

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Departamento de Ingeniería Eléctrica



**Modelos eléctricos de respuesta de cargas: obtención
y aplicación a la identificación de usos finales en bajos
niveles de agregación**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D. Juan Álvaro Fuentes Moreno

DIRIGIDA POR:

Dr. D. Antonio Gabaldón Marín

CARTAGENA, 2001

Agradecimientos

El problema de los agradecimientos, es que el que se los lee, es porque piensa que tal vez debiera aparecer en ellos. Si está en ellos, entonces quedo bien, pero si no, quedo fatal.

Por eso, para no disgustar a nadie, doy las gracias públicamente a todos los que con sus acciones han facilitado, aportado, impulsado, aguantado, y vete a saber cuantas cosas más, la realización de esta tesis.

Y, para que sepas que no me olvidé, a ti te lo agradezco especialmente.

A mis familias

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE	I
FIGURAS.....	III
TABLAS.....	VII
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
I.1.- OBJETIVOS DE LA TESIS.....	1
I.2.- ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	3
II.- COMPOSICIÓN DE LA CARGA Y SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	5
II.1.- INTRODUCCIÓN.....	5
II.2.- EVOLUCIÓN DE LA PLANIFICACIÓN	6
II.2.1.- <i>Planificación tradicional</i>	9
II.2.2.- <i>Planificación integrada de los recursos</i>	10
II.2.3.- <i>Planificación integrada basada en el valor del servicio</i>	12
II.3.- ESTUDIOS DE LA DEMANDA	13
II.3.1.- <i>Predicción de la demanda</i>	14
II.3.2.- <i>Composición de cargas en la demanda</i>	17
II.4.- MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LAS CARGAS.....	22
II.4.1.- <i>Estudios dinámicos</i>	23
II.4.2.- <i>Monitorización</i>	24
II.5.- CONCLUSIONES	31
II.6.- BIBLIOGRAFÍA	32
III.- MODELOS DE CARGA	35
III.1.- INTRODUCCIÓN	35
III.2.- SISTEMA FÍSICO: CARGAS ELÉCTRICAS	36
III.3.- OBSERVACIÓN: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	40
III.3.1.- <i>Generador de funciones</i>	41

III.3.2.- <i>Adquisición de datos</i>	45
III.4.- MODELO DEL SISTEMA: MODELOS DE CARGAS	49
III.4.1.- <i>Modelos estáticos</i>	53
III.4.2.- <i>Modelos armónicos</i>	69
III.4.3.- <i>Modelos físicamente basados</i>	90
III.5.- COMPARACIÓN DE MODELOS ARMÓNICOS Y FÍSICAMENTE BASADOS	102
III.6.- CONCLUSIONES	105
III.7.- BIBLIOGRAFÍA	106
IV.- IDENTIFICACIÓN DE CARGAS.....	111
IV.1.- INTRODUCCIÓN	111
IV.2.- MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE CARGAS	112
IV.2.1.- <i>Identificación de cargas por su consumo de activa y reactiva</i>	112
IV.2.2.- <i>Identificación de cargas por la corriente absorbida en un ciclo</i>	116
IV.3.- SOFTWARE DESARROLLADO PARA LA IDENTIFICACIÓN	121
IV.4.- ENSAYOS Y RESULTADOS	126
IV.4.1.- <i>Ensayos en laboratorio</i>	126
IV.4.2.- <i>Medidas de la corriente absorbida por aparatos de aire acondicionado</i>	132
IV.4.3.- <i>Estudio simulación cargas agregadas</i>	141
IV.4.4.- <i>Ensayos de identificación de cargas agregadas</i>	144
IV.5.- CONCLUSIONES	159
IV.6.- BIBLIOGRAFÍA	161
V.- CONCLUSIONES	163
V.1.- APORTACIONES DE LA TESIS	163
V.2.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	165
VI.- ANEXO A	167
VI.1.- OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL DESARROLLO EN SERIE DE FOURIER A PARTIR DE LA FFT	167
VII.- ANEXO B.....	173

FIGURA II.1 PLANIFICACIÓN TRADICIONAL.....	10
FIGURA II.2 PLANIFICACIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS	11
FIGURA II.3 PLANIFICACIÓN INTEGRADA BASADA EN EL VALOR DEL SERVICIO	12
FIGURA II.4 GESTIÓN DEL SUMINISTRO Y HORIZONTE DE PREVISIÓN	16
FIGURA II.5 OBJETIVOS DE FORMA DE LA CURVA DE CARGA.....	18
FIGURA III.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE UN MODELO	35
FIGURA III.2 CLASIFICACIÓN DE SEÑALES	38
FIGURA III.3 ARQUITECTURA HARDWARE DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS	42
FIGURA III.4 CLASES DESARROLLADAS PARA LA GENERACIÓN DE FUNCIONES	44
FIGURA III.5 DIAGRAMA DE SECUENCIA DE LA APLICACIÓN GPIB	45
FIGURA III.6 DIAGRAMA DE SECUENCIA DE LA APLICACIÓN DAQ.....	47
FIGURA III.7 CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE CARGA SEGÚN LA DINÁMICA.....	50
FIGURA III.8 CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE CARGA SEGÚN EL DOMINIO	51
FIGURA III.9 COEFICIENTES DEL MODELO POLINOMIAL PARA LAS LÁMPARAS ELECTRÓNICAS.....	60
FIGURA III.10 COEFICIENTES DEL MODELO EXPONENCIAL PARA P EN LAS LÁMPARAS ELECTRÓNICAS.....	63
FIGURA III.11 TENSIÓN Y CORRIENTE ABSORBIDA EN EL ENSAYO DE LINEALIDAD DE P Y Q.....	65
FIGURA III.12 POTENCIA ACTIVA ABSORBIDA POR DISTINTOS CIRCUITOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	68
FIGURA III.13 FORMAS DE ONDA DE LA CORRIENTE ABSORBIDA POR UN ORDENADOR CUANDO SE HACE VARIAR LA FASE DEL ARMÓNICO 9.....	77
FIGURA III.14 LUGAR GEOMÉTRICO DE LOS VALORES OBTENIDOS PARA Y_{71} CUANDO LA CARGA ALIMENTADA ES UN ORDENADOR.	79
FIGURA III.15 DIAGRAMA DE ACTIVIDAD DE LA APLICACIÓN ENSAYO.	81

FIGURA III.16 ERRORES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE TENSIÓN PARA EL BALASTO ELECTRÓNICO CIPESA.....	86
FIGURA III.17 ERRORES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE TENSIÓN PARA EL BALASTO ELECTRÓNICO CIPESA.....	87
FIGURA III.18 ERRORES OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE TENSIÓN PARA EL ORDENADOR COMPAQ DESKPRO (SUPERIOR) Y PARA EL BALASTO MAGNÉTICO (INFERIOR).	89
FIGURA III.19 RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN PARA LA BOMBILLA INCANDESCENTE Y LA CALEFACCIÓN.....	91
FIGURA III.20 MODELO FÍSICAMENTE BASADO PARA EL BALASTO MAGNÉTICO.	91
FIGURA III.21 INTENSIDADES MEDIDAS Y PREVISTAS EN ENSAYOS DEL ORDENADOR COMPAQ DESKPRO.	92
FIGURA III.22 MODELO FÍSICAMENTE BASADO CARGAS ELECTRÓNICAS.	93
FIGURA III.23 MODELO EQUIVALENTE DEL PUENTE DE DIODOS CUANDO TRABAJA EN RÉGIMEN DE INTENSIDADES DISCONTINUO.	93
FIGURA III.24 MÉTODO TRAPEZOIDAL DE INTEGRACIÓN.....	95
FIGURA III.25 INTENSIDAD ABSORBIDA POR EL ORDENADOR COMPAQ-DESKPRO CUANDO LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN ES PERFECTAMENTE SENOIDAL Y DE AMPLITUD 220V _{RMS}	98
FIGURA III.26 CIRCUITO APROXIMADO PARA EL CÁLCULO DEL VALOR INICIAL JUNTO CON LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN Y LA INTENSIDAD ABSORBIDA PARA UNOS VALORES DADOS.....	100
FIGURA III.27 ERROR CUADRÁTICO MEDIO OBTENIDO EN LOS ENSAYOS A TENSIONES REALES PARA LOS MODELOS DE 3 Y 4 PARÁMETROS, Y EL GENERALIZADO DE ADMITANCIAS CRUZADAS	104
FIGURA IV.1 POTENCIA CONSUMIDA POR DISTINTAS CARGAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.	113
FIGURA IV.2 ESCALONES DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DIBUJADOS EN EL PLANO PQ	114
FIGURA IV.3 DIAGRAMA DE CLASES DE LA APLICACIÓN IDENTIFICACIÓN	122
FIGURA IV.4 DIAGRAMA DE ACTIVIDAD DE LA TAREA IDENTIFICACIÓN	124
FIGURA IV.5 HOJA DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE IDENTIFICACIÓN DE CARGAS EN LABORATORIO	128
FIGURA IV.6 FORMAS DE ONDA DE LA CORRIENTE ABSORBIDA POR EL AIRE ACONDICIONADO FUJITSU	133

