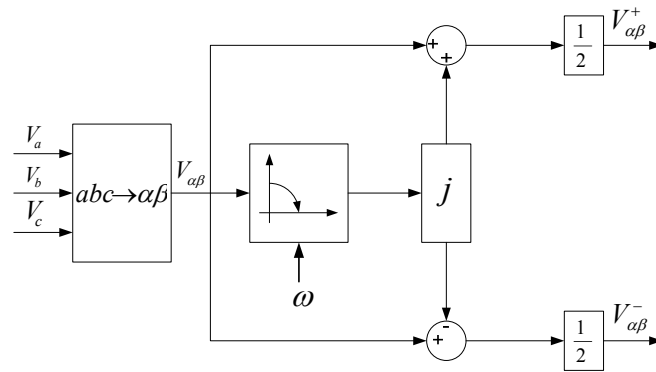


Figura 4.14 Diagrama de bloques de la DSC

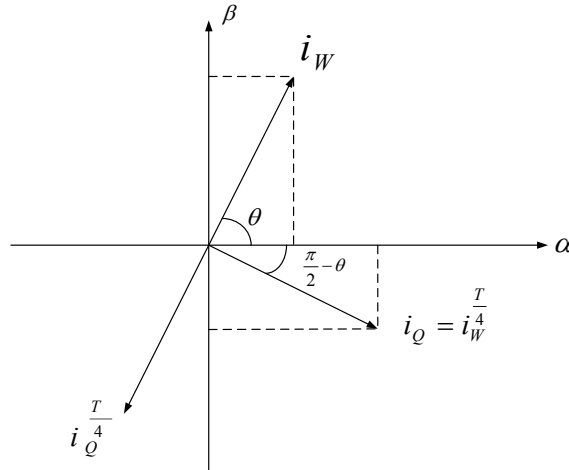


Figura 4.15 Desplazamiento de las intensidades  $\frac{T}{4}$ .

El diagrama de bloques de la DSC se muestra en la Figura 4.14. El funcionamiento de este método se presentó en [112]. El autor descompone la intensidad en tres componentes  $i_W$ ,  $i_q$ , e  $i_g$  correspondientes a la corriente activa, reactiva e inversa respectivamente. La componente activa  $i_W$  da lugar a la potencia activa  $P_W = v_\alpha i_{W\alpha} + v_\beta i_{W\beta}$ . De igual manera, la componente reactiva de la intensidad  $i_Q$  tendrá la misma amplitud que  $i_W$  y un retraso de un cuarto del periodo ( $\frac{\pi}{2}$  radianes), de forma tal que se cumple que  $v_\alpha i_{Q\alpha} + v_\beta i_{Q\beta} = 0$ . Así las relaciones entre las componentes del vector intensidad y del vector intensidad retrasado un cuarto del periodo quedan como se muestra en (4.21).

$$\begin{aligned} i_{W\alpha} &= -i_{Q\beta} = -i_{W\beta}^{\frac{T}{4}} = -i_{Q\alpha}^{\frac{T}{4}} = I \cos \theta \\ i_{W\beta} &= i_{Q\alpha} = i_{W\alpha}^{\frac{T}{4}} = -i_{Q\beta}^{\frac{T}{4}} = I \sin \theta \end{aligned} \quad (4.21)$$

Donde  $I$  es el módulo de  $i_W$ , habiéndose hecho uso de que  $\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \cos(\theta)$ , y  $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \sin(\theta)$ . Para la componente inversa de la intensidad,  $i_g$ , se tienen las expresiones:

$$\begin{aligned} i_{g\alpha} &= I_g \cos(w_1 t + \phi_g) \\ i_{g\beta} &= -I_g \sin(w_1 t + \phi_g) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Siendo  $I_g$ , el valor máximo de la componente inversa de la intensidad y  $\phi_g$  su desfase respecto de la tensión. Las relaciones entre dichas componentes y las del vector desplazado  $\frac{T}{4}$ , son:

$$\begin{aligned} i_{g\alpha}^{\frac{T}{4}} &= -i_{g\beta} \\ i_{g\beta}^{\frac{T}{4}} &= i_{g\alpha} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Entonces teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_{W\alpha} + i_{Q\alpha} + i_{g\alpha} \\ i_\beta &= i_{W\beta} + i_{Q\beta} + i_{g\beta} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Y sustituyendo las ecuaciones (4.21) y (4.23) en (4.24) se obtienen las ecuaciones (4.19) y (4.20) para la determinación de las secuencias positiva y negativa por el método de la DSC.

El funcionamiento de la DSC expuesto en las ecuaciones anteriores se puede ver desde un punto de vista más práctico si se analizan las propiedades de un sistema desequilibrado ayudándose del teorema de Fortescue [37].

Tal y como define Fortescue un sistema desequilibrado se puede descomponer en suma de tres sistemas, uno equilibrado de secuencia positiva otro equilibrado de secuencia negativa y un último de secuencia cero, tal y como se muestra en la Figura 4-16.

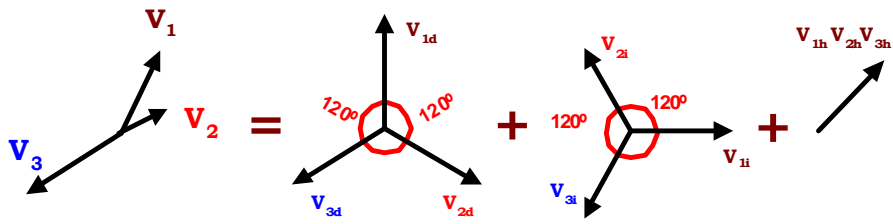


Figura 4.16 Descomposición de un sistema de tensiones desequilibrado mediante el teorema de Fortescue.

Si se realiza una transformación al plano  $\alpha\beta$  de un sistema desequilibrado, y teniendo en cuenta la descomposición de Fortescue se tendría dicho sistema representado por dos vectores, uno de secuencia positiva y girando a la velocidad del armónico fundamental, y otro con la misma velocidad de giro pero en sentido contrario tal y como se muestra ver en la Figura 4.17.

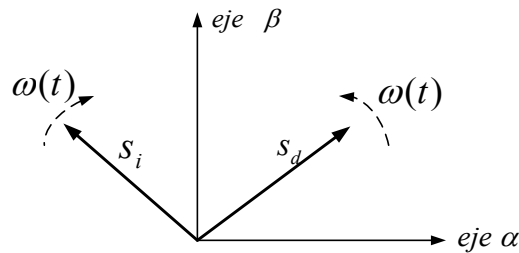


Figura 4.17 Rotación en el plano  $\alpha\beta$  de los vectores de secuencia directa e inversa de un sistema trifásico desequilibrado.

Suponiendo que el armónico fundamental gira a una frecuencia de 50 Hz, para un observador situado o sincronizado con la secuencia positiva la secuencia negativa giraría al doble de esa frecuencia (100 Hz) [113]. Si se retrasa la señal de red en el plano  $\alpha\beta$  (secuencia positiva y secuencia negativa) un cuarto de su periodo ( $0.02/4 = 0.005$  s) lo que se está haciendo es retrasar la secuencia negativa (5 ms) que gira a 100Hz, lo que supone retrasarla un semiperiodo tal y como se muestra en la Figura 4.18. Si a continuación se suma con la misma secuencia negativa sin retrasar lo, que se consigue es la anulación de la secuencia negativa del sistema ya que se están sumando dos señales desfasadas  $180^\circ$ , y de esta forma se obtiene a la salida de la DSC únicamente la secuencia positiva del sistema.

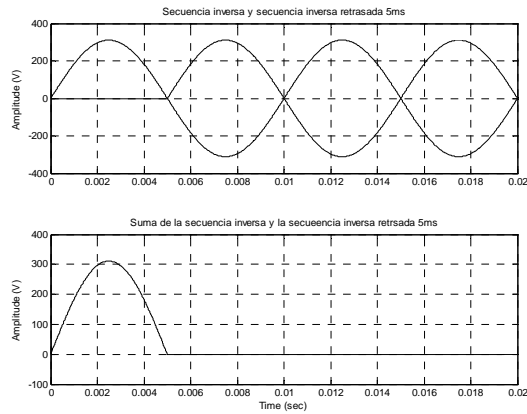


Figura 4.18 Suma de la secuencia negativa y la secuencia negativa retrasa 5ms

El método de la DSC constituye una buena herramienta para la extracción “on line” de la secuencia positiva de las tensiones de red, mostrando como único inconveniente la necesidad de un cuarto del periodo de red para la determinación de dicha secuencia. En el apartado 5.2.2. se presentarán los resultados de simulación que validan el funcionamiento de la DSC.

#### 4.2.3. Diseño del SPLL.

El sistema de sincronización propuesto, se basa en el empleo de un SPLL combinado con un filtro de red SOGI y el método de la DSC. En esta tesis se propone el empleo de un SPLL (Software PLL), como método de sincronización con la red eléctrica. En la literatura técnica existen numerosas referencias a métodos de sincronización con las tensiones de red, algunos de ellos basados en PLL son [102]-[103]-[104], otros están basados en filtros (paso bajo, Kalman, etc.) [114]. En [115] se realiza la estimación del flujo de la red eléctrica. Con la actual tecnología de microcontroladores y DSPs, todas las funciones de los PLLs clásicos se pueden implementar mediante funciones software (SPLL). Los SPLLs tienen numerosas ventajas con respecto a los PLLs hardware [102], una de éstas es la posibilidad de modificar los parámetros “on line”, lo que permite realizar un control adaptativo, a partir de la identificación de diferentes perturbaciones de la red eléctrica.

La función del SPLL en el sistema de medidas es la sincronización con el armónico fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red. En la Figura 4.9 se muestra la estructura del sistema de sincronización en donde se observa que una vez que se ha obtenido el armónico fundamental y de secuencia positiva el siguiente paso es la utilización del SPLL para la sincronización con dicho armónico.

En el diseño del SPLL se han utilizado los valores de las señales  $V_{dq}^+$ , sin hacer referencia al armónico fundamental de las tensiones de red, ya que el filtro SOGI no interviene en el diseño



del SPLL. Una vez realizado el diseño del SPLL en el apartado 5.2.2.1, se justifica la utilización del filtro SOGI, y en ese caso el SPLL se sincroniza con el armónico fundamental de secuencia positiva de las tensiones en todo momento.

El filtro del SPLL corresponde a un PI discreto. Donde  $0 - V_q^+ = -V_q^+$  es la entrada, y la salida es el incremento de la velocidad angular de la tensión de la red eléctrica ( $\Delta\hat{\omega}$ ) tal y como se puede observar en la Figura 4.19. La expresión analítica de este filtro (discreto) depende del tipo de PI implementado, pero una posible opción es:

$$\Delta\hat{\omega}(k) = -K_{pPLL} \left( \frac{z - \alpha_{PLL}}{z - 1} \right) \quad (4.25)$$

Donde  $-K_{pPLL}$  y  $\alpha_{PLL}$  son la ganancia proporcional y el cero del controlador PI respectivamente. De esta forma el SPLL se “engancha” con la fase de la secuencia positiva de la tensión de red.

$\hat{\theta}'$  es la fase estimada del armónico de secuencia positiva de la tensión de red, la cual se obtiene integrando  $\Delta\hat{\omega}$ . El encargado de realizar esta función es el VCO (Voltage Controlled Oscillator), que en el caso de que sea discreto,  $\hat{\theta}'(k)$  presenta la función de transferencia mostrada en (4.26).

$$\hat{\theta}'(k) = \Delta\hat{\omega}(k) \frac{T_s}{z - 1} \quad (4.26)$$

El valor de  $\hat{\theta}'(k)$  se limita por software entre 0 y  $2\pi$  (para obtener un periodo), obteniendo  $\hat{\theta}(k)$ , ángulo que se realimenta hacia la transformación de park para calcular las nuevas componentes de  $dq$ . El objetivo es que  $V_q^+$  sea cero y el resto de variables  $dq$ , sean constantes.

#### 4.2.3.1. Modelo continuo linealizado del SPLL.

Las tensiones de la red se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} V_a(t) &= V_m \sin \theta \\ V_b(t) &= V_m \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_c(t) &= V_m \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Donde  $V_m$  es el valor de pico de la tensión de fase y  $\theta$  es la fase de la tensión de red ( $\theta = \omega t$ ). La transformación a los ejes  $dq^+$  en el SPLL es [103]:

$$V_{dq}^+ = kV_m(-\sin(\theta - \hat{\theta}) + j \cos(\theta - \hat{\theta})) \quad (4.28)$$

Donde  $k = \frac{2}{3}$  y  $\hat{\theta}$  es la fase estimada por el SPLL. Cuando  $\theta - \hat{\theta} = 0$ , entonces  $V_q^+ = 0$  y  $V_d^+ = kV_m$ . En condiciones ideales de funcionamiento  $kV_m = V_d$ . Si  $\delta = \theta - \hat{\theta} \neq 0$ ,  $V_d^+$  se expresa como:

$$V_q^+ = -kV_m \sin \delta \quad (4.29)$$

La ecuación anterior es una ecuación no lineal, porque la componente “q” de la secuencia positiva de la tensión de red ( $V_q^+$ ) es función del seno de la diferencia entre los ángulos actual y estimado. Para simplificar el análisis se obtiene un modelo continuo linealizado, que consiste en suponer que  $\delta$  es suficientemente pequeño, con lo que la ecuación (4.29) se transforma en:

$$V_q^+ \approx -kV_m \delta \quad (4.30)$$

Cuando el SPLL sigue la fase de la tensión de red, el error es igual a cero ( $\delta = 0$ ).

La linealización el SPLL ha consistido en sustituir el bloque no lineal de transformación  $\alpha\beta \rightarrow dq$  por la ecuación (4.30), y el resultado es el lazo de control que se muestra en la Figura 4.19.

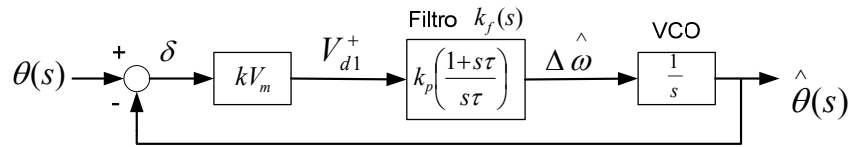


Figura 4.19 Modelo continuo linealizado del SPLL.

La función de transferencia en lazo cerrado en el plano  $s$  de la Figura 4.19 es:

$$H_c(s) = \frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{k_f(s)kV_m}{s + k_f(s)kV_m} \quad (4.31)$$

Donde  $\hat{\theta}(s)$  y  $\theta(s)$  son las transformadas de Laplace de  $\hat{\theta}$  y  $\theta$ , respectivamente. Hay varios métodos para diseñar el filtro del lazo  $k_f(s)$ , pero un buen criterio es diseñarlo de tal forma que  $H_c(s)$  sea una función de segundo orden subamortiguada. Así, para conseguir esto, la función de transferencia de  $k_f(s)$  es la de un regulador PI, de la forma

$$k_f(s) = K_{pPLL} \left( \frac{1 + s\tau}{s\tau} \right) \quad (4.32)$$

Donde  $K_{pPLL}$  y  $K_{iPLL} = K_{pPLL}/\tau$  son las constantes proporcional e integral del PI, respectivamente. Sustituyendo (4.32) en (4.31) se obtiene una función de transferencia de segundo orden subamortiguada cuya expresión general se muestra en(4.33).

$$H_c(s) = \frac{2\zeta w_n s + w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (4.33)$$

Donde, comparando las ecuaciones se pueden identificar los términos de (4.33), tal y como se muestra en (4.34).

$$w_n = \sqrt{\frac{K_{pPLL} k V_m}{\tau}} \quad (4.34)$$

$$\zeta = \frac{K_{pPLL} k V_m}{2w_n} = \frac{\sqrt{K_{pPLL} k V_m \tau}}{2}$$

#### 4.2.3.2. Ajuste de las constantes del SPLL.

El objetivo es que el SPLL sea capaz de seguir muy rápidamente las variaciones de las tensiones de red (tenga un ancho de banda elevado) y que a la vez tenga buenas características de filtrado. Sin embargo estos objetivos no son compatibles y hay que adoptar una solución de compromiso entre las dos.

El diseño de  $k_f(s)$  está basado en un análisis en pequeña señal donde  $\sin(\theta - \hat{\theta})$ , se aproxima por  $(\theta - \hat{\theta})$ . En la literatura técnica se han presentado varios métodos para el diseño de este controlador. Por ejemplo, en [103] se emplea el método de optimización Wiener, que está basado en características estocásticas de ruido, los resultados obtenidos son buenos, pero la metodología es muy compleja. En [104], se usa el método “Symmetrical Optimun”, para ajustar las constantes del PI; y en [102], se emplea la técnica de localización de los polos en un sistema de segundo orden en el plano z.

En esta tesis se analizan los posibles valores de  $w_n$  y  $\zeta$  a partir de las especificaciones del comportamiento del SPLL, y con éstos se diseña el controlador en el plano z [105]-[106].

#### 4.2.3.3. Especificaciones del comportamiento en lazo cerrado.

La Figura 4.20 representa el lugar de las raíces en el plano s de la función de transferencia en lazo cerrado de la ecuación(4.33).  $\omega_n$  determina el ancho de banda del sistema, y por tanto, la velocidad de respuesta, mientras que  $\zeta$  fija el amortiguamiento de la respuesta en lazo cerrado. Esto se comprueba en las respuestas temporales de la Figura 4.21. Para  $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$  el sobreimpulso es del 20.8%, pero se alcanza la respuesta final a la mitad del periodo de la frecuencia

fundamental de las señales de red para cualquier  $\omega_n$ , entre  $2\pi 100 \text{ rad/s}$  y  $2\pi 1000 \text{ rad/s}$ . Esto resulta ser un buen compromiso entre seguir rápidamente las variaciones de las tensiones de la red y tener buenas características de filtrado. El valor seleccionado de  $\zeta$  coincide con el seleccionado en [103], empleando el método de optimización de Wiener.

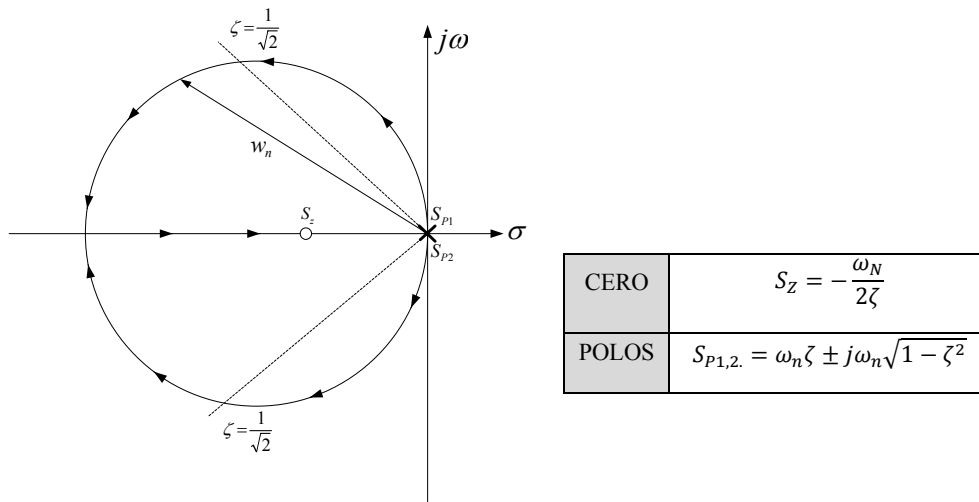


Figura 4.20 lugar de las raíces de la Figura 4.19

#### 4.2.3.4. Ajuste de las constantes del modelo discreto linealizado del SPLL.

La Figura 4.22 representa el modelo discreto linealizado del SPLL, donde:

- El periodo de discretización es de  $T_s = 156.25 \mu\text{s}$ . (Frecuencia de muestreo de las señales del pcc)
- La planta (VCO),  $\frac{\hat{\theta}(z)}{\Delta\omega(z)} = \frac{T_s}{(z-1)}$ , es la transformada z mediante el método ZOH (Zero Order Hold) del VCO continuo de la Figura 4.19.
- La función de transferencia del controlador discreto es de  $k_d(z) = K_{pPLL} \frac{z^{-\alpha_{PLL}}}{z-1}$  y se desarrolla mediante técnicas de diseño directo basado en el lugar de las raíces en el plano z.

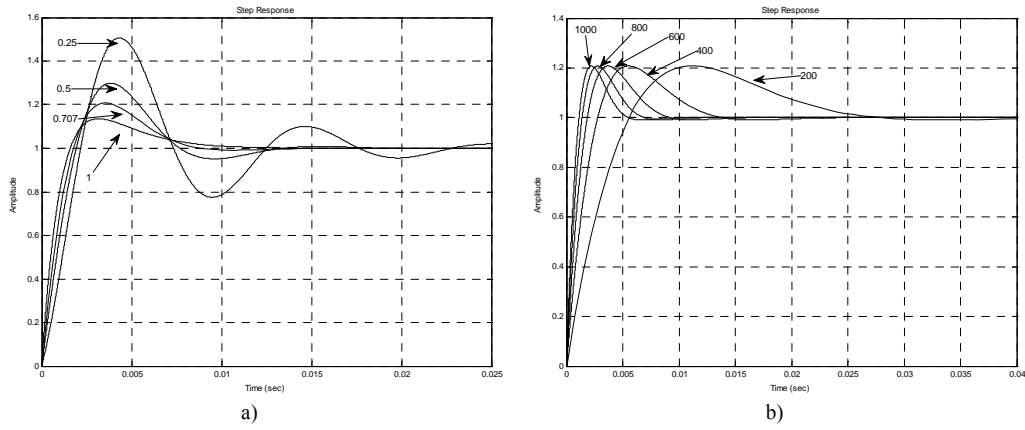


Figura 4.21 Respuesta temporal de la función de transferencia (4.33) en función de: a)  $\zeta$  para  $\omega_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$  y b)  $\omega_n$  para  $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Las especificaciones de diseño se toman de las conclusiones obtenidas en el apartado anterior, y son:  $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ,  $\omega_{n1} = 2\pi 100 \text{ rad/s}$  y  $\omega_{n2} = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ . Estos dos valores de  $\omega_n$  se van a usar para realizar ensayos del comportamiento del SPLL ante perturbaciones de la red eléctrica para diferentes velocidades de respuesta.

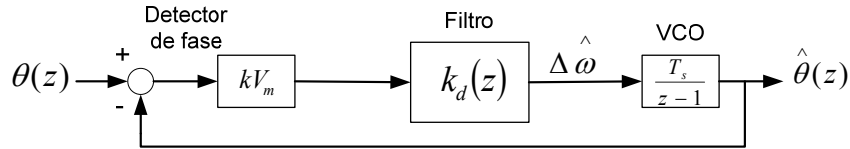


Figura 4.22 Modelo discreto linealizado del SPLL

La Tabla 4-3 muestra la ubicación de los polos en lazo cerrado y los valores del  $K_{pPLL}$  y  $\alpha_{PLL}$  en función de  $\omega_n$ . La Figura 4.23, Figura 4.24 y Figura 4.25 representan el lugar de las raíces, la respuesta ante un escalón unitario en la fase de la red eléctrica y el diagrama de Bode de la función de transferencia en lazo cerrado correspondiente al sistema linealizado discreto de la Figura 4.22 para los dos valores de  $\omega_n$ .

$\omega_n$	Ubicación de los polos en lazo cerrado	$K_{pPLL}$	$\alpha_{PLL}$
$2\pi 100 \text{ rad/s}$	$0.9115 \pm j0.0804$	2.21125	0.9199
$2\pi 1000 \text{ rad/s}$	$0.2593 \pm j0.3189$	1.4814	0.561

Tabla 4-3 Valores de las constantes de  $K_d(z)$  en función de  $\omega_n$

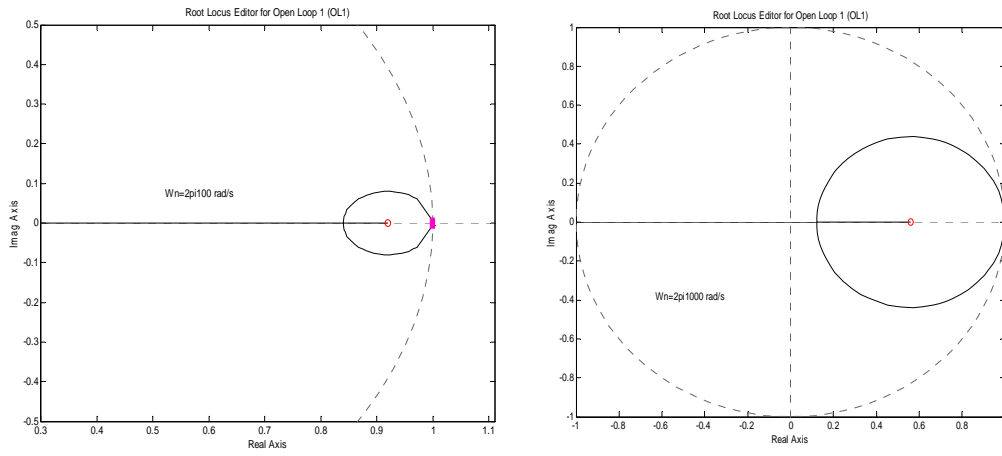


Figura 4.23 Lugar de las raíces y ubicación de los polos de la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de la Figura 4.22

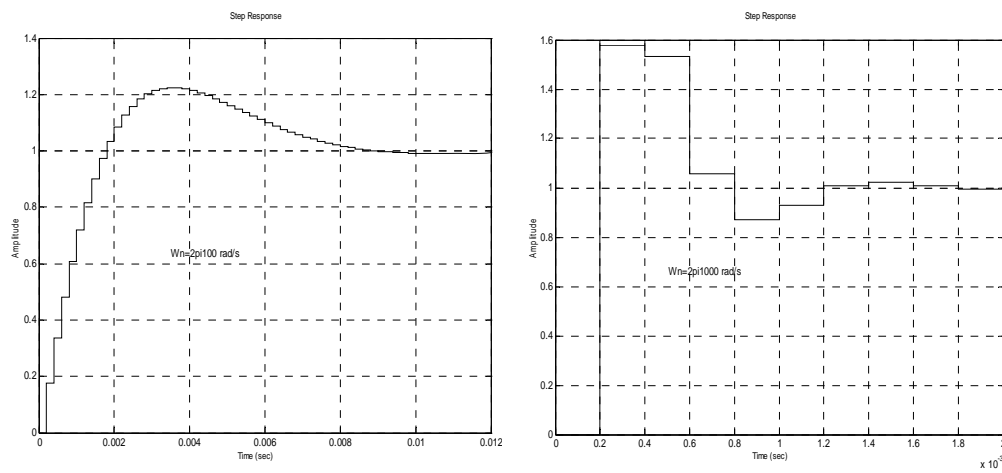


Figura 4.24 Respuesta ante un escalón unitario de la función de transferencia en lazo cerrado del sistema de la Figura 4.22

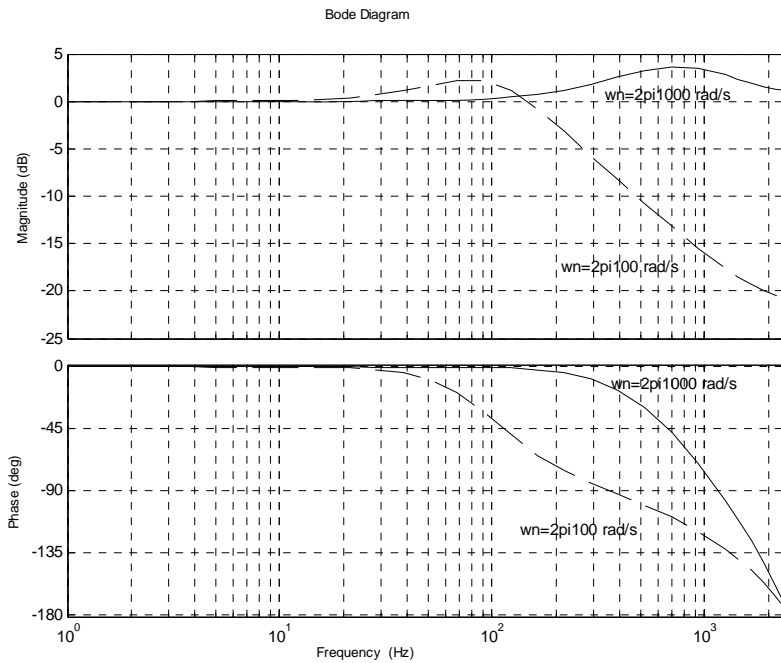


Figura 4.25 Diagrama de bode del sistema en lazo cerrado de la Figura 4.22.

Tras las simulaciones llevadas a cabo se ha elegido el valor de  $\omega_{n2} = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ , para implementar el SPLL tanto en las simulaciones del sistema de medidas como en la parte experimental.

### 4.3. Conclusiones.

En este capítulo se han analizado todos los módulos que conforman el sistema de medidas que se va a implementar.

- Se ha establecido la metodología a seguir para realizar las medidas. Esta metodología será la base para el desarrollo software a implementar en el DSP. Se han establecido los tiempos de muestreo de las señales de tensiones y corrientes en el pcc, teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo debe adaptarse a la frecuencia de red para conservar siempre constante el número de muestras adquiridas por ciclo.
- La utilización de la SDFT presenta la ventaja de optimizar la obtención de las componentes fundamentales, reduciendo el coste computacional y posibilitando su cálculo con cada muestra adquirida.

- Se ha propuesto un sistema para la sincronización con el armónico fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red, necesario para el funcionamiento de la SDFT.
- Se han diseñado cada uno de los bloques que integran el sistema de sincronización (SOGI+DSC+SPLL), y se han definido las condiciones de funcionamiento de cada una de ellas.
- En las simulaciones realizadas de cada uno de los bloques del sistema de sincronización se han obtenidos los tiempos de respuesta para cada uno de ellos donde: SOGI=12ms; DSC=T/4 y el SPLL=1.8ms. Si se tienen en cuenta los tiempos anteriores y suponiendo una frecuencia de red de 50Hz, el tiempo de respuesta global del sistema se sitúa en 18.8 ms.



## 5. Simulación del sistema de medidas.

La obtención de los resultados para la comprobación del funcionamiento del sistema de medidas propuesto ha sido llevada a cabo en dos fases. En la primera fase se ha realizado la simulación del sistema de medidas, obteniéndose los resultados de simulación que se presentan en este capítulo. En la segunda fase se ha procedido al montaje experimental de un prototipo del sistema, detallándose los resultados experimentales obtenidos en el capítulo 7.

Los objetivos de las simulaciones incluidas en el presente capítulo son los siguientes:

- Comprobar el correcto funcionamiento y las características del sistema de sincronización con la red eléctrica (SPLL).
- Comprobar y validar el sistema de medidas basado en el cálculo de todos los términos del IEEE Std. 1459 desarrollados en los capítulos 1 y 2, para los casos experimentales a implementar. Para ello se utilizará la herramienta Mathcad para los cálculos teóricos y la herramienta Matlab para la simulación dinámica.

Para la correcta validación de los resultados, las simulaciones del sistema de medidas reproducen las mismas condiciones de alimentación y carga que se implementarán mediante el prototipo de laboratorio en la parte experimental. No obstante, y con el objetivo de dar una mayor validez a los resultados, se incluyen en este capítulo algunas simulaciones del sistema completo trabajando en condiciones reales sin las limitaciones del prototipo, lo cual validará el sistema propuesto para su conexión en redes de distribución trifásicas con neutro.

El capítulo se ha estructurado de acuerdo con los objetivos planteados y en el mismo orden que el que se han presentado. Previamente se justifica la elección de la plataforma de simulación empleada y las características de los métodos empleados en las simulaciones, a continuación se simula el funcionamiento de cada uno de los elementos que integran el sistema de medidas del IEEE Std.1459 extendido, y al final se realiza la simulación del sistema completo. Con el fin de comprobar los resultados con los que ofrecería un equipo de medidas comercial basado en el IEEE Std.100, se añaden para cada caso simulado, incluyendo los valores de potencia definidos en dicho estándar. En la última parte del capítulo y como se ha comentado en el párrafo anterior se simulan los casos que no pueden ser experimentados en el prototipo de medidas debido a las limitaciones del laboratorio.

### 5.1. Técnicas de simulación.

Para la simulación del sistema es necesario seleccionar una plataforma de simulación. Las simulaciones presentadas en este capítulo se han realizado utilizando la plataforma de simulación Matlab Simulink. La elección de esta plataforma se sustenta en las siguientes bases:

- Facilidad de diseño de funciones definidas por el usuario (s-function) que permiten desarrollar mediante código de matlab (similar al lenguaje de programación C) los algoritmos de control y medida a implementar, facilitando la migración del código al procesador digital de señales (DSP)
- Matlab Simulink (v2007b) incorpora una librería para la simulación y análisis de sistemas de potencia denominada SimPowerSystems.

Las funciones definidas por el usuario permiten desarrollar el código del sistema de control en un lenguaje de programación similar a C de forma análoga a como se haría en un procesador digital de señal (DSP). El código generado para el desarrollo de los algoritmos incluidos en el sistema de medidas para la simulación es transportable casi directamente (95%) al DSP, lo cual hace que la migración desde la simulación hacia el sistema real sea un proceso sencillo y temporalmente corto. La librería SimPowerSystems sitúa a Matlab a un nivel cercano a otras plataformas de simulación de sistemas electrónicos como Orcad-PsPice. La unión de las dos características citadas hace de Matlab Simulink una herramienta de gran potencia para la simulación de sistemas electrónicos de potencia, facilitando además la portabilidad a sistemas procesadores digitales reales.

Para llevar a cabo las simulaciones del sistema de sincronización se han utilizado las tensiones de red cuyos valores se muestran en la Tabla 5-1, donde las perturbaciones introducidas en cada caso se realizan sobre los módulos, fase, frecuencia, etc. de dichas tensiones.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$
220.00 V	220.00 V	220.00 V
$\phi_{V_{As}}$	$\phi_{V_{Bs}}$	$\phi_{V_{Cs}}$
0.00 °	-120.00 °	-240 °

Tabla 5-1 Valores eficaces de las tensiones utilizadas para la simulación del sistema de sincronización.

Para los casos de simulación con tensiones desequilibradas, los valores de la secuencia positiva de las tensiones de red serán calculados respecto a los valores de tensiones de red mostrados en la Tabla 5-1.

## 5.2. Simulación del sistema de sincronización con la Red Eléctrica.

Como se expuso en el capítulo anterior, para el correcto funcionamiento de la SDFT, se necesita un sistema de sincronización con la red eléctrica que proporcione la fase del armónico fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red y de esta forma la SDFT podrá obtener los valores correctos de las componentes fundamentales necesarios para llevar a cabo los cálculos definidos en el IEEE Std.1459-2000.

En la Figura 5.1, se muestra el diagrama Simulink del sistema de sincronización con la red, que se ha utilizado para llevar a cabo las simulaciones de dicho sistema. Dentro del bloque “Sistema Sincronización”, se encuentra la S-function en la cual se ha programado el código correspondiente al filtro SOGI junto con la DSC y el SPLL, descritos en el capítulo 3. Para analizar el correcto funcionamiento de cada uno de estos tres subsistemas se han llevado a cabo las simulaciones de cada uno de ellos por separado tal y como se muestra en los siguientes apartados.

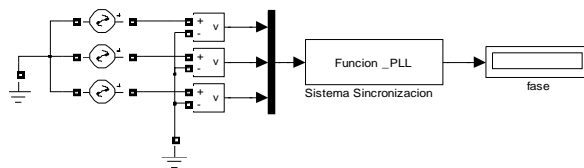


Figura 5.1 Diagrama simulink del sistema de sincronización

El bloque correspondiente al “Sistema Sincronización”, corresponde a la S-function en la cual se ha programado la estructura correspondiente a la Figura 5.2, en donde se tiene el filtro de red SOGI, junto a la DSC para la extracción de la secuencia directa de las tensiones de red y por último está el SPLL, tal y como se expuso en el apartado 4.1(Figura 4.9).

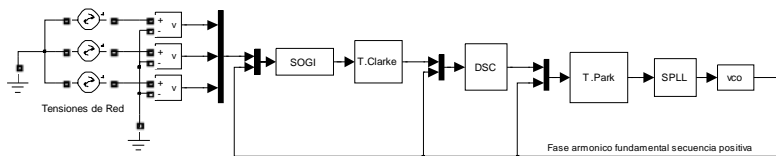


Figura 5.2 Diagrama Simulink del sistema de sincronización completo.

### 5.2.1. Simulación del filtro SOGI.

Para validar la capacidad de filtrado del filtro SOGI, se ha sometido al mismo a distintas perturbaciones introducidas en las tensiones de red. En estas primeras simulaciones se han realizado los ensayos en bucle abierto, es decir sin que haya realimentación en la frecuencia al

filtro SOGI por parte del SPLL. El comportamiento del filtro en bucle cerrado se simula en el apartado 5.2.4 correspondiente a la simulación del sistema completo en el cual está implementado dentro de todo el sistema de sincronización y recibe la realimentación de la frecuencia a la salida del SPLL.

En la Figura 5.3 se puede ver el diagrama Simulink, utilizado para llevar a cabo la simulación del filtro SOGI. Partiendo de unas tensiones de red distorsionadas como las mostradas en la Figura 5.4 (a), se observa que el filtro elimina correctamente los armónicos presentes en la tensión de red ( $3^{\circ}$  y  $5^{\circ}$ ).

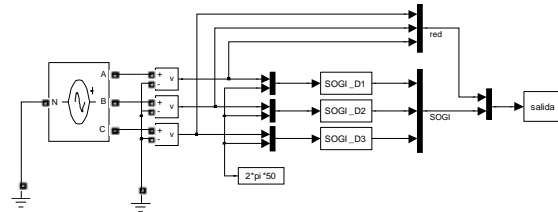


Figura 5.3 Diagrama Simulink filtro SOGI sin realimentación de frecuencia.

Analizando la Figura 5.4, se puede ver como a los 0.02s de la simulación se ha introducido un armónico de tercer orden con una amplitud del 6% de las tensiones de red (311 V) y un quinto armónico con una amplitud del 4% de las tensiones de red. Como se observa en dicha figura el filtro elimina correctamente los armónicos presentes en las tensiones de red, consiguiendo de esta forma proporcionar a la entrada de la DSC unas tensiones completamente senoidales y libres de armónicos.

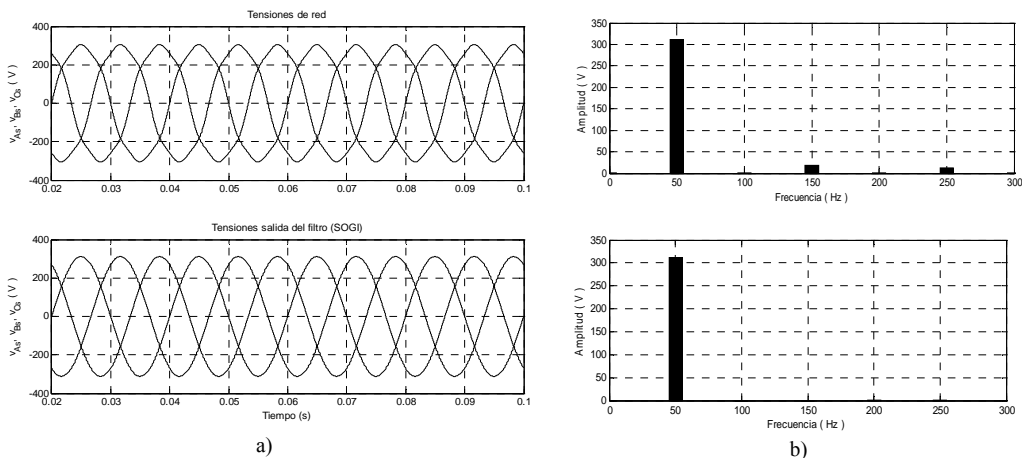


Figura 5.4 Simulaciones del filtro SOGI en bucle abierto ( $\omega_n = \text{constante}$ ), a) Tensiones de red con  $3^{\circ}$  (6%) y  $5^{\circ}$  armónico (4%) b) Contenido armónico de las tensiones de red y de la salida del filtro

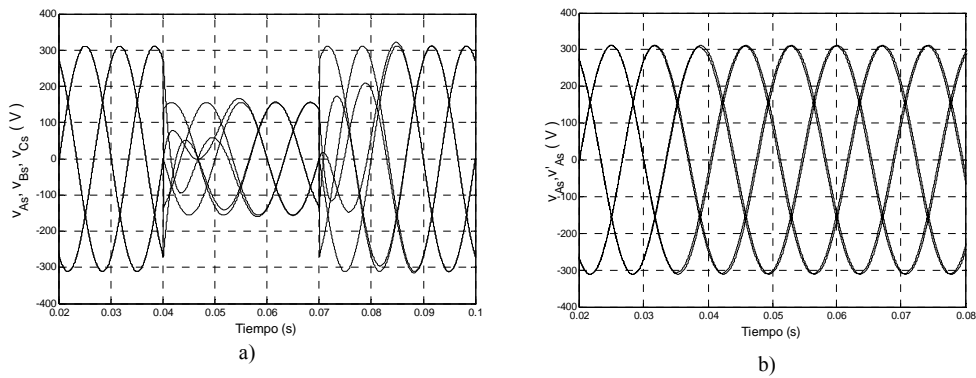


Figura 5.5 Respuesta del filtro (SOGI) a) Ante una caída en las tensiones de red del 50% b) Variación en la frecuencia de red de (-3Hz)

En la Figura 5.5 (a), se observa cual es el comportamiento del filtro SOGI, ante una caída del 50% en las tres tensiones de red, observando que el filtro se estabiliza al cabo de 18ms ( $k=1.7$ ) y en la Figura 5.5 (b) se muestra la respuesta del filtro ante una variación de la frecuencia de red. En dicha figura se puede observar que a los 0.03s se produce una variación de la frecuencia de -3Hz, lo que supone que al estar el filtro en bucle abierto y no tener realimentación de la pulsación ( $\omega_n$ ), aparece un desfase entre la señal de entrada  $V_{As}$  (tension de red) y la salida de dicho filtro  $V'_{As}$  (tension a la salida del filtro SOGI). En el apartado 5.2.4 se simula el sistema de sincronización completo (SOGI+DSC+SPLL) en donde la pulsación del filtro es realimentada desde el SPLL para corregir este desfase.

A la vista de los resultados anteriores se observa que el filtro elimina correctamente los armónicos presentes en las tensiones de red, y que es necesario realimentar la frecuencia a la entrada del filtro para evitar que ante un cambio en la frecuencia de las tensiones de red, el filtro introduzca un desfase y atenuación a las señales de red que hay a su salida.

### 5.2.2. Simulación de la DSC.

Tal y como explicó en el apartado 4.2.2, para la obtención de la secuencia positiva de las tensiones de red se ha utilizado en esta tesis el método de la DSC, cuyo diagrama simulink es el mostrado en la Figura 5.6. Para la simulación de la DSC se ha supuesto que la frecuencia de red permanece constante siendo en la parte de la simulación del sistema completo donde se simulan variaciones de frecuencia. En las simulaciones llevadas a cabo en este apartado se va a comprobar el correcto funcionamiento de la DSC en un sistema de tensiones senoidales (sin distorsión), y se va a presentar la aportación que se ha hecho en esta tesis al funcionamiento del sistema de sincronización, analizando el comportamiento de la DSC en un sistema de tensiones distorsionadas.

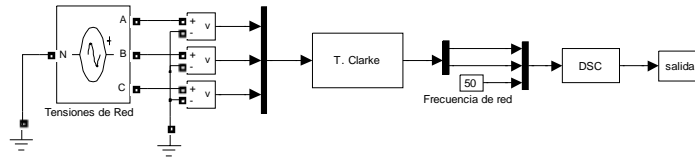


Figura 5.6 Diagrama simulink de la DSC

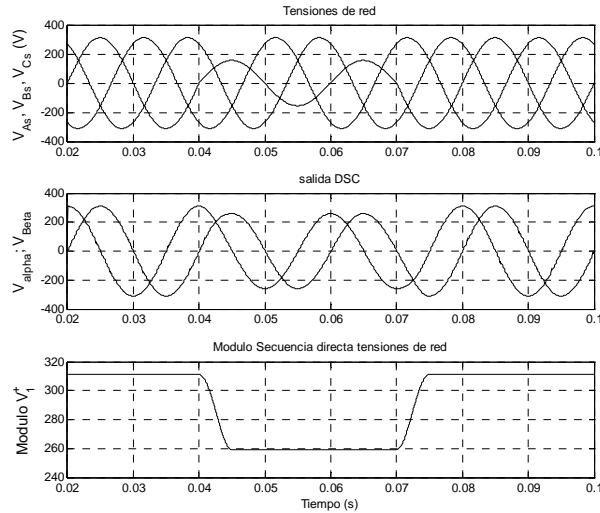


Figura 5.7 Salida de la DSC ante una caída de la fase a del 50%

En la Figura 5.7 se observa la secuencia positiva de la tensión de red obtenida a la salida de la DSC (sistema desequilibrado), en las coordenadas  $(\alpha\beta)$ , y el módulo de la secuencia positiva en las mismas condiciones. La DSC proporciona a su salida las componentes alfa y beta de la secuencia positiva de las tensiones de red, sin embargo para verificar el correcto funcionamiento de la DSC se muestra también el módulo de dicha secuencia obtenido a partir de los valores de las señales proporcionados por la DSC.

En la Tabla 5-2, se presenta un resumen de los valores de las componentes simétricas de las tensiones de red utilizadas en este caso de simulación (valor máximo de la componente positiva de las tensiones de red), para verificar que el valor de la secuencia directa proporcionado por la DSC es el adecuado.

$V_{As}^-$	$V_{Bs}^-$	$V_{Cs}^-$
220.00 V	220.00 V	110.00 V
$V_s^+$	$V_s^-$	$V_s^0$
$183.33*\sqrt{2} = 259.27$ V	$36.36*\sqrt{2} = 51.42$ V	$36.36*\sqrt{2} = 51.42$ V
$\phi_s^+$	$\phi_s^-$	$\phi_s^0$
0.00°	60.00°	-60°

Tabla 5-2 Resumen de las componentes simétricas de las tensiones de red desequilibradas

En el caso anterior se observa que el método de la DSC para la obtención de la secuencia positiva en un sistema de tensiones sólo se necesita un cuarto del periodo del armónico fundamental de las tensiones de red para alcanzar la referencia tal y como se demostró en el apartado 4.2.2.

A continuación se llevaran a cabo unas simulaciones donde se observa el comportamiento de la DSC ante un sistema de tensiones distorsionadas. Para entender mejor el efecto de filtrado que posee la DSC, en las simulaciones se representará el módulo de la secuencia positiva a la salida de la DSC, teniendo presente que lo que proporciona la DSC son las componentes alfa y beta de la secuencia directa de las tensiones de red.