FIGURA IV.7 FORMAS DE ONDA DE LA CORRIENTE ABSORBIDA POR EL AIRE ACONDICIONADO FUJITSU	137
FIGURA IV.8 EVOLUCIÓN DE LAS AMPLITUDES, EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, PARA LAS FRECUENCIAS MÁXIMA Y CONTINUA, DEL ESPECTRO DE LA SUMA DE ENVOLVENTES MÁXIMOS Y MÍNIMOS PARA EL EQUIPO FUJITSU	138
FIGURA IV.9 FORMAS DE ONDA DE LAS MAGNITUDES DERIVADAS OBTENIDAS DEL ENSAYO DEL AIRE ACONDICIONADO FUJITSU	140
FIGURA IV.10.RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AGREGADO DE LA SEÑAL SEMM.....	143
FIGURA IV.11.CONSUMOS Y PORCENTAJES DE LA IDENTIFICACIÓN DE UNA DE LAS FASES DE LA ACOMETIDA, AGRUPADAS EN ILUMINACIÓN RESISTIVA Y ELECTRÓNICA.....	150
FIGURA IV.12.RESULTADOS DE LA IDENTIFICACIÓN, SIN FILTRAR Y FILTRADOS POR WAVELETS, REALIZADA CON LOS DATOS TOMADOS DEL CIRCUITO DE LA ACOMETIDA	153
FIGURA IV.13.RESULTADOS DE LA DESCOMPOSICIÓN, Y LA AGRUPACIÓN, PARA LOS CIRCUITOS MEDIDOS.....	154
FIGURA IV.14.FORMAS DE ONDA, DE LA ACOMETIDA Y DE LOS GRUPOS IDENTIFICADOS A PARTIR DE ÉSTA, Y ERROR PORCENTUAL DE LA DESCOMPOSICIÓN.....	155
FIGURA IV.15.DESCOMPOSICIÓN EN GRUPOS DE CARGA DE LOS CIRCUITOS MEDIDOS Y ESPECTRO DEL VALOR EFICAZ DEL SEMM PARA VARIAS CORRIENTES.	158
FIGURA IV.16.PREVISIÓN DE CARGA DE EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO UTILIZANDO EL VALOR EFICAZ DEL SEMM PARA DATOS TOMADOS DEL CIRCUITO N°1.	159

TABLA II.1 IMPACTO DE PROGRAMAS DSM, EN EEUU, PARA LA MODIFICACIÓN DE LA CURVA DE CARGA (GIGAWATIOS) [GELLINGS, 89]	19
TABLA II.2 PROYECTOS EUROPEOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN.....	27
TABLA III.1 COEFICIENTES ZIP (POLINOMIAL) DERIVADOS DE LAS MEDIDAS	58
TABLA III.2 COEFICIENTES EXP DERIVADOS DE LAS MEDIDAS.....	61
TABLA III.3 RESULTADO DEL ENSAYO DE LINEALIDAD.....	64
TABLA III.4 AMPLITUD, FASE Y DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE LAS TENSIONES DE ENSAYO REALES	82
TABLA III.5 AMPLITUD Y FASE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE LAS TENSIONES DE ENSAYO SIMULADAS.	83
TABLA III.6 NÚMEROS DE COMBINACIÓN, SU AMPLITUD RELATIVA Y SUPERPOSICIÓN UTILIZADA.	85
TABLA III.7 VALORES OBTENIDOS PARA EL PUENTE DE DIODOS.	102
TABLA IV.1 ESTADO DE CONEXIÓN/DESCONEXIÓN DE LAS CARGAS PARA CADA UNO DE LOS ENSAYOS	127
TABLA IV.2 POTENCIAS APROXIMADAS DE APARATOS ELECTRODOMÉSTICOS	131
TABLA IV.3 DISTINTOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS A CARGAS CON COMPRESORES.....	136
TABLA IV.4 POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA CARGA IDENTIFICADA EN UN SOLO CICLO	147
TABLA IV.5 PORCENTAJES DE CARGA, POR GRUPOS, AL MEDIODÍA.....	149
TABLA IV.6 POTENCIAS ASIGNADAS A LOS APARATOS DE AIRE ACONDICIONADO	157

I.- Introducción

I.1.- Objetivos de la tesis

El dato de la composición de la carga es de gran interés para las compañías eléctricas, usuarios e investigadores. Esta información puede ser utilizada por las compañías de dos formas distintas: estática y dinámica. La versión estática normalmente se utiliza para tareas relacionadas con la planificación de las actividades de la empresa. En cuanto a la dinámica, interesa en las tareas relacionadas con la operación del sistema.

Actualmente, la versión estática se utiliza sobre todo en los estudios de mercado y en los modelos de predicción de la demanda a largo plazo, pero el autor desconoce la utilización de este parámetro de forma dinámica en la operación del sistema.

La idea de intentar medir este dato de forma dinámica y a la vez económica surgió por el interés en conocer cuál era la proporción, sobre el total de la potencia demandada a un determinado nivel de agregación, de la potencia consumida por los aparatos de aire acondicionado. Disponer de este dato era importante, sobre todo, para el diseño de la estrategia de control de los ciclos de conexión/desconexión de cargas dentro de un programa de control de cargas, una de las alternativas DSM más importante para la reducción de los picos de demanda, tema sobre el que el grupo de investigación estaba trabajando.

La participación en el programa Europeo SAVE II permitió conocer la problemática relacionada con la medida de la información sobre usos finales de determinadas cargas eléctricas, que se hacían por medio de la medida del consumo, aparato por aparato, con sus consabidos costes económicos y dificultades operativas, y que, al ser un método invasivo podía influir sobre el uso que se pretendía medir.

Estos hechos fueron los que motivaron la investigación sobre la manera y forma de obtener este dato por otros medios que no fueran invasivos. Lo que sugería, por tanto, utilizar la información sobre la potencia activa y reactiva absorbida por el conjunto de cargas monitorizadas.

Tras la observación de que la actividad (conexiones y desconexiones de los distintos equipos) medida al nivel de centro de transformación era demasiado elevada como para utilizar sólo la información procedente de la medida de la potencia activa y la reactiva, se cambió entonces el planteamiento inicial y se decidió utilizar la forma de onda de la corriente total absorbida; descomponiendo ésta entre las formas de onda de las corrientes absorbidas por las cargas eléctricas aguas abajo.

Para poder realizar esta descomposición se necesitaban modelos que permitieran representar, lo más fielmente posible, la forma de onda de la corriente instantánea absorbida por las cargas. Dada la gran variedad de cargas que se pueden utilizar en niveles residenciales y comerciales, se necesitaban modelos que fueran lo suficientemente flexibles como para dar cabida a cargas con principios físicos muy distintos, y lo suficientemente

precisos como para predecir lo mejor posible la forma de onda en estado estacionario. Esto derivó la investigación a modelos armónicos del tipo matriz de admitancias, los cuales tienen la ventaja de ser modelos muy genéricos y además predecir los armónicos de corriente.

En el desarrollo de la tesis se necesitaba implementar las aplicaciones informáticas que dieran soporte a todo el proceso, desde la obtención de los modelos de las cargas hasta el proceso completo de identificación. Puesto que se quería que los datos fueran procesados en tiempo real, y por tanto era deseable la máxima velocidad de ejecución, se programó todo el software en C++, que garantiza máxima velocidad pero que, al no ser una herramienta de propósito específico, obligó a desarrollar todos los algoritmos de tratamiento de la señal, además de la adquisición de datos, y representación gráfica de curvas.

Finalmente, los modelos y el proceso de identificación realizado se debían contrastar, hasta donde fuera posible, con la realidad, por lo que se desarrolló un protocolo de medidas a nivel de laboratorio y de campo (CT).

Por lo comentado, el objetivo principal de la tesis era la obtención de la máxima información posible sobre usos finales de cargas a un nivel de agregación bajo. De estos usos, la obtención de los consumos de los aparatos de aire acondicionado era de especial interés.

I.2.- Estructura de la tesis

Se ha estructurado el documento de la tesis en tres partes, más o menos independientes entre sí. Por este motivo se decidió que cada una de ellas tuviera sus propias conclusiones y bibliografía.

La primera parte, “Composición de la carga y sistemas eléctricos”, es el resultado de la investigación realizada para la identificación de los usos y necesidades del dato de la composición de la carga en los distintos niveles y actividades de la empresa, así como de la forma de obtener ese dato actualmente y, previsiblemente, en el futuro.

La segunda parte, “Modelos de carga”, trata sobre la investigación desarrollada en busca de modelos idóneos para nuestros propósitos y el proceso de obtención de sus parámetros.

Finalmente se comparan, individualmente y entre ellos, sus predicciones con medidas de cargas reales para conocer sus debilidades y puntos fuertes

La tercera parte, “Identificación de cargas”, propone una serie de métodos de identificación no invasivos que se pueden aplicar, además de presentar los ensayos y resultados obtenidos, con los que se pretende analizar las propiedades de cada uno de ellos.

Finalmente, las conclusiones resumen las aportaciones de la tesis y presentan posibles líneas de investigación futuras.

II.- Composición de la carga y sistemas eléctricos

II.1.- Introducción

La diferencia fundamental entre ciencia básica e ingeniería, estriba en que el ingeniero debe aplicar los conocimientos científicos a la invención, perfeccionamiento y utilización de la técnica industrial. Esta diferencia, no sería tan importante si no fuera porque toda actividad industrial suele ser consecuencia de una actividad empresarial, que restringe las posibles soluciones técnicas a aquellas que son viables económicamente y, de las viables económicamente, el ingeniero debe decidir aquellas que minimicen o maximicen el criterio de optimización que mueva a la empresa y por el cual se creó, cumpliendo al mismo tiempo con las restricciones legislativas y medioambientales existentes para su funcionamiento. Hay que destacar que este criterio varía según la motivación que llevó a la creación de la empresa. Por ejemplo, una empresa pública sigue el criterio de servir a las personas mientras que una privada suele seguir el criterio de máximo beneficio.

Al estudiar la historia de los Sistemas Eléctricos de Potencia se puede comprobar cómo uno de los grandes motores de cambio ha sido el entorno legislativo. Este entorno ha ido cambiando según los intereses políticos del momento haciendo que, aquellas soluciones que eran óptimas según un determinado entorno dejen de serlo al cambiar éste, forzando a la empresa a un cambio en la dirección deseada. En resumen, la historia nos muestra como los objetivos políticos han ido modificando la legislación y con ello las reglas de juego de mercado y cómo, ante las nuevas reglas, las empresas modifican sus criterios de optimización.

El marco que condiciona a la empresa eléctrica actualmente en Europa, es la liberalización. Existen varios motivos políticos para esta liberalización, entre los que se encuentran **[DGET]**:

- Asegurar el suministro de energía para el futuro.
- Integrar los mercados energéticos para mejorar la competencia y promover el empleo.
- Compatibilizar objetivos energéticos y medioambientales.

Lógicamente también existen motivos económicos, puesto que si las empresas de la Comunidad Europea deben competir en el mercado internacional y su competitividad depende de los costes del suministro energético, una liberalización del mercado posibilitará una competencia que reduzca estos costes y con ello, se garantizará la competitividad de las empresas y el mantenimiento del empleo.

Y por último existen motivos jurídicos, ya que el Tratado de la Unión define al mercado interior como "una zona sin fronteras interiores en la que se garantice la libre circulación de mercancías, personas, servicios y capital conforme a lo dispuesto en el Tratado". La electricidad como tal está considerada como una mercancía (como ha declarado el Tribunal de Justicia de las Comunidades Europeas), la venta de electricidad, por ende, un servicio, y la construcción de una central eléctrica el ejercicio de un derecho para establecerse en cualquier parte de la Unión Europea.

Por estas tres razones, se está forzando a los mercados eléctricos en toda la Unión Europea a ser más competitivos suprimiendo derechos exclusivos y monopolios [Klom, 96].

El final de este proceso de liberalización todavía está lejos, pero es evidente que tendrá repercusiones en todas las actividades de las empresas eléctricas y en la organización de éstas, es decir en la planificación. El estudio de la planificación a lo largo de la historia del mercado, nos ayudará a entender mejor el papel que tienen los estudios de la demanda de la energía en la industria y cómo, conforme ha ganado en complejidad la planificación, mayor y mejor información sobre la demanda es necesaria para hacer planes realistas.

El estudio del usuario final, y por tanto de la demanda desagregada, es cada vez un tema de mayor actualidad y, por tanto necesario para aquellas empresas que quieran permanecer competitivas en este mercado en continua evolución.

II.2.- Evolución de la planificación

El sistema eléctrico de potencia es un sistema dinámico, caracterizado por la imposibilidad de almacenar la energía eléctrica en grandes cantidades de forma económica y práctica, motivo por el que se debe cumplir, en cada instante, el equilibrio entre la potencia generada y la potencia demandada, produciéndose en caso contrario inestabilidades en el

sistema que si no son corregidas, pueden dar lugar en el peor de los casos a la total falta de suministro a los consumidores.

La necesidad de mantener este equilibrio lleva a la realización, por parte de la compañía, de un conjunto encadenado de actividades, cada una en su instante de tiempo adecuado y algunas con bastante antelación con respecto a otras, que han de ser adecuadamente planificadas para aprovechar de forma óptima los recursos disponibles por la compañía.

Todas las aproximaciones realizadas al problema de la planificación han perseguido siempre el objetivo de adaptar el suministro de energía a la demanda, satisfaciendo al mismo tiempo algún criterio de optimización [Smith, 89], y conforme ha ido cambiando el entorno en que debía desarrollarse el mercado así ha ido cambiando la forma de planificación.

Históricamente, se pueden reconocer cuatro fases diferenciadas en la evolución del mercado eléctrico y que son:

- Entorno estable regulado.
- Entorno inestable regulado.
- Entorno competitivo regulado.
- Entorno competitivo liberalizado.

No necesariamente todos los mercados han pasado, o pasarán, por todas las etapas, pero es una clasificación en la que se pueden ver reflejados la mayoría de los mercados eléctricos.