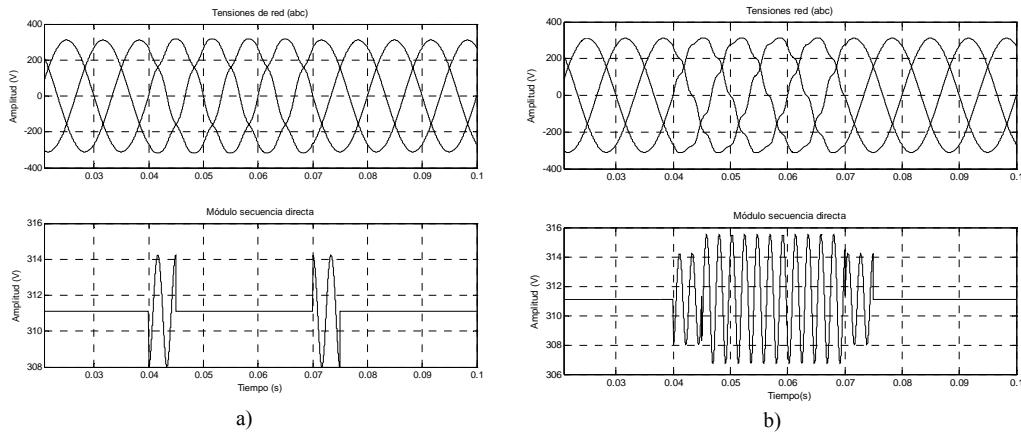


Figura 5.8 Salida de la DSC con tensión de red distorsionadas: a) 5° (5% ) y 7° (3%) armónicos, b) 8° (5%) y 10°(3%)

En la Figura 5.8, se observa la salida de la DSC ante un sistema de tensiones distorsionadas. En el caso (a) se han añadido a las tensiones de red un armónico de 5° orden con una amplitud del 6% del valor eficaz de las tensiones de red, y un armónico de 7° orden cuya amplitud es del 5% de dichas tensiones. En la Figura 5.8 a), se puede ver como la DSC tras el transitorio de estabilización (un cuarto del periodo de red de 40ms a 45ms), proporciona correctamente la amplitud de la secuencia positiva de la tensión de red ( $V_1^+ = 311$ ) sin ningún rizado superpuesto, es decir la DSC funciona como un filtro ante esta distorsión armónica. En el caso

(b) se han introducido los armónicos de orden 8 y 10 cuyas amplitudes son el 5% y el 3% del valor eficaz de las tensiones de red respectivamente. Sin embargo en este caso a la salida de la DSC se obtiene la amplitud de la secuencia positiva ( $V_1^+ = 311$ ) más un rizado superpuesto de 450Hz.

A la vista de las simulaciones realizadas se deduce que el funcionamiento de la DSC para la obtención de la secuencia positiva de un sistema desequilibrado de tensiones presenta un buen comportamiento en sistemas sin armónicos (Figura 5.6) donde, en un cuarto del periodo del armónico fundamental de las tensiones de red, proporciona el valor correcto de las componentes alfa y beta de la secuencia positiva de las tensiones de red. En el caso de que las tensiones de red presenten distorsión, la DSC tiene un comportamiento desigual tal y como se ha visto en la Figura 5.8. En el caso de que en las tensiones de red estén presentes el 5° y 7° armónico la DSC tras un transitorio (un cuarto del periodo del armónico fundamental = 5ms) proporciona a su salida el valor correcto de la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red en los ejes alfa y beta (recordar que lo que se ha visualizado es el módulo de la secuencia directa para una mejor comprensión), y en el caso de que en las tensiones de red estén presentes el 8° y 10° armónico la DSC no proporciona correctamente el valor de la componente fundamental de secuencia directa, alfa y beta de las tensiones de red, si no que aparece un rizado superpuesto a dicho valor tal y como se muestra en la Figura 5.8 b).

En el siguiente apartado se explica cual es el comportamiento de la DSC ante un sistema de tensiones distorsionado y como dependiendo del orden del armónico presente en dichas tensiones es capaz de eliminarlo o no del valor de la secuencia positiva de las tensiones de red.

#### 5.2.2.1. Filtrado de la DSC y aportaciones al sistema de sincronización.

En [107], se propone la DSC como sistema de obtención de la secuencia positiva de las tensiones de red, y se llevan a cabo simulaciones con tensiones de red donde están presentes el 5° y 7° armónico sin analizar el comportamiento de la DSC para el caso en que en la red estén presentes armónicos de cualquier orden. En [109], se ha supuesto que en la red están presentes los armónicos de orden  $h = 3k$ , y  $h = 6k \pm 1$ , siendo  $k = 1, 2, 3, \dots$ , y se ha analizado el funcionamiento de la DSC para el caso de los armónicos 5° y 7° dejando fuera del análisis el resto armónicos.

En esta tesis se analiza el comportamiento de la DSC en un sistema con armónicos y se propone la utilización de un filtro de red sintonizado a la frecuencia de red (SOGI) y realimentado a la salida del SPLL para eliminar los armónicos de red y evitar así el mal funcionamiento del SPLL en estas condiciones.



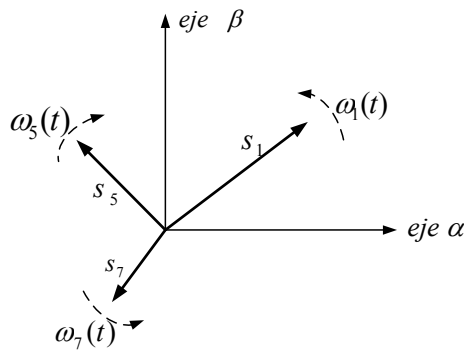


Figura 5.9 Dirección de giro de los diferentes armónicos en los ejes  $\alpha\beta$

Para entender el comportamiento de la DSC en un sistema con armónicos lo primero es saber qué sucede cuando se hace una transformación de un sistema trifásico con armónicos. Los armónicos en los ejes de referencia  $\alpha\beta$  rotan en diferentes direcciones dependiendo del orden del armónico [113]. Por ejemplo en la Figura 5.9 se muestra el sentido de giro en los ejes  $\alpha\beta$  del armónico fundamental, el 5º y 7º armónico.

Orden armónico (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frecuencia (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tabla 5-3 Secuencia de giro de los distintos armónicos en el plano  $\alpha\beta$

En la Tabla 5-3, se muestra el sentido de giro de los nueve primeros armónicos, si se continuase con el resto de armónicos se llegaría a la siguiente conclusión.

- Los armónicos de orden  $h = 3k$  son los de secuencia cero y en los ejes  $\alpha\beta$ , estos armónicos no giran.
- Los armónicos de orden  $h = 3k + 1$ , siendo  $k = 1,2,3, \dots$  son de secuencia positiva, con lo que giran en los ejes  $\alpha\beta$  en el sentido contrario a las agujas del reloj al igual que el armónico fundamental.
- Los armónicos de orden  $h = 3k - 1$ , siendo  $k = 1,2,3, \dots$  son de secuencia negativa, con lo que giran en los ejes  $\alpha\beta$  en el sentido de las agujas del reloj.

El funcionamiento de la DSC está basado en este principio y, tal y como se explicó en el apartado 4.2.2 si se retrasa la señal de red en coordenadas  $\alpha\beta$  un cuarto de su periodo fundamental y se suma en cuadratura con dicha señal sin retrasar, lo que se consigue es la

eliminación de la secuencia negativa obteniendo de esta forma la secuencia positiva de la tensión de red.

Partiendo del mismo análisis que se ha hecho en el apartado 4.2.2 para un sistema de tensiones desequilibrado, se realiza ahora para el caso de tensiones de red con distorsión. Si se tiene un sistema trifásico de tensiones distorsionado en coordenadas  $\alpha\beta$  y se retrasa dicho sistema de tensiones en el plano  $\alpha\beta$  un cuarto del periodo fundamental, todos los armónicos presentes en el sistema serán retrasados el mismo valor. Si ahora se suman las dos señales (señal retrasada y señal sin retrasar) en el plano  $\alpha\beta$ , todos los armónicos cuyo retraso (respecto al mismo armónico sin retrasar) sea un número entero impar de semiperiodos serán eliminados de las componentes  $\alpha\beta$  de la secuencia positiva de las tensiones de red.

Teniendo en cuenta lo anterior todos los armónicos presentes en la red cuyo orden sea  $h = 6k \pm 1$  donde  $k=1,3,5,\dots$  (entero impar), serán eliminados por la DSC de las componentes  $\alpha\beta$  de las tensiones de red. La DSC como su nombre expresa (Delayed Signal Cancellation), constituye un filtro por cancelación para los armónicos de orden  $h = 6k \pm 1$  donde  $k=1,3,5,\dots$  presentes en la red.

Con lo expresado anteriormente queda claro que para obtener la componente fundamental de la secuencia directa el funcionamiento de la DSC, no será el adecuado cuando las tensiones de red (pcc) presenten armónicos de cualquier orden, con lo que será necesario disponer de un filtro que asegure que las señales de las tensiones que se monitorizan en el pcc, estén libres de armónicos y permitir el correcto funcionamiento del sistema de sincronización.

Como aportación en esta tesis para la eliminación de los armónicos de tensión de las señales medidas en el pcc, se ha propuesto la utilización de un filtro SOGI descrito en el apartado 4.2.3, y cuyas simulaciones se han realizado en el apartado 5.2.1.

### **5.2.3. Simulación del SPLL.**

El objetivo de este apartado es analizar el comportamiento del SPLL de forma individual en presencia de distintas perturbaciones de la red eléctrica. En este apartado se plantea el análisis del funcionamiento del SPLL con y sin DSC y en función del ancho de banda ( $\omega_n$ ).

Para llevar a cabo la simulación del SPLL se ha utilizado el diagrama Simulink de la Figura 5.10.

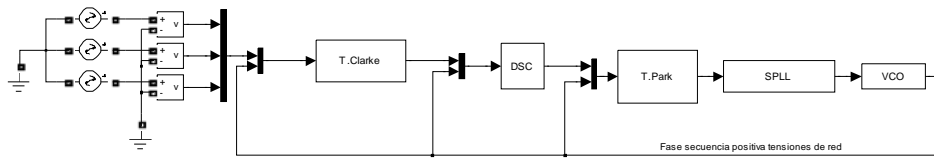


Figura 5.10 Diagrama Simulink del SPLL

En la Figura 5.11 se muestra el diagrama de bloques de la Figura 5.10.

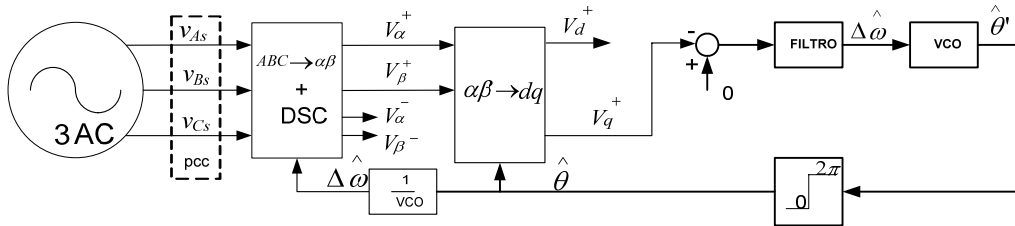


Figura 5.11 Diagrama de bloques del sistema de sincronización sin filtro SOGI.

En las simulaciones mostradas a continuación para cada uno de los casos estudiados, se presenta el valor de  $v_d$  y  $v_q$  (sin DSC) ó  $v_d^+$  y  $v_q^+$  (con DSC), y en aquellos casos donde se introduzcan armónicos en las tensiones de red se presenta también la fase de las tensiones de red ( $\hat{\theta}$ ) para una mejor comprensión de lo que está sucediendo en cada caso.

Hay que tener presente que la función del SPLL es proporcionar correctamente la fase del armónico fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red tal y como se muestra en la Figura 5.11, ya que dicha referencia es la que se pasa a la SDFT (Figura 4.9) para su correcto funcionamiento. El funcionamiento de la SDFT depende directamente de la exactitud de dicha fase (paso por cero) ya que el hecho de no estar sincronizado correctamente con la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red provocará un error en el resultado de la SDFT.

En cada caso se presentan las simulaciones con DSC y sin DSC y con  $\omega_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$  y con  $\omega_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ .

A continuación se simulan diferentes casos significativos para la comprobación del SPLL.

**Caso 1.** Caída del 50% de las tensiones de red. Entre los tiempos 0.04s y 0.07s.

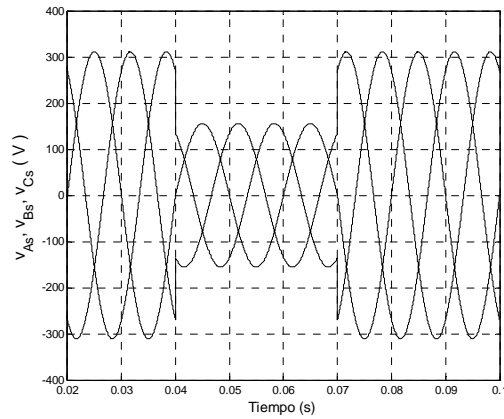


Figura 5.12 Tensiones de red.

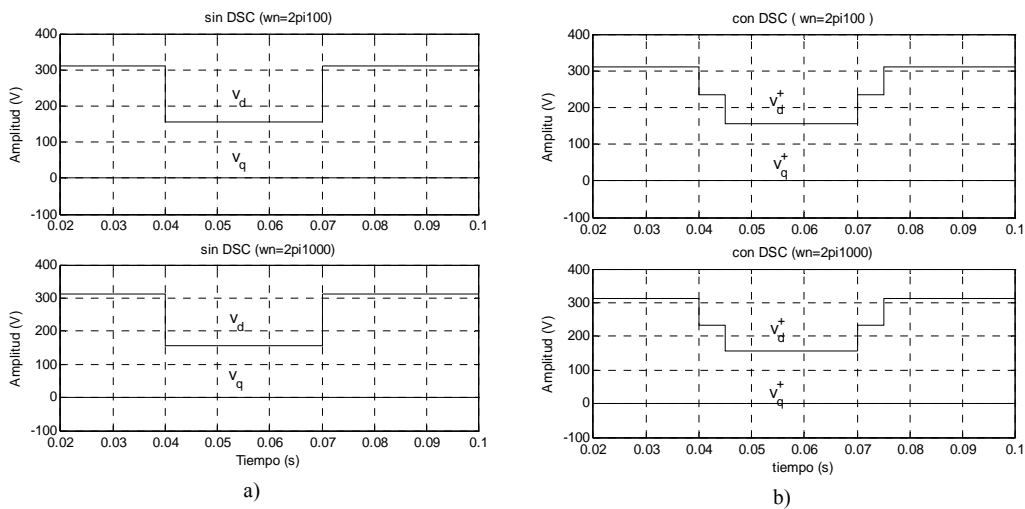


Figura 5.13 Respuesta temporal de las componentes  $v_d$ ,  $v_q$  y  $v_d^+$ ,  $v_q^+$  ante una caída del 50% de las tres fases a) sin DSC b) con DSC

En la Figura 5.12, se muestran las tensiones de red que se han utilizado en la simulación de este caso cuyos valores se han mostrado en la Tabla 5-1. Aplicando la transformación de Fortescue a dichas tensiones el valor de la secuencia directa tiene un valor eficaz de 220 V al cual le corresponde un valor máximo de  $220\sqrt{2} = 311.12 V$  tal y como se puede ver en las simulaciones de la Figura 5.13. Cuando las tres tensiones de red sufren una caída del 50% su valor eficaz pasa a ser de 110 V y el valor máximo de la secuencia positiva es de  $110\sqrt{2} = 155.56 V$ .

Analizando la Figura 5.12 a) se observa que la respuesta del sistema es prácticamente la misma para los dos anchos de banda ya que la perturbación introducida no obliga al SPLL a reaccionar ante ella.

En la Figura 5.13 b) se observa que al igual que el caso anterior la variación del ancho de banda no introduce modificaciones en la respuesta, sin embargo en este caso la componente de secuencia directa  $v_d^+$  presenta un retardo de 5 ms debido a la DSC en los dos anchos de banda.

En este caso la sincronización con el armónico fundamental de secuencia directa (pasos por cero) son exactos ya que la componente  $v_d^+$  no presenta oscilación de ningún tipo lo cual indica que la sincronización es correcta en este caso.

**Caso 2.** Caída del 20% de una sola fase de la tensión de red. Entre 0.04s y 0.07s.

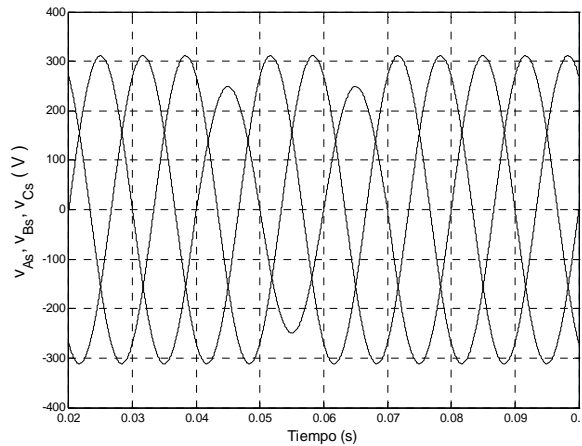


Figura 5.14 Caída del 20% da la fase A.

En la Figura 5.14, se muestran las tensiones de red utilizadas en la simulación, partiendo de los valores de dichas tensiones mostradas en la Tabla 5-1, se ha introducido una caída de un 20% sobre una de ellas ( $V_{As} = 220 * 0.8 = 176 V$ ). Aplicando la transformación de Fortescue al sistema de tensiones desequilibrado se obtiene un valor de la secuencia directa de las tensiones de red de:  $V_d^+ = 205.33 V$ , cuyo módulo corresponde a 290.38 V, coincidiendo con el valor obtenido en las simulaciones de la Figura 5.15 b).

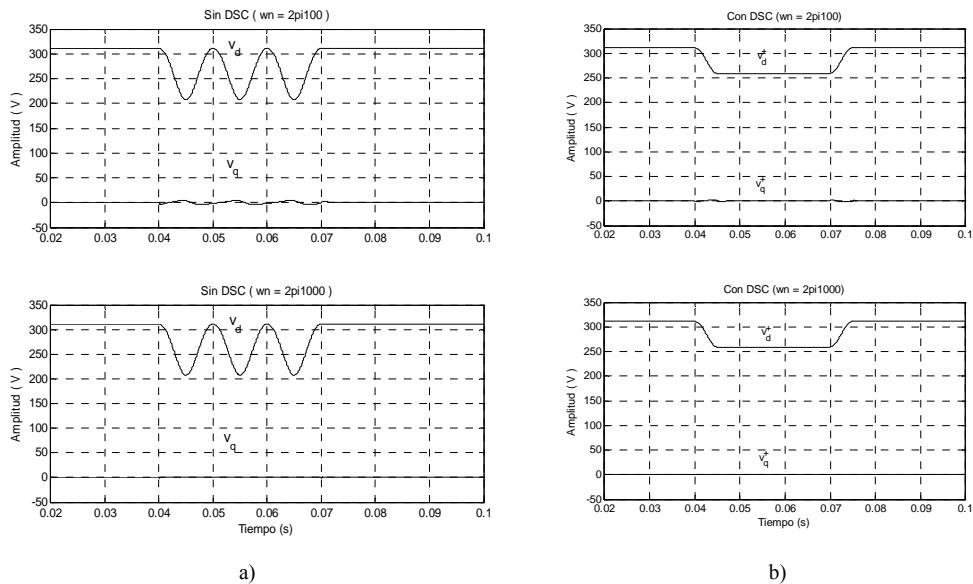


Figura 5.15 Respuesta temporal de las componentes  $v_d, v_q$  y  $v_d^+, v_q^+$  ante una caída del 20% en una de las fases a) sin DSC b) con DSC

Analizando la Figura 5.15 a) se observa que al no tener DSC el valor de la componente  $v_d$  presenta un rizado de 100Hz para los dos anchos de banda simulados (este rizado es debido a que si se está sincronizado con la secuencia directa de las tensiones de red que giran a 50Hz, la secuencia inversa que gira en los ejes  $\alpha\beta$  en sentido contrario a la misma velocidad de la componente directa, se ve desde la secuencia directa girando al doble de su velocidad 100 Hz). En el caso de no tener DSC y un ancho de banda de  $w_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$ , se observa que la componente  $v_q$  presenta un rizado durante el tiempo de la perturbación debido a que la velocidad del SPLL no es la suficiente para eliminar dichas oscilaciones, lo que va a provocar que el seguimiento de la fase de las tensiones de red presente un error en el paso por cero y la sincronización con las tensiones de red no sea la adecuada, tal y como se puede ver en la Figura 5.16 a) donde se ha realizado una ampliación de la evolución de la fase de la componente fundamental y secuencia directa de las tensiones de red ( $\hat{\theta}$ ) a los 0.06s (hay que tener presente que si se está correctamente sincronizado, la fase de dicha componente ( $\hat{\theta}$ ) varía entre 0 y  $(2\pi)$  y sus pasos por cero se producen cada 20ms (50Hz) teniendo en cuenta que en  $t = 0 \rightarrow \hat{\theta} = 0$ ).

Si se aumenta el ancho de banda a  $w_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$  desaparecen las oscilaciones de la componente  $v_q$ , consiguiendo que la sincronización con las tensiones de red y el seguimiento de la fase (paso por cero) sean los adecuados tal y como se muestra en la Figura 5.16 b). Para

este ancho de banda el SPLL es capaz de seguir dichas oscilaciones y el error en el paso por cero desaparece.

Como se puede observar en este caso aumentando el ancho de banda, el sistema tiene mayor velocidad de respuesta y consigue sincronizarse con la tensión fundamental de secuencia directa de las tensiones de red aunque el sistema presente desequilibrios.

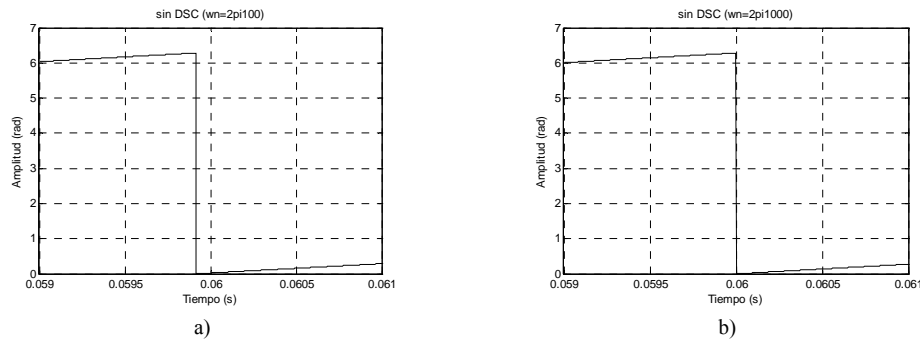


Figura 5.16 Fase de la componente de la secuencia directa de las tensiones de red sin DSC y variando la  $w_n$ .

En la Figura 5.15 b) se muestran los valores de las componentes  $v_d^+$  y  $v_q^+$  para el caso de un sistema desequilibrado de tensiones. En dichas figuras se observa como en este caso la DSC es capaz de eliminar el rizado debido a la secuencia inversa de las tensiones de red de la componente  $v_d^+$  y  $v_q^+$ , esto se debe a que tal y como se ha explicado en el apartado 4.2.2 la DSC elimina los armónicos de secuencia inversa, funcionando como un filtro de cancelación de armónicos para la obtención de la secuencia directa de las tensiones de red. En este caso la variación del ancho de banda al igual que en el caso anterior supone una modificación en la velocidad de respuesta y una mayor capacidad en el seguimiento de las oscilaciones, consiguiendo en el caso de mayor ancho de banda que las transiciones en la  $v_q^+$ , sean prácticamente inapreciables debido a la rapidez con la que se alcanza la referencia  $v_q^+ = 0$ .

A la vista de los resultados se observa que cuando la red presenta desequilibrios, si no se tiene DSC, va a suponer que las componentes  $v_d$  y  $v_q$  de las tensiones de red presenten un rizado superpuesto de 100Hz, que provocará que el seguimiento de la fase de las tensiones de red presente un error en régimen estacionario y el paso por cero no sea el adecuado. Aumentando el ancho de banda se consigue dar mayor velocidad de respuesta al SPLL y de esta forma eliminar el rizado en la componente  $v_q$  consiguiendo que el seguimiento de la fase de las tensiones de red sea el adecuado. En el último caso analizado se realiza un análisis del comportamiento del SPLL ante armónicos en la tensión de red y de como la modificación del ancho de banda influye en el comportamiento del SPLL a la hora de seguir la fase de las tensiones de red y conseguir una correcta sincronización.

**Caso 3.** Salto en la frecuencia de las tres tensiones (sistema equilibrado). Entre 0.04s y 0.07s  $f_a = f_b = f_c = 47\text{Hz}$ .

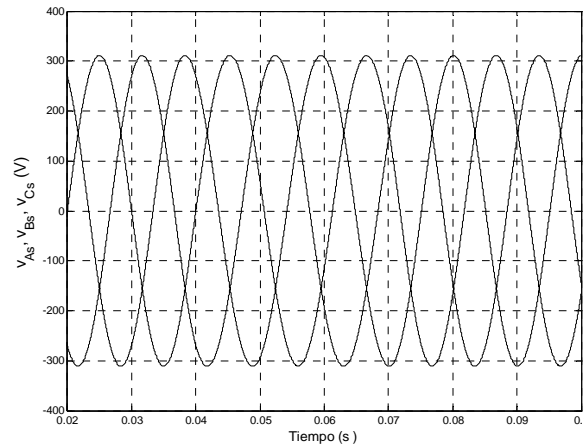


Figura 5.17 Salto en la frecuencia de las tensiones de red.

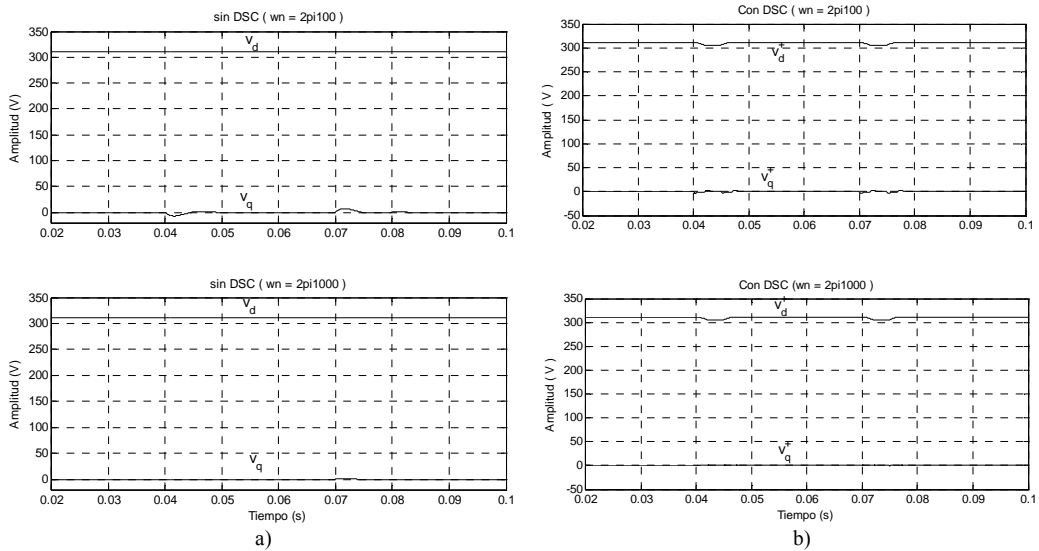


Figura 5.18 Respuesta temporal de las componentes  $v_d, v_q$  y  $v_d^+, v_q^+$  ante un salto de frecuencia(47Hz) a) sin DSC b) con DSC

En la Figura 5.17 se muestran las tensiones utilizadas en la simulación, cuyos valores corresponden a los mostrados en la Tabla 5-1. En este caso lo que se hace es introducir una variación en la frecuencia de dichas tensiones de -3Hz, pasando a ser la nueva frecuencia de 47Hz entre los tiempos de simulación de 0.04s y 0.07s.



Analizando la Figura 5.18 a), se observa que no existe variación en el valor de la componente  $v_d$ , ya que al tener un sistema equilibrado de tensiones antes y después de la perturbación el módulo de la secuencia positiva permanece constante. La variación del ancho de banda supone, al igual que en los casos anteriores, una modificación en la velocidad de respuesta del sistema, y así se observa que, para el caso del ancho de banda  $\omega_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$ , las transiciones en la referencia  $v_q = 0$ , son más lentas que para el caso del ancho de banda  $\omega_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ .

En la Figura 5.18 b) se observa que la respuesta es muy similar a los casos sin DSC, pero en esta ocasión hay que tener en cuenta el retraso que introduce la DSC y la variación del módulo de la componente  $v_q^+$ , hasta que no se corrige el nuevo retraso en la DSC debido a la nueva frecuencia de las tensiones de red. Hay que tener presente que el retraso que introduce la DSC es función del periodo del armónico fundamental de las tensiones de red ( $T/4$ ). La modificación del ancho de banda en este caso, al igual que con DSC, supone una modificación de la velocidad de respuesta. A mayor ancho de banda la referencia se alcanza antes y las transiciones de la referencia ( $v_q^+ = 0$ ) son más estrechas.

En las cuatro situaciones que se han simulado en este caso, la perturbación introducida no supone aparición de oscilaciones en la componente  $v_q$ , lo que supone que el seguimiento de la fase de las tensiones de red se hace de forma correcta y la referencia de dicha fase (paso por cero), no presenta error y los valores calculados por la SDFT serán los adecuados.

**Caso 4.** Cambio en la fase de las tres tensiones (sistema equilibrado). Entre 0.04s y 0.07s se produce un incremento en la fase de las tres señales de  $30^\circ$ .

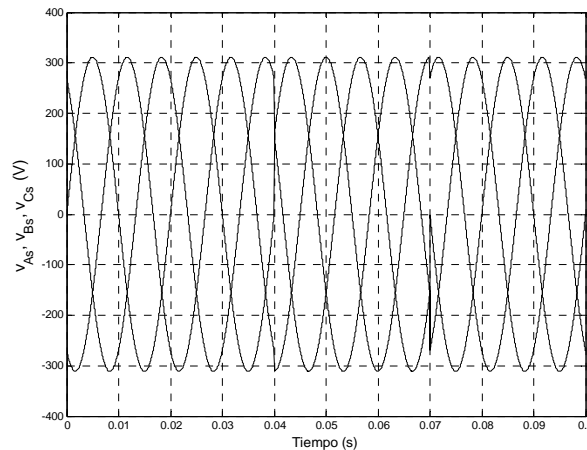


Figura 5.19 Cambio en la fase de la tres tensiones de red.

En la Figura 5.19 se muestra las señales de las tensiones de red utilizadas en la simulación de este caso, cuyos valores corresponden a los mostrados en la Tabla 5-1. En este caso se ha provocado un salto de  $30^\circ$  en las tres señales de red durante el tiempo de la perturbación para estudiar la respuesta del sistema ante este tipo de perturbaciones.

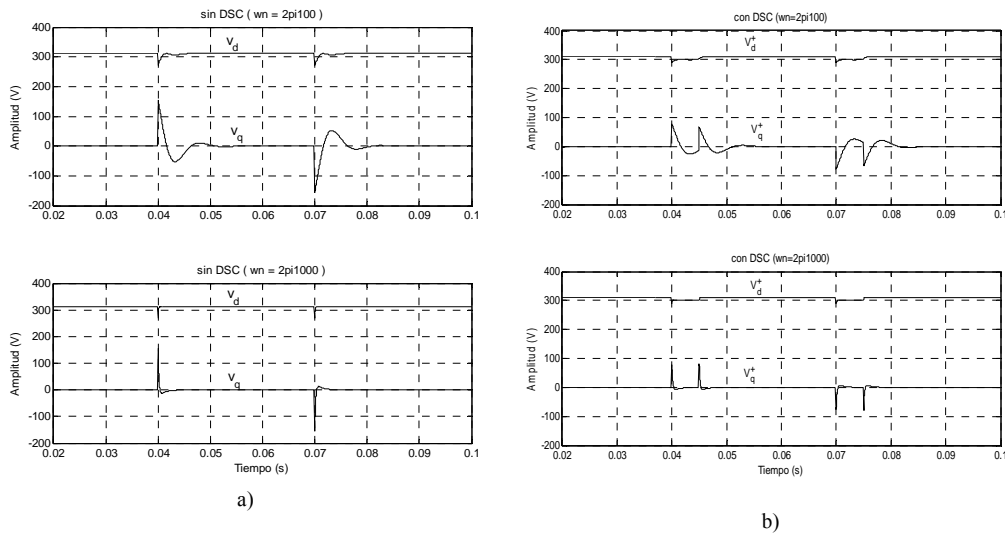


Figura 5.20 Respuesta temporal de las componentes  $v_d, v_q$  y  $v_d^+, v_q^+$  ante un cambio en la fase ( $30^\circ$ ) a) sin DSC b) con DSC.

En la Figura 5.20 a) se muestra el valor de la componente  $v_d$  y la componente  $v_q$  para el caso sin DSC y distintos anchos de banda. Como se puede ver el valor de la  $v_d$ , permanece constante y al mismo valor en régimen estacionario antes y después de la perturbación (módulo  $v_d=311$  V), ya que se tiene un sistema equilibrado de tensiones antes y después de la perturbación. Como se muestra en dichas figuras el tiempo de respuesta depende del ancho de banda simulado, en donde se observa que a mayor ancho de banda la duración de las transiciones es menor.

En la Figura 5.20 b) se puede ver que si se añade la DSC el tiempo de respuesta del sistema se hace mayor que para el mismo ancho de banda sin DSC. La justificación de esto es que ahora hay que sumar al tiempo de respuesta del sistema el tiempo de respuesta de la DSC ( $T/4$  del periodo fundamental de las señales de red). La modificación del ancho de banda supone una modificación de la rapidez de respuesta observándose que, a mayor ancho de banda la duración de las transiciones se hace más corta.

Analizando las cuatro situaciones planteadas se observa que la mejor respuesta del sistema ante este tipo de perturbación se obtiene sin DSC, ya que debido al retardo de la DSC se tarda más

tiempo en alcanzar la referencia, y desde el punto de vista del ancho de banda dependerá de la velocidad de respuesta elegida.

**Caso 5.** Sistema equilibrado con armónicos en la tensión de red. Entre 0.04s y 0.07s se introducen los siguientes armónicos:

$$v_5 = 13.2V \text{ rms (6\%)}$$

$$v_7 = 11V \text{ rms (5\%)}$$

$$v_8 = 4.4V \text{ rms (2\%)}$$

$$v_{10} = 2.2V \text{ rms (1\%)}$$

El resultado es un sistema trifásico equilibrado en todas las componentes armónicas.

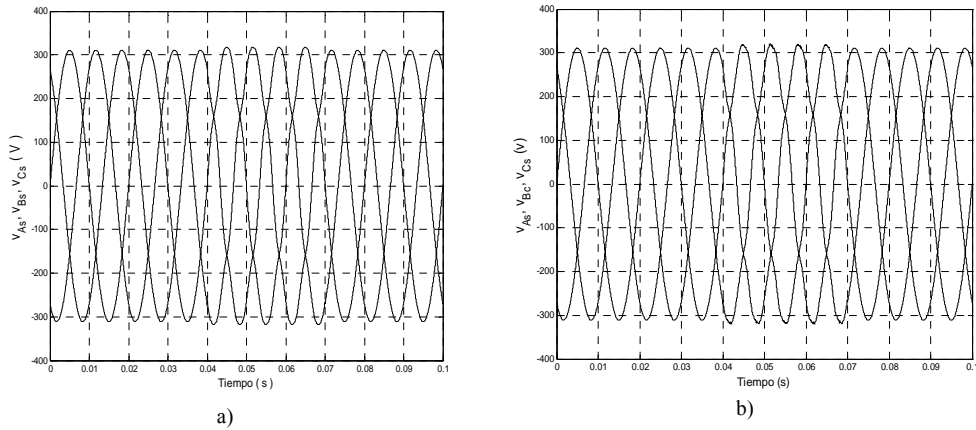


Figura 5.21 Tensiones de red con armónicos: a) Armónicos orden 5 y 7 b) Armónicos orden 5,7,8 y 10.

En la Figura 5.21 se muestran las tensiones de red utilizadas en la simulación de este caso. Las dos tensiones son equilibradas durante todo el tiempo de simulación, y lo que se ha hecho es añadir a las tensiones de red en el caso a) los armónicos de orden 5 y 7 para verificar el correcto funcionamiento de la DSC, a la hora de eliminar dichos armónicos, y en el caso b) se han añadido a las tensiones de red los armónicos de orden 5, 7, 8 y 10. Los valores de los armónicos se han elegido teniendo en cuenta la Tabla 4-1, aumentando dichos porcentajes para los armónicos de orden 8 y 10, para un mejor análisis de sus efectos.

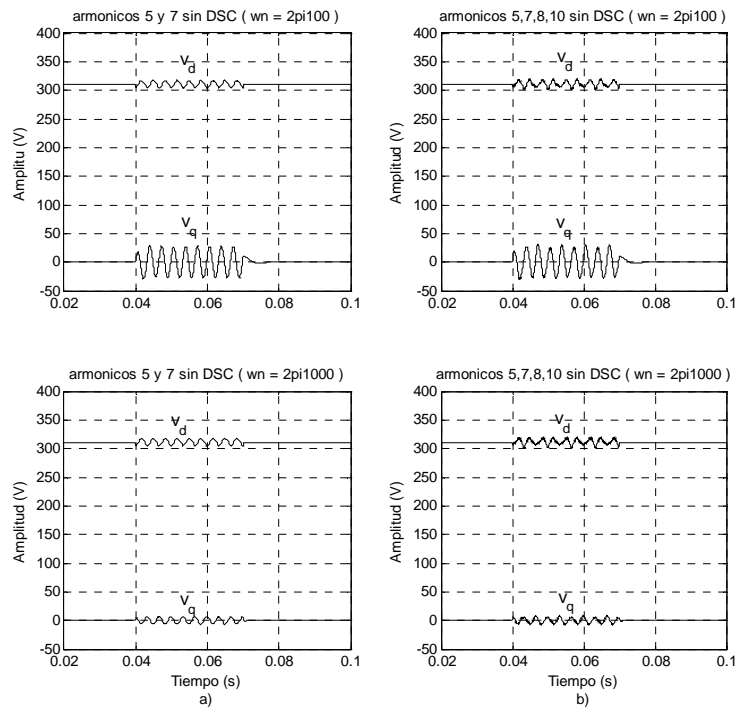


Figura 5.22 Respuesta temporal de las componentes  $v_d$  y  $v_q$  ante armonicos de red a) sin DSC con armonicos 5° y 7°  
 b) sin DSC y con armonicos 5°,7,8° y 10°

Analizando la Figura 5.22 a), se observa que si no se tiene DSC y las tensiones de red presentan distorsión armónica, el SPLL presentará un error a la hora de sincronizarse con la fase de las tensiones de red, tal y como se observa en la Figura 5.23, en donde en función del ancho de banda el seguimiento de la fase (paso por cero), presentará mayor o menor exactitud. En la Figura 5.23 a) se muestra la fase de la secuencia directa de las tensiones de red para el caso de tener los armónicos de orden 5 y 7 y un ancho de banda de  $w_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$ . En dicha figura se puede ver como la componente  $v_q$  de las tensiones de red presenta rizado y el paso por cero de la fase de la tensión de secuencia directa no coincide con la de la componente fundamental (0.06s). Si se aumenta el ancho de banda se está consiguiendo un mejor seguimiento de las frecuencias presentes  $v_d$  y  $v_q$ , lo que reduce el rizado y mejora el paso por cero tal y como se muestra en la Figura 5.23 b).

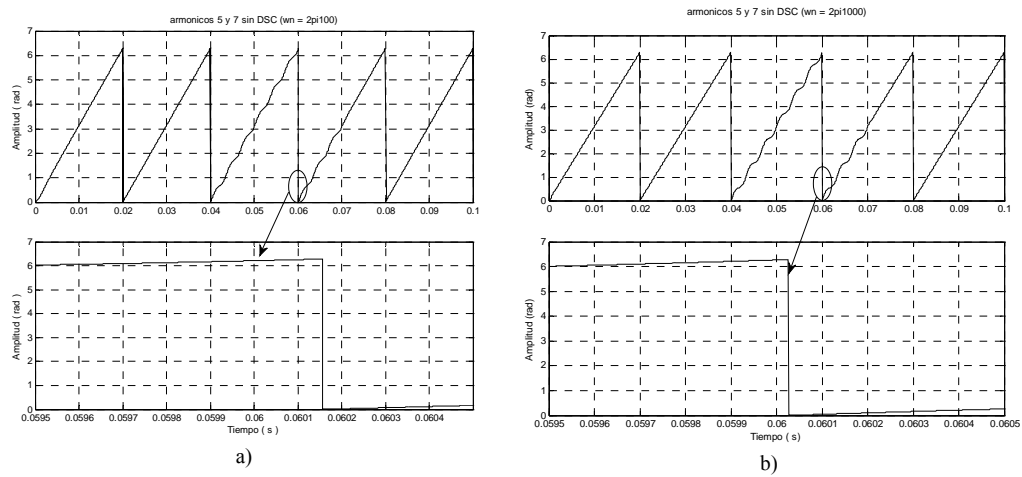


Figura 5.23 Fase de la componente de la secuencia directa de las tensiones de red sin DSC con armónicos 5 y 7 a)  $w_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$  y b)  $w_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$

En la Figura 5.22 b) se han añadido al sistema de tensiones los armónicos de orden 5, 7, 8 y 10 lo que supone que desde el punto de vista de modificación del ancho de banda, se llegaría a las mismas conclusiones que para el caso de los armónicos de orden 5 y 7, sin embargo se han añadido estos armónicos para verificar que la DSC no filtra los armónicos cuyo orden no está dentro de la serie  $h = 6k \pm 1$ , donde  $k = \text{entero impar}$ . La verificación de la capacidad de filtrado por parte de la DSC, ante estos armónicos se muestra en la Figura 5.24 b).

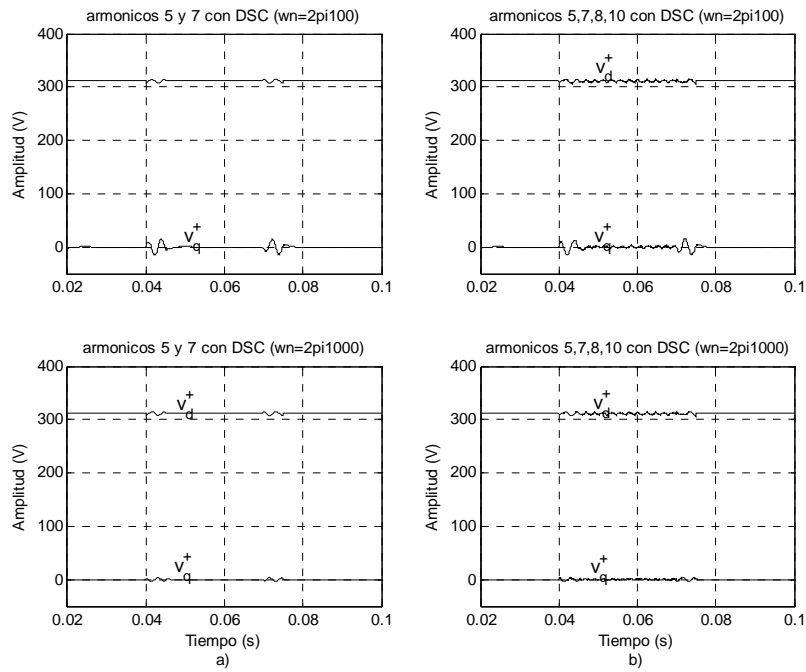


Figura 5.24 Respuesta temporal de las componentes  $v_d^+$  y  $v_q^+$  ante armónicos de red a) con DSC con armónicos de red  $5^\circ$  y  $7^\circ$  b) con DSC y con armónicos  $5^\circ, 7^\circ, 8^\circ$  y  $10^\circ$

En la Figura 5.24 a) se observa que cuando los armónicos presentes en la red son el  $5^\circ$  y  $7^\circ$ , el comportamiento del SPLL, con DSC es capaz de filtrar los armónicos presentes en la red, tal y como se esperaba. El aumento del ancho de banda, al igual que en los casos anteriores lo que proporciona es una mayor velocidad de respuesta, sin embargo en este caso es la propia DSC la que elimina los armónicos de la componente  $v_q^+$ , consiguiendo de esta forma que para los dos anchos de banda el seguimiento de la fase del armónico fundamental y de secuencia directa sea correcto (paso por cero adecuado).

En el caso de que los armónicos de red no cumplan las condiciones de cancelación (ver apartado 5.2.2.1), el SPLL presenta un rizado en la componente  $v_d^+$  y en la  $v_q^+$ , que dependiendo del ancho de banda elegido se tendrá un mejor o peor seguimiento de la fase y una mayor o menor velocidad de respuesta.

**Caso 6.** Sistema equilibrado con armónicos en la tensión de red. Entre 0.04s y 0.07s se introduce el armónico de orden 22 con la siguiente amplitud:

$$v_{22} = 17.6V \text{ rms}$$

El resultado es un sistema trifásico equilibrado en todas las componentes armónicas.

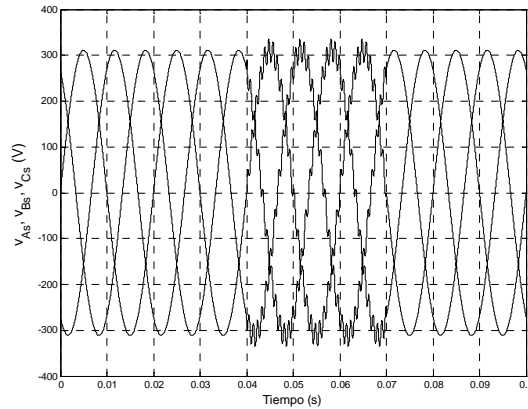


Figura 5.25 Tensiones de red con armónicos de orden 22.

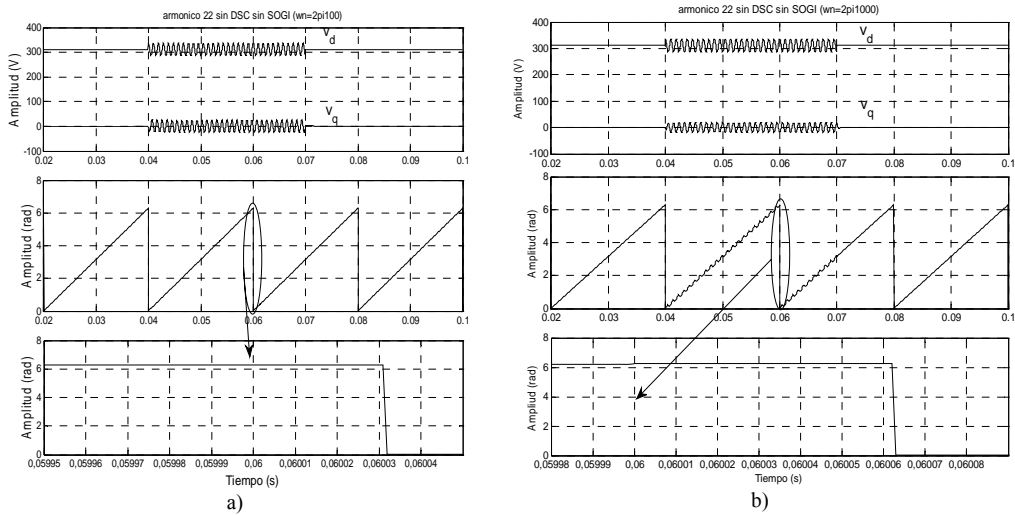


Figura 5.26 Respuesta temporal de las componentes  $v_d$  y  $v_q$  y la fase de las tensiones de red ante los armónicos 22 y a)  $w_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$  y b)  $w_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$

En la Figura 5.25 se muestran las tensiones de red utilizadas para la simulación de este caso, en donde se ha introducido el armónico de orden 22 sobre las tensiones de red. Se ha introducido dicho armónico porque no lo filtra la DSC y además dicho armónico permite el análisis del

seguimiento de la fase de la secuencia directa de las tensiones de red por parte del SPLL para los dos anchos de banda simulados.