Si se particulariza al mercado de EEUU, por ser del que más información disponemos, se puede ver que el **entorno estable regulado** se dio antes de la década de los 70 y se caracterizaba porque la curva de predicción de la demanda a lo largo del tiempo mostraba tal regularidad, que ésta era fácil de realizar. En ese entorno, el aumento del suministro tenía la ventaja del buen aprovechamiento de las economías de escala y, por lo tanto, generalmente se conseguían tarifas mas bajas para los consumidores. Una situación que era bien recibida tanto por los legisladores como por los consumidores.

Fue la década de los 70 la que vivió el **entorno inestable regulado**, viniendo la inestabilidad a partir de la crisis del petróleo y de la influencia que ésta tuvo en la economía, provocando el aumento de la inflación, el incremento de los costes de construcción y la

caída del crecimiento de la demanda. Además, también comenzó a desarrollarse una mayor sensibilidad por los temas medioambientales. El resultado combinado de estos factores fue el incremento de las tarifas. Para intentar minimizar en lo posible este incremento, y al mismo tiempo poder influir en la curva de crecimiento de la demanda, se implantaron las primeras acciones de gestión de la demanda, inicialmente en forma de conservación de la energía y gestión de cargas, pero hay que decir que gran parte del ímpetu inicial que motivó la aplicación de estas medidas eran debidas a las presiones políticas que las empresas asumían.

La llegada de la reglamentación PURPA (Public Utility Regulatory Policy Act) en 1978, donde se fomentan medidas como los programas para el uso eficiente de la energía y el ahorro energético, la apertura a la competencia de los productores independientes de potencia (IPP) junto con los proveedores de servicios, y la liberalización del mercado eléctrico y del gas natural al por mayor, lleva al mercado eléctrico al **estado competitivo regulado**. Ahora, la aparición de la competencia entre empresas y entre distintas fuentes de energía da lugar a un nuevo fenómeno: el cliente podía abandonar a la compañía por otra con precios más baratos.

Esta competencia era el objetivo que se pretendía acelerar cuando en 1996 se aprobaron por parte del FERC (Federal Energy Regulatory Commission) dos nuevos decretos que redefinían la forma en que la electricidad se vendería en el mercado al por mayor. El más importante era el que requería a las compañías eléctricas a ofrecer tarifas de acceso a sus redes de transporte a terceras empresas. El segundo decreto, animaba a las “power pools”, entidades establecidas para coordinar las operaciones a corto plazo de varias empresas, a convertirse en operadores independientes del sistema. La liberalización se completó con la desregulación del mercado al por menor, pudiendo el consumidor elegir a su proveedor de energía. Se inicia el **entorno competitivo liberalizado**.

Ante estas modificaciones, las empresas fueron adaptando sus esquemas de planificación y, conforme evolucionaban, ganaban en complejidad. Básicamente se pueden clasificar en:

- Planificación tradicional.
- Planificación integrada de los recursos.
- Planificación integrada basada en el valor del servicio.

En los apartados siguientes, se verá cómo, en cada etapa, la información necesaria sobre la demanda para poder planificar, es cada vez mayor, pasando de una información totalmente agregada en la planificación tradicional, a un mayor conocimiento del comportamiento de la respuesta de la demanda ante las acciones de las compañías en la planificación integrada de los recursos, y finalizando con la necesidad de estudiar la demanda a un nivel de agregación de usuario final, para poder presentar al mercado nuevos productos, diferenciados de la competencia, que se adapten mejor a las necesidades y preferencias de los clientes en la planificación basada en el valor del servicio.

II.2.1.- Planificación tradicional

Esta forma de planificar es la más común en los entornos estables y regulados por ser la de más fácil aplicación por parte de la compañía.

También conocida como la gestión del suministro, su principio básico se basaba en que la demanda futura era prevista, por parte de la compañía, con bastante fiabilidad y, puesto que su crecimiento era estable en el tiempo y ésta tenía una posición monopolística en el mercado sin perspectivas de cambio cercanas, satisfacía a la demanda utilizando la mezcla óptima de los recursos eléctricos disponibles (centrales nucleares, carbón, fuel-oil, hidráulicas, etc.).

La optimización tenía en cuenta factores como: la fiabilidad del sistema, las prestaciones de las centrales y las necesidades financieras, y como objetivo la minimización de las necesidades de renta de las compañías. Se pretendía ingresar la mínima cantidad de dinero necesaria para pagar los costos de operación y los costos de capital para el funcionamiento del sistema eléctrico.

Esta situación se veía favorecida por los bajos tipos de interés, así como por los bajos costos de construcción, que permitían una previsión acertada tanto de los costes de ampliación del sistema como financieros.

Por lo tanto, al predecir correctamente la demanda, lo que es lo mismo que decir con los ingresos, y predecir correctamente los costes, la planificación de la gestión del suministro conseguía precios del kWh bajos, aprovechándose de las economías de escala asociadas con las construcciones de grandes centrales eléctricas. El problema de la

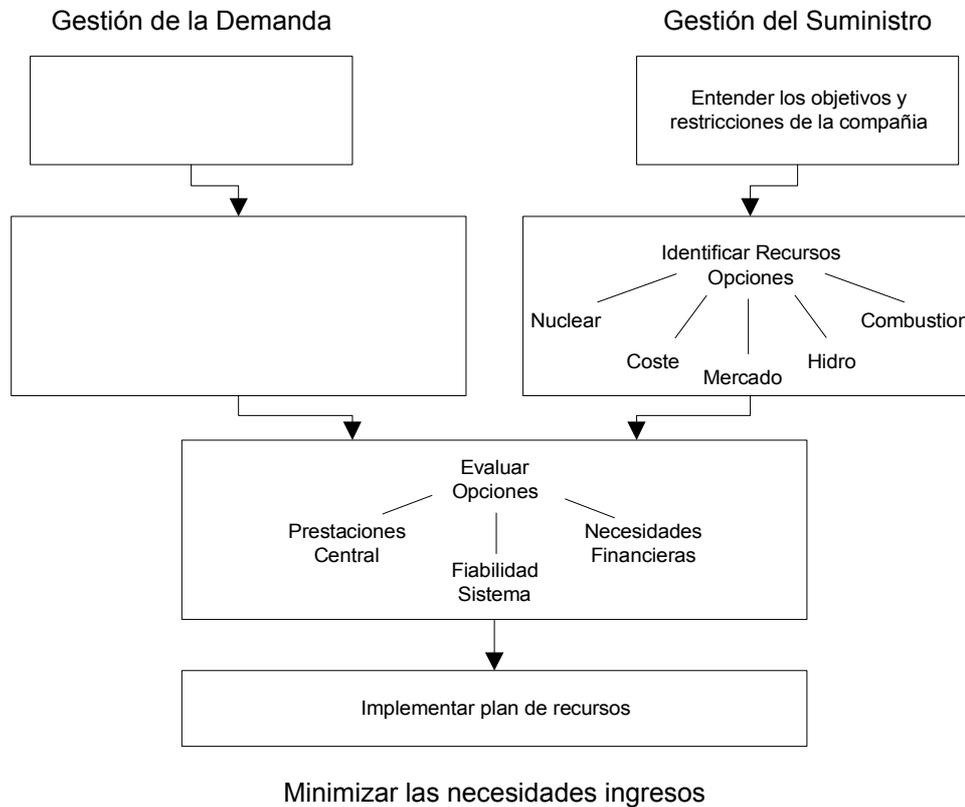


Figura II.1 Planificación tradicional

planificación se resumía en saber cuantas centrales y de que tipo se debían construir para minimizar los costos [Schweppe, 88].