Como se ha comentado anteriormente el objetivo principal del SPLL es la sincronización con el armónico fundamental de la secuencia directa de las tensiones de red. En dicha sincronización lo que se busca es el seguimiento exacto de la fase de dicha secuencia (paso por cero) ya que de no estar sincronizado correctamente el resultado de la SDFT presentará un error.

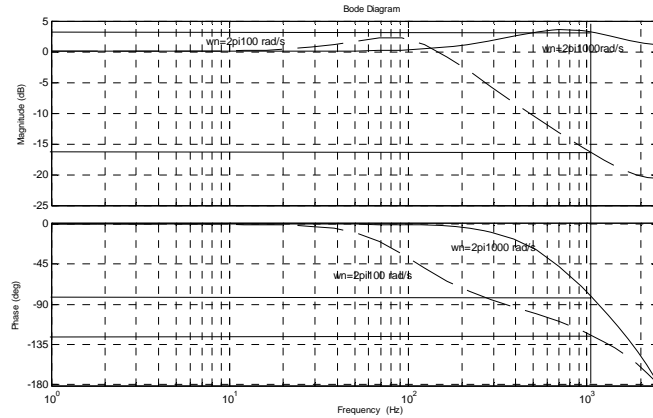


Figura 5.27 diagrama de bode del SPLL en lazo cerrado para distintos anchos de banda.

En la Figura 5.26 a) se muestra el valor de las componentes  $v_d$  y  $v_q$ , junto con la fase de las tensiones de red, cuando se introduce el armónico de orden 22 en las tensiones de red y el ancho de banda del SPLL es de  $\omega_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$ . Analizando dicha figura se observa que las componentes  $v_d$  y  $v_q$ , presentan rizado durante el tiempo de la perturbación y el paso por cero de la fase de las tensiones de red presenta un error de  $33 \mu\text{s}$ , respecto al paso por cero teórico (0.06s).

Por otro lado en la Figura 5.26 b) se muestra el valor de las componentes  $v_d$  y  $v_q$ , y la fase de las tensiones de red, cuando en la tensión de red se introduce el armónico de orden 22 y el ancho de banda del SPLL en este caso es de  $\omega_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ . Analizando dicha figura se observa que las componentes  $v_d$  y  $v_q$ , presentan un rizado durante el tiempo de la perturbación menor que para el ancho de banda anterior, y el paso por cero de la fase de las tensiones de red presenta un error de  $63 \mu\text{s}$ , respecto al paso por cero ideal (0.06s).

Para entender lo que está sucediendo en este caso es necesario analizar el diagrama de bode del SPLL mostrado en la Figura 5.27. Analizando dicha figura se observa que el SPLL presenta una atenuación de 16dB y una fase de  $-132^\circ$  para el armónico de orden 22 (1100Hz) cuando se tiene un ancho de banda de ( $\omega_n = 2\pi 100 \text{ rad/s}$ ). En dicha situación el SPLL está atenuando



el valor del armónico introducido y minimizando el efecto que sobre el seguimiento de la fase tiene dicho armónico, consiguiendo que el error que se tiene en el seguimiento de la fase sea de  $33 \mu s$ . En este caso como el SPLL no tiene una velocidad de respuesta capaz de seguir las oscilaciones de dicho armónico, por ello no aparece el rizado en  $(\hat{\theta})$  y se mantiene en  $v_q$ .

Para el caso en el que se tiene un ancho de banda de  $\omega_n = 2\pi i 1000 \text{ rad/s}$ , el SPLL presenta una ganancia de 4 dB y una fase de  $-87^\circ$  para el armónico de orden 22. En esta situación el SPLL intenta seguir el armónico lo cual se observa en el rizado que aparece en  $(\hat{\theta})$  y en la atenuación de  $v_q$ . Sin embargo, al introducir desfase el seguimiento no es correcto y las oscilaciones desfasadas en  $(\hat{\theta})$ , llevan a un aumento del error en el paso por cero.

Si se observa la componente  $v_q$ , en este caso presenta un rizado menor que en el caso de tener un ancho de banda de  $\omega_n = 2\pi i 100 \text{ rad/s}$ , ya que en este caso al tener el SPLL una velocidad de respuesta mayor es capaz de realizar un mejor seguimiento del armónico haciendo que este disminuya su amplitud, ya que de forma teórica y si el SPLL tuviese la suficiente velocidad de respuesta  $v_q = 0$ .

Teniendo en cuenta los dos análisis realizados para los dos anchos de banda se extraen las siguientes conclusiones:

- a) Si se tiene un ancho de banda estrecho se tiene una velocidad de respuesta lenta y se consigue una atenuación de todos los armónicos que estén por encima de la frecuencia de corte, que dependerá del orden de los mismos. Como consecuencia de ello el error en el seguimiento de la fase dependerá de dicha atenuación y la componente  $v_q$ , tendrá un rizado provocado por los armónicos. Por otro lado para todos los armónicos que se encuentren dentro de la banda pasante del SPLL, el seguimiento de la fase será correcto y el rizado en  $v_q$ , provocado por los mismos será 0, siempre y cuando no presentes desfase. Si los armónicos tienen desfase y están en la banda pasante aparecerán en  $(\hat{\theta})$ , desfasados lo que llevará a un error en el paso por cero.
- b) Si se aumenta el ancho de banda se está aumentando la velocidad de respuesta del SPLL, pero se está empeorando la capacidad de filtrado del SPLL. Es decir el SPLL presentará un buen seguimiento de la fase para todos los armónicos que estén dentro de la banda pasante y la componente  $v_q$  no presentará oscilaciones ( $v_q = 0$ ) al tener el SPLL la suficiente velocidad para realizar un seguimiento de dichas oscilaciones. Si alguno de los armónicos que están dentro de la banda pasante presentase desfase, provocaría un error en el paso por cero ya que el SPLL seguiría también dicho desfase. Para el resto de armónicos que estén fuera de la banda pasante, el SPLL tendría un error en el seguimiento de la fase que estaría determinado por la atenuación que tuviese dicho armónico para ese ancho de banda.

Tras lo expuesto, y teniendo en cuenta que lo que se busca por parte del SPLL es un buen seguimiento de la fase de la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red, lo adecuado sería tener un ancho de banda estrecho que atenuase todos los armónicos superiores al de 50 Hz, garantizando de esta forma que el seguimiento de la fase presentase un error lo más pequeño posible frente a los posibles armónicos que tuviese la tensión de red. Por otro lado si se elige un ancho de banda estrecho se tiene una velocidad de respuesta más lenta haciendo que el SPLL necesite más tiempo a la hora de sincronizarse con la fase de la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red.

Con el fin de buscar un compromiso entre la velocidad de respuesta y capacidad de filtrado por parte del SPLL se ha elegido en esta tesis un ancho de banda de  $\omega_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$  para el SPLL, consiguiendo de esta forma un tiempo de respuesta de 1.8ms ante un escalón unitario tal y como se muestra en la Figura 4.22. El aumento de la velocidad de respuesta supone una disminución de la capacidad de filtrado del SPLL, teniendo un peor comportamiento en el seguimiento de la fase de las tensiones de red cuando se tengan armónicos con desfase que estén dentro de la banda pasante del SPLL. Para evitar esto y conseguir un buen comportamiento del SPLL ante dichos armónicos se ha utilizado un filtro de red (SOGI), sintonizado a la frecuencia fundamental que consigue atenuar el efecto de dichos armónicos dentro de la banda pasante del SPLL y cuya respuesta en frecuencia se ha mostrado en la Figura 4.11. Para todos los armónicos que estén fuera de la banda pasante del SPLL se tendría una mejor respuesta en el seguimiento de la fase ya que se suma el efecto atenuador del propio SPLL y la del filtro. La ventaja del filtro SOGI frente a otro tipo de filtros es la posibilidad que tiene a la hora de sintonizarse a distintas frecuencias de modo continuo “on line”, ya que si se utilizase un filtro con una frecuencia de corte fija y próxima al armónico fundamental para conseguir una buena atenuación, si se produjese una variación en la frecuencia de red al permanecer constante la frecuencia de corte podría provocar un desfase en el armónico fundamental con las consecuencias que eso supondría en el funcionamiento de la DSC.

La utilización del filtro SOGI, introduce desfase en todos los armónicos diferentes al sintonizado (fundamental). Aquellos que estén dentro de la banda pasante del SPLL por el hecho de presentar desfase introducen error en la detección del paso por cero.

Para cuantificar dicho error se han llevado a cabo una serie de simulaciones con el sistema de medidas completo y se ha constatado que el sistema de medidas presenta un error del 0.1% por cada grado que se desvíe el SPLL en el cálculo del paso por cero.

**5.2.4. Simulación del sistema de sincronización (SOGI+DSC+PLL).**

En la Figura 5.2, se presenta el diagrama Simulink del sistema de sincronización completo, utilizado para llevar a cabo las simulaciones de este apartado, en donde se muestra el filtro de red (SOGI) para la eliminación de los armónicos de las tensiones de red. Como se ha visto en el apartado anterior la presencia de armónicos puede provocar que el SPLL no realice un seguimiento adecuado de la fase de la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red y como consecuencia el resultado de la SDFT no sea el adecuado.

Para validar funcionamiento del sistema de sincronización completo se han llevado a cabo una serie de simulaciones donde se somete al sistema de sincronización (SOGI+DSC+SPLL) a distintas perturbaciones para verificar su funcionamiento ante dichas perturbaciones. Estas simulaciones deben demostrar que el sistema de sincronización, se sincroniza con la componente fundamental de la secuencia directa de las tensiones de red  $v_1^+$ .

En las simulaciones realizadas se han ajustado las constantes del SPLL para trabajar con un ancho de banda de  $\omega_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ , ( $K_{pPLL} = 1.4814$ ,  $\alpha_{PLL} = 0.561$ ), consiguiendo de esta forma un compromiso entre velocidad de respuesta y capacidad de atenuación de los armónicos tal y como se ha mostrado en el apartado 5.2.3. Por otro lado las constantes del filtro SOGI, se han fijado buscando una respuesta en frecuencia que combine una buena atenuación de las frecuencias que se encuentran dentro de la banda pasante del SPLL ( $\omega_n = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$ ), y una buena respuesta dinámica del filtro, teniendo en cuenta esto se ha ajustado un valor de  $k=1.7$ , donde para dicho valor se obtiene una respuesta en frecuencia y una respuesta escalón como las mostradas en la Figura 5.28.

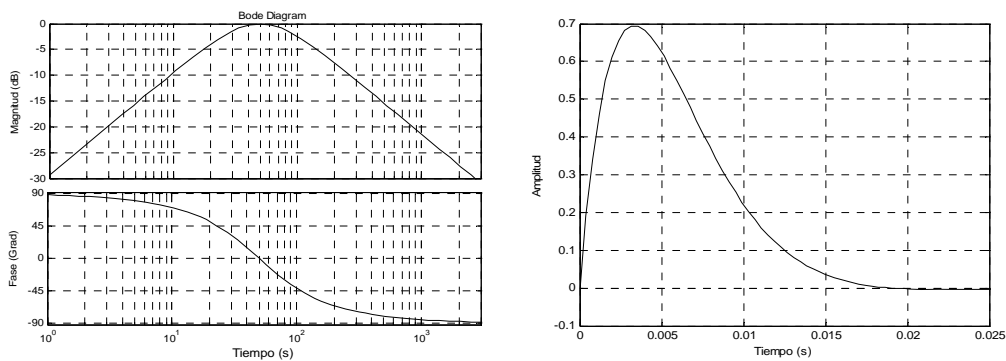


Figura 5.28 Respuesta en frecuencia y respuesta ante un escalon unitario del filtro SOGI para  $k=1.7$

En las simulaciones mostradas a continuación se presentan los valores de las señales  $V_{d1}^+$  y  $V_{q1}^+$  que obtiene el sistema de sincronización. En el caso de introducir armónicos en las tensiones de red se muestran los valores de la fase de la componente fundamental y secuencia directa de

dichas tensiones para un mejor análisis del sistema de sincronización. El filtro SOGI a la entrada del sistema de sincronización obtiene el armónico fundamental de las tensiones de red, y a continuación la DSC extrae la secuencia positiva para conseguir que el SPLL se sincronice con la fase del armónico fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red ( $V_{d1}^+$  y  $V_{q1}^+$ ).

El sistema de sincronización (SOGI+DCS+SPLL) se ha probado en los siguientes casos:

**Caso 1.** Caída del 50% de las tensiones de red. Entre 0.06s y 0.12 s.

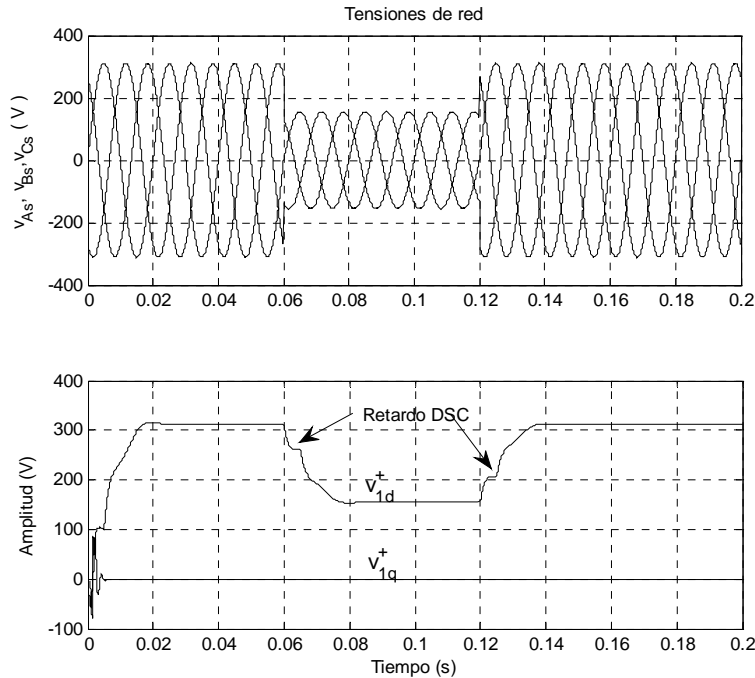


Figura 5.29 Respuesta temporal de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  ante una caída del 50% de las tres fases.

Los valores de las tensiones de red utilizados en este caso corresponden a los mostrados en la Tabla 5-1 y los valores de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$ , corresponden a los calculados en el caso1 del apartado anterior.

En la Figura 5.29, se observa como el sistema de sincronización, se engancha con el armónico fundamental y de secuencia positiva ante una caída del 50% de las tres tensiones de red. Hay que tener presente que cuando no se tienen armónicos en las tensiones de red, no hay rizado en las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  de dichas tensiones, en esas condiciones el sistema de sincronización sigue de forma adecuada la fase de la componente fundamental de secuencia directa (paso por cero), consiguiendo de esta forma que la SDFT proporcione un valor correcto a su salida.

En el momento de producirse la caída de las tensiones de red (0.06 s), el sistema tarda 18.8 ms en sincronizarse con el armónico fundamental y de secuencia positiva, tal y como se observa en dicha figura. El tiempo de respuesta está determinado por la dinámica total del sistema, donde se incluye el tiempo de respuesta del filtro (18ms), el tiempo de respuesta de la DSC (5ms) y el tiempo de respuesta del SPLL (1.8 ms), teniendo de esta forma un tiempo de respuesta total de 24.8ms.

**Caso2.** Caída del 20% de una sola fase de la tensión de red. Entre 0.06s y 0.12s.

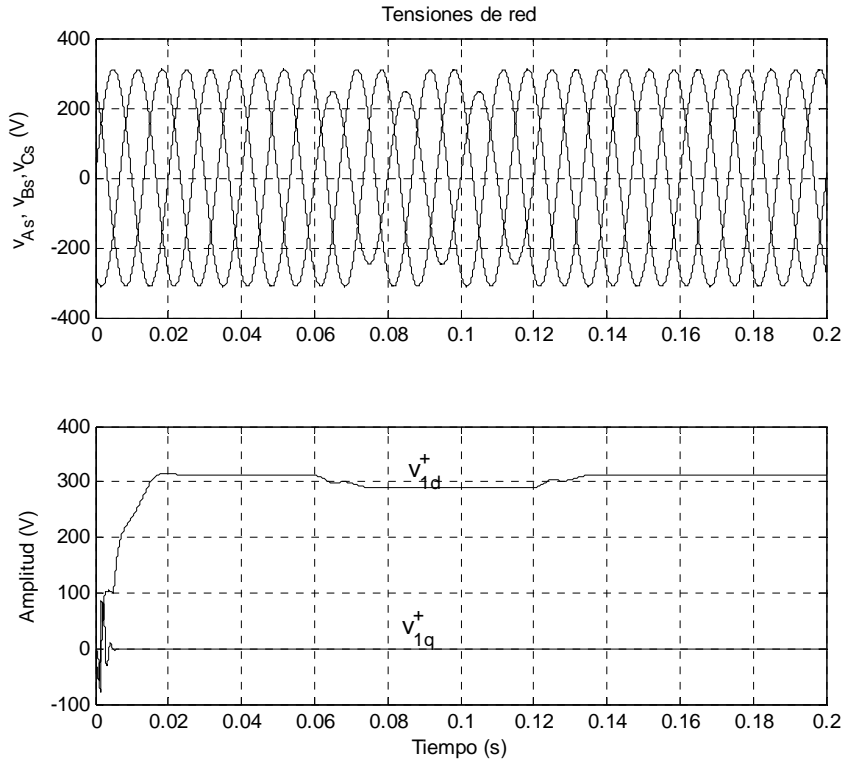


Figura 5.30 Respuesta temporal de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  ante una caída del 20% de una fase.

En la Figura 5.30, se muestran las tensiones de red utilizadas en la simulación, partiendo de los valores de dichas tensiones mostradas en la Tabla 5-1, se ha introducido una caída de un 20% sobre una de ellas ( $v_{As} = 220 * 0.8 = 176 V$ ). Aplicando la transformación de Fortescue al sistema de tensiones desequilibrado se obtiene un valor de la secuencia directa de las tensiones de red de:  $v_d^+ = 205.33 V$ , cuyo módulo corresponde a 290.38 V, tal y como se muestra en las simulaciones de dicha figura.

En este caso la caída en las tensiones de red corresponde a una sola fase, lo que provoca que la caída de la secuencia positiva sea menor que en el caso anterior tal y como se observa en la Figura 5.30.

En dicha figura se observa que las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$ , no presentan rizado debido a la secuencia inversa (sistema desequilibrado en tensiones), ya que la DSC se encarga de eliminarlo consiguiendo de esta forma que el seguimiento de la fase de la secuencia directa de las tensiones de red sea el adecuado (paso por cero).

**Caso 3.** Salto en la frecuencia de las tres tensiones (sistema equilibrado). Entre 0.06s y 0.12s  $f_a = f_b = f_c = 47\text{Hz}$ .

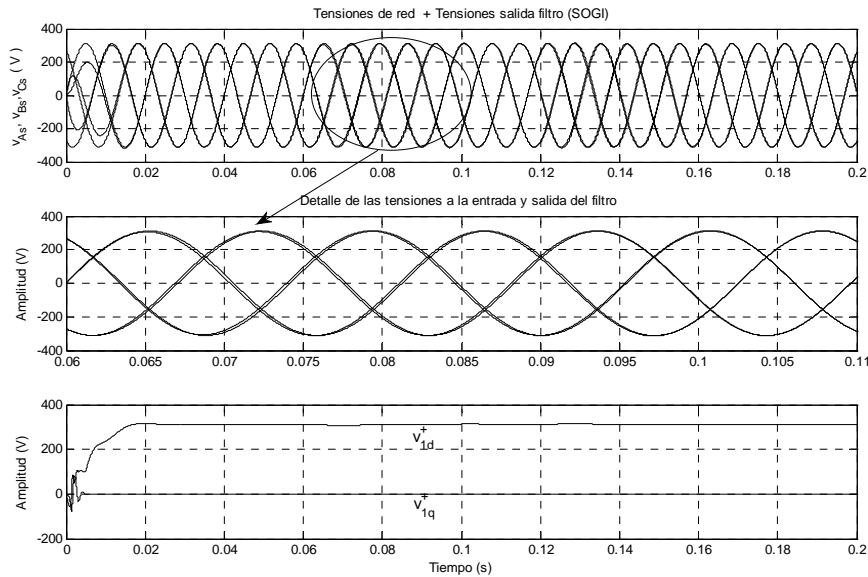


Figura 5.31 Respuesta temporal de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  ante un salto de frecuencia (47Hz).

En la Figura 5.31 se muestran las tensiones utilizadas en esta simulación, cuyos valores corresponden a los mostrados en la Tabla 5-1. En este caso lo que se ha hecho es introducir una variación en la frecuencia de dichas tensiones de -3Hz, pasando a ser la nueva frecuencia de 47Hz entre los tiempos de simulación de 0.06s y 0.12s.

En la Figura 5.31, se observa cómo responde el sistema de sincronización ante un cambio en la frecuencia de red. Como se puede observar a los 0.06s se produce una variación en la frecuencia de -3Hz pasando la nueva frecuencia de las tensiones de red a 47 Hz. Se observa que una vez que la frecuencia pasa a ser de 47Hz el filtro de red provoca un desfase entre la

tensión de entrada y la de salida tal y como se puede ver en la zona ampliada de dicha figura. El desfase inicial es debido a que la referencia de la pulsación que recibe el filtro SOGI desde la salida del SPLL, todavía no ha cambiado existiendo una diferencia entre la frecuencia de las señales de entrada y la frecuencia de corte del filtro. Como se describió en el capítulo 4, esto es debido a que la nueva frecuencia de muestreo no se actualiza hasta el siguiente periodo de la red al que se ha producido la modificación de la frecuencia. Teniendo en cuenta esto, en la Figura 5.31(centro) se observa que la correcta sincronización con la nueva frecuencia se produce en  $t = 0.1048s$ . Durante los primeros 20 ms se detecta la nueva frecuencia de red (47Hz), sin embargo la pulsación de referencia del filtro SOGI sigue siendo de 50Hz. Cuando se ha detectado la nueva frecuencia se actualiza la pulsación de referencia del filtro SOGI y al cabo de los 24.8 ms se alcanza la nueva referencia, es decir el sistema de sincronización se ha enganchado con la nueva frecuencia de red al cabo de  $20+24.8=44.8$  ms.

En este caso el valor de la componente  $v_{1d}^+$  permanece al mismo valor antes y después de la perturbación ya que en este caso no hay desequilibrios en las tensiones de red, y solo se ve afectada durante el transitorio debido al retraso de la DSC, provocado por el cálculo del valor de la secuencia directa para la nueva frecuencia.

Respecto al seguimiento de la fase de la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red, en este caso al no tener ningún tipo de componente armónica en las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$ , el seguimiento se realiza de forma exacta en el momento que el SPLL, se sincronice de nuevo con las tensiones de red y con su nueva frecuencia.

**Caso 4.** Cambio en la fase de las tres tensiones (sistema equilibrado). Entre 0.06s y 0.12s Se produce un incremento en la fase de las tres señales de 30°.

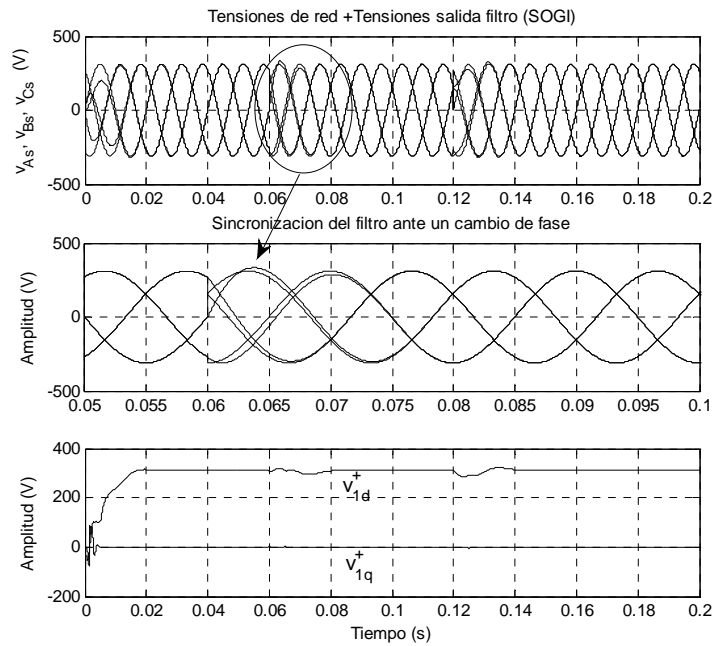


Figura 5.32 Respuesta temporal de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  ante un cambio en la fase (30°).

En la Figura 5.32 se muestran las señales de las tensiones de red utilizadas en la simulación de este caso, cuyos valores corresponden a los mostrados en la Tabla 5-1. En este caso se ha provocado un salto de 30° en las tres señales de red durante el tiempo de la perturbación para estudiar la respuesta del sistema ante este tipo de perturbación.

En Figura 5.32 se observa como el sistema de sincronización se engancha con las tensiones de red ante un salto en la fase de las tres tensiones consiguiendo en este caso alcanzar la nueva referencia al cabo de 24.8 ms, ya que en este caso la frecuencia permanece constante.

Si se observa el valor de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$ , se puede ver como el SPLL consigue alcanzar la referencia de la componente  $v_{1q}^+$ , en un tiempo menor que el necesario para que la componente  $v_{1d}^+$  alcance su referencia debido al retardo del filtro y la DSC.

Al igual que en el caso anterior el seguimiento de la fase de la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red, se realiza de forma correcta en el momento en que el SPLL se sincronice de forma adecuada con las tensiones de red tras el cambio de fase, ya que en este caso no hay distorsión armónica en las tensiones de red que pueda provocar un mal seguimiento de dicha fase.



**Caso 5.** Armónicos en la tensión de red. Entre 0.06s y 0.12s se introducen los siguientes armónicos:

$$v_5 = 13.2V \text{ rms}(6\%)$$

$$v_7 = 11V \text{ rms}(5\%)$$

$$v_8 = 4.4V \text{ rms}(2\%)$$

$$v_{10} = 2.2V \text{ rms}(1\%)$$

Los valores de los armónicos se han elegido teniendo en cuenta la Tabla 4-1, aumentando dichos porcentajes para los armónicos de orden 8 y 10, para un mejor análisis de sus efectos.

El resultado es un sistema trifásico equilibrado en todas las componentes armónicas.

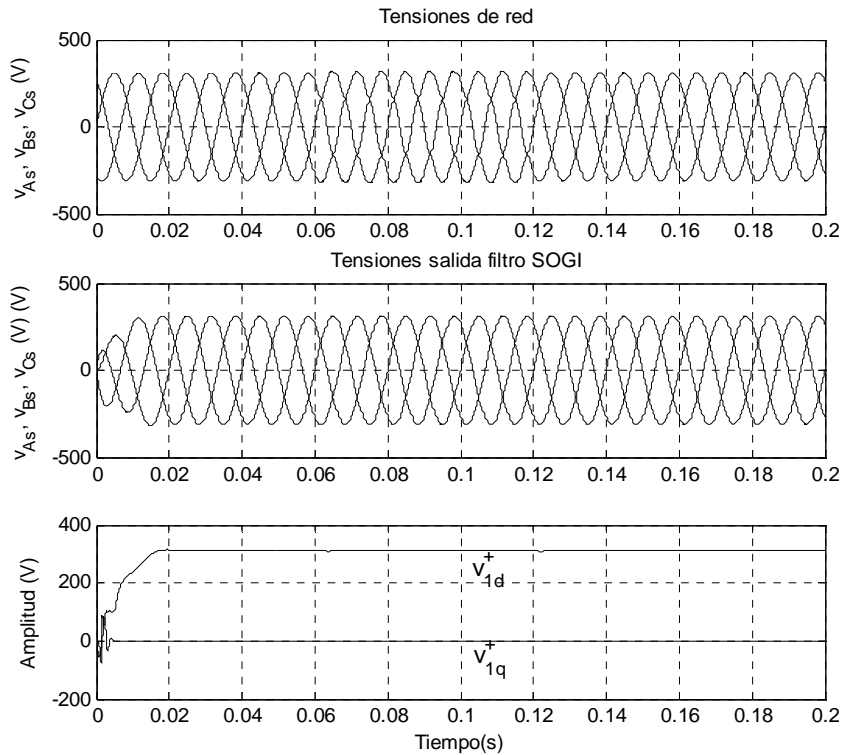


Figura 5.33 Respuesta temporal de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  ante armónicos de red 5°, 7°, 8° y 10°.

En la Figura 5.33 se muestran las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  donde se han introducido los armónicos descritos en la tensión de red, y se observa que dichas componentes no presentan rizado ya que el filtro SOGI se encarga de eliminar todos los armónicos presentes en las tensiones de red provocando que el sistema de sincronización presente un buen funcionamiento ante cualquier tipo de armónico presente en dichas tensiones, ya sean de orden par o impar. De esta forma se consigue mejorar el funcionamiento del SPLL en los casos en los que la DSC no elimina los armónicos de red tal y como se analizó en el apartado 5.2.2.1.

Si aumentamos las amplitudes de los armónicos van aumentar las oscilaciones en las transiciones de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$ , pero se alcanzaría el régimen permanente con el valor correcto.

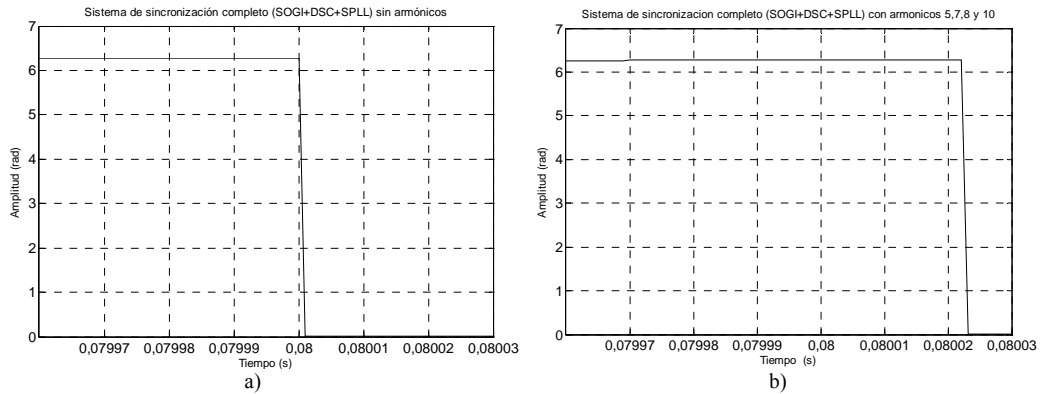


Figura 5.34 Fase de la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red: a) sin armónicos b) con armónicos de orden 5,7,8 9 y 10.

Desde el punto de vista de seguimiento de la fase de la componente fundamental de las tensiones de red, en la Figura 5.34, se puede ver cuál es el efecto que provoca el filtro SOGI, cuando dichas tensiones presentan distorsión armónica. En la Figura 5.34 a), puede ver como el sistema de sincronización realiza un seguimiento perfecto de la fase de la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red cuando no se tienen armónicos en dichas tensiones y en la Figura 5.34 b), se observa como al introducir los armónicos de orden 5, 7, 8 y 10 el seguimiento de la fase presenta un error en el paso por cero de 22 microsegundos ( $0.18^\circ$ ). El error cometido por el sistema de sincronización en el seguimiento de la fase se justifica teniendo presente que los armónicos 8 y 10 son atenuados (no eliminados), por el SOGI y además les introduce desfase. La DSC no los elimina y llegan al SPLL que por estar dentro de su banda pasante los sigue exactamente (por eso  $v_q = 0$  y sin oscilaciones), sin embargo el desfase causa que  $(\hat{\theta})$  tenga oscilaciones desfasadas que provocan un error en el paso por cero.

**Caso 6.** Todas las perturbaciones anteriores en el mismo instante

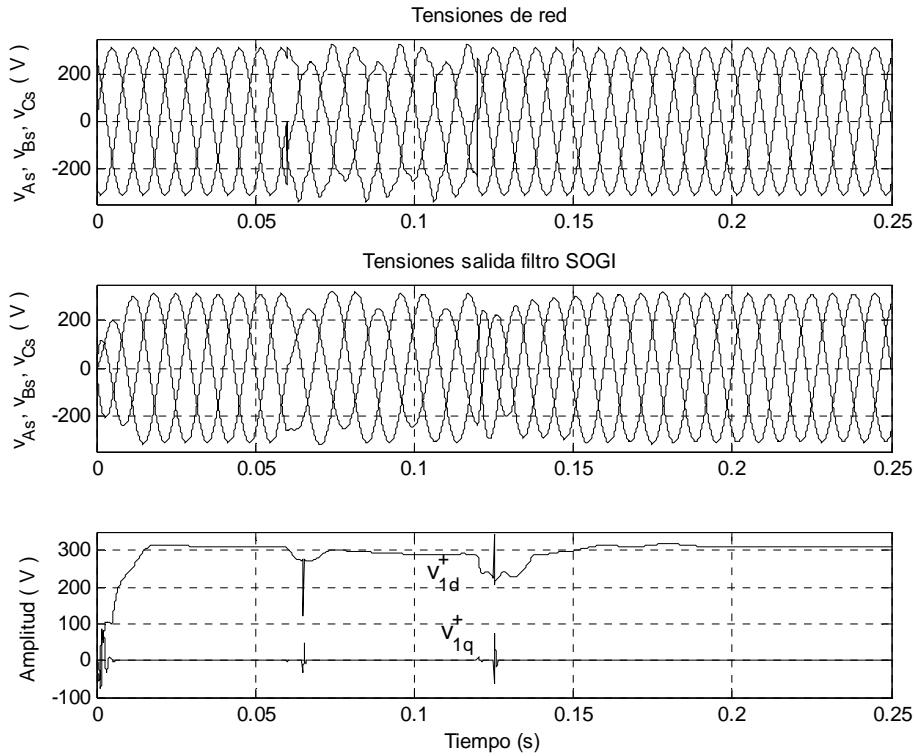


Figura 5.35 Respuesta temporal de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$  ante las perturbaciones de desequilibrio, armónicos, cambio de frecuencia y cambio de fase..

En la Figura 5.35, se muestran las tensiones de red utilizadas para la simulación de este caso, en donde se han introducido todas las perturbaciones anteriores (caída de amplitud 20% en una fase, cambio de frecuencia (47Hz), cambio de fase (30°) y armónicos de orden 5,7,8 y 10 entre los tiempos de simulación de 0.06s y 0.12s.

Analizando la Figura 5.35, se observa que a los 0.09s se alcanza el régimen estacionario de las componentes  $v_{1d}^+$  y  $v_{1q}^+$ , tras haber introducido todas las perturbaciones a la vez en 0.05s. Al igual que en el caso anterior se observa que la velocidad de respuesta del SPLL consigue que el valor de la componente  $v_{1q}^+$ , alcance la referencia en un tiempo menor que el caso de la componente  $v_{1d}^+$  al estar esta influida por los tiempos de respuesta del filtro y la DSC.

A partir de los resultados, se demuestra que el tiempo de respuesta del sistema ante una perturbación, está determinado por el tiempo de respuesta de la DSC, el filtro SOGI y el SPLL. Las respuestas obtenidas en los cuatro primeros casos son similares a las obtenidas en el

apartado 5.2.3 correspondiente al funcionamiento del SPLL, y en el caso 5 el filtro SOGI soluciona el problema de funcionamiento del SPLL, cuando en la red existen armónicos de cualquier orden.

A continuación se resumen las conclusiones de las mejoras conseguidas en el funcionamiento del sistema de sincronización.

- Se ha observado que añadiendo el filtro SOGI al sistema de sincronización soluciona el problema que se tiene con los armónicos en la banda pasante del SPLL con desfase y que no elimine la DSC. Por otro lado se consigue que las variaciones de la frecuencia fundamental de las tensiones de red no presenten desfase a la entrada del sistema de sincronización.
- El tiempo de respuesta del sistema de sincronización, se obtiene sumando los tiempos de respuesta del filtro SOGI (18ms), el tiempo de respuesta de la DSC ( $T/4$  del periodo de red, para 50Hz se tienen 5ms), y por último el tiempo de respuesta del SPLL (para  $\omega_{n2} = 2\pi 1000 \text{ rad/s}$  es de 1.8 ms), con lo que el tiempo de respuesta del sistema de sincronización se sitúa en 24.8ms. Respecto a dicho tiempo hay que tener en cuenta que si se produce una variación de frecuencia dicha frecuencia se actualiza al cabo de 20ms lo que sitúa al tiempo total en 44.8ms.
- Por otro lado las simulaciones llevadas a cabo en este apartado justifican la ventaja de la utilización del filtro SOGI en el sistema de sincronización (aportación hecha en esta tesis al sistema de sincronización apartado 5.2.2.1), para conseguir el correcto funcionamiento de dicho sistema ante cualquier perturbación que se pueda dar en la red eléctrica, consiguiendo de esta forma sincronizarse con el armónico fundamental y de secuencia positiva de las tensiones de red.
- Por último señalar que el error que se comete en la detección de la fase de la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red cuando se tienen armónicos en dichas tensiones, dependerá del orden del armónico y de su amplitud tal y como se ha analizado en el caso 6 del apartado 5.2.3, donde los armónicos de orden bajo (próximos a la frecuencia de corte del filtro SOGI), son lo que provocarán un error más significativo en el paso por cero. Las simulaciones llevadas a cabo del sistema de medidas completo han permitido analizar el error relativo en la medida cometido por cada grado de error en el paso por cero siendo dicho error del 0.1%.



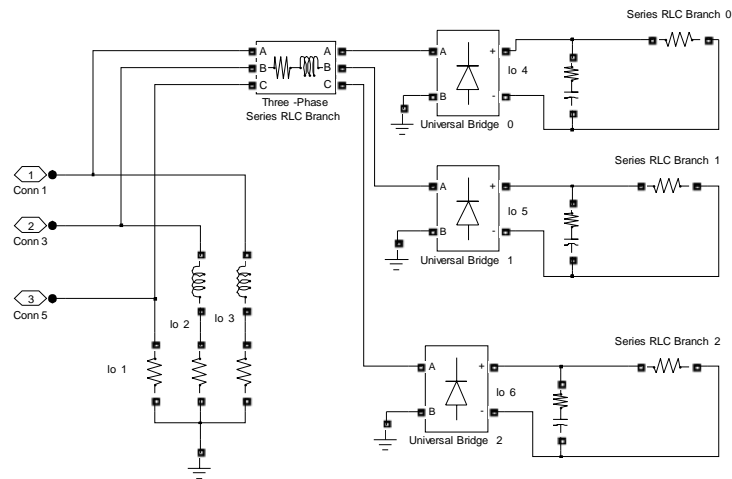


Figura 5.37 Diagrama Simulink general empleado para la simulación de la carga.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de simulaciones a realizar, debido al alto número de posibles combinaciones de medidas, se han seleccionado aquellos casos de mayor relevancia para el estudio y cuya generalización permite la validación del resto de casos no contemplados. Las condiciones de alimentación y carga adoptadas en este punto reproducen las mismas condiciones que se implementarán en el prototipo. Los tipos de carga y tensiones de alimentación utilizados son los siguientes:

Los tipos de carga utilizados para las simulaciones han sido los siguientes:

- Carga trifásica lineal desequilibrada.
- Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva (desfase).
- Carga trifásica no lineal con desequilibrio y componente inductiva.

Las condiciones de alimentación empleadas han sido las siguientes:

- Tensiones de alimentación trifásicas senoidales y equilibradas.
- Tensiones de alimentación trifásicas senoidales y desequilibradas.

El prototipo experimental de laboratorio se conecta a la red a través de un transformador trifásico de múltiples secundarios, ofreciendo la posibilidad de experimentar el sistema de medidas ante un sistema de tensiones equilibrado o desequilibrado. El nivel de distorsión de las tensiones de la red eléctrica analizadas en el laboratorio es inferior al 2%, pudiendo considerarse prácticamente senoidales.

Los resultados obtenidos en las simulaciones se agrupan en tablas para una mejor interpretación de los resultados. Para cada caso de simulación, en una tabla se incluyen las medidas de los valores eficaces de las tensiones en el pcc y de las corrientes de línea y neutro, así como las tasas de distorsión armónica total de las mismas. En una segunda tabla se agrupan los valores teóricos y los obtenidos mediante simulación de las magnitudes definidas en el IEEE Std.1459 para cada uno de los casos analizados. Los valores teóricos mostrados con un asterisco (\*) en la tabla son calculados mediante el programa de cálculo matemático Mathcad a partir de las tensiones de alimentación y los valores de los componentes que definen los tipos de carga para cada caso. Los valores de dicha tabla que no presentan asterisco son los correspondientes al resultado de la simulación realizado para cada uno de los casos simulados mediante el diagrama simulink de la Figura 5.36 correspondiente al sistema de medidas. En una tercera tabla se muestran los valores correspondientes a los términos que integran la potencia de desequilibrio  $S_{u1}$  y los factores de mérito propuestos en el capítulo 2 de esta tesis. Por último se añade una tabla con los valores obtenidos al aplicar las expresiones que integra el equipo de medidas comercial Power-Guia 440s y que tal y como se ha explicado en el capítulo 2 siguen las recomendaciones del IEEE Std 100 que integran la mayor parte de los equipos comerciales de medida. La obtención de dichos valores se ha realizado mediante el programa de cálculo matemático Mathcad a partir de los valores de tensiones de alimentación y tipos de carga para cada uno de los casos simulados.

Las magnitudes en formato IEEE Std.1459-2000 presentadas en las tablas se definieron en el apartado 1.1.4, sin embargo, se han añadido unos nuevos términos que añaden información sobre las características del sistema para la mejora del IEEE Std.1459-2000 y que se presenta a continuación.

- El factor de potencia fundamental relaciona la potencia activa fundamental con la potencia aparente efectiva fundamental (5.1).

$$P_{F1} = \frac{P_1}{S_{e1}} \quad (5.1)$$

- El factor de eficiencia [116], se define como la relación entre la potencia útil, calculada mediante la potencia activa fundamental de secuencia positiva, y la potencia aparente efectiva definida en la norma IEEE Std.1459.

$$F_e = \frac{P_1^+}{S_e} \quad (5.2)$$

**5.3.1. Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas.**

El sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, utilizado para los casos de simulación, se muestra en la Figura 5.38.

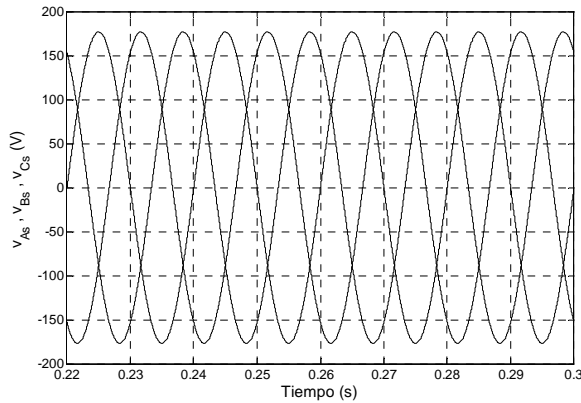


Figura 5.38 Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
125.00 V	125.00 V	125.00 V	0.00 %	0.00 %	0.00 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
125.00 V	125.00 V	125.00V	125.00V	0.00V	0.00V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}^+}$	$\phi_{V_{s1}^-}$	$\phi_{V_{s1}^0}$
0 °	-120.00 °	-240.00 °	0.00 °	180.00 °	-60.00 °

Tabla 5-4 Valores significativos de las tensiones en el pcc.

La Tabla 5-4 presenta un resumen de los valores más representativos de las tensiones en el punto de conexión (pcc):

A continuación se presenta cada tipo de carga bajo estas condiciones de alimentación y los resultados obtenidos al aplicar el sistema de medidas basado en el IEEE Std. 1459-2000. La Figura 5.36 y la Figura 5.37, muestran los diagramas simulink del sistema de alimentación y medidas junto con la carga utilizada para llevar a cabo las simulaciones.

**5.3.2. Carga trifásica lineal desequilibrada.**

En primer lugar se presentan los valores para el caso en el que la carga es una carga lineal desequilibrada. En este punto se van a tratar dos casos: el primer caso cuando la carga sea sólo resistiva y el segundo caso cuando además presente componente inductiva. En el primero de los casos las corrientes de carga sólo presentarán fenómeno de desequilibrio. En el segundo caso, además del desequilibrio, aparecerá el fenómeno del desfase.



5.3.2.1. Carga trifásica lineal desequilibrada resistiva.

Al tratarse de un sistema trifásico a cuatro hilos las cargas se conectarán en estrella con conexión del conductor de neutro. La carga se compone de una resistencia en la fase *A* mientras que se deja en circuito abierto las otras dos fases. Los valores de la carga son los siguientes:

$R_A = 22.5 \Omega$	$R_B = R_C = \infty \Omega$
---------------------	-----------------------------

Esta combinación representa un caso de desequilibrio extremo debido a la no existencia de corriente en dos de las fases. Para un sistema de alimentación trifásico de tensiones senoidales y equilibradas, como las mostradas en la Figura 5.38, la carga lineal desequilibrada demanda del generador las corrientes que se muestran en la Figura 5.39.

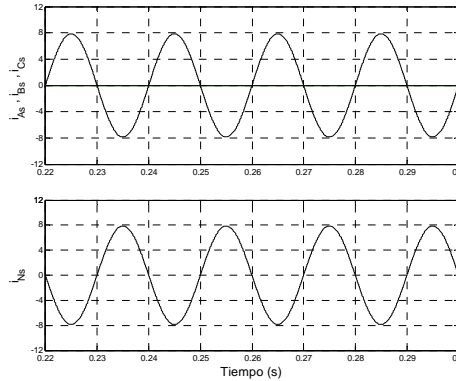


Figura 5.39 Corrientes demandadas por la carga al generador, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-5 se muestran los valores más significativos de las corrientes que entrega el generador. Valor eficaz, componente fundamental (valor eficaz y fase) y componentes simétricas fundamentales. Se incluyen también los factores de distorsión armónica.

$I_{As} = 5.55 \text{ A}$	$I_{Bs} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Cs} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Ns} = 5.55 \text{ A}$
$I_{As1} = 5.55 \text{ A}$	$I_{Bs1} = - \text{ A}$	$I_{Cs1} = - \text{ A}$	$I_{Ns1} = 5.55 \text{ A}$
$\phi_{I_{As1}} = 0.00^\circ$	$\phi_{I_{Bs1}} = -^\circ$	$\phi_{I_{Cs1}} = -^\circ$	$THD_{I_{As}} = 0 \%$
$I_{s1}^+ = 1.85 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 1.85 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 1.85 \text{ A}$	$THD_{I_{Bs}} = 0 \%$
$\phi_{s1}^+ = 0.00^\circ$	$\phi_{s1}^- = 0.00^\circ$	$\phi_{s1}^0 = 0.00^\circ$	$THD_{I_{Cs}} = 0 \%$

Tabla 5-5 Valores significativos de las corrientes demandadas por la carga.

La Tabla 5-6 presenta las tensiones y corrientes efectivas, potencias, factores de potencia y distorsión armónica en formato IEEE Std. 1459, medidas a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por el generador.

$V_e^* = 125.000 \text{ V}$		$I_e^* = 4.536 \text{ A}$	
$V_e = 125.000 \text{ V}$		$I_e = 4.534 \text{ A}$	
$V_{e1}^* = 125.000 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 0.000 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 4.536 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 0.000 \text{ A}$
$V_{e1} = 124.999 \text{ V}$	$V_{eh} = 0.006 \text{ V}$	$I_{e1} = 4.534 \text{ A}$	$I_{eh} = 0.000 \text{ A}$
$S_e^* = 1701.034 \text{ va}$			
$S_e = 1700.277 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 1701.034 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 0.000 \text{ va}$	
$S_{e1} = 1700.277 \text{ va}$		$S_{eN} = 0.120 \text{ va}$	
$S_1^{+*} = 694.444 \text{ va}$	$S_{U1}^* = 1552.825 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 0.000 \text{ va}$	$D_{eI}^* = 0.000 \text{ va}$
$S_1^+ = 694.135 \text{ va}$		$D_{eV} = 0.086 \text{ va}$	$D_{eI} = 0.084 \text{ va}$
$P_1^{+*} = 694.444 \text{ W}$	$Q_1^{+*} = 0.000 \text{ var}$	$S_{U1} = 1552.134 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 0.000 \%$
$P_1^+ = 694.135 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0.001 \text{ var}$		$THD_{eV} = 0.000 \%$
$P^* = 694.444 \text{ W}$		$P_1^* = 694.444 \text{ W}$	$P_H^* = 0.000 \text{ W}$
$P = 694.135 \text{ W}$		$P_1 = 694.135 \text{ W}$	$P_H = 0.000 \text{ W}$
$P_A^* = 694.444 \text{ W}$	$P_B^* = 0.000 \text{ W}$	$P_C^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.408$
$P_A = 694.134 \text{ W}$	$P_B = 0.000 \text{ W}$	$P_C = 0.000 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.408$
$P_{A1}^* = 694.444 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.408$
$P_{A1} = 694.134 \text{ W}$	$P_{B1} = 0.000 \text{ W}$	$P_{C1} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.408$
$P_1^{+*} = 694.444 \text{ W}$	$P_1^- = 0.000 \text{ W}$	$P_1^{0*} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^{+*} = 1$
$P_1^+ = 694.135 \text{ W}$	$P_1^* = 0.000 \text{ W}$	$P_1^0 = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 1$
$F_e^* = 0.408$			
$F_e = 0.408$			

Tabla 5-6 Magnitudes en formato IEEE Std. 1459

La Tabla 5-7 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga.

$S_{UV}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 1552.825 \text{ VA}$	$S_{UIU}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 0.000 \text{ VA}$
$S_{UV} = 0.002 \text{ VA}$	$S_{UI} = 1552.134 \text{ VA}$	$S_{UIU} = 0.002 \text{ VA}$	$S_{UIe}^* = 0.002 \text{ VA}$
$TU_V^* = 0.000\%$		$TU_I^* = 91.287 \%$	
$TU_V = 0.000\%$		$TU_I = 91.287 \%$	

Tabla 5-7 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 5-8, muestra los valores de potencias y factores de potencia obtenidos a partir de las corrientes y tensiones presentes en el pcc y según el IEEE Std.100, el cual integran los sistemas de medida comerciales.

$P_A = 694.444 \text{ W}$	$Q_{1A} = 0.000 \text{ var}$	$S_A = 694.444 \text{ va}$	$TPF_A = 1.00$
$P_B = 0.000 \text{ W}$	$Q_{1B} = 0.000 \text{ var}$	$S_B = 0.000 \text{ va}$	$TPF_B = 1.00$
$P_C = 0.000 \text{ W}$	$Q_{1C} = 0.000 \text{ var}$	$S_C = 0.000 \text{ va}$	$TPF_C = 1.00$
$P_{TOT} = 694.444 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 0.000 \text{ var}$	$S_{TOT} = 694.444 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 1.00$

Tabla 5-8 Magnitudes formato IEEE Std 100 que sigue el equipo de medidas comercial Power Guia 440s

Analizando la Tabla 5-6 y la Tabla 5-8, se observa que el formato IEEE Std.100 agrupa toda la potencia activa en un solo término ( $P_{TOT}$ ) tal y como se muestra en la Tabla 5-8, mientras que el formato IEEE Std 1459-2000 que utiliza el equipo de medidas desarrollado en la presente tesis diferencia entre la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ), la potencia activa fundamental de secuencia negativa ( $P_1^-$ ) y la potencia activa fundamental de secuencia cero ( $P_1^0$ ), cuya suma corresponde con la potencia activa total ( $P$ ) (Tabla 5-6). En este caso, al tener un sistema de tensiones equilibradas, los valores correspondientes a la secuencia positiva, negativa y cero son nulos. Por otro lado en este caso al tener un sistema de tensiones equilibradas el desequilibrio corresponde únicamente al desequilibrio en corrientes provocado por la carga desequilibrada lo que supondría que, en este caso, todo el desequilibrio está provocado por el usuario tal y como se muestra en la Tabla 5-7.

Al tener una carga totalmente resistiva, no existe potencia reactiva, con lo que no da lugar a ningún tipo de análisis.

La discrepancia existente en la potencia aparente cuantificada por cada uno de los sistemas se justifica teniendo en cuenta que: el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 a la hora de definir la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ) cuantifica la corriente del neutro para realizar dicho cálculo tal y como se muestra en las ecuaciones (1.65) y (1.66), sin embargo el IEEE Std.100 cuantifica la potencia aparente sin tener en cuenta dicha corriente del neutro. En el caso de un sistema equilibrado (en corrientes) los dos valores coincidirían, sin embargo, en este caso al haber desequilibrio (en corrientes) se produce discrepancia, tal y como se puede ver en las tablas. Por otro lado el valor de la potencia aparente en formato IEEE Std.100 ( $S_{TOT}$ ) es el valor de la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) en formato IEEE Std.1459-2000, donde esta potencia es la suma vectorial de la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ), y la potencia reactiva fundamental de secuencia positiva ( $Q_1$ ) que en este caso al ser nula, y como los valores de la potencia activa de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y la potencia activa total ( $P_{TOT}$ ) coinciden (ya que no se tiene desequilibrio en tensión ni distorsión armónica), las potencias aparentes también coinciden tal y como se muestra en la Tabla 5-6 y la Tabla 5-8.

Si se analiza la Tabla 5-6 y la Tabla 5-7, se observa que la potencia de desequilibrio ( $S_{UI}$ ) (Tabla 5-6), corresponde en este caso al desequilibrio en corriente (carga desequilibrada), tal y como se puede observar en la Tabla 5-7 observando los valores de los términos  $S_{UIV}$  y  $S_{UIB}$ , lo

que supone que en este caso todo el desequilibrio está causado por el usuario, lo que valida la descomposición propuesta de  $S_{UL}$ . Por otro lado el IEEE Std.1459-2000 cuantifica el desequilibrio mientras que el IEEE Std.100 no lo hace, que si se observan los valores de los términos propuestos  $TU_i$ ,  $TU_r$  se observa que en este caso todo el desequilibrio está provocado por la corriente de carga.

El factor de potencia correspondiente al armónico fundamental y de secuencia positiva ( $P_{F1^+}$ ), se corresponde con el factor de potencia total obtenido con el formato IEEE Std.100 ( $TPF_{tot}$ ), ya que en este tipo de carga, aunque se trata de un sistema con desequilibrio las relaciones entre la potencia activa y la potencia aparente en ambos casos son iguales. Hay que tener en cuenta que ( $P_{F1^+}$ ), sólo considera la potencia activa fundamental de secuencia positiva y la potencia aparente fundamental de secuencia positiva (1.112), y el caso de ( $TPF_{tot}$ ), considera toda la potencia activa y toda la potencia aparente, y como en esta caso ambas coinciden los valores del factor de potencia también coinciden.

Por último se observa que el valor del factor de potencia (TPF) cuantificado según el IEE Std.100 y los valores del ( $P_{Fe}$ ), ( $P_{F1}$ ) y ( $F_e$ ) cuantificados según el IEE Std.1459 no coinciden ya que en estos últimos al tener en cuenta la corriente del neutro se aleja de la cuantificación hecha por el Std.100 sobre el TPF que si coincide con el valor de ( $P_{F1^+}$ ).

#### 5.3.2.2. Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva.

La carga trifásica lineal asimétrica con componente inductiva va a permitir comprobar el funcionamiento del sistema de medidas ante los fenómenos de desequilibrio y desfase. Los valores de los componentes utilizados para implementar la carga son los siguientes:

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 22.5 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 38.2 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = \infty \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, como las mostradas en la Figura 5.38, las corrientes que la carga lineal desequilibrada mixta demanda al sistema de generación se muestran en la Figura 5.40.

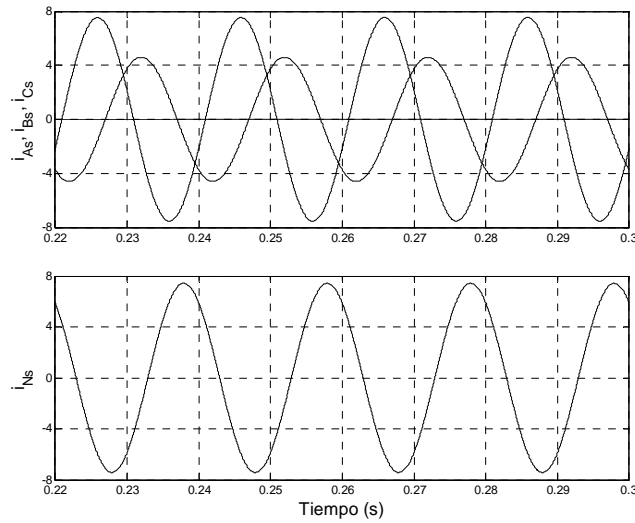


Figura 5.40 Corrientes demandadas por la carga al generador, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-9 se muestran los valores más significativos de las corrientes demandadas por la carga al sistema de generación eléctrico.

$I_{As} = 5.33 \text{ A}$	$I_{Bs} = 3.25 \text{ A}$	$I_{Cs} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Ns} = 5.24 \text{ A}$
$I_{As1} = 5.33 \text{ A}$	$I_{Bs1} = 3.25 \text{ A}$	$I_{Cs1} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Ns1} = 5.24 \text{ A}$
$\phi_{As1} = -16.34^\circ$	$\phi_{Bs1} = -125.63^\circ$	$\phi_{Cs1} = -240^\circ$	$THD_{I_{As}} = 0.00 \%$
$I_{s1}^+ = 2.85 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 1.34 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 1.74 \text{ A}$	$THD_{I_{Bs}} = 0.00 \%$
$\phi_{s1}^+ = -12.28^\circ$	$\phi_{s1}^- = 21.24^\circ$	$\phi_{s1}^0 = -52.18^\circ$	$THD_{I_{Cs}} = 0.00 \%$

Tabla 5-9 Resumen las corrientes que suministra el generador a la carga.

La Tabla 5-10 muestra los valores más significativos medidos en formato IEEE Std. 1459 de las tensiones, corrientes, potencias, THD's y factores de potencia, calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes consumidas por la carga trifásica lineal mixta.

$V_e^* = 125.000 \text{ V}$		$I_e^* = 4.710 \text{ A}$	
$V_e = 125.000 \text{ V}$		$I_e = 4.709 \text{ A}$	
$V_{e1}^* = 125.000 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 0.000 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 4.710 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 0.000 \text{ A}$
$V_{e1} = 124.999 \text{ V}$	$V_{eh} = 0.005 \text{ V}$	$I_{e1} = 4.709 \text{ A}$	$I_{eh} = 0.000 \text{ A}$
$S_e^* = 1766.587 \text{ va}$			
$S_e = 1765.884 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 1766.587 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 0.000 \text{ va}$	
$S_{e1} = 1765.884 \text{ va}$		$S_{eN} = 0.114 \text{ va}$	
$S_1^{**} = 1069.035 \text{ va}$	$S_{U1}^* = 1406.412 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 0.000 \text{ va}$	$D_{eI}^* = 0.000 \text{ va}$
$S_1^+ = 1069.663 \text{ va}$		$D_{eV} = 0.000 \text{ va}$	$D_{eI} = 0.000 \text{ va}$
$P_1^{**} = 1044.555 \text{ W}$	$Q_1^{**} = 227.478 \text{ var}$	$S_{U1} = 1405.812 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 0.000 \%$
$P_1^+ = 1044.210 \text{ W}$	$Q_1^+ = 227.305 \text{ var}$		$THD_{eV} = 0.000 \%$
$P^* = 1044.552 \text{ W}$	$P_1^* = 1044.552 \text{ W}$	$P_H^* = 0.000 \text{ W}$	
$P = 1044.210 \text{ W}$	$P_1 = 1044.210 \text{ W}$	$P_H = 0.000 \text{ W}$	
$P_A^* = 639.466 \text{ W}$	$P_B^* = 405.086 \text{ W}$	$P_C^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.591$
$P_A = 639.228 \text{ W}$	$P_B = 404.982 \text{ W}$	$P_C = 0.000 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.591$
$P_{A1}^* = 639.466 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 405.086 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.591$
$P_{A1} = 639.228 \text{ W}$	$P_{B1} = 404.982 \text{ W}$	$P_{C1} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.591$
$P_1^{**} = 1044.552 \text{ W}$	$P_1^* = 0.000 \text{ W}$	$P_1^{0*} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^{**} = 0.977$
$P_1^+ = 1044.210 \text{ W}$	$P_1 = 0.000 \text{ W}$	$P_1^0 = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 0.977$
$F_e^* = 0.591$			
$F_e = 0.591$			

Tabla 5-10 Magnitudes en formato IEEE Std. 1459

En La Tabla 5-11 se presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga correspondientes a la carga trifásica lineal mixta.

$S_{UV}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 1406.412 \text{ VA}$	$S_{UIV}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UIe}^* = 0.000 \text{ VA}$
$S_{UV} = 0.002 \text{ VA}$	$S_{UI} = 1405.812 \text{ VA}$	$S_{UIV} = 0.002 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 0.001 \text{ VA}$
$TU_V^* = 0.000\%$		$TU_I^* = 79.611 \%$	
$TU_V = 0.000\%$		$TU_I = 79.610 \%$	

Tabla 5-11 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

En la Tabla 5-12, se muestran los valores de las magnitudes de potencias y factores de potencias según el IEEE Std.1459-2000 calculados a partir de las corrientes y tensiones presentes en el pcc, que se corresponden con los valores que se medirían con el IEEE Std.1459.

$P_A = 639.466 \text{ W}$	$Q_{1A} = 187.105 \text{ var}$	$S_A = 664.388 \text{ va}$	$TPF_A = 0.959$
$P_B = 405.086 \text{ W}$	$Q_{1B} = 39.975 \text{ var}$	$S_B = 405.053 \text{ va}$	$TPF_B = 0.995$
$P_C = 0.000 \text{ W}$	$Q_{1C} = 0.000 \text{ var}$	$S_C = 0.000 \text{ va}$	$TPF_C = 1$
$P_{TOT} = 1044.552 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 227.305 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1069.441 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.977$

Tabla 5-12 Magnitudes formato IEEE Std 100 que sigue el equipo de medidas comercial Power Guía 440s

Analizando la Tabla 5-10 y la Tabla 5-12, para el caso de la potencia activa se llega a la misma conclusión que el caso anterior donde se observa que el sistema de medidas desarrollado en esta tesis basado en el IEEE Std.1459-200 descompone la potencia activa en sus tres términos ( $P_1^+$ ,  $P_1^-$ ,  $P_1^0$ ), mientras que el equipo comercial que integra el Std.100 agrupa toda la potencia en un solo término ( $P_{TOT}$ ), no permitiendo diferenciar las distintas potencias activas presentes en el sistema. Como en este caso las tensiones de red no presentan desequilibrio y los valores de ( $P_1^-$ ) y ( $P_1^0$ ) son nulos, los valores de la potencia activa de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y la potencia total ( $P_{TOT}$ ) coinciden

Para el caso de la energía reactiva si se tiene en cuenta que ( $Q_{1TOT}$ ), incluye ( $Q_1^-$ ) y ( $Q_1^0$ ), y al tener tensiones de red equilibradas los valores de ( $Q_1^-$ ) y ( $Q_1^0$ ), son nulos con lo que ( $Q_{1TOT}$ ) y ( $Q_1^+$ ) coinciden tal y como se muestra en la Tabla 5-10 y la Tabla 5-11.

La discrepancia en la potencia aparente se justifica de la misma forma que el caso anterior ya que se sigue teniendo un sistema trifásico desequilibrado en corrientes y como consecuencia de ello el IEEE Std.1459 define la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ), teniendo en cuenta la corriente del neutro a la hora de calcular la potencia aparente global del sistema (1.65), (1.66), mientras que el cálculo de la potencia aparente a través de la definición hecha en el IEEE Std.100 (1.24), no tiene en cuenta dicha corriente. Sin embargo si existe coincidencia en la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ) en formato IEEE Std.100 y la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) en formato IEEE Std.1459 ya que al no tener desequilibrio en tensión ni distorsión armónica dichos valores coinciden.

Al igual que en el caso anterior, al tener un sistema trifásico de tensiones equilibradas alimentando a una carga desequilibrada, la potencia mostrada en la Tabla 5-10 ( $S_{VI}$ ) y la Tabla 5-11 ( $S_{VI^+}$  y  $S_{VI^-}$ ), se observa que ( $S_{VI}$ ) incluye toda la ( $S_{VI}$ ), demostrándose la correcta identificación y cuantificación de los términos de ( $S_{VI}$ ) mediante la descomposición propuesta.

El factor de potencia correspondiente al armónico fundamental y de secuencia positiva ( $P_{F1^+}$ ), se corresponde con el factor de potencia total en formato IEEE Std.100 ( $TPF_{TOT}$ ), ya que la potencia activa fundamental y de secuencia directa ( $P_1^+$ ) es igual a la potencia activa total medida ( $P_{TOT}$ ) con el IEE Std.100, y si analizan los valores de las potencias aparentes en cada uno de los casos ( $S_1^+$  y  $S_{TOT}$ ) se observa que son iguales, por lo que se ha comentado anteriormente, con lo que dichos factores de potencia presentan el mismo valor.

Por otro lado si se observan las tasas de desequilibrio ( $TU_V$ ) y ( $TU_I$ ), y se comparan con el caso anterior, se puede ver cómo, el desequilibrio debido a la corriente ha disminuido, debido a que en este caso se tiene carga en dos fases y el desequilibrio en tensión permanece igual ya que las tensiones son equilibradas en ambos casos.

Si se comparan los valores del factor de eficiencia se observa que en este caso ha aumentado respecto al caso anterior debido a la disminución del desequilibrio.

**5.3.3. Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.**

En último lugar se analiza el caso en el que la carga es una carga trifásica no lineal. Este tipo de carga incluye el fenómeno de la distorsión y permite comprobar el funcionamiento del sistema de medidas cuando se decide medir este fenómeno. Además de la no linealidad, las cargas que se van a utilizar presentan desequilibrio y desfase permitiendo que, para la misma carga, se puedan comprobar todas las posibilidades de medida. En este caso la carga está formada por una combinación de cargas lineales y no lineales. La parte lineal de la carga es la siguiente:

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 32.5 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 56.5 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = 100 \Omega$

La carga se completa con tres rectificadores monofásicos no controlados, uno por fase, con un filtro LC y carga resistiva. Los valores de los componentes de la parte no lineal son los siguientes:

<i>3 x Rectificador + Filtro</i>		
$C_r = 2200 \mu F$	$L_r = 5.4 \text{ mH}$	$R_r = 100 \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, como las mostradas en la Figura 5.38, las corrientes que la carga demanda al sistema de generación se muestran en la Figura 5.41. Para distinguir correctamente las formas de onda se ha representado mediante línea continua los valores de la fase *A*, la línea de trazos corresponde a la fase *B* mientras que la línea punteada pertenece a la fase *C*.



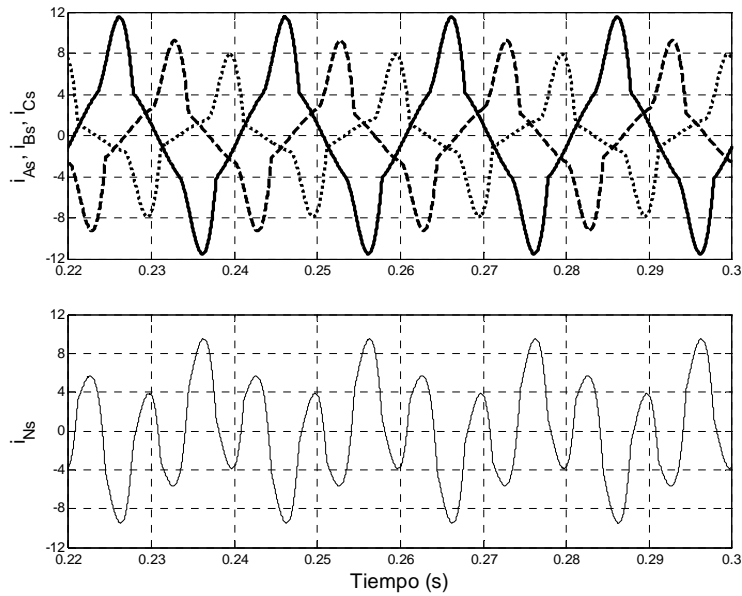


Figura 5.41 Corrientes demandadas por la carga al generador, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-13 se muestran los valores más significativos de las corrientes demandadas por la carga al sistema de generación.

$I_{As} = 6.47 \text{ A}$	$I_{Bs} = 4.97 \text{ A}$	$I_{Cs} = 4.09 \text{ A}$	$I_{Ns} = 5.54 \text{ A}$
$I_{As1} = 6.19 \text{ A}$	$I_{Bs1} = 4.61 \text{ A}$	$I_{Cs1} = 3.65 \text{ A}$	$I_{Ns1} = 2.37 \text{ A}$
$\phi_{iAs1} = -13.69^\circ$	$\phi_{iBs1} = 230.00^\circ$	$\phi_{iCs1} = 108.83^\circ$	$THD_{iAs} = 29.67 \%$
$I_{s1}^+ = 4.82 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 0.69 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 0.79 \text{ A}$	$THD_{iBs} = 40.55 \%$
$\phi_{i s1}^+ = -12.08^\circ$	$\phi_{i s1}^- = 3.97^\circ$	$\phi_{i s1}^0 = -40.09^\circ$	$THD_{iCs} = 52.12 \%$

Tabla 5-13 Resumen las corrientes que suministra el generador a la carga.

La Tabla 5-14 muestra los valores más significativos en formato IEEE Std. 1459 de las tensiones, corrientes, potencias, THD's y factores de potencia, calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes consumidas por la carga trifásica no lineal del generador.

$V_e^* = 125.000 \text{ V}$		$I_e^* = 6.167 \text{ A}$	
$V_e = 125.000 \text{ V}$		$I_e = 6.167 \text{ A}$	
$V_{e1}^* = 125.000 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 0.000 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 5.121 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 3.435 \text{ A}$
$V_{e1} = 124.999 \text{ V}$	$V_{eh} = 0.006 \text{ V}$	$I_{e1} = 5.122 \text{ A}$	$I_{eh} = 3.435 \text{ A}$
$S_e^* = 2312.865 \text{ va}$			
$S_e = 2312.824 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 1920.707 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 1288.499 \text{ va}$	
$S_{e1} = 1920.764 \text{ va}$		$S_{eN} = 1288.343 \text{ va}$	
$S_1^{**} = 1805.832 \text{ va}$		$S_{U1}^* = 648.737 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 0.000 \text{ va}$
$S_1^+ = 1805.670 \text{ va}$			$D_{eI}^* = 1288.499 \text{ va}$
$P_1^{**} = 1767.324 \text{ W}$		$S_{U1} = 648.792 \text{ va}$	$D_{eV} = 0.097 \text{ va}$
$Q_1^{**} = 371.006 \text{ var}$			$D_{eI} = 1288.343 \text{ va}$
$P_1^+ = 1767.122 \text{ W}$		$S_{U1} = 648.792 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 0.000 \%$
$Q_1^+ = 370.826 \text{ var}$			$THD_{eI}^* = 67.084 \%$
$P^* = 1767.324 \text{ W}$		$P_1^* = 1767.324 \text{ W}$	$P_H^* = 0.000 \text{ W}$
$P = 1767.122 \text{ W}$		$P_1 = 1767.122 \text{ W}$	$P_H = 0.000 \text{ W}$
$P_A^* = 752.910 \text{ W}$	$P_B^* = 566.602 \text{ W}$	$P_C^* = 447.812 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.764$
$P_A = 752.903 \text{ W}$	$P_B = 566.513 \text{ W}$	$P_C = 447.706 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.764$
$P_{A1}^* = 752.910 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 566.602 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 447.812 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.921$
$P_{A1} = 752.903 \text{ W}$	$P_{B1} = 566.513 \text{ W}$	$P_{C1} = 447.706 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.920$
$P_1^{**} = 1767.324 \text{ W}$	$P_1^* = 0.000 \text{ W}$	$P_1^{0*} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^{**} = 0.978$
$P_1^+ = 1767.122 \text{ W}$	$P_1 = 0.000 \text{ W}$	$P_1^0 = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 0.977$
$F_e^* = 0.765$			
$F_e = 0.764$			

Tabla 5-14 Resumen de Potencias de línea en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 5-15 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga correspondientes a la carga trifásica no lineal.

$S_{UV}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 648.737 \text{ VA}$	$S_{UIV}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UIe}^* = 0.000 \text{ VA}$
$S_{UV} = 0.003 \text{ VA}$	$S_{UI} = 648.792 \text{ VA}$	$S_{UIV} = 0.001 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 0.001 \text{ VA}$
$TU_V^* = 0.000 \%$		$TU_I^* = 0.337 \%$	
$TU_V = 0.000 \%$		$TU_I = 0.337 \%$	

Tabla 5-15 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

En la Tabla 5-16 se muestran los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std. 100 obtenidos a partir de las tensiones y corrientes presentes en el pcc.

$P_A = 752.910 \text{ W}$	$Q_{1A} = 170.934 \text{ var}$	$S_A = 808.750 \text{ va}$	$TPF_A = 0.932$
$P_B = 566.602 \text{ W}$	$Q_{1B} = 109.980 \text{ var}$	$S_B = 621.250 \text{ va}$	$TPF_B = 0.912$
$P_C = 447.812 \text{ W}$	$Q_{1C} = 89.912 \text{ var}$	$S_C = 511.214 \text{ va}$	$TPF_C = 0.875$
$P_{TOT} = 1767.324 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 370.826 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1941.214 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.910$

Tabla 5-16 Magnitudes formato IEEE Std 100 que sigue el equipo de medidas comercial Power Guia 440s

Analizando la Tabla 5-14 para el caso de la potencia activa el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 separa dicha potencia en tres términos ( $P$ ,  $P_1$ ,  $P_H$ ), correspondientes a la potencia activa, la potencia activa fundamental y la potencia de distorsión. En este caso al no existir distorsión en las tensiones la potencia activa ( $P$ ) y la potencia activa fundamental ( $P_1$ ) coinciden, por lo que la potencia de distorsión ( $P_H$ ) es nula. A su vez la potencia activa fundamental se descompone en potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ), secuencia negativa ( $P_1^-$ ) y cero ( $P_1^0$ ) tal y como define el IEEE Std.1459-2000, en donde se observa que al no existir desequilibrio en tensión las dos últimas son cero. Por otro lado como se puede observar en la Tabla 5-16, el IEEE Std.100 cuantifica la potencia activa en un solo término ( $P_{TOT}$ ), que como se puede observar coincide con la potencia activa fundamental de secuencia directa ( $P_1^+$ ), ya que la no tener desequilibrios ni distorsión en tensión solamente se tiene la potencia activa correspondiente a la componente fundamental de tensiones y corrientes.

Para el caso de la energía reactiva no existe discrepancia en ambos términos ( $Q_1^+$ ) y ( $Q_{1TOT}$ ), esto se justifica, ya que aunque en este caso existe distorsión armónica debida a la corriente, al no existir distorsión armónica en tensión dichos valores coinciden.

Analizando la Tabla 5-14, se observa que en este caso la potencia aparente efectiva no fundamental ( $S_{eN}$ ), ha sufrido un aumento con respecto a los casos anteriores ya que en este caso al haber distorsión armónica la potencia aparente debida a los armónicos pasa a estar cuantificada por dicho término. Por otro lado en la Tabla 5-16 se observa el valor de la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ) cuantificada con el IEEE Std.100, es superior a la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) en formato IEEE Std.1459, ya que al tener distorsión de corriente la primera la incluye dentro de dicho término y la segunda no contempla el valor de la distorsión armónica.

En este caso el factor de potencia ( $P_{F1^+}$ ) y el ( $TPF_{TOT}$ ) presentan una diferencia debida a que al existir distorsión el IEEE Std.100 no es capaz de discriminar dicha distorsión armónica en la parte de la potencia aparente, lo que supone que a la hora de calcular el factor de potencia aparezca un error.

Respecto a los valores de ( $TU_v$ ), ( $TU_i$ ), se observa que al no haber desequilibrio en la tensión el valor de ( $TU_v$ ) es cero y debido a que el desequilibrio en corriente ha disminuido el valor de ( $TU_i$ ), ha mejorado respecto a los dos casos anteriores.

Por último comentar que el valor del factor de eficiencia ( $F_e$ ), ha aumentado respecto a los casos anteriores debido a que la potencia activa fundamental de secuencia positiva ha aumentado respecto a los casos anteriores, en relación con la potencia aparente efectiva.

**5.3.4. Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas.**

El sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, utilizado para los casos de simulación y análisis experimental, se muestra en la Figura 5.42

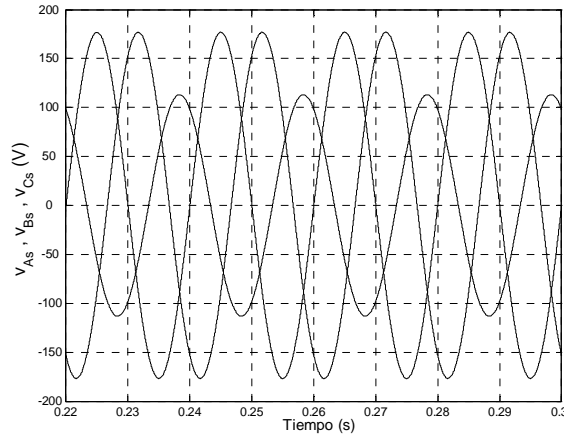


Figura 5.42 Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
125.00 V	125.00 V	80.00 V	0.00 %	0.00 %	0.00 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
125.00 V	125.00 V	80.00 V	110.00 V	15.00 V	15.00 V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}^+}$	$\phi_{V_{s1}^-}$	$\phi_{V_{s1}^0}$
0°	-120.00°	-240.00°	0.00°	60.00°	-60.00°

Tabla 5-17 Valores significativos de las tensiones en el pcc.

La Tabla 5-17 presenta un resumen de los valores más representativos de las tensiones en el punto de conexión (pcc).

A continuación se presenta cada tipo de carga bajo estas condiciones de alimentación y los resultados obtenidos al aplicar el sistema de medidas basado en el IEEE Std. 1459-2000.

**5.3.5. Carga trifásica lineal desequilibrada.**

En primer lugar se presentan los valores para el caso en el que la carga es lineal desequilibrada. En este punto se van a tratar dos casos: el primer caso cuando la carga sea sólo resistiva y el segundo caso cuando además presente componente inductiva. En el primero de los casos las

corrientes de carga sólo presentarán fenómeno de desequilibrio. En el segundo caso, además del desequilibrio, aparecerá el fenómeno del desfase.

5.3.5.1. Carga trifásica lineal desequilibrada resistiva.

Al tratarse de un sistema trifásico a cuatro hilos las cargas se conectarán en estrella con conexión del conductor de neutro. La carga se compone de una resistencia en la fase *A* mientras que se deja en circuito abierto las otras dos fases. Los valores de la carga son los siguientes:

$R_A = 17.5 \Omega$	$R_B = R_C = \infty \Omega$
---------------------	-----------------------------

Esta combinación representa un caso de desequilibrio extremo debido a la no existencia de corriente en dos de las fases. Para un sistema de alimentación trifásico de tensiones senoidales y desequilibradas, como las mostradas en la Figura 5.42, la carga lineal desequilibrada demanda del generador las corrientes que se muestran en la Figura 5.43 .

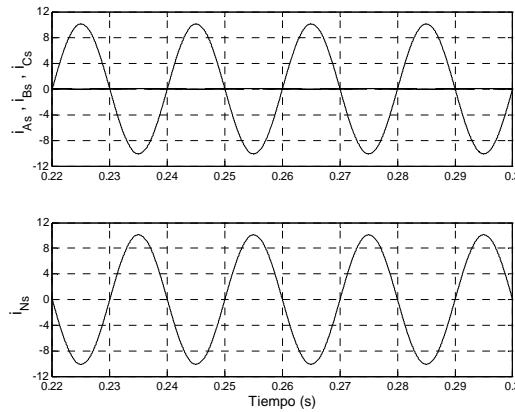


Figura 5.43 Corrientes demandadas por la carga al generador, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-18 se muestran los valores más significativos de las corrientes que entrega el generador. Valor eficaz, componente fundamental (valor eficaz y fase) y componentes simétricas fundamentales. Se incluyen también los factores de distorsión armónica.

$I_{As} = 7.14 \text{ A}$	$I_{Bs} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Cs} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Ns} = 7.14 \text{ A}$
$I_{As1} = 7.14 \text{ A}$	$I_{Bs1} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Cs1} = 0.00 \text{ A}$	$I_{Ns1} = 7.14 \text{ A}$
$\phi_{I_{As1}} = 0.00^\circ$	$\phi_{I_{Bs1}} = 0.00^\circ$	$\phi_{I_{Cs1}} = 0.00^\circ$	$THD_{I_{As}} = 0.00\%$
$I_{s1}^+ = 2.38 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 2.38 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 2.38 \text{ A}$	$THD_{I_{Bs}} = 0.00\%$
$\phi_{s1}^+ = 0.00^\circ$	$\phi_{s1}^- = 0.00^\circ$	$\phi_{s1}^0 = 0.00^\circ$	$THD_{I_{Cs}} = 0.00\%$

Tabla 5-18 Valores significativos de las corrientes demandadas por la carga.

La Tabla 5-19 presenta las tensiones y corrientes efectivas, potencias, factores de potencia y distorsión armónica en formato IEEE Std. 1459, medidas a partir de los valores de las tensiones en el pcc y las corrientes suministradas por el generador.

$V_e^* = 111.523 \text{ V}$		$I_e^* = 5.832 \text{ A}$	
$V_e = 111.523 \text{ V}$		$I_e = 5.828 \text{ A}$	
$V_{e1}^* = 111.523 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 0.000 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 5.832 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 0.000 \text{ A}$
$V_{e1} = 111.523 \text{ V}$	$V_{eh} = 0.005 \text{ V}$	$I_{e1} = 5.828 \text{ A}$	$I_{eh} = 0.000 \text{ A}$
$S_e^* = 1951.255 \text{ va}$			
$S_e = 1950.139 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 1951.255 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 0.000 \text{ va}$	
$S_{e1} = 1950.139 \text{ va}$		$S_{eN} = 0.138 \text{ va}$	
$S_1^{**} = 785.714 \text{ va}$	$S_{U1}^* = 1786.071 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 0.000 \text{ va}$	$D_{eI}^* = 0.000 \text{ va}$
$S_1^+ = 785.264 \text{ va}$		$D_{eV} = 0.099 \text{ va}$	$D_{eI} = 0.096 \text{ va}$
$P_1^{**} = 785.714 \text{ W}$	$Q_1^{**} = 0.000 \text{ var}$	$S_{U1} = 1785.049 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 0.000 \%$
$P_1^+ = 785.264 \text{ W}$	$Q_1^+ = 0.001 \text{ var}$		$THD_{eI}^* = 0.000 \%$
$P^* = 892.857 \text{ W}$		$P_1^* = 892.857 \text{ W}$	$P_H^* = 0.000 \text{ W}$
$P = 892.346 \text{ W}$		$P_1 = 892.346 \text{ W}$	$P_H = 0.000 \text{ W}$
$P_A^* = 892.857 \text{ W}$	$P_B^* = 0.000 \text{ W}$	$P_C^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.457$
$P_A = 892.346 \text{ W}$	$P_B = 0.000 \text{ W}$	$P_C = 0.000 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.457$
$P_{A1}^* = 892.857 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.457$
$P_{A1} = 892.346 \text{ W}$	$P_{B1} = 0.000 \text{ W}$	$P_{C1} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.457$
$P_1^{**} = 785.714 \text{ W}$	$P_1^* = 53.571 \text{ W}$	$P_1^0 = 53.571 \text{ W}$	$P_{F1}^{**} = 1$
$P_1^+ = 785.264 \text{ W}$	$P_1^- = 53.540 \text{ W}$	$P_1^0 = 53.540 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 1$
$F_e^* = 0.402$			
$F_e = 0.402$			

Tabla 5-19 Magnitudes en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 5-20 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga correspondientes a la carga desequilibrada.

$S_{UV}^* = 321.428 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 1781.244 \text{ VA}$	$S_{UU}^* = 293.422 \text{ VA}$	$S_{U1e}^* = 273.161 \text{ VA}$
$S_{UV} = 321.242 \text{ VA}$	$S_{UI} = 1780.225 \text{ VA}$	$S_{UU} = 293.252 \text{ VA}$	$S_{U1e} = 273.003 \text{ VA}$
$TU_V^* = 16.472\%$		$TU_I^* = 91.287\%$	
$TU_V = 16.472\%$		$TU_I = 91.287\%$	

Tabla 5-20 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 5-21, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std100 obtenidos a partir de las corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 892.857 \text{ W}$	$Q_{1A} = 0.000 \text{ var}$	$S_A = 892.857 \text{ va}$	$TPF_A = 1.00$
$P_B = 0.000 \text{ W}$	$Q_{1B} = 0.000 \text{ var}$	$S_B = 0.000 \text{ va}$	$TPF_B = 1.00$
$P_C = 0.000 \text{ W}$	$Q_{1C} = 0.000 \text{ var}$	$S_C = 0.000 \text{ va}$	$TPF_C = 1.00$
$P_{TOT} = 892.857 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 0.000 \text{ var}$	$S_{TOT} = 892.857 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 1.00$

Tabla 5-21 Magnitudes formato IEEE Std 100 que sigue el equipo de medidas comercial Power Guia 440s

Analizando la Tabla 5-19 y la Tabla 5-21, se observa que en este caso al tener un sistema desequilibrado en tensiones y corrientes, la potencia activa en formato IEEE Std1459 presente valor en sus tres términos de potencia activa ( $P_1^+$ ), ( $P_1^-$ ), ( $P_1^0$ ), diferenciando de esta forma la potencia activa de secuencia positiva (que es la que generaría trabajo útil en un motor eléctrico), del resto de valores de potencia activa. Sin embargo el IEEE Std.100 agrupa toda la potencia activa en un solo término ( $P_{TOT}$ ), considerando que en el caso del motor eléctrico proporciona trabajo útil. En este caso si se analizan los valores de potencia activa de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y la potencia total ( $P_{TOT}$ ), se obtiene una discrepancia de 107.593 W lo que supone un error relativo del 13.70% (para el cálculo del error relativo se toma como valor real el de  $P_1^+$ ) cuando en las tensiones de red se tiene un desequilibrio del 16.47% ( $TU_V$ ) y en las corrientes un 91.28% ( $TU_I$ ). Si se analiza el apartado 5.3.2 donde se tenían tensiones equilibradas, se observa que en dicha situación la potencia activa de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y la potencia total ( $P_{TOT}$ ) en formato IEEE Std.100 coincidían aun teniendo desequilibrio en corriente, sin embargo se observa que al tener desequilibrio en corriente la situación cambia por completo, y dependiendo del desequilibrio que presente la tensión y las corrientes de carga la discrepancia entre ambas potencias será mayor o menor.

En este caso no existe potencia reactiva al ser la carga totalmente resistiva con lo que no da lugar a ningún tipo de análisis.

La discrepancia existente en la potencia aparente cuantificada por cada uno de los sistemas se justifica teniendo en cuenta que: el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 a la hora de definir la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ) cuantifica la corriente del neutro para realizar dicho cálculo tal y como se muestra en las ecuaciones (1.65) y (1.66), sin embargo el IEEE Std.100 cuantifica la potencia aparente sin tener en cuenta dicha corriente del neutro, donde en el caso de un sistema equilibrado los dos valores coincidirían, sin embargo, en este caso al haber desequilibrio se produce discrepancia, tal y como se puede ver en dichas tablas. Por otro lado el valor de la potencia aparente en formato IEEE Std.100 ( $S_{TOT}$ ) no se corresponde con el valor de la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ), ya que el IEEE Std.100 no tiene en cuenta el desequilibrio de tensiones del sistema para calcular la potencia aparente.

Analizando la Tabla 5-19 y la Tabla 5-20 se observa que en este caso al tener un sistema trifásico de tensiones desequilibrado y una carga trifásica desequilibrada (desequilibrio en tensiones y corrientes), la potencia aparente fundamental de desequilibrio ( $S_{U1}$ ) (Tabla 5-19),

presenta un parte de desequilibrio debido a la tensión ( $S_{UV}$ ) y una parte debida al desequilibrio en corriente ( $S_{UI}$ ) tal y como se muestra en la Tabla 5-20. A partir de los términos ( $TU_i$ ) y ( $TU_v$ ), se puede determinar el valor de desequilibrio provocado por el usuario y el provocado por las tensiones de red.

El factor de potencia correspondiente al armónico fundamental y de secuencia positiva ( $P_{F1^+}$ ), se corresponde con el factor de potencia total según el IEEE Std.100 ( $TPF_{TOT}$ ), ya que al tener una carga completamente resistiva solamente se tiene potencia activa.

Si se analizan los valores de ( $TU_v$ ) y ( $TU_i$ ), se observa que en este caso al tener un sistema de tensiones desequilibrado, dicho desequilibrio aparece reflejado a través del valor de ( $TU_v$ ), mientras que el desequilibrio debido a las corrientes de carga se refleja a través de ( $TU_i$ ), los cuales determinan el desequilibrio provocado por el usuario y el desequilibrio provocado por las tensiones de red.

### 5.3.5.2. Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva.

La carga trifásica lineal asimétrica mixta va a permitir comprobar el funcionamiento del sistema de medidas ante los fenómenos de desequilibrio y desfase. Los valores de los componentes utilizados para implementar la carga son los siguientes:

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 22.7 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 27 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = 30 \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, como las mostradas en la Figura 5.42, las corrientes que la carga lineal desequilibrada mixta demanda al sistema de generación se muestran en la Figura 5.44. Para distinguir correctamente las formas de onda se ha representado mediante línea continua los valores de la fase  $A$ , la línea de trazos corresponde a la fase  $B$  mientras que la línea punteada pertenece a la fase  $C$ .



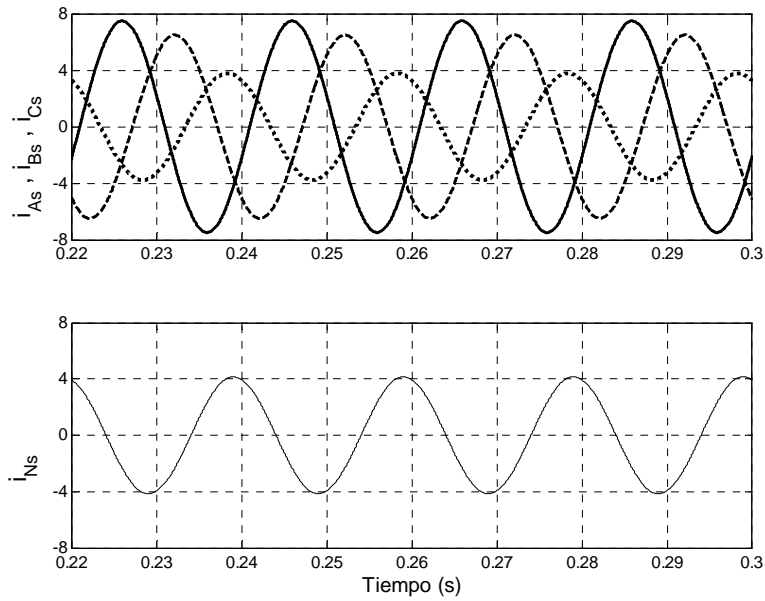


Figura 5.44 Corrientes demandadas por la carga al generador, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-22 se muestran los valores más significativos de las corrientes demandadas por la carga al sistema de generación eléctrico.

$I_{As} = 5.28 \text{ A}$	$I_{Bs} = 4.58 \text{ A}$	$I_{Cs} = 2.66 \text{ A}$	$I_{Ns} = 2.93 \text{ A}$
$I_{As1} = 5.28 \text{ A}$	$I_{Bs1} = 4.58 \text{ A}$	$I_{Cs1} = 2.67 \text{ A}$	$I_{Ns1} = 2.93 \text{ A}$
$\phi_{iAs1} = -16.20^\circ$	$\phi_{iBs1} = -127.94^\circ$	$\phi_{iCs1} = -240.00^\circ$	$THD_{IAs} = 0.00 \%$
$I_{s1}^+ = 4.15 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 0.69 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 0.97 \text{ A}$	$THD_{IBs} = 0.00 \%$
$\phi_{s1}^+ = -9.74^\circ$	$\phi_{s1}^- = 12.93^\circ$	$\phi_{s1}^0 = -71.61^\circ$	$THD_{ICs} = 0.00 \%$

Tabla 5-22 Resumen las corrientes que suministra el generador a la carga.

La Tabla 5-23 muestra los valores más significativos medidos en formato IEEE Std. 1459 de las tensiones, corrientes, potencias, THD's y factores de potencia, calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes consumidas por la carga trifásica lineal mixta.