II.2.2.- Planificación integrada de los recursos

La elevación de los precios de los derivados del petróleo, consecuencia de la crisis del 73, y la redistribución resultante en los precios de los bienes y servicios, sometieron a las economías de los países industrializados a una gran tensión cuya consecuencia económica más llamativa fue la aparición de cifras de inflación con dos dígitos y, por lo tanto, con las subidas correspondientes de los tipos de interés. Estas subidas afectaron de lleno a las compañías eléctricas, que se vieron obligadas a subir las tarifas. Subidas, influidas tanto por el aumento de sus costos operativos, como de los financieros.

El aumento en el precio de la energía eléctrica tuvo como resultado una disminución de la demanda, como era de esperar, que junto con las dudas que los políticos comenzaban a tener, en cuanto a la expansión de la generación utilizando energías consideradas como no-limpias (nuclear y carbón principalmente), y el rápido aumento de los costos del capital, propiciaron la maduración de una serie de ideas que tenían como objetivo influir en la curva de demanda, para así poder hacer frente a la probable amenaza de falta de capacidad

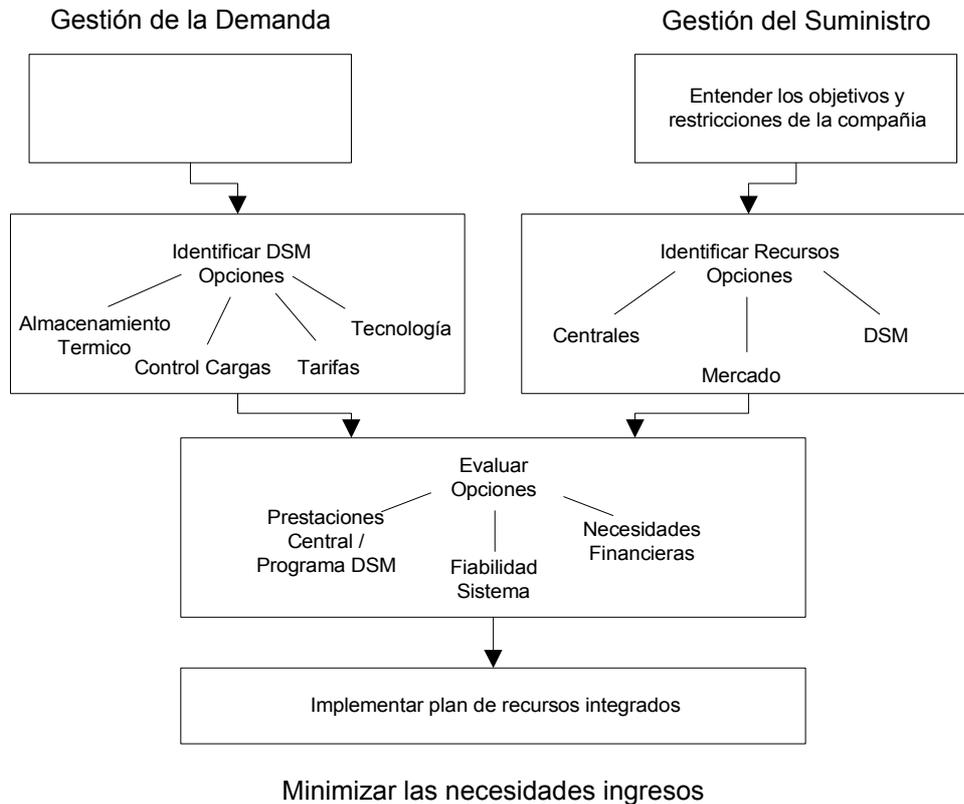


Figura II.2 Planificación integrada de los recursos

de suministro del sistema, debido a los retrasos en la construcción de las centrales en proyecto [Rabl, 88].

Al conjunto de actividades realizadas por la compañía eléctrica con la idea de influir en la cantidad y en el momento en que la energía eléctrica se consumía, se denominó gestión de la demanda (DSM), y pronto se vió que era una alternativa a la planificación del suministro tradicional.

A partir de entonces, la planificación del suministro y de la demanda empezaron a ser consideradas al mismo nivel, comparando los costos y beneficios que la aplicación de las distintas alternativas ofrecidas por ambas aproximaciones tenían y seleccionando, de entre las posibles, aquellas que minimizaban las necesidades de renta de las compañías. El mismo objetivo que en la planificación tradicional, ya que la posición monopolística de éstas en el mercado no había variado.

Precisamente, la fortaleza monopolística de las empresas hizo que, inicialmente, las primeras acciones de gestión de la demanda fueran diseñadas sin tener en cuenta, ni las preferencias, ni los deseos de los consumidores. Como ejemplo se puede citar la gestión de cargas, en donde las órdenes de control van directamente de la compañía a las cargas del

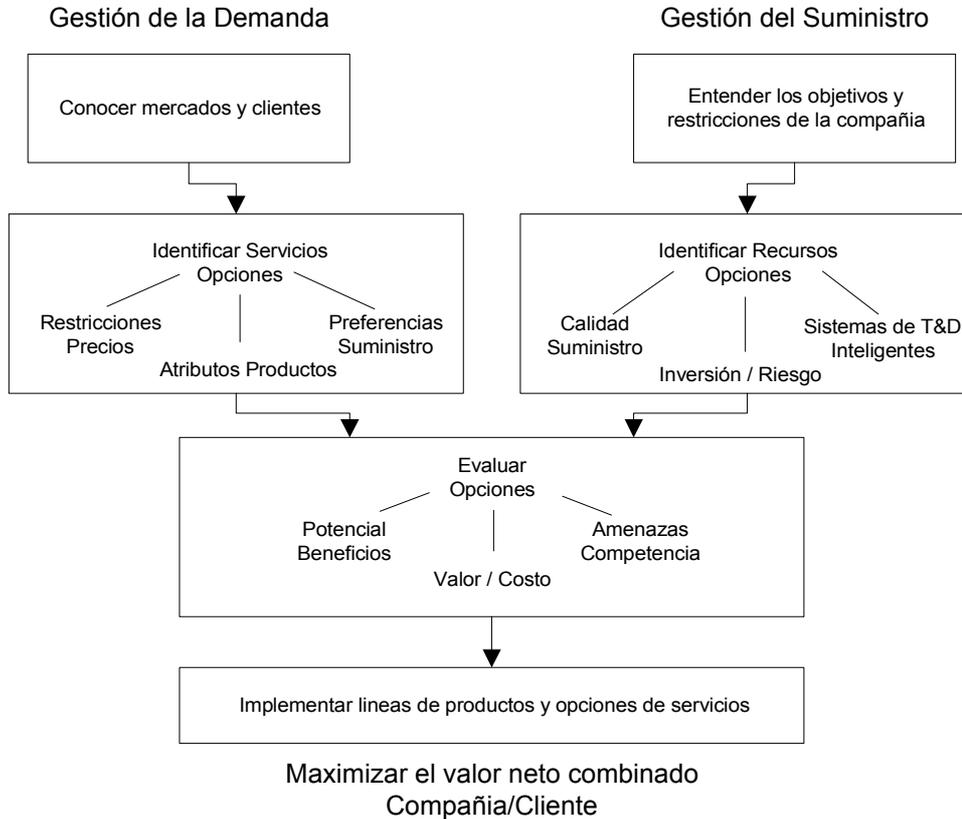


Figura II.3 Planificación integrada basada en el valor del servicio

cliente sin que éste pueda influir en la señal de control (unidireccional). La compañía sólo espera del cliente que pueda soportar sus acciones a cambio de una compensación económica reflejada en la tarifa, pero no busca adaptarse a las necesidades, preferencias ni deseos de éste.

II.2.3.- Planificación integrada basada en el valor del servicio

El concepto de valor del servicio aparece, en cualquier mercado, cuando el proveedor de un servicio reconoce que el valor de éste, puede ser, en función del cliente, distinto del coste asignado desde el punto de vista técnico. Este valor del servicio puede no ser aplicado cuando en un mercado existe un monopolio que lo distorsiona, como ha ocurrido con el eléctrico. En ese caso, se puede cobrar por un bien o servicio un precio fijado por otros parámetros.

El proceso de liberalización del mercado eléctrico divide un mercado, en el que existe un monopolio de oferta, en varios (generación, transporte y distribución) en el que, además, pueden operar muchas empresas, con la idea de que la competencia entre ellas abarate el precio de la energía al usuario final. Lo que antes llegaba al cliente como un

producto elaborado por una sola empresa, ahora puede pasar por varias. Consecuencia de esto es que, las empresas que quieren operar en este mercado se enfrentan al problema de asignar un precio a sus servicios y, es entonces, cuando es necesario conocer el valor del servicio.

La planificación basada en el valor del servicio es natural en un mercado competitivo y contempla también la posibilidad de que, para satisfacer al mismo tiempo a la demanda y al entorno legislativo maximizando los objetivos de la compañía, sea necesario ofrecer un conjunto de productos eléctricos diferenciados, con distintos valores para el usuario. Un ejemplo podría ser un producto definido como: un suministro eléctrico con calidad excelente en donde el contenido armónico, posibles sobretensiones, falta de suministro, etc., estén por debajo de unos límites dados. Además, estos servicios pueden ser la llave para mantener o incrementar una posición de mercado si la competencia no los suministrara. Por último, la necesidad de diferenciación del servicio puede llevar a un exceso, en cuanto a número de ofertas que pueden desorientar al consumidor. Fijémonos si no, en el proceso de liberalización del mercado de telecomunicaciones. Por lo tanto es necesario que las compañías eléctricas, además de separar servicios, deben agruparlos en líneas de productos, que permitan al consumidor realizar la elección de aquellos servicios que más valor tengan para él.

La competencia entre empresas se realiza en el mercado, y el mercado son los consumidores. Las compañías deben unir sus ofertas de productos con los valores de sus clientes y encuadrarlos dentro del entorno legislativo. La planificación basada en el valor del servicio aborda todos estos factores [Smith, 89].

Finalmente, no cabe duda de que, en cualquier esquema de planificación, es imprescindible realizar estudios para conocer la demanda, sea con mayor o menor precisión, y así, utilizar esta información como entrada.

II.3.- Estudios de la demanda

Los estudios de la demanda se realizan principalmente para conseguir uno de los dos objetivos que se exponen a continuación. Por un lado, conocer cuál va a ser la cantidad de energía demandada en un futuro (predicción de la demanda agregada) y realizar en consecuencia, las actividades adecuadas de planificación y, por otro lado, para conocer cuál

es la utilización de la energía por los consumidores (demanda desagregada) con el objetivo de que los estudios de mercado resultantes mejoren los objetivos económicos, técnicos, etc.

II.3.1.- Predicción de la demanda

La predicción de la demanda agregada es el área de la ingeniería eléctrica encargada de dar respuestas al problema de predecir la cantidad de electricidad que será necesaria suministrar a un conjunto de clientes y en un horizonte futuro [Al-Alawi, 96]. Dentro de la predicción, se incluye tanto la predicción de la potencia consumida, como de la energía.

En función del tiempo, la predicción puede variar desde una escala de minutos a años, y, según el horizonte de futuro, se pueden clasificar en:

- Predicción a corto plazo.
- Predicción a medio plazo.
- Predicción a largo plazo.

Las predicciones a **corto plazo** deben tener un periodo de validez que puede ir desde los 15 minutos hasta varias horas, y sólo se predice la potencia demandada. El resultado de este estudio es la potencia consumida en cada instante deseado.

A **medio plazo** se debe predecir tanto la energía como la potencia, pretendiendo que su rango de validez alcance periodos que van desde las pocas semanas hasta unos pocos años. Los resultados se dan por meses.

También se debe predecir la energía y la potencia a **largo plazo**, pero ahora cambia el periodo de validez (de 5 a 25 años) y los instantes de cálculo, que ahora se dan por años. Otro resultado que es necesario conocer a largo plazo es la expansión geográfica de la demanda.

Entre las dificultades para obtener una predicción válida de la demanda está el gran número de parámetros de los que depende, de los que se pueden destacar los siguientes: el clima, el entorno socio-económico y la demografía.

Los modelos utilizados para abordar este problema se suelen clasificar en dos tipos:

- Modelos autónomos.
- Modelos condicionales.

En los **modelos autónomos** se pretende explicar el comportamiento del futuro basado en su crecimiento pasado. Entre las técnicas aplicadas están: técnicas estadísticas (análisis de series temporales), regresiones lineales, redes neuronales, etc. Estos tipos de modelos han dado buen resultado en la predicción a corto plazo y se basan en la búsqueda de una relación matemática entre la temperatura, la demanda y el tiempo.

En los **modelos condicionales** se pretende buscar la relación del crecimiento con otras variables, como pueden ser, los indicadores económicos o los basados en el uso final de las cargas eléctricas. Conforme la predicción se va alejando en el futuro, y la influencia de los factores climáticos va perdiendo su importancia, las variables socioeconómicas, en contra, la van ganando. Las variables que se pueden utilizar para estos modelos, pueden ir desde variables genéricas, como el producto interior bruto y la población, hasta variables más específicas, como puede ser el consumo eléctrico según uso final (p.e. iluminación y calefacción), variable ésta que es utilizada para realizar la predicción a largo plazo de la expansión geográfica de la demanda [Willis, 95].

II.3.1.1.- Demanda y gestión del suministro

En la gestión del suministro (SSM) se deben tomar decisiones sobre el conjunto de actividades a realizar, por parte de la compañía eléctrica, para suministrar la energía eléctrica demandada por el cliente, en las cantidades y en los instantes de tiempo que éste lo requiera, y, aunque a largo plazo, el objetivo de la gestión del suministro podría resumirse en saber cuantas centrales habría que construir, es evidente que quedan mas cuestiones tanto a largo, como a medio y corto plazo, que requieren de la planificación de las empresas.

El proceso de decisión requiere la optimización de un conjunto de problemas individuales que, en muchas ocasiones, necesita conocer la predicción de la demanda para obtener resultados que, a su vez, son las entradas de otros relacionados. Este proceso de realimentación y prealimentación, entre los distintos problemas, lleva a una gran interdependencia de las decisiones operativas y planificadoras de la compañía [Hubele, 89].

En la figura II.4 se pueden ver las relaciones entre los procesos de decisión más importantes donde es necesario conocer la previsión de la demanda y, además de mostrar las relaciones entre ellos, se representa en el eje de abscisas el horizonte en el tiempo con

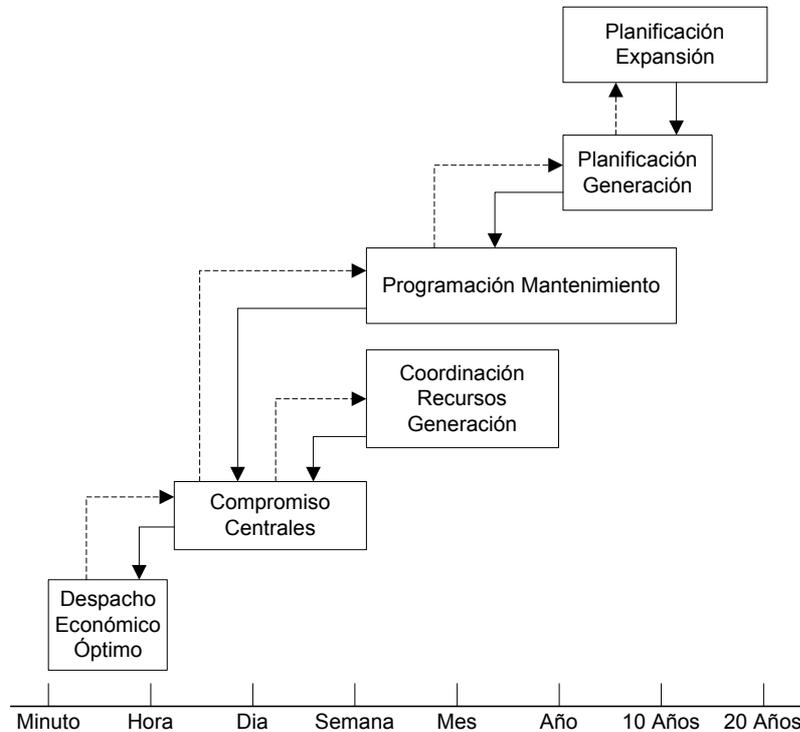


Figura II.4 Gestión del suministro y horizonte de previsión

que se necesita conocer la previsión de la demanda para poder tomar las decisiones adecuadas.