$V_e^* = 111.523 \text{ V}$		$I_e^* = 4.643 \text{ A}$	
$V_e = 111.523 \text{ V}$		$I_e = 4.641 \text{ A}$	
$V_{e1}^* = 111.523 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 0.000 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 4.643 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 0.000 \text{ A}$
$V_{e1} = 111.523 \text{ V}$	$V_{eh} = 0.005 \text{ V}$	$I_{e1} = 4.641 \text{ A}$	$I_{eh} = 0.000 \text{ A}$
$S_e^* = 1553.628 \text{ va}$			
$S_e = 1553.002 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 1553.628 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 0.000 \text{ va}$	
$S_{e1} = 1553.002 \text{ va}$		$S_{eN} = 0.111 \text{ va}$	
$S_1^{+*} = 1371.185 \text{ va}$	$S_{U1}^* = 730.488 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 0.000 \text{ va}$	$D_{eI}^* = 0.000 \text{ va}$
$S_1^+ = 1370.677 \text{ va}$		$D_{eV} = 0.078 \text{ va}$	$D_{eI} = 0.078 \text{ va}$
$P_1^{+*} = 1351.402 \text{ W}$	$Q_1^{+*} = 232.078 \text{ var}$	$S_{U1} = 730.110 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 0.000 \%$
$P_1^+ = 1350.918 \text{ W}$	$Q_1^+ = 231.895 \text{ var}$		$THD_{eI}^* = 0.000 \%$
$P^* = 1415.684 \text{ W}$		$P_1^* = 1415.684 \text{ W}$	$P_H^* = 0.000 \text{ W}$
$P = 1415.174 \text{ W}$		$P_1 = 1415.174 \text{ W}$	$P_H = 0.000 \text{ W}$
$P_A^* = 634.713 \text{ W}$	$P_B^* = 567.637 \text{ W}$	$P_C^* = 213.333 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.911$
$P_A = 634.477 \text{ W}$	$P_B = 567.433 \text{ W}$	$P_C = 213.262 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.911$
$P_{A1}^* = 634.713 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 567.637 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 213.333 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.911$
$P_{A1} = 634.477 \text{ W}$	$P_{B1} = 567.433 \text{ W}$	$P_{C1} = 213.262 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.911$
$P_1^{+*} = 1351.402 \text{ W}$	$P_1^* = 21.207 \text{ W}$	$P_1^0 = 43.074 \text{ W}$	$P_{F1}^{+*} = 0.985$
$P_1^+ = 1350.918 \text{ W}$	$P_1 = 21.203 \text{ W}$	$P_1^0 = 43.052 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.985$
$F_e^* = 0.869$			
$F_e = 0.869$			

Tabla 5-23 Resumen de Potencias de línea en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 5-24 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga.

$S_{UV}^* = 255.927 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 693.664 \text{ VA}$	$S_{U1U}^* = 114.266 \text{ VA}$	$S_{U1e}^* = 94.470 \text{ VA}$
$S_{UV} = 255.822 \text{ VA}$	$S_{UI} = 693.295 \text{ VA}$	$S_{U1U} = 114.205 \text{ VA}$	$S_{U1e} = 94.414 \text{ VA}$
$TU_V^* = 16.472\%$		$TU_I^* = 44.648 \%$	
$TU_V = 16.472\%$		$TU_I = 44.642 \%$	

Tabla 5-24 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 5-25 muestra los valores de las potencias y factores de potencias en formato IEEE Std.100 obtenidos a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc para este tipo de carga.

$P_A = 634.713 \text{ W}$	$Q_{1A} = 184.468 \text{ var}$	$S_A = 660.970 \text{ va}$	$TPF_A = 0.960$
$P_B = 567.637 \text{ W}$	$Q_{1B} = 79.257 \text{ var}$	$S_B = 573.143 \text{ va}$	$TPF_B = 0.990$
$P_C = 213.333 \text{ W}$	$Q_{1C} = 0.000 \text{ var}$	$S_C = 213.333 \text{ va}$	$TPF_C = 1$
$P_{TOT} = 1415.684 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 263.725 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1447.454 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.978$

Tabla 5-25 Magnitudes formato IEEE Std 100 que sigue el equipo de medidas comercial Power Guia 440s

Analizando la Tabla 5-23 y la Tabla 5-25, para el caso de la potencia activa se llega a la misma conclusión que el caso anterior donde se observa que el sistema de medidas desarrollado en esta tesis basado en el IEEE Std.1459-200 descompone la potencia activa en sus tres términos ( $P_1^+, P_1^-, P_1^0$ ), mientras que el equipo comercial que integra el Std.100 agrupa toda la potencia en un solo término ( $P_{TOT}$ ), no permitiendo cuantificar las distintas potencias activas presentes en el sistema. Como se puede observar el valor de la potencia activa en formato IEEE Std.100 es superior al valor de la potencia activa fundamental y de secuencia positiva ya que la primera no tiene en cuenta el desequilibrio de tensiones que tiene el sistema. De la misma forma que en el caso anterior si analizan los valores de la potencia activa de secuencia directa ( $P_1^+$ ) y la potencia activa total ( $P_{TOT}$ ) en formato IEEE Std.100 se observa una discrepancia de 64.766 W lo que supone un error de 4.79%. En este caso el desequilibrio en tensiones permanece igual que el caso anterior (16.47%) y el desequilibrio en corrientes ha disminuido respecto al caso anterior en un 46.64% (comparando los valores de  $TU_i$  en ambos casos), lo que ha provocado que la discrepancia entre los dos valores de potencia activa disminuya.

Para el caso de la energía reactiva sucede lo mismo que el caso de la energía activa, donde en la Tabla 5-23 se muestra la energía reactiva de secuencia positiva (recordar que se trata de un sistema trifásico de tensiones y corrientes desequilibradas), correspondiente a la definición del IEEE Std.1459-2000 en donde la energía reactiva se descompone en secuencia positiva, negativa y cero (en la tabla solamente se muestra la energía reactiva de secuencia positiva). Por otro lado en la Tabla 5-25 se muestra la energía reactiva (fundamental), de cada una de las fases en formato IEEE Std.100 en donde en este caso no se descompone, sino que se agrupan los tres términos ( $Q_1^+, Q_1^-, Q_1^0$ ), en uno solo ( $Q_{1TOT}$ ). Al igual que para el caso de la potencia activa si se analizan los valores de la potencia reactiva de secuencia positiva ( $Q_1^+$ ) y la potencia reactiva total ( $Q_{1TOT}$ ) se obtiene una diferencia de 31.83 var, que corresponde a un error relativo de un 13.72% (para el cálculo del error relativo se toma como valor real el de  $Q_1^+$ ), cuando se tienen los valores de desequilibrio en tensiones del (16.47%) y un desequilibrio en corrientes del (44.64%).

La discrepancia en la potencia aparente se justifica de la misma forma que el caso anterior ya que se sigue teniendo un sistema trifásico desequilibrado y como consecuencia de ello el IEEE Std.1459 define la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ), en donde se incluye la corriente del neutro a

la hora de calcular la potencia aparente global del sistema (1.65), (1.66), mientras que el IEEE Std.100 calcula la potencia aparente a través de la definición hecha en (1.24), sin tener en cuenta dicha corriente. Por otro lado la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ) medida en formato IEEE Std.100, es superior a la potencia aparente fundamental de secuencia directa ( $S_1^+$ ), ya que en este caso la primera no tiene en cuenta el desequilibrio en tensiones y corrientes que tiene el sistema.

El factor de potencia correspondiente al armónico fundamental y de secuencia positiva ( $P_{F1^+}$ ), no se corresponde con el factor de potencia total en formato IEEE Std.100 ( $TPF_{TOT}$ ), ya que al tener desequilibrio en tensiones y corrientes las potencias activas y aparentes utilizadas para el cálculo de dichos términos no tienen los mismos valores debido a lo explicado anteriormente.

Analizando los valores de ( $TU_V$ ) y de ( $TU_I$ ), se observa que como el desequilibrio en tensiones corresponde al mismo valor del caso anterior el valor de ( $TU_V$ ), sin embargo en este caso el desequilibrio en corriente ha disminuido reflejando en este caso un valor de ( $TU_I$ ), menor que el caso anterior ya que en este caso se tiene corriente en dos fases.

Por otro lado el factor de eficiencia ha aumentado ya que la potencia activa fundamental de secuencia directa también ha aumentado respecto al caso anterior en relación a la potencia aparente efectiva.

**5.3.6. Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.**

En último lugar se analiza el caso en el que la carga es una carga trifásica no lineal. Este tipo de carga incluye el fenómeno de la distorsión y permite comprobar el funcionamiento del sistema de medidas cuando debe medir este fenómeno. Además de la no linealidad, las cargas que se van a utilizar presentan desequilibrio y desfase. En este caso la carga está formada por una combinación de cargas lineales y no lineales. La parte lineal de la carga es la siguiente:

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 32.5 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 56.5 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = 33 \Omega$

La carga se completa con tres rectificadores monofásicos no controlados, uno por fase, con un filtro LC y carga resistiva. Los valores de los componentes de la parte no lineal son los siguientes:

<i>3 x Rectificador + Filtro</i>		
$C_r = 2200 \mu F$	$L_r = 5.4 \text{ mH}$	$R_r = 100 \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, como las mostradas en la Figura 5.42, las corrientes que la carga demanda al sistema de generación se muestran en la Figura 5.45.

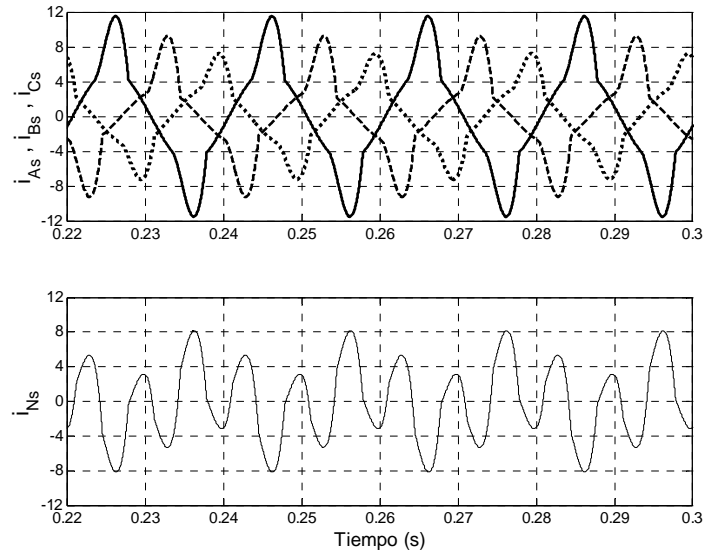


Figura 5.45 Corrientes demandadas por la carga al generador, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-26 se muestran los valores más significativos de las corrientes demandadas por la carga al sistema de generación.

$I_{As} = 6.47 \text{ A}$	$I_{Bs} = 4.97 \text{ A}$	$I_{Cs} = 4.11 \text{ A}$	$I_{Ns} = 4.83 \text{ A}$
$I_{As1} = 6.19 \text{ A}$	$I_{Bs1} = 4.61 \text{ A}$	$I_{Cs1} = 3.94 \text{ A}$	$I_{Ns1} = 1.98 \text{ A}$
$\phi_{I_{As1}} = -13.70^\circ$	$\phi_{I_{Bs1}} = -130.61^\circ$	$\phi_{I_{Cs1}} = -246.36^\circ$	$THD_{I_{As}} = 29.67\%$
$I_{s1}^+ = 4.91 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 0.72 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 0.65 \text{ A}$	$THD_{I_{Bs}} = 40.55\%$
$\phi_{s1}^+ = -10.77^\circ$	$\phi_{s1}^- = -9.66^\circ$	$\phi_{s1}^0 = -40.96^\circ$	$THD_{I_{Cs}} = 29.78\%$

Tabla 5-26 Resumen las corrientes que suministra el generador a la carga.

La Tabla 5-27 muestra los valores más significativos en formato IEEE Std. 1459 de las tensiones, corrientes, potencias, THD's y factores de potencia, calculados a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes consumidas por la carga trifásica no lineal del generador.

$V_e^* = 111.523 \text{ V}$		$I_e^* = 5.971 \text{ A}$	
$V_e = 111.523 \text{ V}$		$I_e = 5.971 \text{ A}$	
$V_{e1}^* = 111.523 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 0.000 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 5.136 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 3.044 \text{ A}$
$V_{e1} = 111.523 \text{ V}$	$V_{eh} = 0.001 \text{ V}$	$I_{e1} = 5.136 \text{ A}$	$I_{eh} = 3.044 \text{ A}$
$S_e^* = 1997.766 \text{ va}$			
$S_e = 1997.754 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 1718.607 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 1018.559 \text{ va}$	
$S_{e1} = 1718.620 \text{ va}$		$S_{eN} = 1018.509 \text{ va}$	
$S_1^{+*} = 1621.166 \text{ va}$	$S_{U1}^* = 570.463 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 0.000 \text{ va}$	$D_{eI}^* = 1018.559 \text{ va}$
$S_1^+ = 1621.157 \text{ va}$		$D_{eV} = 0.022 \text{ va}$	$D_{eI} = 1018.509 \text{ va}$
$P_1^{+*} = 1593.585 \text{ W}$	$Q_1^{+*} = 297.769 \text{ var}$	$S_{U1} = 570.528 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 0.000 \%$
$P_1^+ = 1593.761 \text{ W}$	$Q_1^+ = 298.324 \text{ var}$		$THD_{eI}^* = 59.266 \%$
$P^* = 1634.606 \text{ W}$		$P_1^* = 1634.606 \text{ W}$	$P_H^* = 0.000 \text{ W}$
$P = 1634.634 \text{ W}$		$P_1 = 1634.634 \text{ W}$	$P_H = 0.000 \text{ W}$
$P_A^* = 753.968 \text{ W}$	$P_B^* = 567.245 \text{ W}$	$P_C^* = 313.393 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.817$
$P_A = 753.902 \text{ W}$	$P_B = 567.515 \text{ W}$	$P_C = 313.217 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.817$
$P_{A1}^* = 753.968 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 567.245 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 313.393 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.951$
$P_{A1} = 753.902 \text{ W}$	$P_{B1} = 567.515 \text{ W}$	$P_{C1} = 313.217 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.950$
$P_1^{+*} = 1593.585 \text{ W}$	$P_1^* = 12.803 \text{ W}$	$P_1^0 = 28.219 \text{ W}$	$P_{F1}^{+*} = 0.982$
$P_1^+ = 1592.761 \text{ W}$	$P_1^- = 12.599 \text{ W}$	$P_1^0 = 28.274 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 0.981$
$F_e^* = 0.797$			
$F_e = 0.796$			

Tabla 5-27 Resumen de Potencias de línea en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 5-28 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga.

$S_{UV}^* = 283.104 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 502.117 \text{ VA}$	$S_{UU}^* = 82.713 \text{ VA}$	$S_{UIe}^* = 71.823 \text{ VA}$
$S_{UV} = 283.107 \text{ VA}$	$S_{UI} = 502.201 \text{ VA}$	$S_{UU} = 82.726 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 71.924 \text{ VA}$
$TU_V^* = 16.472\%$		$TU_I^* = 29.216 \%$	
$TU_V = 16.472\%$		$TU_I = 29.221 \%$	

Tabla 5-28 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 5-29 muestra los valores de las potencias y factores de potencias en formato IEEE Std.100 obtenidos a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc para este tipo de carga. Estos valores son los obtenidos al aplicar el sistema de medidas comercial Power-Guia 440s

$P_A = 753.968 \text{ W}$	$Q_{1A} = 292.589 \text{ var}$	$S_A = 808.750 \text{ va}$	$TPF_A = 0.932$
$P_B = 567.245 \text{ W}$	$Q_{1B} = 254.592 \text{ var}$	$S_B = 621.759 \text{ va}$	$TPF_B = 0.912$
$P_C = 313.393 \text{ W}$	$Q_{1C} = 101.211 \text{ var}$	$S_C = 329.331 \text{ va}$	$TPF_C = 0.951$
$P_{TOT} = 1634.606 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 648.392 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1759.840 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.928$

Tabla 5-29 Magnitudes formato IEEE Std 100 que sigue el equipo de medidas comercial Power Guia 440s

Analizando la Tabla 5-27 para el caso de la potencia activa el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 separa dicha potencia en tres términos ( $P$ ,  $P_1$ ,  $P_H$ ), correspondientes a la potencia activa (total), la potencia activa fundamental y la potencia de distorsión. A su vez la potencia activa fundamental se descompone en potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ), secuencia negativa ( $P_1^-$ ) y cero ( $P_1^0$ ) tal y como define el IEEE Std.1459-2000. Por otro lado como se puede observar en la Tabla 5-28, el IEEE Std.100 cuantifica la potencia activa en un solo término ( $P_{TOT}$ ), que como se puede observar en la Tabla 5-27, no coincide con la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) ya que al tener desequilibrio en tensiones provoca la aparición de potencia activa de secuencia negativa ( $P_1^-$ ) y cero ( $P_1^0$ ). Al igual que en los casos anteriores se observa que la discrepancia en los valores de la potencia activa de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) y la potencia total ( $P_{TOT}$ ) en formato IEEE Std.100 es de 41.84W lo que supone un error relativo del 2.62% cuando se tiene un desequilibrio en tensión del 16.47% y un desequilibrio en corriente del 29.22% en corrientes.

Para el caso de la energía reactiva la discrepancia de ambos términos ( $Q_1^+$ ) y ( $Q_{1TOT}$ ), se justifica teniendo en cuenta que el IEEE Std100 no tiene en cuenta el desequilibrio en tensiones ni la distorsión armónica a la hora de calcular la potencia reactiva. Si se comparan los valores ( $Q_1^+$ ) y de ( $Q_{1TOT}$ ), se observa que la discrepancia es de 350.068 lo que representa un error relativo del 117.344 %. En este caso además del desequilibrio en tensiones, la distorsión armónica está influyendo el valor de la potencia aparente medida en formato IEEE Std.100, lo que supone que el valor de la potencia reactiva en dicho formato presente un error mucho mayor.

Analizando la Tabla 5-27, se observa que en este caso la potencia aparente efectiva no fundamental ( $S_{eN}$ ), ha sufrido un aumento con respecto a los casos anteriores ya que en este caso al haber distorsión armónica la potencia aparente debida a los armónicos pasa a estar cuantificada por dicho término. En la Tabla 5-29 se observa el valor de la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ), cuantificado con el IEEE Std.100 en donde como se puede ver dicho valor es inferior a la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ), (hay que recordar que esa potencia aparente incluye la potencia aparente del neutro), y superior a la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ). De lo anterior se llega a la conclusión de que el IEEE Std.100, incluye en la potencia aparente toda la potencia debida a la distorsión armónica y el desequilibrio del sistema y el IEEE Std.1459 separa dichos fenómenos.

En este caso el factor de potencia ( $P_{FI}^+$ ) y el ( $TPF_{TOT}$ ) presentan una diferencia debida a que al existir distorsión armónica y desequilibrio el IEEE Std.100 no es capaz de discriminar dicha distorsión armónica en la parte de la potencia activa ni en la potencia aparente, lo que supone que a la hora de calcular el factor de potencia aparezca una discrepancia con respecto al valor de ( $P_{FI}^+$ ).

Analizando los valores de ( $TU_V$ ) y ( $TU_I$ ), se llega a la misma conclusión que en el caso anterior, donde el valor de ( $TU_V$ ), tiene el mismo valor que en el caso anterior debido a que el desequilibrio en tensiones es el mismo, y el desequilibrio en corrientes ha disminuido tal y como refleja el valor de ( $TU_I$ ).

A consecuencia de haber aumentado la distorsión el valor de la potencia activa fundamental de secuencia directa ha disminuido respecto al caso anterior y de igual forma el factor de eficiencia se ha visto afectado y como consecuencia ha disminuido indicando que el sistema sería menos eficiente que en el caso anterior.

### **5.3.7. Otros casos significativos.**

Para completar el análisis se ha incluido la simulación de unos casos significativos que no pueden ser comprobados de forma experimental con los medios disponibles en el laboratorio. En la primera situación se presenta el funcionamiento del sistema de medidas propuesto cuando las tensiones en el pcc presentan distorsión. En la segunda situación, el sistema de tensiones de alimentación presentará desfase en las tensiones. Las tensiones de alimentación se han elevado al rango de los 220 V.

#### **5.3.7.1. Tensiones de alimentación no lineales.**

En primer lugar se presenta el caso en el que las tensiones de alimentación presenten distorsión. Las tensiones se han formado añadiendo un tercer armónico de  $15 V_{RMS}$  y un octavo armónico de  $10 V_{RMS}$  a una componente fundamental de  $220 V_{RMS}$  en cada fase. El sistema trifásico de tensiones de alimentación utilizado se muestra en la Figura 5.46.



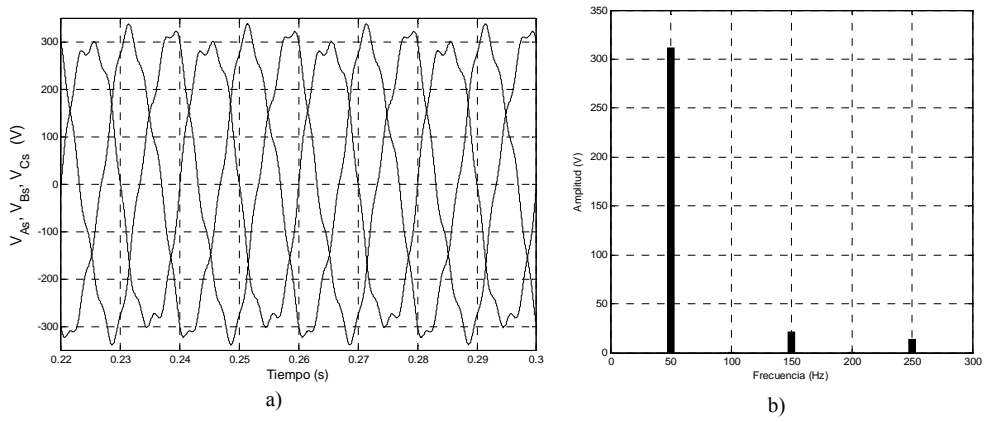


Figura 5.46 Tensiones de alimentación no senoidales en el pcc. a) Tensiones b) Contenido armónico

La Tabla 5-30 presenta un resumen de los valores más representativos de las tensiones en el punto de conexión del sistema de medidas.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
220.73 V	220.73 V	220.73 V	8.19 %	8.19 %	8.19 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
220.00 V	220.00 V	220.00 V	220.00 V	0.00 V	0.00 V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}^+}$	$\phi_{V_{s1}^-}$	$\phi_{V_{s1}^0}$
0°	-120°	-240.00°	0.00°	173.82°	-21.80°

Tabla 5-30 Valores significativos de las tensiones en el pcc

La carga está formada por una combinación de cargas lineales y no lineales. La parte lineal de la carga es la siguiente:

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 10 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 15 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = 10 \Omega$

La carga se completa con tres rectificadores monofásicos no controlados, uno por fase, con un filtro LC y carga resistiva. Los valores de los componentes de la parte no lineal son los siguientes:

3 x Rectificador + Filtro		
$C_r = 2200 \mu F$	$L_r = 0.5 \text{ mH}$	$R_{rA} = 100 \Omega$ ; $R_{rB} = 50 \Omega$ ; $R_{rC} = 75 \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación no senoidales como las mostradas en la Figura 5.46 , las corrientes que la carga demanda al sistema de generación se muestran en la Figura 5.47.

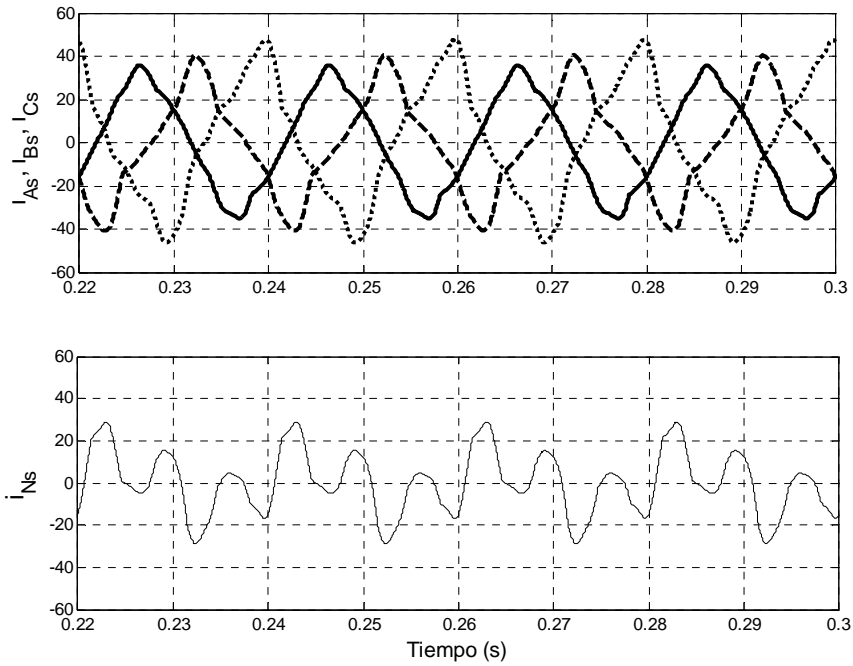


Figura 5.47 Corrientes demandadas por la carga, fases (superior) y neutro (inferior).

En la Tabla 5-31 se muestran los valores más significativos de las corrientes demandadas por la carga al sistema de generación.

$I_{As} = 22.40 \text{ A}$	$I_{Bs} = 22.65 \text{ A}$	$I_{Cs} = 27.79 \text{ A}$	$I_{Ns} = 14.67 \text{ A}$
$I_{As1} = 22.30 \text{ A}$	$I_{Bs1} = 21.93 \text{ A}$	$I_{Cs1} = 27.17 \text{ A}$	$I_{Ns1} = 8.13 \text{ A}$
$\phi_{I_{As1}} = -30.16^\circ$	$\phi_{I_{Bs1}} = -133.17^\circ$	$\phi_{I_{Cs1}} = -244.15^\circ$	$THD_{I_{As}} = 9.48 \%$
$I_{s1}^+ = 23.38 \text{ A}$	$I_{s1}^- = 4.27 \text{ A}$	$I_{s1}^0 = 2.71 \text{ A}$	$THD_{I_{Bs}} = 25.83 \%$
$\phi_{s1}^+ = -15.17^\circ$	$\phi_{s1}^- = -99.59^\circ$	$\phi_{s1}^0 = -161.24^\circ$	$THD_{I_{Cs}} = 21.45 \%$

Tabla 5-31 Resumen las corrientes que suministra el generador a la carga.

La Tabla 5-32 muestra los valores más significativos en formato IEEE Std. 1459 de las tensiones, corrientes, potencias, THD's y factores de potencia, medidos a partir de las tensiones en el pcc y las corrientes consumidas por la carga.

$V_e^* = 220.737 \text{ V}$		$I_e^* = 25.839 \text{ A}$	
$V_e = 220.736 \text{ V}$		$I_e = \text{A}$	
$V_{e1}^* = 220.000 \text{ V}$	$V_{eh}^* = 18.027 \text{ V}$	$I_{e1}^* = 24.380 \text{ A}$	$I_{eh}^* = 8.561 \text{ A}$
$V_{e1} = 219.999 \text{ V}$	$V_{eh} = 18.027 \text{ V}$	$I_{e1} = 24.379 \text{ A}$	$I_{eh} = 8.561 \text{ A}$
$S_e^* = 17111.130 \text{ va}$			
$S_e = 17111.021 \text{ va}$			
$S_{e1}^* = 16090.911 \text{ va}$		$S_{eN}^* = 5820.623 \text{ va}$	
$S_{e1} = 16090.521 \text{ va}$		$S_{eN} = 5820.839 \text{ va}$	
$S_1^{+*} = 15431.820 \text{ va}$		$S_{U1}^* = 4558.094 \text{ va}$	$D_{eV}^* = 1318.559 \text{ va}$
$S_1^+ = 15431.439 \text{ va}$			$D_{eV} = 1318.991 \text{ va}$
$P_1^{+*} = 14868.620 \text{ W}$	$Q_1^{+*} = 4129.955 \text{ var}$	$S_{U1} = 4558.039 \text{ va}$	$THD_{eV}^* = 8.194 \%$
$P_1^+ = 14868.822 \text{ W}$	$Q_1^+ = 4128.832 \text{ var}$		$THD_{eV} = 8.194 \%$
$P^* = 14938.934 \text{ W}$		$P_1^* = 14868.823 \text{ W}$	$P_H^* = 70.111 \text{ W}$
$P = 14938.933 \text{ W}$		$P_1 = 14868.824 \text{ W}$	$P_H = 70.110 \text{ W}$
$P_A^* = 4214.293 \text{ W}$	$P_B^* = 4675.290 \text{ W}$	$P_C^* = 6049.351 \text{ W}$	$P_{Fe}^* = 0.874$
$P_A = 4214.292 \text{ W}$	$P_B = 4675.290 \text{ W}$	$P_C = 6049.350 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.873$
$P_{A1}^* = 4207.747 \text{ W}$	$P_{B1}^* = 4662.461 \text{ W}$	$P_{C1}^* = 5998.615 \text{ W}$	$P_{F1}^* = 0.925$
$P_{A1} = 4207.748 \text{ W}$	$P_{B1} = 4662.462 \text{ W}$	$P_{C1} = 5998.613 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.924$
$P_1^{+*} = 14868.620 \text{ W}$	$P_1^* = 0.000 \text{ W}$	$P_1^{0*} = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^{+*} = 0.965$
$P_1^+ = 14868.822 \text{ W}$	$P_1 = 0.001 \text{ W}$	$P_1^0 = 0.000 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 0.963$
$F_e^* = 0.870$			
$F_e = 0.869$			

Tabla 5-32 Resumen de Potencias de línea en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 5-33 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{UV}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UI}^* = 4558.094 \text{ VA}$	$S_{UIU}^* = 0.000 \text{ VA}$	$S_{UIe}^* = 0.000 \text{ VA}$
$S_{UV} = 0.006 \text{ VA}$	$S_{UI} = 4558.039 \text{ VA}$	$S_{UIU} = 0.001 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 0.001 \text{ VA}$
$TU_V^* = 0.000\%$		$TU_I^* = 28.327 \%$	
$TU_V = 0.000\%$		$TU_I = 28.327 \%$	

Tabla 5-33 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 5-34 muestra los valores de las potencias y factores de potencias en formato IEEE Std.100 obtenidos a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc para este tipo de carga.

$P_A = 4214.293 \text{ W}$	$Q_{1A} = 2588.617 \text{ var}$	$S_A = 4945.827 \text{ va}$	$TPF_A = 0.852$
$P_B = 4675.290 \text{ W}$	$Q_{1B} = 1773.240 \text{ var}$	$S_B = 5000.272 \text{ va}$	$TPF_B = 0.935$
$P_C = 6049.351 \text{ W}$	$Q_{1C} = 1019.933 \text{ var}$	$S_C = 6134.730 \text{ va}$	$TPF_C = 0.986$
$P_{TOT} = 14938.934 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 5381.790 \text{ var}$	$S_{TOT} = 16080.830 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.928$

Tabla 5-34 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas por el equipo comercial Power Guia 440s

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5-32 se observa que en este caso al tener un sistema de tensiones equilibrado las potencias activas debidas al desequilibrio son nulas ( $P_1^-$ ) y ( $P_1^0$ ) ya que  $(V_{s1}^-) = (V_{s1}^0) = 0$ . Sin embargo es la potencia debida a la distorsión armónica ( $P_H$ ), provocada en este caso por el tercero y quinto armónico presentes en las tensiones de red, la que ha aumentado de valor respecto a los casos anteriores. Para el caso del IEEE Std.100, la potencia activa se cuantifica a través del término ( $P_{TOT}$ ), agrupando toda la potencia activa en dicho término (fundamental y de distorsión), el cual no coincide con la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) en formato IEEE Std.1459, ya que aunque el sistema no presenta desequilibrio en tensiones si presenta distorsión de tensiones y corrientes lo que provoca la discrepancia en dichos términos. Analizando los valores de ( $P_1^+$ ) y de ( $P_{TOT}$ ), se observa una discrepancia de 70.314 W lo que supone un error relativo del 0.47%. En este caso dicho error está provocado por la distorsión armónica presente en las tensiones y corrientes.

Para el caso la potencia reactiva la discrepancia en los términos ( $Q_1^+$ ) y ( $Q_{1TOT}$ ) se justifica debido a que el IEEE Std.1459 elimina la distorsión armónica de tensiones y corrientes para el cálculo del término ( $Q_1^+$ ) mientras que el IEEE Std.100 la considera para el cálculo del término ( $Q_{1TOT}$ ). Analizando el valor de ambos términos se observa una discrepancia de 1252.985 var que corresponde a un error relativo del 30.34%

El valor de la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ) en formato IEEE Std.100 es mayor que el de la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) en formato IEEE Std.1459, ya que aunque el sistema es equilibrado en tensiones, el IEEE Std.100 no elimina la distorsión armónica de la medida de la potencia aparente mientras que el IEEE Std1459 si lo tiene en cuenta.

Al no tener en cuenta la distorsión armónica en el formato IEEE Std100 para el cálculo del factor de potencia total ( $TPF_{TOT}$ ), éste no coincide con el ( $P_{F1}^+$ ) en formato IEEE Std1459, que si tiene en cuenta la distorsión armónica de tensiones y corrientes para dicho calculo.

Analizando la Tabla 5-33, se observa que la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ) corresponde al desequilibrio en corriente ( $S_{UI}$ ) ya que en este caso se tiene un sistema trifásico de tensiones equilibradas.

Analizando la Tabla 5-34, se observa que toda la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ), es debida al desequilibrio en corriente ( $S_{UI}$ ) y que así se refleja en el factor de mérito propuesto ( $TU_i$ )

5.3.7.2. Tensiones de alimentación lineales con desfase y asimetría.

En segundo lugar se presenta el caso en el que las tensiones de alimentación presenten desfase en la componente fundamental con respecto al paso por cero de una supuesta tensión de secuencia positiva en los generadores remotos. Hay que tener en cuenta que si se tiene un desequilibrio en las tensiones de red, lo que se produce es una modificación del módulo de la componente de secuencia positiva pero su fase permanece en el mismo valor y coincide con la fase de la tensión ( $V_{As}$ ), sin embargo si se produce una modificación de la amplitud y el desfase de las tensiones de red la componente de secuencia positiva de dichas tensiones va a sufrir una variación de amplitud y una variación en el desfase, en donde el sistema de sincronización debe tenerlo en cuenta y considerar como punto de origen (referencia=0) el ángulo de dicha secuencia. En este caso se ha omitido toda la parte de cálculo de potencias ya que no aporta información significativa respecto a cualquiera de los casos anteriormente simulados, al no influir el punto de referencia (fase secuencia positiva o fase de las tensiones de red) en el cálculo de las potencia definidas en el IEEE Std1459.

Para este caso las tensiones se han desfasado respecto del paso por cero ficticio de la simulación, que es el instante 0 s y cada 20 ms. El sistema trifásico de tensiones de alimentación utilizado se muestra en la Figura 5.48. La Tabla 5-35 presenta un resumen de los valores más representativos de las tensiones en el punto de conexión del sistema de medidas.

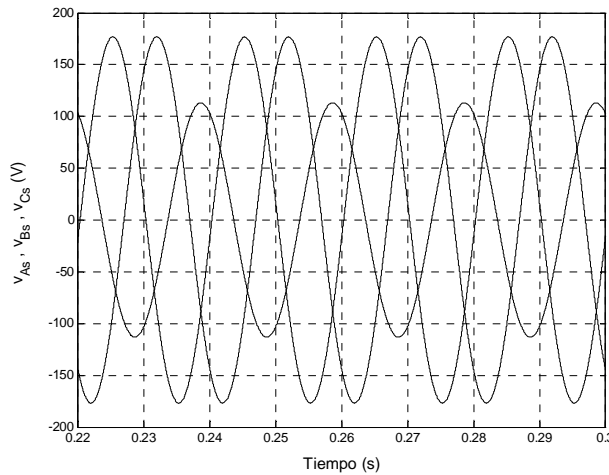


Figura 5.48 Tensiones de alimentación con desfase.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
125.00 V	125.00 V	80.00 V	0.00 %	0.00 %	0.00 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
125.00 V	125.00 V	80.00 V	110.00 V	15.00 V	15.00 V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}^+}$	$\phi_{V_{s1}^-}$	$\phi_{V_{s1}^0}$
-20.00 °	-140.00 °	-260.00 °	-20.00 °	40.00 °	-80.00 °

Tabla 5-35 Valores significativos de las tensiones en el pcc.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
125.00 V	125.00 V	80.00 V	0.00 %	0.00 %	0.00 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
125.00 V	125.00 V	80.00 V	110.00 V	15.00 V	15.00 V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}^+}$	$\phi_{V_{s1}^-}$	$\phi_{V_{s1}^0}$
-20.00 °	-140.00 °	-260.00 °	00.00 °	60.00 °	-60.00 °

Tabla 5-36 Valores significativos de las tensiones en el pcc proporcionados por el sistema de medidas

En la Tabla 5-36, se muestran los valores significativos de las tensiones medidas con el sistema de medidas propuesto donde se puede observar como el sistemas de sincronización está sincronizado correctamente con la componente fundamental de secuencia positiva de las tensiones de red, ya que como se puede ver en dicha tabla el ángulo de dicha secuencia es cero ( $\phi_{V_{s1}^+}=0.00^\circ$ ). En la Tabla 5-35, se puede ver como si se está sincronizado con las tensiones de red dicho ángulo presenta un valor de ( $\phi_{V_{s1}^+}=-20.00^\circ$ ).

En este caso se pone de manifiesto el correcto funcionamiento del sistema de sincronización al observar que si el sistema de tensiones de alimentación presenta desfase, el sistema de sincronización es capaz de sincronizarse correctamente con la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red. La ventaja de estar sincronizado con dicha secuencia es que si se utiliza el sistema de medidas desarrollado, junto con un compensador activo, y se pretenden compensar todas aquellas magnitudes que no sean fundamentales y de secuencia positiva, el propio sistema de medidas proporciona dicha referencia al compensador activo ya que su sincronismo se realiza con la componente fundamental y de secuencia directa de las tensiones de red tal y como se ha mostrado en la Tabla 5-36.

### 5.3.8. Simulación de la SDFT.

Para verificar el correcto funcionamiento de la ventana deslizante (SDFT) se ha llevado a cabo una simulación mediante Matlab en donde se observa la evolución de la salida de la SDFT ante una variación de las tensiones de entrada. En este caso se ha introducido una caída del 50% en una de las fases de las tensiones de red ( $V_{As}$ ).

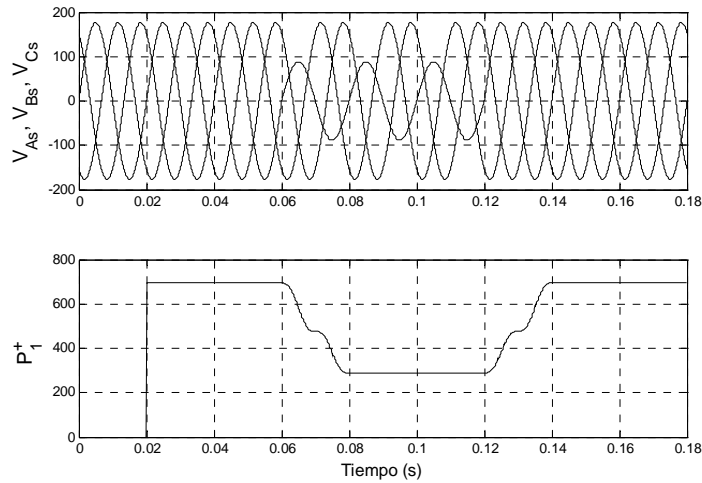


Figura 5.49 Respuesta de la SDFT ante una perturbación en las tensiones de red

En la Figura 5.49 se muestran las tensiones de alimentación utilizadas en la simulación de este caso cuyos valores se muestran en la Tabla 5-37 (antes de la perturbación) y en la Tabla 5-38 (durante la perturbación).

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
125.00 V	125.00 V	125.00 V	0.00 %	0.00 %	0.00 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
125.00 V	125.00 V	125.00V	125.00V	0.00V	0.00V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}}^+$	$\phi_{V_{s1}}^-$	$\phi_{V_{s1}}^0$
0°	-120.00°	-240.00°	0.00°	180.00°	-60.00°

Tabla 5-37 Valores de las tensiones de alimentación antes de la perturbación

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$
62.50 V	125.00 V	125.00 V	0.00 %	0.00 %	0.00 %
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$V_{s1}^+$	$V_{s1}^-$	$V_{s1}^0$
62.50 V	125.00 V	125.00 V	104.16 V	20.83 V	20.83 V
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{V_{s1}}^+$	$\phi_{V_{s1}}^-$	$\phi_{V_{s1}}^0$
0°	-120.00°	-240.00°	0.00°	60.00°	-60.00°

Tabla 5-38 Valores de las tensiones de alimentación durante la perturbación.

Si se observa la Figura 5.49, se puede ver cómo evoluciona el valor de la potencia activa de secuencia directa ante una caída del 50% de una de las tensiones de red. En dicha figura se observa que una vez transcurridos los primeros 20ms donde se han almacenado las muestras correspondientes a un ciclo de red, la SDFT proporciona los valores de corrientes y tensiones necesarios para el cálculo de  $P_1^+$  cuyo valor antes de la perturbación se muestra en la Figura

5.41. A partir de los 20ms el valor de  $(P_1^+)$  permanece constante hasta que se produce la perturbación a los 0.06s donde las tensiones de red sufren una caída del 50% en una de sus fases ( $V_{As}$ ), donde a partir de ese momento la SDFT proporciona un nuevo valor de corrientes y tensiones con cada nueva muestra que se va adquiriendo, provocando de esta forma una transición suave hacia el nuevo valor de la potencia activa de secuencia directa ( $P_1^+$ ), cuyo valor final se muestra en la Tabla 5-39.

Como se puede observar en la Figura 5.49, la SDFT va proporcionando de forma continua la evolución de las tensiones y corrientes presentes en el pcc, con cada nueva muestra que se va adquiriendo, realizando de esta manera un transición suave y continua del valor inicial de todas las magnitudes medidas por el sistema de medidas, hacia los nuevos valores que se alcanzan al cabo de un ciclo de red.

<i>Valor de <math>(P_1^+)</math> antes de la perturbación</i>	<i>Valor de <math>(P_1^+)</math> despues de la perturbación</i>
$P_1^+ = 694.444W$	$P_1^+ = 289.351 W$

Tabla 5-39 Valores de  $(P_1^+)$  antes y durante la perturbación.

La utilización de la SDFT proporciona al sistema de medidas la ventaja, de que si se utiliza junto con un compensador activo de ineficiencias, la compensación de dichas ineficiencias se realiza de forma suave, evitando así las transiciones bruscas en la compensación de dichas ineficiencias.

#### 5.4. Conclusiones.

En este capítulo se ha realizado la simulación del sistema propuesto para la implementación de un sistema de medidas digital basado en el IEEE Std.1459-2000.

- El método de la DSC para la extracción de la secuencia directa de las tensiones de red no ofrece buenos resultados para el funcionamiento del sistema de sincronización, ya que cuando el orden de los armónicos presentes en las tensiones de red no pertenecen a la serie  $h = 6k \mp 1$  donde  $k = \text{numero entero impar}$  la DSC no consigue eliminarlos y el SPLL no se sincroniza adecuadamente con la fase de la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red.
- Los resultados demuestran que la utilización del filtro SOGI, añade robustez al sistema de sincronización filtrando los armónicos que no cancela la DSC.
- Para el correcto funcionamiento del SPLL se necesita que la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red no presente distorsión armónica, ya que en función del orden de los armónicos presentes en dicha componente el SPLL realizará un



mejor o peor seguimiento de la fase de la componente fundamental de secuencia directa de las tensiones de red.

- Las simulaciones demuestran que el sistema de sincronización propuesto es robusto ante cualquier tipo de perturbación presente en las tensiones de red, con unos tiempos de respuesta aceptables.
- Se ha simulado el sistema de medidas completo con las tensiones de alimentación y cargas que luego se medirán de forma experimental. Los resultados de las simulaciones permitirán contrastar los valores teóricos los valores obtenidos con el sistema de medidas comercial (Power Guia 440S) y los valores obtenidos con el equipo de medidas desarrollado en esta tesis.
- Se ha simulado el sistema de medidas para unos casos de tensiones de alimentación (distorsión, desfase, etc.) que no se podrán implementar de forma real. La simulación ha permitido comprobar su correcto funcionamiento en estos casos.
- La comparación de los valores obtenidos en las simulaciones con los teóricos (\*), indican que el error relativo medio en la medida cometido por el sistema de medidas es menor del 0.01%.
- Se ha observado mediante la simulación de los distintos casos, que el error que se comete a la hora de cuantificar los valores de las distintas potencias y factores de potencia, depende del tipo de sistema de corrientes y tensiones que se tenga en el pcc. Por otro lado se ha observado que a medida que el sistema a medir, se aleja de un sistema de tensiones y corrientes senoidales y equilibrado el error en la cuantificación de dichos valores aumenta, y que dependiendo de los fenómenos no eficientes presente en tensiones y corrientes afectará mas a unos u otros términos de potencia y factores de potencia cuantificados.
- Los casos de simulación planteados han constatado la utilidad de la nueva descomposición de ( $S_{vi}$ ), así como de los factores de mérito propuestos cuando se trabaja en sistemas de alimentación con tensiones desequilibradas.
- La comparación de los resultados obtenidos con el sistema de medidas propuesto con los resultados obtenidos mediante las definiciones del Std. 100 demuestra que se trata de un sistema de medidas que ofrece mucha más información aprovechando las ventajas del IEEE Std.1459.



# Capítulo 6

---

## **6. Descripción de la plataforma hardware.**

Tras el análisis y simulación realizados en los capítulos 4 y 5 se está en disposición de implementar de forma física el sistema de medidas propuesto en esta tesis. Dentro de las necesidades técnicas que debe cumplir el prototipo del sistema de medidas se definirán las necesidades hardware y software para medir las señales presentes en el pcc (del entorno de trabajo) y, a partir de ellas calcular los valores de todos los términos definidos en el IEEE Std.1459-2000 junto con los valores de los nuevos términos propuestos en esta tesis. El entorno de trabajo en el que se sitúa el sistema de medidas corresponde al laboratorio de Energías Renovables del departamento de Ingeniería Electrónica de la UPV (prototipo experimental de laboratorio).

Teniendo en cuenta lo anterior en este capítulo se describe en primer lugar la plataforma hardware que constituye el prototipo experimental del sistema de medidas y cuál es la función de los distintos elementos que integran dicha plataforma. Se incluye dentro de esta descripción la parte correspondiente al sensado y acondicionamiento de la señal para su posterior tratamiento por parte del procesador digital de señales (DSP) [117]-[118]-[119]. Seguidamente se justifica la elección del DSP utilizado para la ejecución del software de medidas para el cálculo de los valores de las magnitudes medidas, y se describen los equipos de medida comerciales que se utilizan para la monitorización de las señales presentes en el punto de conexión. A continuación se describe el sistema monitor, encargado de la visualización y almacenamiento en un PC de los valores de las magnitudes calculadas por el sistema de medidas. Este sistema de medidas ha sido desarrollado en la presente tesis y aporta al prototipo unas mayores prestaciones, permitiendo el análisis posterior de las magnitudes medidas. Por último se detallan las conclusiones de las magnitudes medidas así como las conclusiones del capítulo.

### **6.1. Descripción de la plataforma hardware del sistema de medidas IEEE Std.1459.**

En la Figura 6.1 se presenta el diagrama de bloques del prototipo experimental que se ha construido del sistema de medidas. El diagrama incluye todos los sistemas y subsistemas que configuran dicha plataforma hardware.