Se puede observar que, tanto el despacho económico óptimo, como el del compromiso de las centrales, son problemas cuyas decisiones se han de tomar a corto plazo y con horizontes de trabajo que van desde los 15 minutos hasta la semana. A corto plazo, el conocimiento de la previsión de la demanda es necesario como variable de entrada del problema de flujo de cargas inherente al despacho económico. Normalmente, el dato de que se dispone es la potencia activa, pero no la composición de la carga, que haría posible un mejor modelado de ésta y por lo tanto resultados más exactos. Un resultado más ajustado al comportamiento real, ayuda a que el operador pueda optimizar la operación del sistema y que, del abanico de decisiones posibles que tiene, por ejemplo elegir entre iniciar el arranque de una central de punta o comprar energía en el mercado de generación, tome aquella que se ajuste mejor a los criterios de dirección de la compañía.

A medio plazo, las compañías deben conocer la demanda de energía para poder abastecerse de los combustibles necesarios y realizar una ajustada planificación del mantenimiento de las centrales y la coordinación entre las fuentes de energía propias disponibles (hidráulica, térmica,...) y las ajenas, como son las del mercado eléctrico. En el medio plazo, el conocimiento de la composición de la carga tiene aplicación directa en los

modelos de previsión de cargas condicionales, al igual que sucede con el largo plazo, cuando la compañía eléctrica debe conocer la demanda para sus planes de expansión de generación y de ampliación de la red de transporte y distribución. La tendencia es que, conforme se amplía el horizonte temporal, los factores socioeconómicos sean más útiles para poder realizar una predicción de la demanda con menor error, que cuando se utilizan métodos basados en la extrapolación de datos históricos.

II.3.2.- Composición de cargas en la demanda

El estudio de la demanda desagregada o, lo que es lo mismo, composición de la carga, pretende obtener la proporción de determinadas cargas sobre el total de la demanda. Se diferencia de la predicción de la demanda en que ésta pretende obtener la demanda agregada en un futuro, mientras que el estudio de la composición de la carga pretende obtener información más detallada de la demanda actual.

Los estudios de la demanda desagregada se pueden realizar con dos niveles de desagregación, por un lado a nivel de tensión del sistema y por el otro al grado de descomposición deseado.

En función del **nivel de tensión** del sistema se desean obtener distintas magnitudes de la demanda. Por ejemplo, la demanda de una vivienda será menor que la demanda del centro de transformación al que esté conectado, y esta será, a su vez, menor que la subestación que lo alimenta. Está claro, que según el nivel de tensión, la problemática será distinta y, por lo tanto, la descomposición deseada de la carga también.

La **descomposición deseada** no es independiente del nivel de tensión, puesto que al cambiar el problema cambia la información necesaria para resolverlo. La descomposición realizada dependerá de en qué se esté interesado. Por ejemplo, a nivel de vivienda interesa conocer la descomposición de la demanda en electrodomésticos, mientras que a nivel de subestación, interesa conocer la descomposición de la demanda en la proporción de carga resistiva, inductiva, electrónica, etc., en fin, su comportamiento eléctrico.

En los siguientes apartados, se van a analizar distintas aplicaciones en los que el conocimiento de la demanda desagregada tiene aplicación directa.

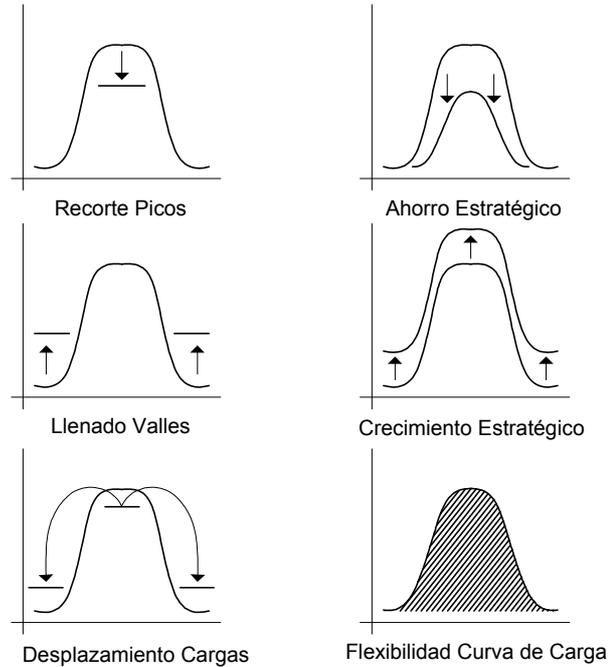


Figura II.5 Objetivos de forma de la curva de carga

II.3.2.1.- Composición y gestión de la demanda

La gestión de la demanda (DSM) abarca la planificación, evaluación, implementación y monitorización de las actividades seleccionadas de una gran variedad de alternativas, entre las que se encuentran: gestión de cargas, identificación y promoción de nuevos usos, ahorro estratégico, crecimiento estratégico, cogeneración, etc. La evaluación de las alternativas adecuadas para una compañía eléctrica no es una tarea fácil, puesto que entre las opciones existentes las hay orientadas al crecimiento de la demanda (crecimiento estratégico), al mantenimiento (control de cargas) y a la disminución de la demanda (ahorro estratégico) debiendo realizarse un proceso en tres etapas [Gellings, 89]:

- I. Establecer objetivos estratégicos para la compañía
- II. Establecer objetivos tácticos y operacionales
- III. Determinar los objetivos de curva de carga

Los **objetivos estratégicos** son muy genéricos e incluyen direcciones como mejorar el flujo de caja, incrementar las ganancias, etc. Estos objetivos son a largo plazo.

Para conseguir estos objetivos estratégicos, las compañías eléctricas necesitan establecer **objetivos tácticos y operacionales** que les guían en esa dirección. A nivel táctico, las alternativas DSM son comparadas con sus equivalentes de gestión del suministro, mientras que a nivel operacional, la gestión de la demanda puede abordar objetivos como reducir la

necesidad de combustibles, reducir o posponer las inversiones de capital, reducir los incrementos en el coste de la electricidad, etc.

Por último, estos objetivos operacionales deben ser trasladados a **objetivos de forma de la curva de carga**. En este nivel existen 6 posibilidades, representadas en la figura II.5.

Una vez que la compañía eléctrica ha seleccionado los objetivos de modificación de la curva de carga, debe identificar qué programas DSM pueden cumplir con sus objetivos, teniendo en cuenta que un programa puede tener influencia en varios de los objetivos de forma de la curva de carga.

Tabla II.1 Impacto de programas DSM, en EEUU, para la modificación de la curva de carga (GigaWattios) [Gellings, 89]

Programa DSM/Objetivo	Reducción Picos	Llenado Valles	Desplazamiento Cargas	Ahorro Estratégico
Almacenamiento térmico		4,1	4,1	
Control de cargas	4,1		0,1	
Tarifas tiempo de uso (TOU)	8,8	8,8	3,3	
Tarifas interrumpibilidad	4,0	3,0		
Cogeneración			31	31

Como ejemplo ilustrativo se puede ver en la tabla II.1, como el almacenamiento térmico es válido para llenar valles y transferir cargas de pico a valle, mientras que el control de cargas es válido para reducir picos.