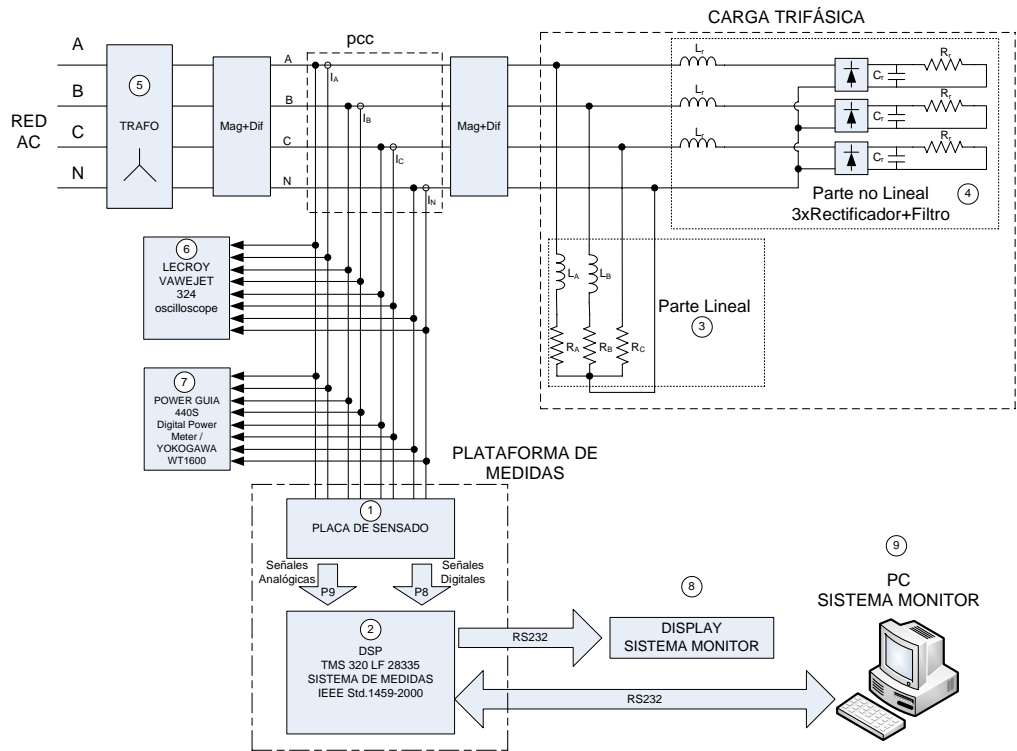


Figura 6.1 Diagrama de bloques del prototipo experimental del sistema de medidas implementado en el laboratorio

A continuación se detallan las características de los principales componentes utilizados para la implementación de la plataforma hardware del prototipo del sistema de medidas las cuales se han numerado correspondiendo con los valores mostrados en la Figura 6.1.

1. En la Figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques de la placa de sensado donde están ubicados los sensores de corriente y tensión junto con toda la electrónica necesaria para adaptar las señales medidas a la entrada del procesador digital de señales (DSP) (acondicionamiento de las señales).

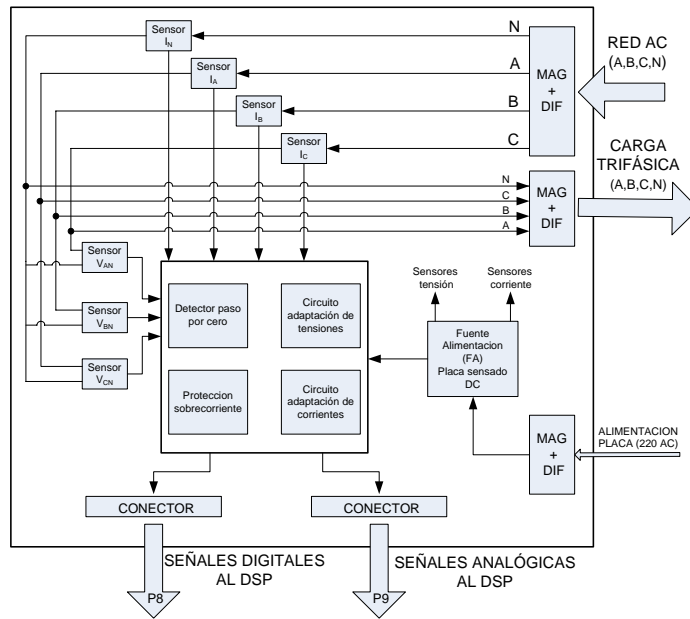


Figura 6.2 Diagrama de bloques de la placa de sensado.

El sensor de tensión elegido es el LV 25-600 del fabricante LEM, y el sensor de corriente corresponde al modelo LA100-P, del mismo fabricante, cuyas características principales se definen en el apartado 6.2.

Como se puede observar en la Figura 6.2, se dispone de tres sensores de tensión y de cuatro sensores de corriente (tres fases y neutro), los cuales proporcionan una salida en corriente (fuente de corriente), proporcional al valor de la magnitud que están midiendo. Las salidas de dichos sensores son adaptadas a los valores de señales de entrada al DSP a través de los circuitos de adaptación correspondientes tal y como se muestra en la Figura 6.2. Por otro lado en dicha placa se dispone de un detector de paso por cero hardware que se ha utilizado para depurar el SPLL propuesto en esta tesis. También se ha implementado un sistema de protecciones por sobre corriente para evitar el deterioro de la placa de sensado y del propio DSP. La placa de sensado incluye también los conectores necesarios para proporcionar las señales de salida, a los puertos de entrada del DSP, donde se tiene un conector para las señales digitales (P8) y un conector para las señales analógicas (P9). Además de los conectores de entrada y salida de las tensiones y corrientes que se desean medir en el pcc. La placa incluye su propia fuente de alimentación ( $\pm 15V$ ) que proporcionan los niveles de tensiones y corrientes necesarios para cada uno de los elementos incluidos en dicha placa.

2. El DSP es el elemento principal en el sistema de medidas, ya que es el encargado de realizar el muestreo y adquisición de las señales presentes en el pcc (tensiones y corrientes), de la

ejecución de todas las funciones y algoritmos necesarios para realizar los cálculos según el IEEE Std.1459-2000, y de la visualización de las magnitudes medidas. El programa desarrollado en el DSP se encarga de ejecutar los algoritmos mostrados en la Figura 4.3, en donde se puede observar que una vez muestreadas las señales de tensiones y corrientes presentes en el pcc, se lleva a cabo el proceso de sincronización con la red (sistema de sincronización SPLL), y a continuación se ejecutan los cálculos necesarios para obtener los valores correspondientes a todas las magnitudes definidas en el IEEE Std. 1459-2000. Por último se visualizan los valores de todas las magnitudes medidas a través de un sistema monitor (apartado 6.4) y un display LCD. La descripción de cada uno de los algoritmos ejecutados en el DSP se ha realizado en el apartado 4.1. Teniendo en cuenta todas las tareas que debe ejecutar el DSP se ha elegido el modelo TMS320F28335 (300 MegaFlops) de la marca comercial Texas Instruments [120]. Para llevar a cabo dicha elección se ha tenido en cuenta la velocidad de procesado con la que debe contar el DSP, a la hora de ejecutar los cálculos, ya que como se explicó en el apartado 4.1 el DSP dispone de 156 microsegundos entre muestra y muestra de tensiones y corrientes para llevar a cabo todos los cálculos y obtener los términos de potencia definidos en el Std.1459. Por otro lado se ha buscado un DSP, en el cual resulte sencillo llevar a cabo operaciones matemáticas sin necesidad de realizar operaciones complejas a nivel de programación, permitiendo la posibilidad de trabajar en coma flotante y tener una mayor resolución.

3. La carga trifásica para llevar a cabo los ensayos consta de dos partes. La primera parte corresponde a una carga lineal en la cual a través de bobinas y resistencias se consiguen distintos valores de desfase y desequilibrio en la carga. Los valores de las bobinas y resistencias utilizadas depende de los casos en estudio y se detallan en cada caso.

4. Cuando se quiere ensayar casos con distorsión en las corrientes se añade una parte no lineal a la carga cuyos valores son fijos para todos los casos de carga no lineal y corresponden a los mostrados a continuación.

<i>3 x Rectificador + Filtro</i>		
$C_r = 2200 \mu F$	$L_r = 5.4 mH$	$R_r = 100 \Omega$

5. Transformador de conexión entre el sistema de medidas y la red de suministro. Se trata de un transformador de 20 KVA configurable. El transformador dispone de varios secundarios (125 V – 80 V – 48 V) que permiten obtener diferentes configuraciones. Primario y secundario se conectan en estrella. Para las diferentes pruebas que se presentan en el capítulo 7 de resultados experimentales, se han empleado los secundarios de 125 V y 80 V, para obtener un sistema de tensiones equilibrado  $V_{As}=V_{Bs}=V_{Cs}=125$  V o un sistema de tensiones desequilibrado con tensiones  $V_{As}=V_{Bs}=125$  V,  $V_{Cs} = 80$  V. El primario se conecta a la red eléctrica trifásica de 220 V (valor de tensión disponible en el laboratorio).

6. El equipo utilizado para la obtención de las formas de onda es el osciloscopio digital LeCroy.WaveJet 324
7. El equipo utilizado para las medidas experimentales y los diagramas fasoriales es el Yokogawa WT 1600 (diagramas fasoriales) y el Power Guia 440s (medidas experimentales) de la casa DRANETZ-BMI cuyas características más importantes se encuentran descritas en el Anexo I
8. Display (LCD de dos filas) del sistema monitor para visualizar los valores de todas las magnitudes medidas por el sistema de medidas de acuerdo con el IEEE Std.1459-2000.
9. El PC permite la visualización y almacenamiento de todas las magnitudes medidas por el sistema a través de una interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic.net que se detalla en el apartado 6.4.



Figura 6.3 Fotografía correspondiente al prototipo del sistema de medidas

## **6.2. Especificaciones técnicas del sistema de medidas.**

Como se ha comentado en la introducción del presente capítulo, a la hora de definir las especificaciones técnicas del sistema de medidas hay que tener en cuenta, cual es la finalidad del sistema de medidas y cuál será el entorno de trabajo en el que debe realizar las medidas.

Si se tiene en cuenta la primera de las condiciones, lo que se pretende es desarrollar un sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 extendido, lo que supone que dicho sistema debe ser capaz de cuantificar todas las magnitudes presentes en dicho estándar. Para realizar los cálculos necesarios y cuantificar dichas magnitudes a partir de los valores de tensiones y corrientes presente en el pcc se ha elegido en esta tesis un procesador digital de señales (DSP), modelo TMS320F28335 de la casa comercial Texas Instruments [120] cuya capacidad de procesado es de 300 MegaFlops (Millones de Operaciones en coma Flotante). De entre las características más relevantes del DSP se encuentra las mostradas en la Tabla 6-1, las cuales garantizan la posibilidad de que a través de dicho DSP, se puedan implementar todas aquellas funciones de medida y

cálculo necesarias para el desarrollo del sistema de medidas basado en IEEE Std.1459-2000 propuesto en esta tesis.

<i>Descripción</i>		<i>F28335(150MHz)</i>
Instruction Cicle		6.67ns
Floating-point Unit		Yes
3.3V on Chip Flash (16 bit word)		256 K
Single-access RAM (SARAM) (16 bit word)		34 K
On time programmable ROM (16 bit word)		1K
16/32 bit external interface (XINT)		Yes
PWM outputs		ePWM1/2/3/4/5/6
32 bit capture inputs or auxiliary PWM outputs		eCAP1/2/3/4/5/6
32bit QEP Channels (For Inputs Channels)		eQEP1/2
12 bit-ADC	N° of channels	16
	MSPS	12.5
	Conversion time	80ns
32 CPU timers		3
Multichannel Buffered Serial Port (McBSP)/(SPI)		2(A/B)
Serial Peripheral Interface (SPI)		1
Serial Communication Interface (SCI)		3 (A/B/C)
Enhanced controller Area Network (eCAN)		2(A/B)
General Purpose I/O pins (Shared)		88
External interrupts		8
Temperature Options	A: -40°C to 85°C	(PGF,ZHH,ZJZ)
	S: -40°C to 125°C	(ZJZ)
	Q: -40°C to 125°C	(ZJZ)

Tabla 6-1 Resumen de características del DSP TMS 320F28335 de Texas Instruments

A la hora de definir los valores máximos de corrientes y tensiones que es capaz de medir el sistema de medidas, se ha tenido en cuenta las segunda de las condiciones que es el entorno de



trabajo en el que se van a realizar las medidas con el prototipo. Todos los ensayos realizados con el sistema de medidas se han llevado a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables del departamento de Ingeniería Electrónica de la UPV, donde los valores de tensiones presentes en laboratorio no superan los 380V de línea y las corrientes están limitadas a 30 A.

Teniendo en cuenta lo anterior se han elegido unos sensores de tensión y corriente capaces de medir los valores de tensión y corriente presentes en el laboratorio de investigación. A continuación se definen las características de dichos sensores y se observa que los valores de las tensiones y corrientes que registran dichos sensores sobrepasan los niveles de corrientes y tensiones presentes en el laboratorio. No obstante si se deseara elevar dichos valores no habría más que integrar en el sistema de medidas unos sensores de corrientes y tensiones adecuados a los nuevos valores de corrientes y tensiones que se desearan medir.

- *Especificaciones técnicas de los sensores de corriente.*

El sensor de corriente de efecto Hall elegido es el LA100P, del fabricante sueco LEM, cuyas especificaciones técnicas más relevantes se muestran en la Tabla 6-2.

<b>Especificaciones eléctricas</b>	
Corriente eficaz del primario ( $I_{PN}$ )	100 A
Rango de medida corriente primario ( $I_{PM}$ )	$\pm 150$ A
Corriente nominal del secundario ( $I_{SN}$ )	50 mA
Ancho de banda	DC a 200kHz (-1dB)
Consumo	10 mA + corriente secundario
Alimentación	$\pm 15$ V
Resistencia del secundario	110 $\Omega$
<b>Especificaciones dinámicas</b>	
Corriente de offset	$\pm 0.10$ mA (máx)
Deriva térmica de corriente	$\pm 0.25$ mA (25° C)
	$\pm 0.35$ mA (70° C)
Linealidad	<0.15%
Retardo	1 $\mu$ s

Tabla 6-2 Especificaciones técnicas de los sensores de corriente LA100P.

- *Especificaciones técnicas de los sensores de tensión.*

El sensor de tensión de efecto Hall elegido es el LV 25-600 del fabricante sueco LEM, cuyas especificaciones técnicas más relevantes son las mostradas en la Tabla 6-3.

<b>Especificaciones eléctricas</b>	
Tensión eficaz del primario ( $V_{PN}$ )	600 V
Rango de medida tensión primario ( $V_P$ )	0 ... $\pm 900$ V
Corriente eficaz del primario ( $I_{PN}$ )	10 mA
Corriente eficaz del secundario	25 mA.
Error relativo a 25°C	$\pm 0.6$ % de $I_n$
Ancho de banda	DC a 200kHz (-1dB)
Consumo	10 mA + corriente secundario
Alimentación	$\pm 15$ V
Resistencia del secundario	110 $\Omega$
Resistencia del primario	250 $\Omega$
<b>Especificaciones dinámicas</b>	
Corriente de offset	$\pm 0.05$ mA (máx)
Deriva térmica de corriente	$\pm 0.25$ mA (25° C)
	$\pm 0.35$ mA (70° C)
Linealidad	<0.2%
Retardo	15 $\mu$ s

Tabla 6-3 Especificaciones técnicas de los sensores de tensión LV25-600.

Como se puede observar en la Figura 6.2, la placa de sensado dispone de cuatro sensores de corriente (LA100P), que se encargan de medir las corrientes de las tres fases y la del neutro, y dispone de tres sensores de tensión (LV25-600) que miden las tres tensiones fase neutro en el punto de conexión (pcc). Las características de los sensores mostradas en la Tabla 6-2 y en la Tabla 6-3, indican los valores máximos que podría llegar a medir el sistema de medidas tanto en corriente como en tensión. Como se ha comentado anteriormente, los sensores tanto de corriente como de tensión se comportan como una fuente de corriente, proporcionando a su salida una corriente proporcional al valor de la magnitud que están midiendo. La placa de sensado se encarga de adaptar los valores de las señales proporcionadas por los sensores de medida tanto de tensión

como de corriente (25mA de corriente de salida del sensor a fondo de escala), a los valores de las señales de entrada al DSP, (3V).

### 6.3. El entorno de programación del DSP “Code Composer Studio”

Para implementar el software del sistema de medidas se ha utilizado el entorno de programación “Code Composer Studio” de Texas Instruments cuya interfaz gráfica se muestra en la Figura 6.4. El entorno de programación “Code composer Studio” permite, entre otras opciones, la edición, depuración y la ejecución en tiempo real del software del sistema de medidas que se ejecutará en el DSP. La conexión entre el PC y el DSP, se realiza a través de un puerto de comunicaciones USB, el cual garantiza la velocidad suficiente para poder trabajar con el “Code composer Studio” en tiempo real.

El lenguaje de programación del software del sistema de medidas se ha hecho en “C” ANSI, en donde además se han utilizado algunas funciones y librerías ya implementadas por Texas Instruments para el funcionamiento del propio DSP.

En la interfaz gráfica del “Code Composer Studio” mostrada en la Figura 6.4, se puede observar la ventana “File View”, en la cual se muestran todos los ficheros que integran el software del sistema de medidas. En la carpeta “source”, se encuentran los ficheros fuente, donde está el código desarrollado para el software del sistema de medidas. En el fichero “Main\_Medidas\_Trifásicas\_28335.c”, se encuentra el código principal correspondiente a todas las funciones que se han desarrollado para el sistema de medidas, es decir, en dicho fichero se encuentran las funciones correspondientes al SPLL, a la SDFT y a todos los cálculos necesarios para realizar las medidas según el Std.1459-2000. En la parte central de la interfaz gráfica se encuentra la ventana en donde se muestra el código de la función seleccionada de la ventana “File View”.

En la parte inferior de la interfaz gráfica se encuentran las ventanas para la visualización de las variables del software del sistema de medidas. El “Code Composer Studio”, permite trabajar en “Real Time”, lo que supone que se puedan visualizar los valores de las variables mostradas en las ventanas “Watch 1”, de forma continua consiguiendo de esta forma monitorizar las variables medidas a través del Code Composer Studio. Aunque esta forma de trabajo permite monitorizar todas las variables del sistema de medidas, no cabe la posibilidad de poder almacenar el valor de dichas variables a través del “Code Composer”, para lo cual se ha desarrollado en esta tesis un programa en Visual Basic.Net, correspondiente a un sistema monitor capaz de almacenar en una base de datos (BBDD) y en un fichero plano o de texto así como visualizar las variables de medidas por el sistema de medidas.



Para evitar un número elevado de figuras se han elegido aquellas pestañas más relevantes del sistema monitor.

En la pestaña “Inicio”, de la interfaz gráfica mostrada en la Figura 6.5, se definen los valores de configuración del sistema monitor, es decir, se elige el puerto de comunicaciones que se va a utilizar en el PC, se configura la velocidad de comunicación de dicho puerto y se establece la comunicación inicial con el DSP seleccionando la frecuencia de lectura de los datos a visualizar.

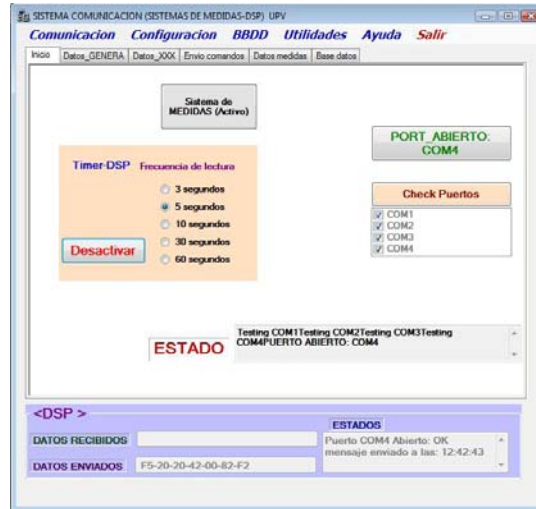


Figura 6.5 Interfaz gráfica del sistema monitor “ ventana inicio”.

Las pestañas “Datos\_GENERA”, “Datos\_XX” se han añadido a la interfaz gráfica, para futuras ampliaciones del sistema monitor y dotar al sistema de medidas de mayores prestaciones.

La pestaña “Envío comandos” permite enviar distintas ordenes al DSP, para la configuración de la comunicación entre el PC y el propio DSP. Además de la comunicación se pueden enviar otra serie de comandos para la ejecución de otras funciones (Estado de las medidas, interrupción de las medidas, etc.).

En la pestaña “Datos medidas” mostrada en la Figura 6.6 se visualizan los valores de las variables medidas por el sistema de medidas.

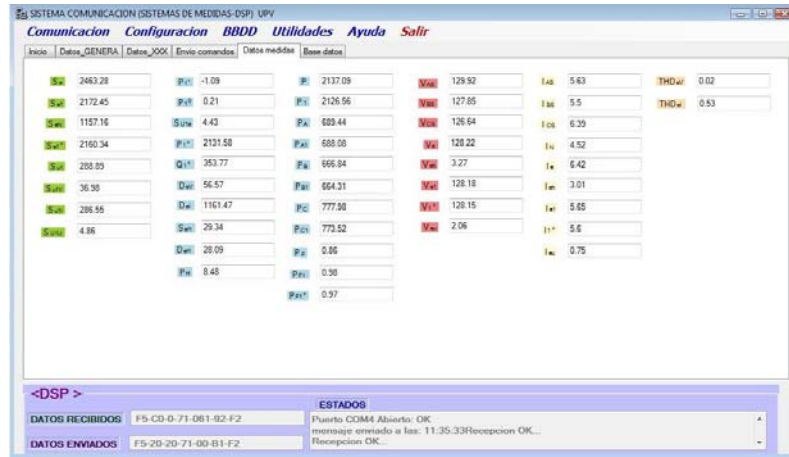


Figura 6.6 Interfaz gráfica del sistema monitor “ ventana visualización de las medidas”.

Las variables visualizadas corresponden con las mostradas en las tablas del capítulo 7, correspondiente a los resultados experimentales. Dichas variables corresponden a los valores de tensiones, corrientes, potencias, factores de potencia, etc, que define el IEEE Std.1459-2000 y que se muestran en la Tabla 6-4.

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>
$V_{As}$	Tensión eficaz de la fase A.
$V_{Bs}$	Tensión eficaz de la fase B.
$V_{Cs}$	Tensión eficaz de la fase C.
$V_e$	Tensión efectiva
$V_{eh}$	Tensión efectiva armónica
$V_{e1}$	Tensión efectiva fundamental
$V_1^+$	Tensión fundamental de secuencia positiva.
$V_{eu}$	Tensión efectiva de desequilibrio.
$I_{As}$	Corriente eficaz de la fase A.
$I_{Bs}$	Corriente eficaz de la fase B.
$I_{Cs}$	Corriente eficaz de la fase C.
$I_N$	Corriente eficaz del neutro.
$I_e$	Corriente efectiva.
$I_{eh}$	Corriente efectiva armónica.
$I_{e1}$	Corriente efectiva armónica fundamental.
$I_{eu}$	Corriente efectiva de desequilibrio.
$I_1^+$	Corriente efectiva fundamental de secuencia positiva.
$S_e$	Potencia aparente efectiva.
$S_{e1}$	Potencia aparente efectiva fundamental.
$S_{eN}$	Potencia aparente efectiva no fundamental.

$S_{e1}^+$	Potencia aparente efectiva fundamental de secuencia positiva
$S_{U1}$	Potencia aparente fundamental de desequilibrio.
$S_{U1V}$	Potencia aparente fundamental de desequilibrio de tensión.
$S_{U1I}$	Potencia aparente fundamental de desequilibrio de corriente.
$S_{U1U}$	Potencia aparente fundamental de desequilibrio.
$S_{U1e}$	Potencia aparente fundamental de desequilibrio residual
$P_1^+$	Potencia activa fundamental de secuencia positiva.
$P_1^-$	Potencia activa fundamental de secuencia negativa.
$P_1^0$	Potencia activa fundamental de secuencia cero.
$Q_1^+$	Potencia reactiva fundamental de secuencia directa.
$D_{eV}$	Potencia de distorsión de tensión.
$D_{eI}$	Potencia de distorsión de corriente.
$S_{eH}$	Potencia aparente efectiva armónica.
$D_{eH}$	Potencia no activa de distorsión
$P_H$	Potencia activa de distorsión.
$THD_{eV}$	Distorsión Armónica Total efectiva de tensión.
$THD_{eI}$	Distorsión Armónica Total efectiva de corriente.
$P$	Potencia activa
$P_1$	Potencia activa fundamental
$P_A$	Potencia activa fase A.
$P_{A1}$	Potencia activa fundamental de la fase A.
$P_B$	Potencia activa fase B.
$P_{B1}$	Potencia activa fundamental de la fase B.
$P_C$	Potencia activa de la fase C.
$P_{C1}$	Potencia activa fundamental de la fase C.
$P_{Fe}$	Factor de potencia efectivo.
$P_{F1}$	Factor de potencia fundamental.
$P_{F1}^+$	Factor de potencia fundamental de secuencia positiva.

Tabla 6-4 Definiciones de las variables mostradas por el sistema monitor.

La pestaña “Base de datos” se muestra en la Figura 6.7. En dicha ventana (columna hora) se observa que cada 5 segundos se registran los valores de todas las variables visualizadas (Tabla 6-4). A cada registro se le asigna un identificador junto con la fecha y hora en la que se ha efectuado dicho registro en la base de datos.

ID	Fecha	Hora	T_eficaz_R	T_eficaz_S	T_eficaz_T	T_eficaz_V	T_eficaz_Am	T_ef
3700	30/09/2009	11:44:15	129.74	127.84	126.06	128.03	3	128.25
3708	30/09/2009	11:44:10	130.02	127.95	127.96	128.29	3.03	128.25
3707	30/09/2009	11:44:05	130.11	128.1	127.96	128.4	3.06	128.36
3706	30/09/2009	11:44:00	130.2	128.02	127.26	128.51	2.99	128.48
3705	30/09/2009	11:43:55	129.85	128.15	127.34	128.41	3.02	128.39
3704	30/09/2009	11:43:50	130.2	128.23	127.27	128.55	3.01	128.52
3703	30/09/2009	11:43:45	130.07	127.88	127.56	128.45	3.08	128.47
3702	30/09/2009	11:43:40	130.02	127.96	127.3	128.41	3.04	128.53
3701	30/09/2009	11:43:35	130.19	128.14	127.49	128.59	3.15	128.49
3700	30/09/2009	11:43:30	129.35	127.23	126.14	127.56	4.57	127.52
3699	30/09/2009	11:43:25	129.39	127.62	126.24	127.74	3.4	127.67
3698	30/09/2009	11:43:20	129.4	127.7	126.38	127.81	3.26	127.77
3697	30/09/2009	11:43:15	129.41	127.81	126.38	127.85	2.77	127.77
3696	30/09/2009	11:40:47	129.89	127.79	127.22	128.42	3	128.38

Figura 6.7 Interfaz gráfica del sistema monitor “ventana de la base de datos de las medidas”.

Mediante un fichero de texto (Fichero.txt), se almacena de forma diaria el valor de todas las variables en formato texto tal y como se muestra en la Figura 6.8 y Figura 6.9.

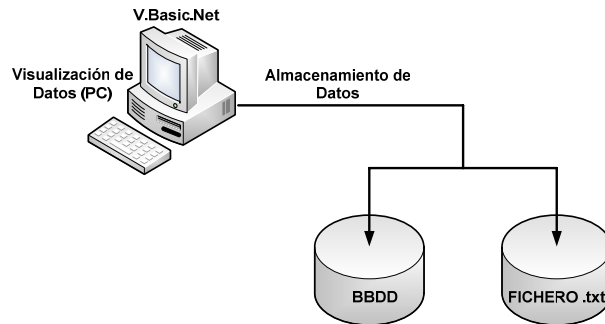


Figura 6.8 Diagrama de bloques del sistema de almacenamiento de datos (BBDD y fichero.txt)

Como se puede observar en la Figura 6.9, los datos son almacenados en un fichero de texto, en el cual se almacenan los valores de todas las variables que mide el sistema de medidas cada 5 segundos. El fichero de texto tiene la ventaja de que se puede exportar a Excel ya que como se puede apreciar los datos están separados por punto y coma. En la parte superior de la interfaz gráfica mostrada en la Figura 6.9, se puede observar cual es el nombre de cada una de las variables que se muestran en el fichero (\*.txt). En dicho fichero se tiene en primer lugar la fecha, a continuación la hora y los registros que hay a continuación (misma fila), que corresponden a los mostrados en la parte superior de la interfaz gráfica, así por ejemplo se observa que en la primera fila se tiene 30/09/2009 a las 11:25:33 el valor de la Vr = 130.66 V, el de la Vs = 128.42, etc.



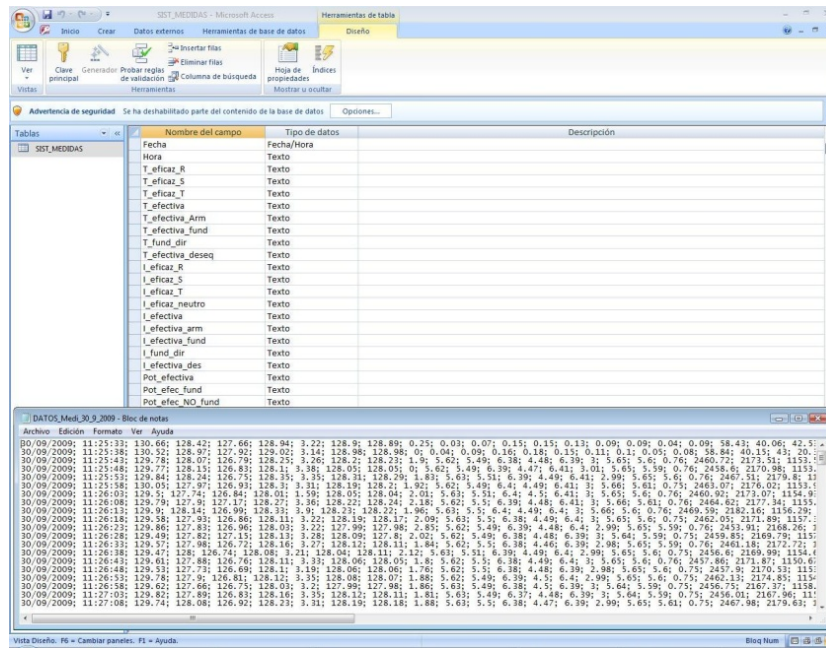


Figura 6.9 Interfaz gráfica del sistema monitor almacenamiento de datos en el fichero de texto

El sistema monitor constituye una herramienta fundamental a la hora de analizar, visualizar y registrar los valores de las magnitudes medidas por el sistema de medidas, permitiendo al usuario tener una visualización gráfica continua de dichos valores.

### 6.5. Conclusiones.

En el presente capítulo se han descrito los elementos hardware y software que integran la plataforma del sistema de medidas.

- Se han analizado las características software del sistema de medidas indicando los algoritmos que se ejecutan dentro del DSP, y se han expuesto las características básicas del propio DSP, para poder ejecutar el software necesario del sistema de medidas.
- Se han descrito los elementos que integran la plataforma hardware del prototipo del sistema de medidas, analizando la función de cada uno de ellos dentro de dicha plataforma.
- Se han analizado las especificaciones técnicas del sistema de medidas teniendo en cuenta las magnitudes que debe medir y el entorno de trabajo en el que se debe desenvolver. Como consecuencia de ello se han elegido los sensores de corriente y tensión de la placa de sensado de la plataforma hardware, y el procesador Digital de Señales (DSP), encargado de realizar

los cálculos necesarios para la obtención de los valores de las magnitudes medidas por el sistema de medidas.

- Se han definido las características más importantes del entorno de programación “Code Composer Studio”, utilizado para programar el DSP y depurar el código del sistema de medidas.
- Se ha descrito el sistema monitor desarrollado en Visual Basic para la visualización y registro a través del PC de todas las variables medidas por el sistema de medidas y la ventaja de utilizar el sistema monitor a la hora de visualizar y registrar los valores de dichas variables.

# Capítulo 7

## 7. Ensayos y resultados experimentales.

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos mediante la implementación en el laboratorio de un prototipo experimental del sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 extendido. La plataforma hardware utilizada para los ensayos se describió en el capítulo 6, su imagen real se muestra en la Figura 7.1.

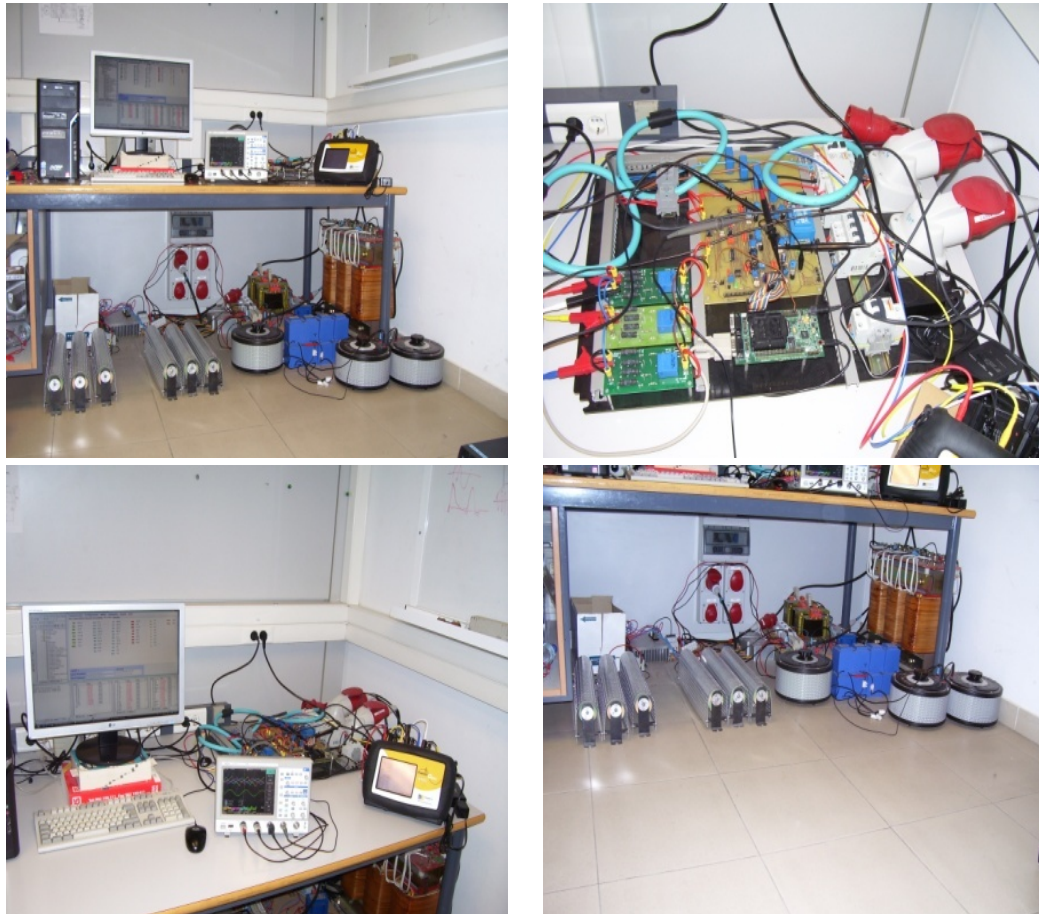


Figura 7.1 Fotografías correspondientes al prototipo del sistema de medidas.

Los ensayos presentados pretenden demostrar el adecuado funcionamiento del sistema de medidas implementado mediante el prototipo experimental. Se presentarán los resultados experimentales correspondientes a los casos de simulación presentados en el capítulo 5 comparándolos además

con los resultados obtenidos mediante un sistema de medidas comercial. Los tipos de carga y tensiones de alimentación se corresponden con los que se han utilizado en el punto 5.3.

Los tipos de carga utilizados para los ensayos han sido los siguientes:

- Carga trifásica lineal desequilibrada.
- Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva.
- Carga trifásica no lineal con desequilibrio y componente inductiva.

Las condiciones de alimentación empleadas han sido las siguientes:

- Tensiones de alimentación trifásicas senoidales y equilibradas.
- Tensiones de alimentación trifásicas senoidales y desequilibradas.

Cabe destacar que, aunque las tensiones de alimentación presentan distorsión, esta es siempre inferior al 3 %, pudiendo considerarse como senoidales.

El capítulo se divide en dos partes diferenciadas por las condiciones de alimentación. En la primera parte se utilizarán tensiones de alimentación senoidales y equilibradas mientras que, en la segunda parte, las tensiones de alimentación presentarán desequilibrio. Cada parte se dividirá en tres subapartados definidos por los tres tipos de carga y, para cada carga, se realizarán las medidas que determinen todos los parámetros definidos del IEEE Std.1459-2000 junto con los parámetros propuestos en esta tesis. Junto con el equipo de medidas desarrollado se utiliza un sistema de medidas comercial (Power Guia 440s de la casa comercial DRANEZT-BMI), para comparar los valores medidos por el sistema de medidas desarrollado y basado en el IEEE Std.1459-2000 con los valores medidos por el equipo comercial y basado en el IEEE Std.100, para cada uno de los casos analizados.

Las formas de onda de las corrientes y tensiones presentadas han sido obtenidas utilizando un osciloscopio LeCroy WaveJet 324. Para la correcta interpretación de las capturas del osciloscopio se debe tener en cuenta que las sondas de corriente ofrecen un ratio de conversión de 100mV/A. Las sondas de tensión atenúan x10, siendo las escalas reales de 50 V/div.

Los diagramas fasoriales han sido obtenidos mediante el Power-Guia 440s. Estos diagramas incluyen las magnitudes fundamentales más significativas para cada fase. El número que acompaña a cada magnitud medida indica la fase a la que se refiere dicha magnitud. Un 1 indica fase *A*, un 2 fase *B* y un 3 hace referencia a la fase *C*. El número 1 entre paréntesis indica que la medida corresponde a la componente fundamental de la magnitud.

Las magnitudes que aparecen en estos diagramas son las siguientes:

- $U$ . Tensión eficaz.
- $I$ . Corriente eficaz.
- $P$ . Potencia activa.
- $S$ . Potencia aparente.
- $Q$ . Potencia reactiva.
- $\lambda$ . Factor de potencia.
- $\phi$ . Desfase entre la tensión y la corriente.

Los datos obtenidos se han agrupado en tablas igual que se agruparon en el capítulo 5 para los resultados de simulación. Estas tablas incluyen las medidas de los valores eficaces de las tensiones en el pcc y de las corrientes de línea, así como las tasas de distorsión armónica total de tensiones y corrientes. Se incluyen también al igual que en el capítulo 5 la tabla correspondiente a la descomposición en los términos de la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ) que han sido propuestos en esta tesis y que se han implementado en el sistema de medidas. Por último se añaden las tablas correspondientes al equipo de medidas Power Guía 440s para cada uno de los casos analizados y que permiten contrastar las medidas realizadas por el sistema de medidas y un equipo comercial en aquellos términos que se puedan comparar.

### **7.1. Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas.**

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos cuando el sistema de tensiones de alimentación es senoidal y equilibrado. El equipo se conecta a la red de distribución trifásica de 4 hilos (220 V, 50 Hz) a través de un transformador de 20 kVA configurable. Este transformador proporciona secundarios trifásicos de 48 V, 80 V y 125 V. Para las pruebas realizadas bajo tensiones de alimentación equilibradas se han utilizado los tres secundarios de 125 V. El sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, utilizado para los casos ensayados se muestra en la Figura 7.2.

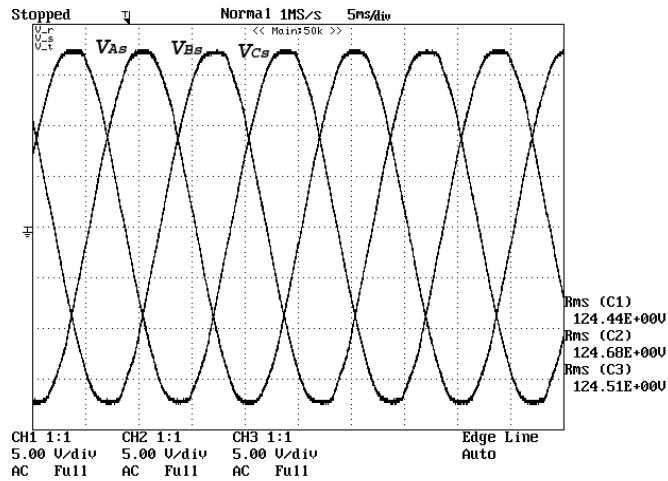


Figura 7.2 Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas en el pcc.

La Tabla 7-1 presenta un resumen de los valores más representativos de las tensiones en el pcc.

	$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$
<i>Tensión</i>	124.41 V	124.64 V	124.52 V
<i>Frecuencia</i>	50 Hz	50 Hz	50 Hz
<i>THD</i>	1.15 %	1.15 %	1.15 %

Tabla 7-1 Valores significativos de las tensiones en el pcc.

Como se puede apreciar a partir de los datos de la Tabla 7-1, las tensiones de alimentación presentan una pequeña distorsión pudiendo considerarse senoidales.

Con los datos medidos por el sistema de medidas propuesto y a partir de los valores de las tensiones y corrientes medidas en el pcc se ha realizado un análisis sobre el error relativo en la medida cometido por el sistema de medidas para cada una de las cargas analizadas, obteniéndose un error relativo medio en la medida de  $\pm 0.5\%$ . Para llevar a cabo dicho análisis se han tomado los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc y a través del software de cálculo matemático Mathcad se han realizado los cálculos necesarios, para obtener todos los términos medidos por el sistema de medidas de forma teórica (aplicando las ecuaciones definidas en el IEEE Std.1459-2000 en Mathcad). Con los valores teóricos calculados en Mathcad, se han comparado con los valores medidos de forma real por el sistema de medidas para los tres tipos de cargas analizadas, obteniendo de esta forma el error relativo en la medida. Con el error relativo en cada una de las medidas se ha calculado la media de todos los errores obteniendo el valor de  $\pm 0.5\%$  correspondiente al error relativo medio de todas las medidas.

Para el cálculo del error relativo en la medida se ha utilizado la expresión que se muestra a continuación.

$$\varepsilon_r = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor teórico}}{\text{Valor teórico}} \times 100$$

El error relativo del equipo comercial Power Guia 440S se puede ver en el Anexo I y corresponde al  $\pm 0.05\%$  de error de medida y a  $\pm 0.025\%$  de fondo de escala.

### 7.1.1. Carga trifásica lineal desequilibrada.

En primer lugar se presentan los resultados experimentales para el caso en el que la carga es una carga lineal desequilibrada, que corresponden a los resultados de simulación llevados a cabo en el apartado 5.3.2.1. La carga trifásica lineal desequilibrada se presenta fundamentalmente para comprobar de forma experimental la medida del fenómeno de desequilibrio de carga de forma independiente y sin otras ineficiencias que enmascaren el resultado. Al ser un sistema trifásico a cuatro hilos las cargas se conectarán en estrella con conexión del conductor de neutro. En este caso la carga se compone de una resistencia en la fase *A* mientras que se deja en circuito abierto las otras dos fases. Esta combinación representa un caso de desequilibrio extremo debido a la no existencia de corriente en dos de las fases.

Los valores de la carga son los siguientes:

$R_A$	$R_B$	$R_C$
$22.5 \Omega$	$\infty \Omega$	$\infty \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, como las mostradas en la Figura 7.2, las corrientes a través de la carga lineal desequilibrada se muestran en la Figura 7.3. En las figuras correspondientes a las corrientes de carga se ha añadido en la parte inferior la tensión de la fase A, ya que se utiliza como referencia de sincronización en el osciloscopio y de esta forma se puede apreciar el desfase entre corriente y tensión en las cargas que presenten este fenómeno.

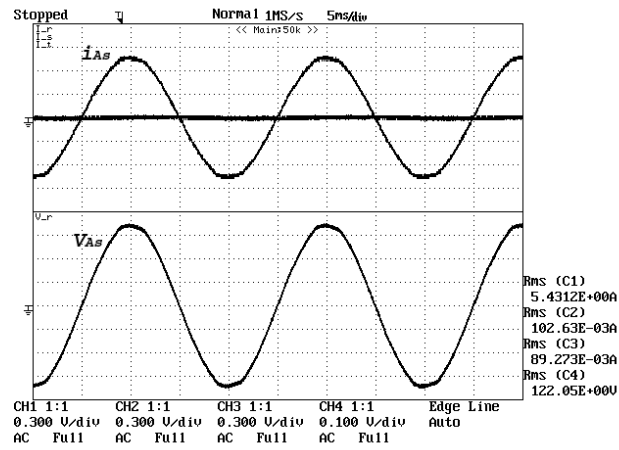


Figura 7.3 Corrientes de carga, fases A, B y C en la parte superior. Tensión de la fase A, en la parte inferior.

La Figura 7.4 muestra un diagrama fasorial donde se representan las tensiones de alimentación y las corrientes de carga junto con sus magnitudes más importantes. En algunas de estas figuras, cuando el fasor de corrientes coincide con el de tensión, no es posible apreciar con claridad las amplitudes de los mismos, sin embargo por la información que aportan en cuanto al desfase y a las magnitudes más importantes de las señales, se han incluido igualmente. En la Tabla 7-2 se muestran los valores eficaces de las tensiones y corrientes de carga junto con sus componentes fundamentales y sus factores de distorsión armónica.

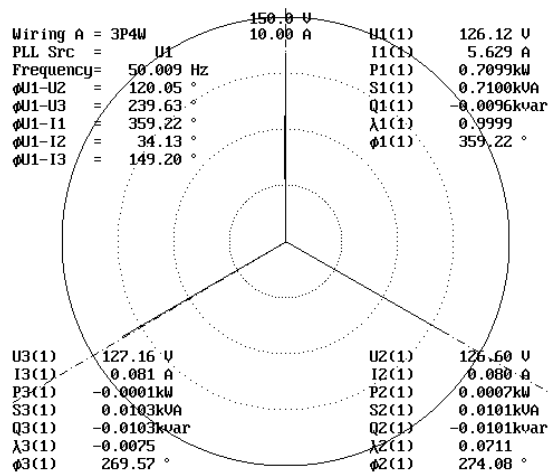


Figura 7.4 Diagrama fasorial de las corrientes y tensiones con sus valores más representativos.



$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$I_{As}$	$I_{Bs}$	$I_{Cs}$	$I_{Ns}$
124.42 V	124.67 V	124.54 V	5.43 A	0.10 A	0.09 A	5.41 A
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$I_{As1}$	$I_{Bs1}$	$I_{Cs1}$	$I_{Ns1}$
124.40 V	124.64 V	124.51 V	5.43 A	0.05 A	0.07 A	5.41 A
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{I_{As1}}$	$\phi_{I_{Bs1}}$	$\phi_{I_{Cs1}}$	
0.37 °	-119.94 °	-240.11 °	0.28 °	-398.24 °	-149.21 °	
$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$	$THD_{I_{As}}$	$THD_{I_{Bs}}$	$THD_{I_{Cs}}$	
1.05 %	1.66 %	1.62 %	1.09 %	-	-	

Tabla 7-2 Resumen de tensiones y corrientes de carga.

Las magnitudes correspondientes a las tensiones en el pcc se consideran constantes durante los ensayos con tensiones equilibradas, siendo sus valores los que se han reflejado en la Tabla 7-2. La Tabla 7-3 presenta las principales magnitudes medidas en formato IEEE Std. 1459 junto con las componentes simétricas fundamentales de tensiones y corrientes.

$V_e = 124.54$ V			$I_e = 4.43$ A		
$V_{e1} = 124.53$ V	$V_{eh} = 1.88$ V		$I_{e1} = 4.43$ A	$I_{eh} = 0.12$ A	
$V_1^+ = 124.52$ V	$V_1^- = 0.36$ V	$V_1^0 = 0.26$ V	$I_1^+ = 1.81$ A	$I_1^- = 1.82$ A	$I_1^0 = 1.80$ A
$\phi_{V_1^+} = 0.11$ °	$\phi_{V_1^-} = 117.09$ °	$\phi_{V_1^0} = 79.85$ °	$\phi_{I_1^+} = 1.58$ °	$\phi_{I_1^-} = -0.29$ °	$\phi_{I_1^0} = -0.45$ °
$S_e = 1654.92$ va					
$S_{e1} = 1654.09$ va			$S_{eN} = 52.49$ va		
$S_1^+ = 677.68$ va		$S_{U1} = 1508.90$ va	$D_{eV} = 25.04$ va	$D_{eI} = 46.14$ va	
$P_1^+ = 677.38$ W	$Q_1^+ = -21.15$ var		$THD_{eV} = 1.03$ %		$THD_{eI} = 2.01$ %
$P = 676.80$ W		$P_1 = 676.73$ W		$P_H = 0.07$ W	
$P_A = 676.09$ W	$P_B = 0.90$ W		$P_C = -0.19$ W		$P_{Fe} = 0.41$
$P_{A1} = 676.04$ W	$P_{B1} = 0.89$ W		$P_{C1} = -0.19$ W		$P_{F1} = 0.41$
$P_1^+ = 677.38$ W	$P_1^- = -0.89$ W		$P_1^0 = 0.24$ W		$P_{F1}^+ = 0.9995$
$F_e = 0.409$					

Tabla 7-3 Potencias de carga en formato IEEE Std. 1459

La Tabla 7-4 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{U1V} = 5.44$ VA	$S_{U1I} = 1508.84$ VA	$S_{U1U} = 4.96$ VA	$S_{U1e} = 4.91$ VA
$TU_V = 0.3$ %		$TU_I = 91.22$ %	

Tabla 7-4 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 7-5, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std.100 medidos por el sistema de medidas comercial a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 676.07\text{ W}$	$Q_{IA} = 0.04\text{ var}$	$S_A = 676.07\text{ va}$	$TPF_A = 1$
$P_B = -0.01\text{ W}$	$Q_{IB} = 0.08\text{ var}$	$S_B = 0.07\text{ va}$	$TPF_B = 0.99$
$P_C = 0.06\text{ W}$	$Q_{IC} = -0.01\text{ var}$	$S_C = 0.06\text{ va}$	$TPF_C = 0.99$
$P_{TOT} = 676.12\text{ W}$	$Q_{ITOT} = 0.11\text{ var}$	$S_{TOT} = 676.22\text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.99$

Tabla 7-5 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas con el equipo comercial Power Guía 440s

Analizando la Tabla 7-3 y la Tabla 7-5, se observa que existe una ligera discrepancia entre la potencia activa fundamental de secuencia directa ( $P_1^+$ ) medida por el equipo de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 y la potencia activa total ( $P_{TOT}$ ) medida por el equipo de medidas comercial Power-Guía 440s basado en el IEEE Std.100, pero en este caso dicha discrepancia es debida al error en la medida cometido por ambos equipos, a la pequeña distorsión armónica de las tensiones y al pequeño desequilibrio de dichas tensiones, ya que de forma teórica (apartado 5.3.2.1) si no existe distorsión armónica ni desequilibrio los valores deben coincidir.

Los valores negativos de potencias activas mostrados en la Tabla 7-5, se justifican debido a los errores cometidos en los cálculos realizados por el equipo de medidas comercial cuando las magnitudes de entrada (corrientes y tensiones), presentan un valor próximo a cero ( $R_B = \infty$ ), ( $R_C = \infty$ ). Por otro lado debido al pequeño desequilibrio en tensión el sistema de medidas cuantifica los términos de potencia activa de secuencia negativa ( $P_1^-$ ) y cero ( $P_1^0$ ).

Al ser la carga puramente resistiva los valores de las potencias reactivas medidas por cada uno de los equipos ( $Q_1^+$ ) y ( $Q_{ITOT}$ ), deberían ser nulos, pero presentan un valor negativo en el primer caso (Tabla 7-3) y un valor muy pequeño en el segundo caso (Tabla 7-5), donde ambos se justifican por los valores tan pequeño de las magnitudes de entrada y los errores de precisión que se comenten en los cálculos.

La potencia aparente cuantificada por el sistema de medidas comercial ( $S_{TOT}$ ), debería coincidir con el de la potencia aparente fundamental y de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) de forma teórica, pero debido a la pequeña distorsión en las tensiones de red, los desequilibrios y los errores en la medida cometidos por los dos equipos no coincide.

El error cometido por el equipo de medidas comercial a la hora de medir el factor de potencia total ( $TPF_{TOT}$ ) se debe a los errores cometidos a la hora de cuantificar la potencia activa y potencia aparente del sistema, ya que de forma teórica debería ser la unidad al tener una carga completamente resistiva.

Analizando la Tabla 7-4 se observa que los valores de  $S_{UV}$  y  $S_{UI}$  determinan que la potencia de desequilibrio está provocada mayoritariamente por el desequilibrio en corriente y que en este caso

el término  $S_{UV}$  está indicando que las tensiones presentan un ligero desequilibrio. De igual forma los términos  $TU_V$  y  $TU_I$  están valorando que, no todo el desequilibrio está provocado por la carga, si no que las tensiones de alimentación provocan una potencia de desequilibrio que no debe ser atribuida al usuario.

**7.1.2. Carga lineal desequilibrada con componente inductiva.**

En segundo lugar se presentan los resultados experimentales para el caso en el que la carga es una carga lineal desequilibrada con componente inductiva, que se corresponde con caso simulado en el apartado 5.3.2.2. Esta carga va a permitir realizar las medidas de los fenómenos de desequilibrio y desfase. En este caso la carga en las fases  $A$  y  $B$  es una impedancia con parte resistiva y parte inductiva, mientras que la fase  $C$  se deja en circuito abierto. Los valores de la carga son los siguientes:

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 22.5 \Omega$	$R_B = 38.2 \Omega$	$\infty \Omega$
$L_A = 21 \text{ mH}$	$L_B = 12 \text{ mH}$	

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, como las mostradas en la Figura 7.2, las corrientes a través de la carga se muestran en la Figura 7.5. El diagrama fasorial correspondiente a estas corrientes se muestra en la Figura 7.6.

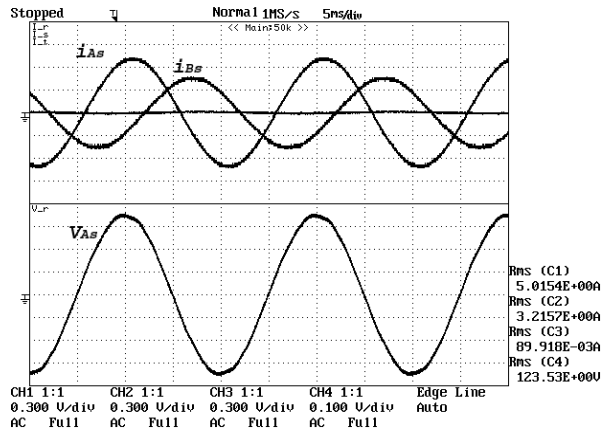


Figura 7.5 Corrientes de carga, fases A, B y C en la parte superior. Tensión de la fase A, en la parte inferior.

En la Tabla 7-6 se muestra los valores eficaces de las tensiones y corrientes de carga junto con sus componentes fundamentales y sus factores de distorsión armónica.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$I_{As}$	$I_{Bs}$	$I_{Cs}$	$I_{Ns}$
124.42 V	124.67 V	124.54 V	5.13 A	3.25 A	0.08 A	4.81 A
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$I_{As1}$	$I_{Bs1}$	$I_{Cs1}$	$I_{Ns1}$
124.40 V	124.64 V	124.51 V	5.01 A	3.21 A	0.08 A	4.80 A
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{I_{As1}}$	$\phi_{I_{Bs1}}$	$\phi_{I_{Cs1}}$	
0.37 °	-119.94 °	-240.11 °	-14.86 °	-127.37 °	-	
$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$	$THD_{I_{As}}$	$THD_{I_{Bs}}$	$THD_{I_{Cs}}$	
1.05 %	1.55 %	1.62 %	0.58 %	1.48 %	-	

Tabla 7-6 Resumen de tensiones y corrientes de carga.

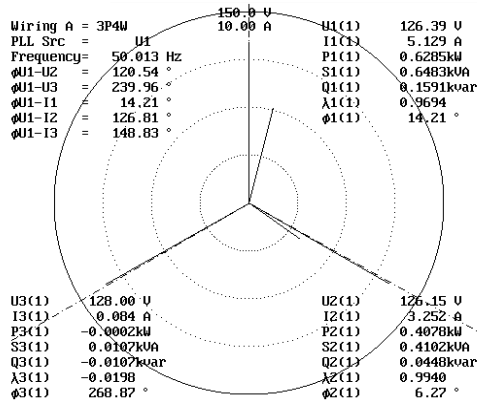


Figura 7.6 Diagrama fasorial de las corrientes y tensiones de carga.

La Tabla 7-7 presenta las principales magnitudes medidas en formato IEEE Std. 1459 junto con las componentes simétricas fundamentales de tensiones y corrientes.

$V_e = 124.53$ V			$I_e = 4.41$ A		
$V_{e1} = 124.52$ V	$V_{e1} = 1.67$ V		$I_{e1} = 4.41$ A	$I_{e1} = 0.02$ A	
$V_1^+ = 124.52$ V	$V_1^- = 0.36$ V	$V_1^0 = 0.26$ V	$I_1^+ = 2.73$ A	$I_1^- = 1.34$ A	$I_1^0 = 1.60$ A
$\phi_{V_1^+} = 0.11$ °	$\phi_{V_1^-} = 117.09$ °	$\phi_{V_1^0} = 79.85$ °	$\phi_{I_1^+} = -11.41$ °	$\phi_{I_1^-} = 24.38$ °	$\phi_{I_1^0} = -53.58$ °
$S_e = 1649.73$ va					
$S_{e1} = 1649.50$ va			$S_{eN} = 27.27$ va		
$S_1^+ = 1020.21$ va		$S_{U1} = 1296.20$ va		$D_{eV} = 22.14$ va	$D_{eI} = 15.93$ va
$P_1^+ = 1000.80$ W	$Q_1^+ = 198.27$ var			$THD_{eV} = 1.34$ %	$THD_{eI} = 1.00$ %
$P = 999.94$ W		$P_1 = 999.90$ W		$P_H = 0.04$ W	
$P_A = 602.49$ W	$P_B = 397.49$ W	$P_C = -0.08$ W		$P_{Fe} = 0.606$	
$P_{A1} = 602.49$ W	$P_{B1} = 397.45$ W	$P_{C1} = -0.08$ W		$P_{F1} = 0.606$	
$P_1^+ = 1000.80$ W	$P_1^- = -0.05$ W	$P_1^0 = -0.85$ W		$P_{F1}^+ = 0.98$	
$F_e = 0.606$					

Tabla 7-7 Potencias demandadas por la carga en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 7-8 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{U1V} = 5.42 \text{ VA}$	$S_{U1I} = 1296.47 \text{ VA}$	$S_{U1U} = 4.26 \text{ VA}$	$S_{U1e} = 4.15 \text{ VA}$
$TU_V = 0.32 \%$		$TU_I = 78.58 \%$	

Tabla 7-8 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposición de  $S_{U1}$

La Tabla 7-9, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std.100 medidos por el sistema de medidas comercial a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 602.60 \text{ W}$	$Q_{1A} = 158.27 \text{ var}$	$S_A = 623.03 \text{ va}$	$TPF_A = 0.96$
$P_B = 397.87 \text{ W}$	$Q_{1B} = 39.92 \text{ var}$	$S_B = 399.86 \text{ va}$	$TPF_B = 0.99$
$P_C = -0.08 \text{ W}$	$Q_{1C} = 0.09 \text{ var}$	$S_C = 0.01 \text{ va}$	$TPF_C = 0.05$
$P_{TOT} = 1000.39 \text{ W}$	$Q_{1TOT} = 198.38 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1022.9 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.97$

Tabla 7-9 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas con el equipo comercial Power Guia 440s

Analizando la Tabla 7-7 y la Tabla 7-9, se observa una ligera discrepancia en la potencia activa de secuencia directa ( $P_1^+$ ) y la potencia activa total ( $P_{TOT}$ ) medida por cada equipo, que en este caso se justifica por los errores de medidas de ambos equipos a la pequeña distorsión armónica y al pequeño desequilibrio de las tensiones de red, ya que de forma teórica no debe haber discrepancias en este término tal y como se puede ver en el apartado 5.3.2.2. El equipo de medidas basado en el IEEE Std.1459 identifica los valores de las potencias activas de secuencia positiva ( $P_1^+$ ), secuencia negativa ( $P_1^-$ ) y secuencia cero ( $P_1^0$ ) debido al pequeño desequilibrio que se tiene en las tensiones.

Teniendo en cuenta que ( $Q_{1TOT}$ ) incluye ( $Q_1^-$ ) y ( $Q_1^0$ ), y como en este caso ambos valores de potencia deberían ser nulos (pequeño desequilibrio en las tensiones), los valores de  $Q_{1TOT}$  y  $Q_1^+$  deberían coincidir, no haciéndolo en este caso debido a los errores en la medida cometidos por ambos equipos, al pequeño desequilibrio y a la pequeña distorsión armónica de las tensiones.

La potencia aparente medida por el equipo de medidas comercial ( $S_{TOT}$ ), debería coincidir con la potencia aparente fundamental de secuencia directa ( $S_1^+$ ), medida por el sistema de medidas desarrollado tal y como se puede observar en el 5.3.2.2 de la simulación teórica de este caso, pero debido a los errores cometidos en la medida, a la ligera distorsión armónica de las tensiones y al pequeño desequilibrio en dichas tensiones, estos valores presentan una ligera discrepancia tal y como se observa en la Tabla 7-7 y la Tabla 7-9.

El factor de potencia total ( $TPF_{TOT}$ ), medido por el equipo de medidas comercial presenta un valor inferior al medido por el sistema de medidas ( $P_{F1}^+$ ) aunque de forma teórica deberían de coincidir al tener un sistema equilibrado en tensiones y sin armónicos. Sin embargo las tensiones reales presentan una ligera distorsión y un pequeño desequilibrio que junto con los errores en la medida provocan la discrepancia en dichos términos.

Por último analizando la Tabla 7-8, se observa que al igual que en el caso anterior la mayor parte de la potencia de desequilibrio ( $S_{UI}$ ) está determinada por el desequilibrio en la carga, donde al ser el desequilibrio en tensiones tan pequeño el valor del término ( $S_{UIV}$ ), asociado a dicha potencia es mucho menor que el que cuantifica la potencia debida al desequilibrio de las corrientes de la carga ( $S_{UII}$ ). Los dos desequilibrios definidos anteriormente se reflejan en los valores de  $TU_V$  y  $TU_I$  los cuales indican que la mayor parte del desequilibrio es provocado por el usuario.

### 7.1.3. Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.

En último lugar se presentan los resultados experimentales para el caso en el que la carga es una carga no lineal desequilibrada y con cierto grado de desfase, donde este caso se corresponde con el caso simulado del apartado 5.3.3. Este tipo de carga permite realizar las medidas de los fenómenos de desequilibrio, desfase y distorsión armónica. En este caso la carga estará formada por una combinación de cargas lineales y no lineales. La parte no lineal está formada por tres rectificadores monofásicos no controlados, uno por fase, con un filtro LC y carga resistiva. Los valores de los componentes de la carga son los siguientes:

Parte lineal			Parte no lineal		
$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$	$3 \times \text{Rectificador} + \text{Filtro}$		
$R_A = 32.5 \Omega$	$R_B = 56.5 \Omega$	$R_C = 100 \Omega$	$C_r = 2200 \mu F$	$L_r = 5.4 \text{ mH}$	$R_r = 100 \Omega$
$L_A = 21 \text{ mH}$	$L_B = 12 \text{ mH}$				

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y equilibradas, como las mostradas en la Figura 7.2, las corrientes a través de la carga se muestran en la Figura 7.7

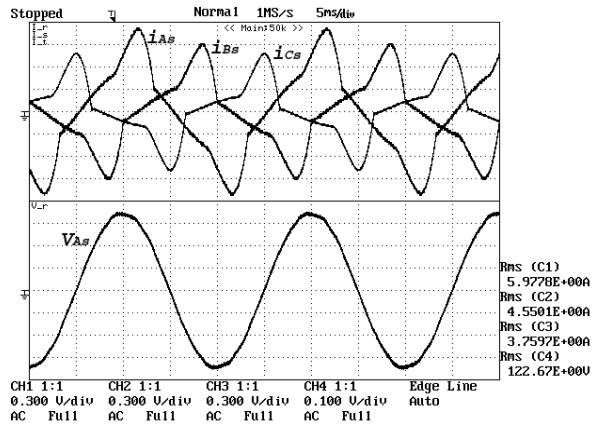


Figura 7.7 Corrientes de carga, fases A, B y C en la parte superior. Tensión de la fase A, en la parte inferior.

La Tabla 7-10 se muestran los valores más representativos de las tensiones y corrientes de carga.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$I_{As}$	$I_{Bs}$	$I_{Cs}$	$I_{Ns}$
124.42 V	124.67 V	124.54 V	5.97 A	4.54 A	3.76 A	5.07 A
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$I_{As1}$	$I_{Bs1}$	$I_{Cs1}$	$I_{Ns1}$
124.40 V	124.64 V	124.51 V	5.73 A	4.21 A	3.32 A	2.12 A
$\phi_{VAs1}$	$\phi_{VBs1}$	$\phi_{VCs1}$	$\phi_{IAs1}$	$\phi_{IBs1}$	$\phi_{ICs1}$	
0.37 °	-119.94 °	-240.11 °	-13.90 °	-132.79 °	-251.70 °	
$THD_{VAs}$	$THD_{VBs}$	$THD_{VCs}$	$THD_{IAs}$	$THD_{IBs}$	$THD_{ICs}$	
1.19 %	1.65 %	1.44 %	29.06 %	40.84 %	52.99 %	

Tabla 7-10 Resumen de tensiones y corrientes de carga.

El diagrama fasorial correspondiente a las corrientes y tensiones de carga se muestra en la Figura 7.8.

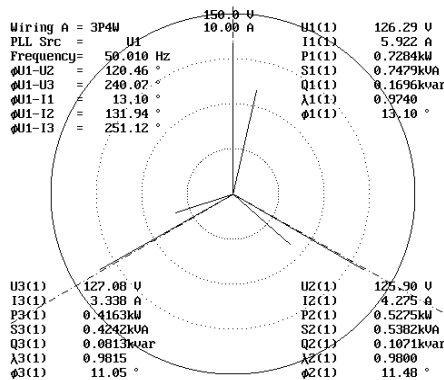


Figura 7.8 Diagrama fasorial de las corrientes y tensiones con demandas por la carga al generador.

La Tabla 7-11 presenta las principales magnitudes en formato IEEE Std. 1459 junto con las componentes simétricas fundamentales de tensiones y corrientes.

$V_e = 124.54 \text{ V}$			$I_e = 5.66 \text{ A}$		
$V_{e1} = 124.52 \text{ V}$		$V_{eh} = 1.67 \text{ V}$	$I_{e1} = 4.69 \text{ A}$		$I_{eh} = 3.17 \text{ A}$
$V_1^+ = 124.52 \text{ V}$	$V_1^- = 0.37 \text{ V}$	$V_1^0 = 0.71 \text{ V}$	$I_1^+ = 4.42 \text{ A}$	$I_1^- = 0.71 \text{ A}$	$I_1^0 = 0.71 \text{ A}$
$\phi_{1+} = 0.10^\circ$	$\phi_{1-} = 117.09^\circ$	$\phi_{10} = 1.39^\circ$	$\phi_{1+} = -13.00^\circ$	$\phi_{1-} = 4.39^\circ$	$\phi_{10} = -38.22^\circ$
$S_e = 2116.82 \text{ va}$					
$S_{e1} = 1754.08 \text{ va}$			$S_{eN} = 1184.96 \text{ va}$		
$S_1^+ = 1651.27 \text{ va}$		$S_{U1} = 591.67 \text{ va}$		$D_{eV} = 23.55 \text{ va}$	$D_{eI} = 1184.62 \text{ va}$
$P_1^+ = 1610.01 \text{ W}$	$Q_1^+ = 366.29 \text{ var}$			$THD_{eV} = 1.34 \%$	$THD_{eI} = 67.53 \%$
$P = 1615.55 \text{ W}$		$P_1 = 1609.46 \text{ W}$		$P_H = 6.09 \text{ W}$	
$P_A = 693.80 \text{ W}$	$P_B = 514.19 \text{ W}$	$P_C = 407.55 \text{ W}$		$P_{Fe} = 0.763$	
$P_{A1} = 692.55 \text{ W}$	$P_{B1} = 511.75 \text{ W}$	$P_{C1} = 405.16 \text{ W}$		$P_{F1} = 0.918$	
$P_1^+ = 1610.01 \text{ W}$	$P_1^- = -0.29 \text{ W}$		$P_1^0 = -0.25 \text{ W}$		$P_{F1}^+ = 0.975$
$F_e = 0.760$					

Tabla 7-11 Potencias demandadas por la carga en formato IEEE Std. 1459.

Como se aprecia en la Tabla 7-11, la carga incluye ahora todos los términos de potencia no eficientes. La potencia no eficiente de mayor peso en la carga es, en este caso, la potencia de distorsión efectiva de corriente.

La Tabla 7-12 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{UV} = 5.77 \text{ VA}$	$S_{UL} = 591.53 \text{ VA}$	$S_{ULU} = 1.94 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 1.86 \text{ VA}$
$TU_V = 0.32 \%$		$TU_I = 33.27 \%$	

Tabla 7-12 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 7-13, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std.100 medidos por el sistema de medidas comercial a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 693.00 \text{ W}$	$Q_{IA} = 154.60 \text{ var}$	$S_A = 710.03 \text{ va}$	$TPF_A = 0.97$
$P_B = 514.10 \text{ W}$	$Q_{IB} = 109.40 \text{ var}$	$S_B = 525.61 \text{ va}$	$TPF_B = 0.97$
$P_C = 406.99 \text{ W}$	$Q_{IC} = 102.90 \text{ var}$	$S_C = 419.79 \text{ va}$	$TPF_C = 0.96$
$P_{TOT} = 1614.09 \text{ W}$	$Q_{ITOT} = 366.90 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1655.43 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.97$

Tabla 7-13 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas con el equipo comercial Power Guia 440s

Comparando la Tabla 7-11 y la Tabla 7-13, se observa que la potencia activa total medida por el sistema de medidas comercial ( $P_{TOT}$ ), presenta un valor ligeramente mayor que el valor de la



potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) medida por el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459. Si se tiene un sistema de tensiones equilibrado y sin distorsión armónica en las tensiones, dichos valores de forma teórica deben coincidir tal y como se muestra en el apartado 5.3.3, sin embargo debido al error en la medida cometido por ambos equipos, a la pequeña distorsión armónica de las tensiones de red y al pequeño desequilibrio de dichas tensiones estos términos presentan una ligera discrepancia.

Al igual que en el caso teórico del apartado 5.3.3 los valores de la potencia reactiva fundamental de secuencia directa ( $Q_1^+$ ) y la potencia reactiva total ( $Q_{1TOT}$ ) que mide el equipo de medidas comercial deben de coincidir, pero por las mismas causas comentadas en el párrafo anterior presentan una ligera discrepancia.

En la Tabla 7-13 se observa que el valor de la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ) medida con el equipo de medidas comercial es superior a la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ) en formato IEEE Std.1459 de la Tabla 7-11, ya que al tener en este caso una pequeña distorsión de tensión y distorsión en la corriente, el equipo de medidas comercial incluye toda la distorsión en la medida de la potencia aparente y el sistema de medidas desarrollado elimina toda la distorsión armónica para la cuantificación de la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ )

El valor del factor de potencia medido por cada uno de los sistemas presenta una diferencia, debido a que el sistema de medidas comercial ( $TPF_{TOT}$ ) no elimina la distorsión armónica de la potencia aparente a la hora de realizar dicho cálculo, lo cual provoca una discrepancia con el factor de potencia medido por el sistema de medidas basado en el IEEE Std. 1459-2000 donde a la hora de cuantificar el factor de potencia ( $P_{F1}^+$ ) tiene en cuenta la distorsión armónica.

En la Tabla 7-12, se puede ver que la mayor parte de la potencia de desequilibrio ( $S_{UVI}$ ) corresponde a la potencia de desequilibrio en corriente ( $S_{UVI}$ ), donde el valor de la potencia de desequilibrio en tensión ( $S_{UVV}$ ), presenta un valor bajo acorde con el desequilibrio en las tres tensiones.

Observando los valores de ( $TU_V$ ) y ( $TU_I$ ), se puede ver como el desequilibrio en tensión se mantiene en el mismo porcentaje que el caso anterior y en el caso del desequilibrio en corriente ha disminuido respecto al caso anterior ya que en este caso se tiene corriente en las tres fases, aunque dichas corrientes presentes unos valores de distorsión armónica elevados. Por último comentar que el factor de eficiencia ha mejorado con respecto al caso anterior ya que el sistema presenta menos desequilibrio que el caso anterior.

## **7.2. Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas.**

En esta segunda parte se presentan los resultados obtenidos cuando el sistema de tensiones de alimentación es desequilibrado, los cuales se corresponden con los casos simulados del apartado 5.3.4. Para lograr el desequilibrio de tensiones en el pcc, se ha configurado el transformador

trifásico de forma que dos de sus secundarios de 125 V se han conectado a las fases *A* y *B*, mientras la fase *C* se ha conectado al devanado secundario de 80 V. El sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, utilizado para los casos ensayados se muestra en la Figura 7.9.

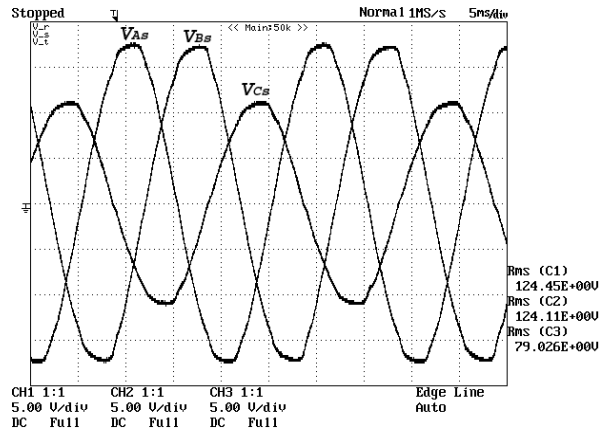


Figura 7.9 Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas en el pcc.

La Tabla 7-14 presenta un resumen de los valores más representativos de las tensiones en el punto de conexión.

	$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$
<i>Tensión</i>	125.27 V	124.63 V	80.00 A
<i>Frecuencia</i>	50 Hz	50 Hz	50 Hz
<i>THD</i>	1.72 %	2.81 %	2.58 %

Tabla 7-14 Valores significativos de las tensiones en el pcc.

A continuación se presenta cada tipo de carga bajo estas condiciones de alimentación y los resultados obtenidos. Estos casos coinciden con los casos presentados en el capítulo 5 de resultados de simulación.

Al igual que en el apartado 7.1 con los datos medidos por el sistema de medidas propuesto y a partir de los valores de las tensiones y corrientes medidas en el pcc se ha realizado un análisis sobre el error relativo en la medida cometido por el sistema de medidas propuesto, para cada una de las cargas analizadas, obteniéndose un error relativo medio de 1.07%, para los tres tipos de cargas analizados.

### 7.2.1. Carga trifásica lineal desequilibrada.

En primer lugar se presentan los resultados experimentales para el caso en el que la carga es una carga lineal desequilibrada, los cuales se corresponden con los simulados en el apartado 5.3.5.1.

En este caso la carga se compone de una resistencia en la fase *A* mientras que se dejan en circuito abierto las otras dos fases. Los valores de la carga son los siguientes:

$R_A$	$R_B$	$R_C$
$17.5 \Omega$	$\infty \Omega$	$\infty \Omega$

Esta combinación representa un caso de desequilibrio extremo debido a la no existencia de corriente en dos de las fases. Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, como las mostradas en la Figura 7.9, las corrientes que demanda la carga lineal desequilibrada al generador se muestran en la Figura 7.10 (sondas de corriente 10 mV/A). El diagrama fasorial correspondiente a estas corrientes se muestra en la Figura 7.11.

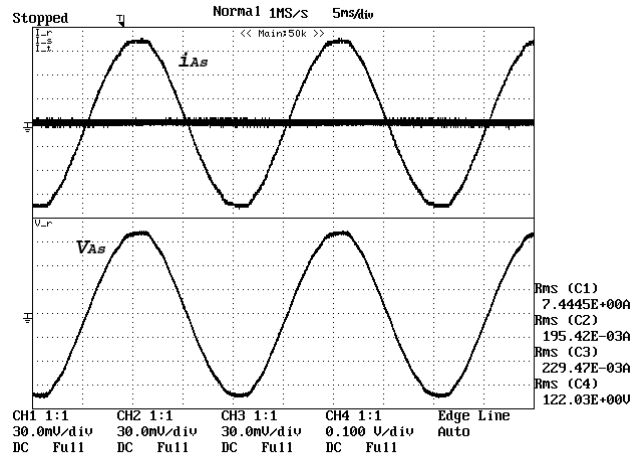


Figura 7.10 Corrientes de carga, fases A, B y C en la parte superior. Tensión de la fase A, en la parte inferior.

En la Tabla 7-15 se muestran los valores eficaces de las tensiones y corrientes de carga junto con sus componentes fundamentales y sus factores de distorsión armónica.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$I_{As}$	$I_{Bs}$	$I_{Cs}$	$I_{Ns}$
124.24 V	123.81 V	78.71 V	7.44 A	0.18 A	0.23 A	7.45 A
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$I_{As1}$	$I_{Bs1}$	$I_{Cs1}$	$I_{Ns1}$
124.21 V	123.76 V	78.68 V	7.44 A	0.07 A	0.05 A	7.45 A
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{I_{As1}}$	$\phi_{I_{Bs1}}$	$\phi_{I_{Cs1}}$	
-0.01 °	-120.68 °	-240.41 °	-0.01 °	- °	- °	
$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$	$THD_{I_{As}}$	$THD_{I_{Bs}}$	$THD_{I_{Cs}}$	
1.77 %	2.88 %	2.57 %	1.74 %	- %	- %	

Tabla 7-15 Resumen de tensiones en el pcc y corrientes entregadas por el generador a la carga.

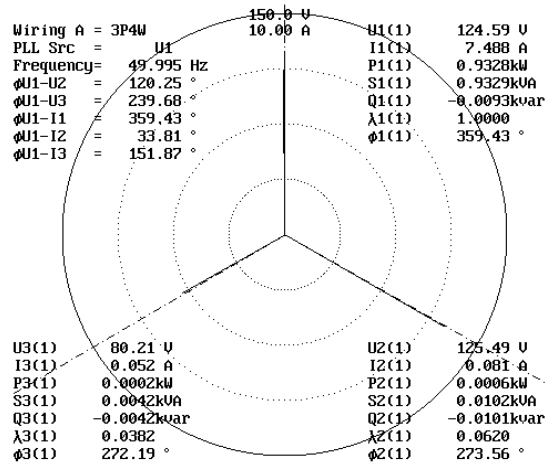


Figura 7.11 Diagrama fasorial de las corrientes y tensiones con sus valores más representativos.

Las magnitudes correspondientes a las tensiones en el pcc se consideran constantes durante los siguientes ensayos, siendo sus valores los que se han reflejado en la Tabla 7-15. La Tabla 7-16 presenta las principales magnitudes en formato IEEE Std. 1459 junto con las componentes simétricas fundamentales de tensiones y corrientes.

$V_e = 110.49$ V			$I_e = 6.08$ A		
$V_{e1} = 110.47$ V		$V_{eh} = 2.09$ V		$I_{e1} = 6.08$ A	
$V_{i1}^+ = 108.88$ V		$V_{i1}^- = 15.52$ V	$V_{i1}^0 = 14.68$ V	$I_{i1}^+ = 2.48$ A	
$\phi_{v1+} = -0.36^\circ$		$\phi_{v1-} = 59.29^\circ$	$\phi_{v10} = -59.71^\circ$	$\phi_{i1+} = 0.92^\circ$	
				$\phi_{i1-} = -0.35^\circ$	
				$\phi_{i10} = -0.61^\circ$	
$S_e = 2015.25$ va					
$S_{e1} = 2014.58$ va			$S_{eN} = 51.72$ va		
$S_{i1}^+ = 811.62$ va		$S_{U1} = 1843.87$ va		$D_{eV} = 38.26$ va	
$P_{i1}^+ = 811.42$ W		$Q_{i1}^+ = -18.15$ var		$D_{eI} = 34.79$ va	
				$THD_{eV} = 1.9\%$	
				$THD_{eI} = 1.72\%$	
$P = 927.11$ W		$P_i = 926.86$ W		$P_H = 0.25$ W	
$P_A = 924.44$ W		$P_B = 1.67$ W		$P_{Fe} = 0.459$	
$P_{A1} = 924.18$ W		$P_{B1} = 1.68$ W		$P_{F1} = 0.459$	
$P_{i1}^+ = 810.85$ W		$P_{i1}^- = 58.21$ W		$P_{i1}^0 = 56.16$ W	
				$P_{F1}^+ = 0.9994$	
$F_e = 0.402$					

Tabla 7-16 Potencias de carga en formato IEEE Std. 1459

La Tabla 7-17 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis, para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{UIV} = 340.59 \text{ VA}$	$S_{UII} = 1838.54 \text{ VA}$	$S_{UIU} = 310.87 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 289.81 \text{ VA}$
$TU_V = 16.90 \%$		$TU_I = 91.27 \%$	

Tabla 7-17 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 7-18, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std.100 medidos por el sistema de medidas comercial a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 924.11 \text{ W}$	$Q_{IA} = -0.05 \text{ var}$	$S_A = 924.11 \text{ va}$	$TPF_A = 1$
$P_B = -0.05 \text{ W}$	$Q_{IB} = 0.06 \text{ var}$	$S_B = 0.06 \text{ va}$	$TPF_B = 0.83$
$P_C = -0.04 \text{ W}$	$Q_{IC} = -0.01 \text{ var}$	$S_C = 0.04 \text{ va}$	$TPF_C = -1$
$P_{TOT} = 924.02 \text{ W}$	$Q_{TOT} = 0.00 \text{ var}$	$S_{TOT} = 924.21 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.99$

Tabla 7-18 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas con el equipo comercial Power Guia 440s

La potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) medida por el sistema de medidas en formato IEEE Std.1459 no coincide con la potencia total ( $P_{TOT}$ ), medida con el sistema de medidas comercial Power Guia 440s, ya que al tener desequilibrio en tensiones y corrientes, el equipo comercial no tiene en cuenta dicho desequilibrio en la cuantificación de la potencia activa. Analizando el valor de ambos términos se observa una discrepancia de 112.6 W, lo que supone un error del 13.87% para un desequilibrio en tensiones del 16.90% y un desequilibrio en corrientes del 91.27% (valores muy similares a los obtenidos en el mismo caso teórico del apartado 5.3.5.1). Por otro lado el valor de la potencia armónica ( $P_H$ ), se justifica debido a la pequeña distorsión armónica que tienen las tensiones de red, ya que si las tensiones de red fuesen completamente senoidales el valor de ( $P_H$ ) sería nulo, tal y como se muestra en el apartado 5.3.5.1 de las simulaciones teóricas.

Para este tipo de carga al ser puramente resistiva no existe potencia reactiva aunque como se puede observar los valores mostrados por ambos equipos ( $Q_1^+$ ), ( $Q_{TOT}$ ) no son cero debido a los errores de medida cometidos por ambos equipos.

La potencia aparente medida por el equipo de medidas comercial ( $S_{TOT}$ ) no tiene en cuenta la parte del desequilibrio que presenta el sistema trifásico, donde el sistema de medidas implementado si lo considera para cuantificar la potencia aparente fundamental y de secuencia directa ( $S_1^+$ ) provocando una discrepancia entre ambos tal y como se muestra en la Tabla 7-16 y la Tabla 7-18.

La diferencia en el factor de potencia ( $P_{F1}^+$ ), y el ( $TPF_{TOT}$ ), se justifica teniendo en cuenta la forma de cuantificar los factores de potencia por cada uno de los equipos donde, el equipo de medidas comercial no tiene en cuenta el desequilibrio y el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459 si lo hace, provocando que la potencia activa, reactiva y aparente cuantificada por ambos equipos sea diferente y en consecuencia lo sea también el valor del factor de potencia.

En la Tabla 7-17, se puede observar como al tener un sistema de tensiones de alimentación desequilibradas el término correspondiente a la potencia de desequilibrio de tensión ( $S_{UV}$ ) ha elevado su valor respecto al caso de tensiones de alimentación equilibradas mostrado en el apartado 7.1.1. Del mismo modo que en los demás casos el desequilibrio en corriente provoca una potencia de desequilibrio en corriente cuantificada por el término ( $S_{UI}$ ), y además tanto el desequilibrio en corriente como en tensión provoca que los términos  $S_{UV}$  y  $S_{UI}$  aumenten su valor debido a las componentes de secuencia negativa y cero de corrientes y tensiones. Los valores de  $TU_V$  y  $TU_I$  demuestran que en este caso el desequilibrio en tensión ha aumentado y que hay de toda la potencia de desequilibrio no toda es atribuible al usuario. El valor del factor de eficiencia ( $F_e$ ) refleja la baja eficiencia que tiene el sistema al presentar desequilibrio en corriente y tensión.

**7.2.2. Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva.**

En segundo lugar se presentan los resultados experimentales para el caso en el que la carga es una carga lineal desequilibrada incluyendo desfase en el armónico fundamental, donde este caso se corresponde con el caso de simulación del apartado 5.3.5.2. La carga trifásica lineal desequilibrada va a permitir realizar las medidas de los fenómenos de desequilibrio y desfase.

$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$
$R_A = 22.7 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 27 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = 30 \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, como las mostradas en la Figura 7.9, las corrientes a través de la carga lineal desequilibrada y con desfase se muestran en la Figura 7.12. El diagrama fasorial correspondiente a estas corrientes se muestra en la Figura 7.13.

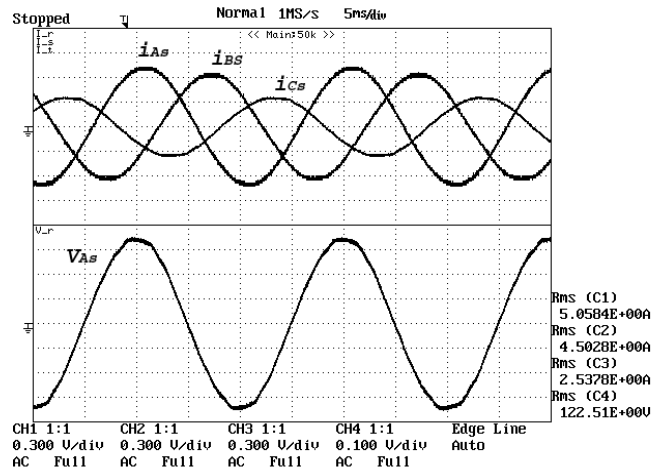


Figura 7.12 Corrientes de carga, fases A, B y C en la parte superior. Tensión de la fase A, en la parte inferior.

En la Tabla 7-19 se muestran los valores eficaces de tensiones y corrientes que la carga demanda al generador junto con sus componentes fundamentales y sus factores de distorsión armónica.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$I_{As}$	$I_{Bs}$	$I_{Cs}$	$I_{Ns}$
124.24 V	123.81 V	78.71 V	5.06 A	4.50 A	2.54 A	2.67 A
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$I_{As1}$	$I_{Bs1}$	$I_{Cs1}$	$I_{Ns1}$
124.21 V	123.76 V	78.68 V	5.06 A	4.50 A	2.54 A	2.66 A
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{I_{As1}}$	$\phi_{I_{Bs1}}$	$\phi_{I_{Cs1}}$	
-0.01 °	-120.68 °	-240.41 °	-15.47 °	-130.51 °	-239.95 °	
$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$	$THD_{I_{As}}$	$THD_{I_{Bs}}$	$THD_{I_{Cs}}$	
1.77 %	2.88 %	2.57 %	0.66 %	1.63 %	2.00 %	

Tabla 7-19 Resumen de tensiones en el pcc y corrientes entregadas por el generador a la carga.

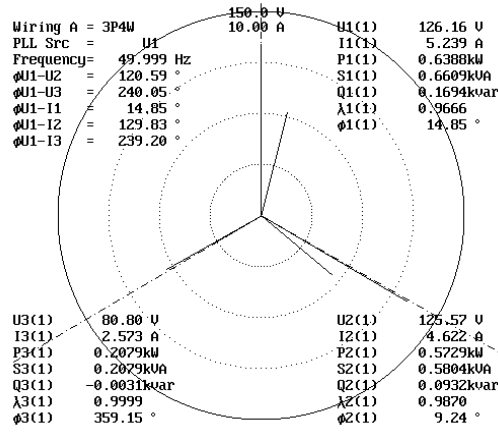


Figura 7.13 Diagrama fasorial de las corrientes y tensiones con sus valores más representativos.

La Tabla 7-20 presenta las principales magnitudes en formato IEEE Std. 1459 junto con las componentes simétricas fundamentales de tensiones y corrientes.

$V_e = 110.49$ V			$I_e = 4.45$ A		
$V_{e1} = 110.47$ V		$V_{e0} = 2.09$ V		$I_{e1} = 4.45$ A	
$V_1^+ = 108.88$ V		$V_1^- = 15.52$ V	$V_1^0 = 14.68$ V	$I_1^+ = 4.01$ A	
$\phi_{V_1^+} = -0.36^\circ$		$\phi_{V_1^-} = 59.29^\circ$	$\phi_{V_1^0} = -59.71^\circ$	$\phi_{I_1^+} = -10.28^\circ$	
$S_e = 1475.05$ va					
$S_{e1} = 1474.49$ va			$S_{eN} = 40.51$ va		
$S_1^+ = 1309.97$ va		$S_{U1} = 676.84$ va		$D_{eV} = 28.01$ va	
$P_1^+ = 1290.27$ W		$Q_1^+ = 225.71$ var		$THD_{eV} = 1.9\%$	
$P = 1352.92$ W		$P_1 = 1352.71$		$P_H = 0.21$	
$P_A = 604.86$ W		$P_B = 548.24$ W		$P_C = 199.82$ W	
$P_{A1} = 604.84$ W		$P_{B1} = 548.13$ W		$P_{C1} = 199.74$ W	
$P_1^+ = 1290.27$ W		$P_1^- = 25.92$ W		$P_1^0 = 37.62$ W	
$F_e = 0.874$					
$I_1^0 = 0.89$ A					
$\phi_{I_1^0} = -75.61^\circ$					
$I_1^- = 0.74$ A					
$\phi_{I_1^-} = 17.32^\circ$					
$D_{eI} = 29.27$ va					
$THD_{eI} = 1.98\%$					

Tabla 7-20 Potencias de carga en formato IEEE Std. 1459

En este caso al existir corriente por las tres fases el desequilibrio es menos acusado siendo el valor de  $S_{U1}$  menor que en el caso anterior. La carga utilizada presenta parte inductiva y por lo tanto se produce el aumento de  $Q_1^+$ . El factor de eficiencia de partida en este caso es considerablemente mayor.

La Tabla 7-21 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para



diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{UV} = 249.77 \text{ VA}$	$S_{UI} = 643.06 \text{ VA}$	$S_{UIU} = 108.71 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 87.59 \text{ VA}$
$TU_V = 16.90 \%$		$TU_I = 43.52 \%$	

Tabla 7-21 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{UI}$

La Tabla 7-18, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std.100 medidos por el sistema de medidas comercial a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 604.87 \text{ W}$	$Q_{IA} = 171.26 \text{ var}$	$S_A = 628.65 \text{ va}$	$TPF_A = 0.96$
$P_B = 548.25 \text{ W}$	$Q_{IB} = 99.13 \text{ var}$	$S_B = 557.14 \text{ va}$	$TPF_B = 0.98$
$P_C = 199.82 \text{ W}$	$Q_{IC} = 6.32 \text{ var}$	$S_C = 199.92 \text{ va}$	$TPF_C = 0.99$
$P_{TOT} = 1352.94 \text{ W}$	$Q_{ITOT} = 276.71 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1385.71 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.97$

Tabla 7-22 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas con el equipo comercial Power Guia 440s.

Analizando la Tabla 7-20 y la Tabla 7-22, se observa que la potencia activa fundamental y de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) no coincide con la potencia activa total medida por el equipo de medidas comercial ( $P_{TOT}$ ). Esto se justifica ya que al tener un sistema desequilibrado en tensiones y corrientes, el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000 separa los valores de potencia activa provocados por dicho desequilibrio en sus correspondientes términos ( $P_1^+$ ), ( $P_1^-$ ), ( $P_1^0$ ) tal y como se puede ver en la Tabla 7-20 sin embargo el equipo de medidas comercial agrupa toda la potencia activa en un solo término ( $P_{TOT}$ ), dando como resultado de la medida de potencia activa un valor superior que al que provocaría trabajo útil en el caso de un motor eléctrico. Analizando los valores de los términos ( $P_1^+$ ) y ( $P_{TOT}$ ) se observa una discrepancia de 62.67 W lo que supone un error del 4.85%, indicando que el equipo de medidas comercial está midiendo un 4,85% más de potencia activa que la que proporcionaría trabajo útil en el caso del motor eléctrico.

Al tener desequilibrio en tensiones la potencia reactiva medida por uno y otro equipo presentan diferencias, ya que como se observa en la Tabla 7-20, el sistema de medidas basado en el IEEE Std. 1459-2000 cuantifica la potencia reactiva de secuencia positiva ( $Q_1^+$ ), eliminando de dicho término la parte del desequilibrio ( $Q_1^-$  y  $Q_1^0$ ), mientras que la medida de la potencia reactiva llevada a cabo con el sistema de medidas comercial incluye toda la potencia reactiva fundamental ( $Q_{ITOT}$ ), tal y como se muestra en la Tabla 7-22. Analizando el valor de ambos términos se tiene una discrepancia de 51var lo que supone un error relativo del 22.59% (valores próximos a los que se tenían en el caso teórico del apartado 5.3.5.2), cuando se tiene un desequilibrio en tensiones del 16.90% y un desequilibrio en corrientes del 43.52%.

La justificación de las diferencias en la medida de la potencia aparente, está determinada por el desequilibrio de tensiones y corrientes, ya que el sistema de medidas basado en el IEEE

Std.15459-2000 cuantifica la potencia aparente fundamental y de secuencia positiva ( $S_1^+$ ), (separando el desequilibrio en la medida de dicha potencia), mientras que el sistema de medidas comercial cuantifica el desequilibrio dentro de dicha medida ( $S_{TOT}$ ).

El factor de potencia correspondiente al armónico fundamental y de secuencia positiva ( $P_{F1^+}$ ), no se corresponde con el factor de potencia total en formato IEEE Std.100 ( $TPF_{TOT}$ ), ya que al tener desequilibrio en tensiones y corrientes las potencias activas y aparentes utilizadas para el cálculo de dichos términos no tienen los mismos valores debido a lo explicado anteriormente.

Analizando la Tabla 7-21, se observa que al igual que en el caso anterior al tener un sistema de tensiones desequilibrado la potencia de desequilibrio de tensión ( $S_{UV}$ ) ha aumentado respecto al mismo caso con tensiones equilibradas (7.1.2) que junto con la debida al desequilibrio en corriente ( $S_{UI}$ ), permiten identificar la parte de la potencia de desequilibrio ( $S_{UI}$ ), provocada por el usuario y las tensiones de red.

### 7.2.3. Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase.

En último lugar se presentan los resultados experimentales para el caso en el que la carga presenta los fenómenos de distorsión, desequilibrio y desfase, donde este caso se corresponde con el mostrado en el apartado 5.3.6 de las simulaciones teóricas. En este caso la carga está formada por una combinación de cargas lineales y no lineales.

La parte no lineal está formada por tres rectificadores monofásicos no controlados, uno por fase, con un filtro LC y carga resistiva.

Parte lineal			Parte no lineal		
$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$	3 x Rectificador + Filtro		
$R_A = 32.5 \Omega$ $L_A = 21 \text{ mH}$	$R_B = 56.5 \Omega$ $L_B = 12 \text{ mH}$	$R_C = 33 \Omega$	$C_r = 2200 \mu\text{F}$	$L_r = 5.4 \text{ mH}$	$R_r = 100 \Omega$

Para un sistema trifásico de tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas, como las mostradas en la Figura 7.9 , las corrientes a través de la carga se muestran en la Figura 7.14. El diagrama fasorial correspondiente a estas corrientes se muestra en la Figura 7.15.

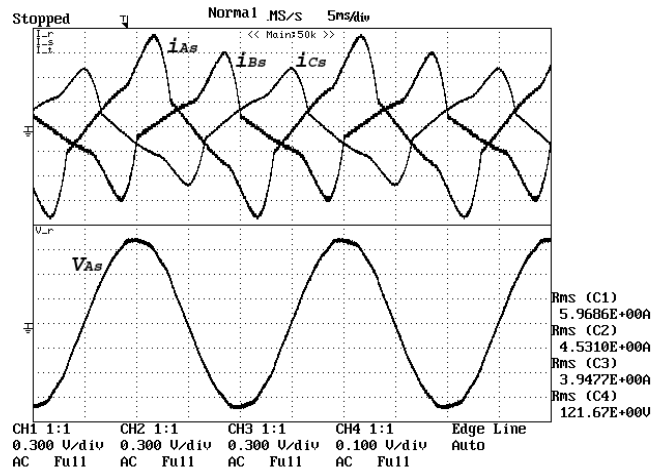


Figura 7.14 Corrientes de carga, fases A, B y C en la parte superior. Tensión de la fase A, en la parte inferior.

En la Figura 7.14 se muestran los valores eficaces de las tensiones y corrientes de carga junto con sus factores de distorsión armónica.

$V_{As}$	$V_{Bs}$	$V_{Cs}$	$I_{As}$	$I_{Bs}$	$I_{Cs}$	$I_{Ns}$
124.24 V	123.81 V	78.71 V	5.97 A	4.53 A	3.95 A	4.33 A
$V_{As1}$	$V_{Bs1}$	$V_{Cs1}$	$I_{As1}$	$I_{Bs1}$	$I_{Cs1}$	$I_{Ns1}$
124.21 V	123.76 V	78.68 V	5.73 A	4.19 A	3.78 A	1.52 A
$\phi_{V_{As1}}$	$\phi_{V_{Bs1}}$	$\phi_{V_{Cs1}}$	$\phi_{I_{As1}}$	$\phi_{I_{Bs1}}$	$\phi_{I_{Cs1}}$	
-0.01 °	-120.68 °	-240.41 °	-14.05 °	-133.27 °	-246.61 °	
$THD_{V_{As}}$	$THD_{V_{Bs}}$	$THD_{V_{Cs}}$	$THD_{I_{As}}$	$THD_{I_{Bs}}$	$THD_{I_{Cs}}$	
1.77 %	2.88 %	2.57 %	29.22 %	41.06 %	29.35 %	

Tabla 7-23 Resumen de tensiones y corrientes de carga.

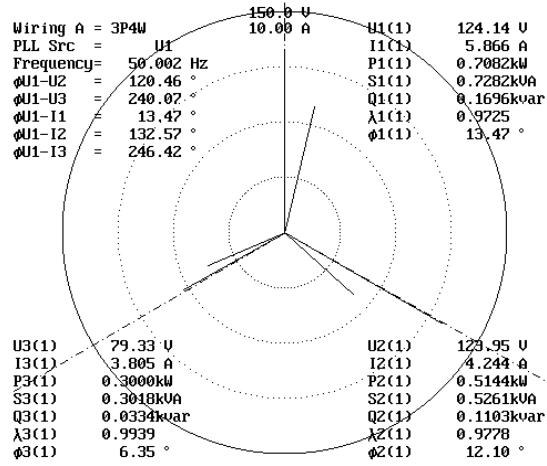


Figura 7.15 Diagrama fasorial de las corrientes y tensiones con sus valores más representativos.

La Tabla 7-24 presenta las principales magnitudes en formato IEEE Std. 1459 junto con las componentes simétricas fundamentales de tensiones y corrientes.

$V_e = 110.49 \text{ V}$			$I_e = 5.49 \text{ A}$		
$V_{e1} = 110.47 \text{ V}$		$V_{eh} = 2.09 \text{ V}$	$I_{e1} = 4.72 \text{ A}$		$I_{eh} = 2.79 \text{ A}$
$V_1^+ = 108.88 \text{ V}$	$V_1^- = 15.52 \text{ V}$	$V_1^0 = 14.68 \text{ V}$	$I_1^+ = 4.56 \text{ A}$	$I_1^- = 0.71 \text{ A}$	$I_1^0 = 0.51 \text{ A}$
$\phi_{1+} = -0.36^\circ$	$\phi_{1-} = 59.29^\circ$	$\phi_{10} = -59.71^\circ$	$\phi_{1+} = -11.75^\circ$	$\phi_{1-} = -11.88^\circ$	$\phi_{10} = -39.81^\circ$
$S_e = 1819.36 \text{ va}$					
$S_{e1} = 1565.55 \text{ va}$			$S_{eN} = 926.88 \text{ va}$		
$S_1^+ = 1489.02 \text{ va}$		$S_{U1} = 483.50 \text{ va}$		$D_{eV} = 29.74 \text{ va}$	$D_{eI} = 926.24 \text{ va}$
$P_1^+ = 1457.51 \text{ W}$	$Q_1^+ = 304.67 \text{ var}$			$THD_{eV} = 1.9 \%$	$THD_{eI} = 59.16 \%$
$P = 1498.51 \text{ W}$		$P_1 = 1489.28 \text{ W}$		$P_H = 9.23 \text{ W}$	
$P_A = 691.20 \text{ W}$	$P_B = 509.73 \text{ W}$	$P_C = 297.58 \text{ W}$	$P_{Fe} = 0.824$		
$P_{A1} = 688.54 \text{ W}$	$P_{B1} = 504.88 \text{ W}$	$P_{C1} = 295.86 \text{ W}$	$P_{F1} = 0.952$		
$P_1^+ = 1457.51 \text{ W}$	$P_1^- = 11.00 \text{ W}$	$P_1^0 = 20.98 \text{ W}$	$P_{F1}^+ = 0.980$		
$F_e = 0.801$					

Tabla 7-24 Potencias de carga en formato IEEE Std. 1459.

La Tabla 7-25 presenta la descomposición de la potencia de desequilibrio  $S_{U1}$  en sus correspondientes términos, junto con los factores de mérito propuestos en esta tesis para diferenciar el desequilibrio correspondiente a las tensiones de red presentes en el pcc y el desequilibrio producido por las corrientes de carga demandadas al generador.

$S_{UIV} = 265.42 \text{ VA}$	$S_{UII} = 424.02 \text{ VA}$	$S_{UIU} = 71.68 \text{ VA}$	$S_{UIe} = 63.70 \text{ VA}$
$TU_V = 16.90 \%$		$TU_I = 27.01 \%$	

Tabla 7-25 Magnitudes formato IEEE Std 1459 correspondientes a la descomposicion de  $S_{U1}$

La Tabla 7-26, muestra los valores de las potencias y factores de potencia en formato IEEE Std.100 medidos por el sistema de medidas comercial a partir de los valores de corrientes y tensiones presentes en el pcc.

$P_A = 690.99 \text{ W}$	$Q_{IA} = 269.56 \text{ var}$	$S_A = 741.71 \text{ va}$	$TPF_A = 0.93$
$P_B = 509.23 \text{ W}$	$Q_{IB} = 235.02 \text{ var}$	$S_B = 560.85 \text{ va}$	$TPF_B = 0.90$
$P_C = 297.25 \text{ W}$	$Q_{IC} = 91.11 \text{ var}$	$S_C = 310.90 \text{ va}$	$TPF_C = 0.95$
$P_{TOT} = 1497.47 \text{ W}$	$Q_{ITOT} = 595.69 \text{ var}$	$S_{TOT} = 1613.46 \text{ va}$	$TPF_{TOT} = 0.92$

Tabla 7-26 Magnitudes formato IEEE Std 100 medidas con el equipo comercial Power Guia 440s

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 7-24 y en la Tabla 7-26, los valores de la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) medida por el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459 y la potencia activa ( $P_{TOT}$ ) medida por el sistema de medidas comercial presentan una discrepancia. Dicha discrepancia se justifica teniendo en cuenta que el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459 considera el desequilibrio en tensiones y corrientes junto con la distorsión armónica para calcular el valor de la potencia activa fundamental de secuencia positiva ( $P_1^+$ ) separando de dicha potencia los términos de potencia correspondientes al desequilibrio ( $P_1^-$ ), ( $P_1^0$ ), y la correspondiente a la distorsión ( $P_H$ ), mientras el sistema de medidas comercial agrupa toda la potencia en un único término ( $P_{TOT}$ ). Analizando el valor de dichos términos se observa que la discrepancia entre ellos es de 39.96W lo que en este caso supone un error del 2.7%, cuando se tiene un desequilibrio en tensiones del 16.90% el desequilibrio en corrientes es del 27.01% y la distorsión armónica de las corrientes es del 59.16% (valores muy similares al caso teórico del apartado 5.3.6)

Para el caso de la energía reactiva la discrepancia de ambos términos ( $Q_1^+$ ) y ( $Q_{ITOT}$ ), se justifica teniendo en cuenta que el IEEE Std100 no tiene en cuenta el desequilibrio en tensiones ni la distorsión armónica a la hora de calcular la potencia reactiva. Si se comparan los valores ( $Q_1^+$ ) y de ( $Q_{ITOT}$ ), se observa que la discrepancia es de 291.02 lo que representa un error relativo del 95.51 %. En este caso además del desequilibrio en tensiones, la distorsión armónica está influyendo el valor de la potencia aparente medida en formato IEEE Std.100, lo que supone que el valor de la potencia reactiva en dicho formato presente un error mucho mayor.

Analizando la potencia aparente medida por cada equipo se observa la diferencia existente entre ambas medidas, dicha diferencia se debe al desequilibrio y la distorsión armónica del sistema a medir. El valor de la potencia aparente total ( $S_{TOT}$ ) medido por el sistema de medidas comercial Power Guia 440s, es superior al valor de la potencia aparente efectiva ( $S_e$ ) medido por el sistema

de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000. El valor de ( $S_e$ ), incluye los valores de la potencia aparente debida a la corriente del neutro tal y como se expresa en las ecuaciones (1.65) y (1.66). Si se elimina la distorsión armónica de la potencia aparente efectiva se obtiene la potencia aparente efectiva fundamental ( $S_{ei}$ ), y si solamente se tiene en cuenta el armónico fundamental de secuencia positiva de tensiones y corrientes se obtiene la potencia aparente fundamental de secuencia positiva ( $S_1^+$ ). Como se puede observa en la Tabla 7-24, el sistema de medidas basado en el IEEE Std.1459-2000, separa dentro de la potencia aparente las distintas potencias aparentes que cuantifican todos los fenómenos presentes en el sistemas (desequilibrio, distorsión, desfase.), sin embargo el sistema de medidas comercial agrupa todos estos fenómenos en la medida de la potencia aparente ( $S_{TOT}$ ), tal y como se observa en la Tabla 7-26.

En este caso el factor de potencia ( $P_{F1^+}$ ) y el ( $TPF_{TOT}$ ) presentan una diferencia debida a que al existir distorsión armónica y desequilibrio el IEEE Std.100 no es capaz de discriminar dicha distorsión armónica en la parte de la potencia activa ni en la potencia aparente, lo que supone que a la hora de calcular el factor de potencia aparezca una discrepancia con respecto al valor de ( $P_{F1^+}$ ).

Analizando la Tabla 7-25, se observa que como en los casos anteriores se tiene la potencia de desequilibrio ( $S_{UI}$ ), separada en la potencia de desequilibrio en tensión ( $S_{UIV}$ ) y la potencia de desequilibrio en corriente ( $S_{UII}$ ), junto con los factores de mérito ( $TU_V$ ) y ( $TU_I$ ), que permiten determinar el valor del desequilibrio provocado por las tensiones de red y el desequilibrio provocado por las corrientes de carga. Por último decir que el factor de eficiencia ( $F_e$ ) ha empeorado respecto al caso anterior ya que junto con el desequilibrio la distorsión harmónica perjudica dicha eficiencia.

### 7.3. Conclusiones.

En el presente capítulo se han presentado los resultados experimentales obtenidos a partir de la implementación de un prototipo experimental del sistema de medidas propuesto diseñado en el capítulo 4 y simulado en el capítulo 5. Se han realizado los distintos ensayos para verificar la parte experimental y teórica para cada una de las distintas cargas que se han implementado.

- En comparación con los resultados esperados teóricamente se concluye que el equipo de medidas experimental presenta un correcto funcionamiento, determinándose que el error relativo cometido en la medida es del  $\pm 0.5\%$
- Los resultados obtenidos demuestran que este equipo de medidas es capaz de medir los fenómenos no eficientes presentes en el punto de conexión identificando los que son atribuibles al usuario y los que no lo son, resultando una herramienta útil para todas aquellas aplicaciones en las cuales se necesite cuantificar cada uno de éstos fenómenos (Sistemas de

compensación selectivos, Sistemas gestores energéticos de red, sistema de tarificación eléctrica y otras).

- Se han medido para cada uno de los casos presentados, los valores correspondientes a cada uno de los términos que componen la descomposición de la  $S_{U_1}$  que se ha propuesto en esta tesis agrupándolos en una tabla que complementa a la de los términos correspondientes al IEEE Std. 1459-2000. Se ha comprobado experimentalmente que estos términos ayudan a determinar la procedencia del desequilibrio en el sistema, siendo de utilidad para sistemas de tarificación o penalización.
- La comprobación del sistema digital de medidas propuesto con el equipo de medidas comercial evidencia la mayor relación de los términos propuestos en el IEEE Std.1459 con los fenómenos físicos que se producen en los sistemas eléctricos demostrando así su mayor utilidad a la hora de cuantificar los fenómenos reales así como para su mejor comprensión.





## 8. Aportaciones y líneas de trabajo futuro. Publicación de resultados.

### 8.1. Aportaciones

En este punto se detallan las aportaciones de la presente tesis.

- Se propone la utilización del Std.1459 como base teórica de la potencia eléctrica para el desarrollo de un sistema de medidas por su mejor identificación, cuantificación, y “agrupación” de los fenómenos físicos que se producen en los sistemas eléctricos.
- Sobre la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ) definida en el IEEE Std.1459-2000, se ha propuesto una nueva descomposición de la misma, siguiendo la metodología aplicada en dicho estándar. Con esta nueva descomposición se consigue identificar la parte de la potencia de desequilibrio debida a las tensiones en el pcc y la parte debida a las corrientes de carga. Estos términos permitirían determinar si ante un sistema de tensiones desequilibrado, el usuario está consumiendo corrientes equilibradas (con la ayuda de un compensador activo) de tal forma que no sería causante del valor de  $S_{U1}$  y no debería ser penalizado por ello.
- Se han propuesto unos nuevos factores de mérito para evaluar las tasas de desequilibrio de tensiones y corrientes en el sistema. Estas tasas son orientativas de la eficiencia de la red y de la instalación en términos de desequilibrio.
- Se ha propuesto un nuevo sistema de sincronización (combinando los sistemas SOGI+DSC+SPLL) con las tensiones red, capaz de sincronizarse con el armónico fundamental de secuencia positiva de dichas tensiones bajo cualquier tipo de perturbación que se pueda dar en la red eléctrica. Con este nuevo sistema de sincronización se consigue el correcto funcionamiento del sistema de medidas (muestreo y cálculo de medidas), de forma robusta para cualquier situación que se pueda dar en las tensiones de red.
- Se ha propuesto la utilización del algoritmo SDFT para el cálculo de los parámetros con cada nueva muestra adquirida. Esto será de utilidad para informar a un compensador activo de la evolución de los términos de potencia que se quiera compensar de una forma suave evitando las transiciones bruscas en la compensación de dichos términos.

### **Líneas de trabajo futuro.**

- Realizar un análisis sobre el efecto que tiene para la red eléctrica las distintas ineficiencias que se han medido con el equipo de medidas, para la mejora de la eficiencia energética.
- Desarrollar un compensador activo cuyas corrientes de referencia estén calculadas a partir de las medidas realizadas por el equipo de medidas liberando al compensador de esta tarea.
- Analizar la efectividad de los términos propuestos en la descomposición de la potencia de desequilibrio ( $S_{U1}$ ), a la hora de compensar dichas ineficiencias mediante un compensador activo basado en el IEEE Std.1459-2000.
- Desarrollar un sistema de optimización energética remoto basado en el IEEE Std. 1459-2000, donde a partir de las medidas realizadas por el sistema digital de medidas propuesto y teniendo en cuenta el tipo de ineficiencia más perjudicial para la red en cada momento, sea capaz de llevar a cabo las acciones de compensación (a través de los compensadores activos basados en el IEEE Std.1459-2000) necesarias para la gestión eficiente de la red.

### **8.2. Resultados de la tesis doctoral.**

En relación con el trabajo realizado en la presente tesis se han publicado, se encuentran aceptados para su publicación o se encuentran en proceso de revisión los siguientes artículos:

#### **1) New Resolution of the Unbalance Power according to STD 1459**

S. Orts-Grau, J.C.Alfonso Gil, F. J. Gimeno-Sales and S. Seguí-Chilet

Revista: *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.25. no.1, p.p 341-350, En.2010.ISSN: 0885-8977.

#### **2) New SPLL Based Fundamental Positive Sequence Voltage Synchronization Method Intended for IEEE Std.1459 Measurements.**

J.C.Alfonso Gil, S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales and S. Seguí-Chilet

Revista: *IEEE Transactions on Power Delivery*

Enviado en diciembre de 2009. A la espera de contestación.

#### **3) Non-fundamental Effective Apparent Power defined through an Instantaneous Power Approach**

N. Muñoz Galeano, J.C. Alfonso Gil, S. Orts-Grau, S. Seguí-Chilet, F.J. Gimeno-Sales.

Revista: *Elsevier Editorial System (tm) for international journal of Electrical Power and Energy Systems*.

Enviado en Julio de 2009. A la espera de contestación.

**4) Discussion on Useless Active and Reactive Powers contained in the IEEE Std.1459.**

S. Orts-Grau, N. Muñoz Galeano, J.C. Alfonso Gil, F. J. Gimeno-Sales, S. Seguí-Chilet.

Revista: *IEEE Transactions on Power Delivery*.

Enviado en Junio de 2009. A la espera de contestación.

**5) Improved Shunt Active Power Compensator for IEEE Standard 1459 Compliance.**

S. Orts-Grau, F. J. Gimeno-Sales, A. Abellán-García, S. Seguí-Chilet, J.C. Alfonso Gil.

Revista: *IEEE Transactions on Power Delivery*.

Enviado en Febrero de 2009. A la espera de contestación.



## Anexo I. Características del equipo de medidas Power Guia 440s de la marca comercial Dranetz BMI.

Para contrastar el sistema de medidas implementado en esta tesis se ha utilizado el equipo de medidas Power Guia 440s de la casa comercial Dranetz-BMI. El Power Guia 440s cumple el Standard IEEE 1159 y la norma IEC 61000-4-30 clase A para la precisión y requerimientos de medida. Además integra la función para la medida de las características del voltaje en las redes de distribución públicas determinadas por la norma EN 50160.



Las características de dicho equipo se muestran a continuación.

PARAMETROS DE MEDIDA	
<b>Voltaje</b>	<p><b>Tipo:</b> 4 entradas diferenciales con acoplamiento en continua</p> <p><b>Rango de entrada de los canales A, B, C,D:</b> 10-600V Vrms</p> <p><b>Impedancia de entrada:</b> 16MΩ, mínimo, entrada.</p> <p><b>Precisión RMS:</b> ±0.1% de lectura, ±0.05% Fondo de escala, Ancho de Banda 7KHz.</p> <p><b>CMRR:</b> -80db.</p>
<b>Corriente</b>	<p><b>Tipo:</b> 4 entradas diferenciales con acoplamiento en continua</p> <p><b>Rango de entrada de los canales A, B, C,D:</b> 10-200% del rango de entrada de las sondas de entrada.(sondas Dranetz-BMI)</p> <p><b>Precisión RMS:</b> ±0.1% de lectura, ±0.05% Fondo de escala, Ancho de Banda 3KHz.</p>

<b>Fase</b>	Cada pareja de Voltaje/corriente son muestreadas a la vez para mantener la relación de fase.
<b>Frecuencia</b>	Dos rangos de selección. 30-70Hz (por defecto). 15-30Hz.

<b>MAGNITUDES MEDIDAS.</b>	
<b>Potencia media</b>	$WATT = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n I_n$ <p>Donde: N= numero de muestras <math>V_n</math>= Voltaje de la muestra n <math>I_n</math>= Corriente de la muestra n.</p>
<b>Potencia Aparente.</b>	$VA = V_{RMS} * I_{RMS}$
<b>Potencia Aparente Fundamental</b>	$VA_{fund} = V_{fund} I_{fund}$
<b>Potencia Fundamental</b>	$WATT_{fund} = VA_{fund} \cos\theta$ <p>Donde: <math>\theta = \theta_v - \theta_i</math> <math>\theta_v</math>= Angulo de la tensión de fase <math>\theta_i</math>= Angulo de la corriente de fase.</p>

<b>Potencia reactiva</b>	$VAR_{fund} = VA_{fund} \sin \theta$ <p>Donde:</p> $\theta = \theta_V - \theta_I$ <p><math>\theta_V</math> = Angulo de la tensión de fase</p> <p><math>\theta_I</math> = Angulo de la corriente de fase.</p>
<b>Verdadero factor de potencia</b>	$TPF = \left  \frac{WATT}{VA} \right $
<b>Factor de desplazamiento</b>	$DPF =  \cos \theta $

<b>VALOR TOTAL DE LAS MAGNITUDES MEDIDAS.</b>	
<b>Potencia total</b>	$WATT_{Tot} = WATT_A + WATT_B + WATT_C$
<b>Potencia Fundamental Total</b>	$WATT_{Tot Fund} = WATT_{A Fund} + WATT_{B Fund} + WATT_{C Fund}$
<b>Potencia Reactiva Fundamental Total</b>	$VAR_{Tot Fund} = VAR_{A Fund} + VAR_{B Fund} + VAR_{C Fund}$
<b>Potencia Aparente Aritmética Total</b>	$VA_{Aritmetica Tot} = VA_A + VA_B + VA_C$
<b>Potencia Aparente Vectorial Total.</b>	$VA_{Vectorial Tot} = \sqrt{WATT_{Tot}^2 + VAR_{Tot Fund}^2}$
<b>Potencia Aparente Fundamental Aritmética Total</b>	$VA_{Aritmetica Tot Fund} = VA_{A Fund} + VA_{B Fund} + VA_{C Fund}$

<b>Potencia Aparente Fundamental Vectorial Total</b>	$VA_{Vectorial\ Tot\ Fund} = \sqrt{WATT_{Tot\ Fund}^2 + VAR_{Tot\ Fund}^2}$
<b>Verdadero factor de potencia Aritmético Total</b>	$TPF_{Aritmético\ Total} = \left  \frac{WATT_{Tot}}{VA_{Aritmético\ Tot}} \right $
<b>Verdadero factor de potencia Vectorial Total</b>	$TPF_{Vectorial\ Total} = \left  \frac{WATT_{Tot}}{VA_{Vectorial\ Tot}} \right $
<b>Factor de potencia de desplazamiento Aritmético Total</b>	$DPF_{Aritmético\ Total} = \left  \frac{WATT_{Tot}}{VA_{Aritmético\ Tot\ Fund}} \right $
<b>Factor de potencia de desplazamiento Vectorial Total</b>	$DPF_{Vectorial\ Total} = \left  \frac{WATT_{Tot}}{VA_{Vectorial\ Tot\ Fund}} \right $

A continuación se muestran las características de las sondas de medida FLEX RR3035A de la marca comercial Dranetz-BMI. Utilizadas por el equipo de medidas Power Guia 440s para la medida de las corrientes.

<b>Datos Generales de la sonda</b>	
<b>Márgenes de medición</b>	30 A / 300 A / 3000 A CA a preseleccionar mediante interruptores.
<b>Repuesta de salida</b>	50 mV / 5 mV / 0.5 mV por A (acoplamiento en CA)
<b>Precisión a 25°</b>	± 1% del margen de medición (45-65 Hz)
<b>Gama de frecuencias</b>	10Hz hasta 50 kHz (-3dB)
<b>Error de Fase</b>	< ±1° (45-65)Hz, ±10° (con 20kHz)
<b>Linealidad</b>	±0.2% de lectura de 10%.....100% del margen indicador



<b>Respuesta de posición</b>	$\pm 2\%$ del margen con cable $> 25\text{mm}$ (1") separado del acoplamiento
<b>Campo externo</b>	$\pm 1\%$ del margen con cable $> 200\text{mm}$ (8"), separado del cabezal
<b>Carga mínima</b>	$5\text{k}\Omega$ habiendo indicado la precisión
<b>Ruido</b>	8mV rms (0.3% del margen) en la escala de 30A 2mV rms (0.1% del margen) en la escala de 300 A y 3000 A.
<b>Distorsión</b>	$\pm 0.08\%$ / $^{\circ}\text{C}$
<b>Temperatura de servicio</b>	$-20^{\circ}\text{C}$ hasta $+85^{\circ}\text{C}$
<b>Datos del cabezal de medida</b>	
<b>Longitud del cable</b>	610 mm (24 pulgadas), aislamiento doble
<b>Diámetro del cable</b>	14.3 mm (0.562 pulgadas)
<b>Radio de flexión</b>	38.1mm (1.5 pulgadas)
<b>Conducto de salida</b>	2 m de longitud (78.7 pulgadas)
<b>Diámetro de acoplamiento</b>	22.2 mm (0.875 pulgadas)
<b>Material</b>	Goma TPE polipropileno
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	$-20^{\circ}\text{C}$ hasta $+90^{\circ}\text{C}$



## Referencias.

- [1] David Bodanis “El Universo eléctrico: la verdadera y sorprendente historia de la electricidad”. Editorial Planeta, S.A.
- [2] C.H. Page, “Reactive power in nonsinusoidal situation,” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 29, no. 4, pp. 420–423, Dec. 1980.
- [3] E. Clarke, Circuit Analysis of AC Power Systems, vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition, pp. 81, Wiley Publications, 1950.
- [4] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes, “New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 697-703, Apr. 1993.
- [5] A.E. Emanuel, “Summary of IEEE Standard 1459: definitions for measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions,” IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. 40, no. 3, pp. 869-876, Mayo / Junio 2004.
- [6] A. E. Emanuel, “Power in nonsinusoidal situation: a review of definitions and physical meaning”. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1377-1389, Julio 1990.
- [7] L. S. Czarnecki, “Comments on Apparent and reactive powers in three-phase systems: in search of a physical meaning and better resolution”, European transactions on electrical power ETEP, vol. 4, no. 5, pp. 421-426, Sept./Oct. 1994.
- [8] L. S. Czarnecki, “Comments on Apparent power- a misleading quantity in the non-sinusoidal power theory: are all non-sinusoidal power theories doomed to fail?”, European transactions on electrical power ETEP, vol. 4, no. 5, pp. 427-432, Sept./Oct. 1994.
- [9] L. S. Czarnecki, “Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality”, Electrical Engineering (Springer-Verlag), No. 82, pp. 119–126, 2000.
- [10] S. Fryze, “Active, reactive and apparent power in non-sinusoidal systems”, Przegląd Elektrot., no. 7, pp.193-203, Polonia, 1931.

- [11] C. I. Budeanu, "Reactive and fictitious powers", Inst. Romain de l'Energie, Bucharest, Rumania, 1927.
- [12] F. Buchholz, "Das begriffsystem rechtleistung. Wirkleistung, totale blindleistung", Munich, Germany: Selbstverlag, 1950.
- [13] IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary (IEV).
- [14] IEEE Standard dictionary of electrical and electronics terms. ANSI/IEEE Std. 100-1988.
- [15] L. S. Czarnecki, "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned", IEEE Trans. on Instrumentation and measurement, vol. 36, pp. 1845-1854, Sept. 1987.
- [16] D. Yildirim, E. F. Fuchs, "Commentary on various formulations of distortion power D", IEEE Power Engineering, vol. 19, pp. 50-52, May. 1999.
- [17] W. Shepherd, P. Zakikhani, "Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems". Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 119, no. 9, pp. 1361-1362, Sept. 1972.
- [18] N. L. Kusters, W. J. M. Moore, "On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1845-1854, Sept. 1980.
- [19] Z. Nowomiejski, "Generalized theory of electrical power", Arch. Elektrotech, vol. 3, pp.177-182, 1981.
- [20] C.H. Page, "Reactive power in nonsinusoidal situation," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 29, no. 4, pp. 420-423, Dec. 1980.
- [21] P. Filipski, "A new approach to reactive current and reactive power measurement in nonsinusoidal systems," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 29, no. 4, pp. 423-426, Dec. 1980.
- [22] M. Depenbrock, "The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 381-387, May 1993.

- [23] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in the three-phase circuits," Proceedings International Power Engineering Conference, pp. 1375-1386, 1983.
- [24] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 20, pp. 625-630, 1984.
- [25] H. Akagi, E.H. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Wiley-IEEE Press, April 2007.
- [26] H. Akagi, "Trends in active power line conditioners," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 9, no. 3, pp. 263-268, May 1994.
- [27] J. L. Willems, "A new interpretation on the Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 41, pp. 523-527, Aug. 1992.
- [28] S. Togasawa, T. Murase, H. Nakano, and A. Nabae, "Reactive power compensation based on a novel cross-vector theory," IEEJ Trans. on Industrial Applications, vol. 114, pp. 340-341, March 1994. (En Japonés)
- [29] F. Peng and J. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 45, pp. 293-297, Feb. 1996.
- [30] H. Kim, H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames", Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99. vol. 1, pp. 422-427, Jul. 1999.
- [31] IEEE Working group in non-sinusoidal situations: Effects on meter of performance and definitions of power, "Practical definitions in systems with non-sinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 79-87, Jan. 1996.
- [32] IEEE Std. 1459-2000, Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced

Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Mayo 2000. Ascendida a categoría "Full Use" en 2002.

- [33] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech, vol. 53, pp. 596-599, 625-627, 700-702. 1932. (En Alemán).
- [34] P. S. Filipski, Y. Baghzouz, M. D. Cox, "Discussion of power definitions contained in the IEEE Dictionary", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 9, no. 3, pp. 1237-1244, Jul. 1994.
- [35] J. L. Willems, J. A. Ghijselen, and A. E. Emanuel, "The apparent power concept and the IEEE standard 1459-2000," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 876-884, 2005.
- [36] A. E. Emanuel and D. L. Milanez, "Clarke's alpha, beta and zero components: a possible approach for the conceptual design of instrumentation compatible with IEEE std. 1459-2000," in Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE, 2004, pp. 1614-1619 Vol.3.
- [37] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks," Trans. AIEE, pt. II, vol.37, pp. 1027-1140, 1918.
- [38] S. Orts, J. C. Alfonso-Gil, F. J. Gimeno-Sales and S. Seguí-Chilet "New Resolution of the Unbalanced Power according to Std 1459," IEEE Trans on Power Delivery. Vol.25, pp.341-350, Enero 2010.
- [39] S. Seguí-Chilet, F. J. Gimeno-Sales, S. Orts, G. Garcera, E. Figueres, M. Alcañiz, and R. Masot, "Approach to unbalance power active compensation under linear load unbalances and fundamental voltage asymmetries," Electrical Power and Energy Systems ELSEVIER, vol. 29, pp. 526-539, 2007.
- [40] S. Seguí-Chilet, F. J. Gimeno-Sales, S. Orts, G. Garcera, E. Figueres, M. Alcañiz, and R. Masot, "Selective Shunt Active Power Compesator Applied in Four-Wire Electrical Systems based on IEEE Std.1459" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 23,pp 2563-2574, Sept 2009

- [41] S. Orts Grau, F.J Gimeno-Sales, Abellan, S. Seguí-Chilet, M. Alcañiz and R. Masot “Selective Compensation in Four-Wire Electric Systems Based on a New Equivalent Conductance Approach”. IEEE Trans. On Industrial. Electronics, Vol 56,pp 2862-2874, Jul 2009
- [42] W.V. Lyon, “Reactive power and unbalanced circuits,” Electrical World, pp. 1417-1420, Jun. 1920.
- [43] L. S. Czarnecki, S. M. Hsu, G. Chen, “Adaptive balancing compensator”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1663-1669, Jul. 1995.
- [44] L. S. Czarnecki, S. M. Hsu, “Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions”, IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 141, no. 4, pp. 177-185, Jul. 1994.
- [45] Manuel C. Rubio, “Eficiencia energética en edificios”, Técnica Industrial 25, pp. 18-23, Diciembre 2003.
- [46] T. F. Chan, L. L. Lai, “Steady-State analysis and performance of a stand-alone three-phase induction generator with asymmetrically connected load impedances and excitation capacitances”, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 16, no. 4, pp. 327-333, Dec. 2001.
- [47] V. León, J. Giner, J. Montañana, A. Cazorla, “Ineficiencias de los sistemas eléctricos: efectos, cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia”, Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2001-4292, I.S.B.N. 84-9705-121-1.
- [48] S. Seguí, “Contribución a la mejora de la eficiencia y al ahorro energético en instalaciones eléctricas desequilibradas y lineales, con neutro”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, 2004.
- [49] F.J Gimeno “Contribución a la mejora de la eficiencia y a la calidad en el suministro en centrales de energía solar fotovoltaica, en régimen permanente” Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia 2003

- [50] V. León, J. Giner, J. Montañana, A. Cazorla, "Cortes en el suministro de energía eléctrica: una solución a la sobrecarga de los transformadores de CT.", *Mundo Electrónico*, nº 327, pp. 34-38, Enero 2002.
- [51] J. H. Chen, W. Lee, M. Chen, "Using a static var compensator to balance a distribution system", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 2, pp. 298-304, Mar./Apr. 1999.
- [52] T. Brekken, N. Mohan, "A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions", *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*, I.S.B.N. 0-7803-7754-0/03, 2003.
- [53] J. Fraile, "Electromagnetismo y circuitos eléctricos", *Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, ISBN 84-7493-131-2.
- [54] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, "Power System Harmonics", *John Wiley & Sons*, 1985.
- [55] L. S. Czarnecki, "Distortion power in systems with non-sinusoidal voltages", *IEE Elect. Power Applicat*, vol. 139, pp. 276-280, 1992.
- [56] E. F. Fuchs, D. J. Roesler, K. P. Kovacs, "Aging of electrical appliances due to harmonics of the power system's voltage", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 1, no. 3, pp. 301-307, Jul. 1986.
- [57] R. Arseneau, "Application of IEEE standard 1459-2000 for revenue meters", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 87-91, Jul. 2003.
- [58] N. Locci, C. Muscas, S. Sulis, "On the Measurement of Power-Quality Indexes for Harmonic Distortion in the Presence of Capacitors". *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 5, pp. 1871-1876, Octubre 2007.
- [59] G. N. Stenbakken, T. L. Nelson, B. C. Waltrip, D. I. Bergman, "NIST program for traceable power and energy measurements under non-sinusoidal waveform conditions",



- [60] L. Cristaldi, A. Ferrero, S. Salicone, “A distributed system for power quality measurement”, Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 2001, pp. 2130-2135, Mayo 2001.
- [61] R. Arseneau, “Calibration system for power quality instrumentation”, Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 1437-1440, 2002.
- [62] S. Orts, F.J. Gimeno-Sales, A. Abellán, S. Seguí-Chilet, M. Alcañiz, and R. Masot, “Achieving maximum efficiency in three-phase systems with a shunt active power compensator based on IEEE Std. 1459,” IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp. 812–822, Apr. 2008.
- [63] Montañaña Romeu Joaquin, “Medida integral de la eficiencia en el suministro de la energía eléctrica en baja tensión”. Universidad Politécnica de Valencia, departamento de Ingeniería Eléctrica. Tesis doctoral 1999.
- [64] UNE-EN 62052-11 “Equipos de medida de la energía eléctrica (ca) – Requisitos generales, ensayos y condiciones de ensayo – parte 11: Equipos de medida”.
- [65] UNE-EN 62053-22 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a) – Requisitos particulares – parte 22: contadores estáticos de energía activa (clases 0.2S y 0.5S)”.
- [66] UNE-EN 62053-21 “Equipos de medida de la energía eléctrica (c.a) – requisitos particulares – parte 21: contadores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)”.
- [67] UNE-EN-61000-3-2. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada inferior o igual a 16 A por fase).
- [68] IEC-61000-3-4. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-4: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada superior a 16 A por fase).
- [69] Antonio Cataliotti, Valentina Consentino, Salvatore Nuccio, “The Measurement of Reactive Energy in Polluted Distribution Power Systems: An Analysis of the Performance of Commercial Static Meters” IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 23 no 3 July 2008.

- [70] L. Cristaldi, A. Ferrero, S. Salicone, "A distributed system for power quality measurement", Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 2001, pp. 2130-2135, Mayo 2001.
- [71] R. Arseneau, "Calibration system for power quality instrumentation", Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 1437-1440, 2002.
- [72] R. Arseneau, "Application of IEEE standard 1459-2000 for revenue meters", IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 1, pp. 87-91, Jul. 2003.
- [73] C. Gherasim, J. Van den Keybus, J. Driesen, R. Belmans, "DSP Implementation of Power Measurements According to the IEEE Trial-Use Standard 1459". IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 4, pp. 1086-1092, Aug. 2004.
- [74] J.Driesen, T Van Craenenbrock, R. Reekmans, D.Van Dommelen "Analyzing time-varying power system harmonics using wavelet transform" in Proc. Instrumentation Measurement Technology Conf.1996, Vol.1, pp.474-479, IMTC-96
- [75] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary "A New Perspective for the IEEE Standard 1459-2000 Via Satationary Wavelet Transform in the Presence of Nonstationary Power Quality Disturbance" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.23, no 4, Octover 2008.
- [76] Subash Kashyap , Ashesh K Singh, " Most Suitable Mother Wavelet form Measurement of Power System Harmonics Using DWT in View of IEEE Standard 1459-200". IEEE Trans on Power Delivery, Vol 23 no1 April 2008.
- [77] H. Monsefa , S. Lotfifard, "Internal Fault Current Identification based on Wavelet Transform in Power Transformers" Electric Power Systems Research, Volume 7, Issue 12, October 2007, Pages 1637-1645.
- [78] S. Santoto, E.J. Powers, W.M Grady, P. Hofmann, "Power quality assesement via wavelet transform for power quality analysis". IEEE Tran.Power.Del.vol.11 no.2, pp924-930, Apr.1196.
- [79] T. Tarasiuk,"Hybrid wavelet-fourier method for harmonic and harmonic subgroups measurement-case study" IEEE Trans.Power Del.Vol 22, no1,pp 4-17, Jan.2007.

- [80] S.Chen, H.Y.Zhu, "Wavelet Transform for Processing Power Quality Disturbance". ERASIP Journal on Advances in Signal Processing. Vol 7, 2007. Article ID 47695, 20Pages, Feb. 2007.
- [81] J.C. Pesquet, H. Krim, H. Carfantan "Time-Invariant orthonormal wavelet representations", IEEE Trans. Signal. Process, Vol 44 no.8, pp. 1964-1970, Aug.1996.
- [82] Vladimir V. Terzija, Vladimir Stanojević, Marjan Popov, Lou Van der Sluis, "Digital Metering of Power Components According to IEEE Standard 1459-2000 Using the Newton-Type Algorithm", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol 56 No6, December 2007.
- [83] C. Gherasim "DSP Implementation of power measurements according to the IEEE trial-Use Standard 1459" IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol.53 no4, pp 73-78 Aug.2004.
- [84] A. Girgis, J. Qui, "Measurement of the parameters of slowly time varying high frequency transients", IEEE Trans. Instruments. Meas., Vol 38, no6 , pp 1057-1063. Dec.1989.
- [85] P.K. Dash "An extended complex Kalman filter for frequency measurement of distorted signals" IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol 49, no.4, pp 746-753, Aug.2000.
- [86] V. Terzija, M. Djuric, B. Kovacevic, "Voltage phasor and local system frequency estimation using Newton Type Algorithm", IEEE Trans. Power. Del.Vol9, No3, pp 1368-1374, Jul 1994.
- [87] Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino, Salvatore Nuccio "A Virtual Instrument for the Measurement of IEEE Std.1459-2000 Power Quantities". IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol.57, No1, January 2008.
- [88] M. Aiello, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio "A selfsynchronizing instrument for harmonic sources detection in power systems", IEEE Trans. Instrume. Meas. Vol 54, No1, pp15-23, Feb 2005.
- [89] A Cataliotti , V. Cosentino, S Nuccio " A time domain approach for IEEE Std. 1459-2000 powers measurement in distorted and unbalanced power systems" in proce.IMTC, Como, Italy, May 20-22, 2004, pp 1388-1393.

- [90] M. Aiello, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio “Synchronization techniques for power quality instruments” in Proc.IMTC, Como, Italy May 20-22, 2004, pp.1399-1404.
- [91] A. Ferrero, G. Superti-Furga, “A new approach to the definitions of power components in three-phase systems under non sinusoidal conditions” IEEE Trans. Instrum. Meas, Vol 40, no3, pp 568-577 jun 1991.
- [92] A. E. Emanuel, D. L. Milanez, “Clarke’s alpha, beta and zero Components: a possible approach for the conceptual design of instrumentation compatible with IEEE Std. 1459-2000”, Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMCT-2004), pp. 1614–1619, May 2004.
- [93] A. Nabae, T. Tanaka, “A new definition of instantaneous active reactive current and a power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three phase circuits”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1238–1243, Jul. 1996.
- [94] A. E. Emanuel, D. L. Milanez, “Clarke’s alpha, beta and zero Components: a possible approach for the conceptual design of instrumentation compatible with IEEE Std. 1459-2000”, Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMCT-2004), pp. 1614–1619, May 2004.
- [95] P.S Filipski, P.W. Labaj, “Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, no 4, October 1992.
- [96] R.Arseneu. “Aplication of IEEE Standard 1459-2000 for Revenue Meters” IEEE 2003 0-7803-7989-6.
- [97] E. Jacobsen, R. Lyons, “The sliding DFT”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 20, no. 2, pp. 74-80, Mar. 2003.
- [98] K. Sozanski, M. Jarnut, “Three phase power filter using the sliding DFT control algorithm”, European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2005, art. no. 1665635.

- [99] UNE-EN 61000-4-7 “Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicables a las redes de suministro, y a los aparatos conectados a éstas.”
- [100] M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, “A signal processing module for power system applications”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1118–1126, Oct. 2003.
- [101] A. G. Exposito, J.A.R. Macias, “Fast harmonic computation for digital relaying”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1263-1268, Oct. 1999.
- [102] H Awad, J. Svensson, M. Bollen. “Phase-Locked Loop for Static Series Compensator”. EPE 2003. Toulouse.
- [103] S. K. Chung. “Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems”. IEEE Proceedings Power Electronics Applications, vol. 147, no. 3 May 2000 Page(s): 213-219.
- [104] V.Kaura, V.Blasko. “Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions”. IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 33, no.1, January/February 1997. Page(s): 58-63.
- [105] Ogata Katsuhiko, “Discrete-time control systems”, Prentice Hall , cop, 1995.
- [106] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, “Power electronics: converters, applications and design”, John Wiley and Sons, 1995.
- [107] E. Bueno, F.J. Rodriguez, F. Espinosa, S. Cobreces. “SPLL Desing to flux Oriented of a VSC Interface for Wind Power Applications”. 31<sup>St</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON’2005.
- [108] UNE-EN 50160 “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”.
- [109] Emilio Bueno Peña, “Optimización del comportamiento de un convertidor de tres niveles NPC conectado a la red eléctrica” Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Electrónica. Tesis doctoral 2005

- [110] Mihai Ciobotaru, Remus Teodorescu and Frede Blaabjerg, “ A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator”
- [111] Joaquin Eloy-García Carrasco “Control Directo de Potencia de Convertidores Electrónicos Conectados a la Red” Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid Departamento de Ingeniería Eléctrica. Julio de 2007.
- [112] T.-N. Le, “Kompensation Schnell Veränderlicher Blindströme Eines Drehstromverbrauchers,” Archiv für Elektrotechnik, vol. 11, no. 8, pp. 249–253, 1989.
- [113] Luis Serrano Iribarnegaray “Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas” ED. Marcombo 1989 ISBN: 8426707637
- [114] J. Svensson “Synchronisation methods for grid-connected voltage source converters” IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol.148, no.3, May 2001. Page (s): 229-235.
- [115] R. Otterten, A. Peterson, K. Pietilainen, “Voltage Sag Response of PWM rectifiers for Variable-Speed Wind Turbines”. 2004 Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie 2004), Trondheim, Norway, June 13-16, 2004.
- [116] Salvador Orts Grau “Sistema de compensación mediante filtro activo de potencia con sistema de obtención de las corrientes de referencia selectivo utilizando control 3D-3B de la etapa de potencia. Aplicación a sistemas industriales a 4 hilos” Universidad Politécnica de Valencia, departamento de Ingeniería Electrónica. Tesis doctoral 2008
- [117] Fco. J. Gimeno, S. Seguí; “Procesador digital de señal DSP TMS320LF240x. Arquitectura y aplicaciones”; Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia; ISBN: 84-9705-451-2.
- [118] F. J. Gimeno, S. Seguí, S. Orts, “Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño”, Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Ref: 2002-648 (2002).
- [119] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, F. Blaabjerg, “Control in power electronics”, Academic Press, Elsevier Science (USA), 2002.
- [120] <http://www.ti.com>.