Tras haber seleccionado el programa DSM que puede servir para los objetivos, se debe realizar la implementación del programa. Finalmente, el seguimiento de éste permite saber si se están consiguiendo los objetivos pretendidos y realizar modificaciones en caso contrario.

De las posibilidades existentes para realizar el seguimiento, la más exacta y, al mismo tiempo más cara, es la de realizar medidas tanto de la curva de demanda agregada como de la composición de la carga de ésta.

No sólo en el seguimiento de la implantación de los programas DSM tiene aplicación el conocimiento de la composición de la carga de la demanda agregada, sino también tiene aplicación en la operación del sistema de aquellas compañías que utilicen en su planificación las acciones de gestión de la demanda. Las compañías deben conocer cuál va a ser la reducción en la demanda que tendrían sus acciones de control. Esto es necesario

porque en sus programas de despacho económico tienen integrado al mismo nivel tanto las acciones de suministro como las acciones de gestión de la demanda, y, en el caso de que tengan implementado un programa de gestión de cargas o una tarifa de interrumpibilidad de cargas, necesitan saber la reducción en la demanda que tienen sus acciones de control, para así poder elegir la mezcla óptima de acciones de suministro y de gestión de la demanda **[Gardner, 95]**.

También, en la búsqueda de las señales de control óptimas para un programa de control de cargas es necesario conocer la composición de la carga, sobre todo de aquellas sobre las que se tiene el control, normalmente aparatos de aire acondicionado, de calefacción eléctrica y calentamiento de agua que están dentro del programa **[Molina, 00]**.

Por último, comentar que este seguimiento puede tener además del interés por parte de la compañía de conocer si sus planes son efectivos, el valor añadido de poder ingresar, en dinero, parte del ahorro conseguido con esos programas, puesto que es posible que el gobierno repercuta directamente a las compañías parte del ahorro conseguido con estos programas **[DeAlmeida, 94]**.

II.3.2.2.- Composición y determinación del valor del servicio

La planificación basada en el valor del servicio es la planificación a seguir en los mercados liberalizados donde la competencia es intensa.

Conocer tanto la composición de la carga, como el tiempo de uso de ésta, permitirá a las compañías ofrecer a sus clientes un servicio que añada a los ofrecidos por ésta. La importancia de este tipo de servicios crecerá conforme lo haga la competencia, puesto que los clientes harán la selección de sus suministradores no sólo por el costo y la fiabilidad del suministro, sino además por el conjunto de servicios ofrecidos que le den valor añadido al cliente y, la compañía, si quiere mantenerse en el mercado, deberá ofrecer.

Como ejemplos de servicios que se pueden ofrecer con un sistema de monitorización de cargas para la determinación de su composición están: factura detallada, alarma y auditorías energéticas.

La **factura detallada** es un servicio añadido de gran utilidad, puesto que las compañías pueden ofrecer a sus clientes la posibilidad de reducir sus consumos eléctricos mostrándoles en que aparatos han consumido la energía.

El **servicio de alarma** ofrece a los usuarios la monitorización continua con el objetivo de identificar aquellos equipos que funcionen de forma incorrecta, avisando cuando así ocurra.

La **auditoria energética** es un servicio similar al de la factura detallada en cuanto informa al usuario de lo consumido por los equipos, pero añade la información del tiempo en que se ha consumido. Con ello los clientes podrán modificar sus patrones de consumo desplazando consumos que se produzcan en horas punta a horas valle aprovechándose de tarifas ventajosas para ellos.

Aparte de los servicios suministrados a los clientes, la compañía eléctrica puede realizar estudios de mercado para conocer los patrones y usos de consumo de sus clientes con los siguientes objetivos:

- Estudio de tarifas preferentes para determinados tipos de cargas.
- Evaluación económica de aquellos programas que ofrezcan descuentos por actualización de equipos anticuados por equipos nuevos posiblemente más eficientes.
- Evaluación económica de planes orientados a la modificación voluntaria de la hora de consumo.

Y en definitiva, de cualquier estudio de tarifas diseñadas con el objetivo de modificar la curva de carga, como pueden ser facturas en función del valor de pico, o facturas que mejoren el factor de potencia.

II.3.2.3.- Otras aplicaciones de la composición

II.3.2.3.1.- Estudios dinámicos

Es difícil cuantificar los beneficios que tiene una mejora de los modelos utilizados en los estudios dinámicos introduciendo la composición de la carga [Task, 93], pero es evidente que si los modelos utilizados no se ajustan bien a la realidad, difícilmente se podrán obtener resultados correctos.

Si los resultados no son los correctos, se pueden obtener resultados demasiado optimistas o demasiado pesimistas. En el caso de que en un estudio dinámico se haya obtenido un resultado demasiado pesimista, un correcto modelado de la composición tiene como beneficio el incremento de la capacidad de transmisión, con su correspondiente influencia económica.

Cuando los resultados hayan sido demasiado optimistas, debido al modelo utilizado, los beneficios de un correcto modelado son los que provienen de la prevención de emergencias en el sistema debido a que los límites de operación del sistema sean excesivamente altos.

Como ejemplo de aplicación se puede citar el estudio de los problemas de inestabilidad de la tensión, y posible colapso del sistema, debidos a la tendencia de las compañías a cargar más las líneas existentes para reducir las necesidades de inversión y que han dado lugar a una mayor necesidad de la gestión de la potencia reactiva. La inestabilidad de la tensión está en gran parte, relacionada con las características de las cargas y con los medios disponibles para su control. Por lo tanto, para una correcta evaluación del problema es necesario conocer el comportamiento de la carga frente a variaciones de tensión [Pal, 92].

II.3.2.3.2.- Localización de faltas en alimentadores de distribución

Teniendo en cuenta que, la duración de una interrupción está íntimamente ligada al tiempo empleado en la localización del defecto y que, más del 85% de las faltas se producen en las líneas de distribución, no es de extrañar que se realicen estudios conducentes a disminuir los tiempos de localización de faltas.

En este problema, al modelar mejor la carga por medio del conocimiento de su composición, se pueden desarrollar algoritmos con mayor precisión [Reineri, 00], sobre todo, en condiciones próximas a las altas impedancias de defecto que se dan en los sistemas de distribución.

II.4.- Métodos de obtención de la composición de las cargas

El grado de detalle con el que es necesario obtener la demanda desagregada, depende de en que aplicación se va a utilizar esta información. No es de extrañar, que existan entonces métodos distintos, distinguiéndose principalmente dos: los utilizados en los estudios dinámicos y los utilizados en los estudios de mercado.

La diferencia entre ambos estriba en que los métodos dinámicos persiguen una demanda desagregada, pero solo a nivel de modelo eléctrico y con niveles de potencia más grandes, frente a los estudios de mercado, cuyo nivel de detalle buscado es mayor pero a un nivel de potencia menor.

II.4.1.- Estudios dinámicos

Existen dos aproximaciones básicas para obtener las características eléctricas de la composición de la carga [Task, 93]. Una está directamente relacionada con la medida de la sensibilidad de la potencia, tanto activa como reactiva, de la carga respecto a la tensión y la frecuencia, y la otra, está relacionada con la construcción de un modelo de carga compuesto, función del conocimiento de la composición de las cargas alimentadas por una subestación, obtenida esta composición a partir de datos estadísticos.

II.4.1.1.- Métodos basados en medidas

Estos métodos se basan en la instalación de dispositivos de medidas y de adquisición de datos colocados en aquellos puntos donde se quiere representar a la carga consumida. Estos dispositivos normalmente miden variaciones de tensión y de frecuencia ante variaciones de la tensión provocadas intencionadamente o por perturbaciones naturales. Los parámetros de los modelos de carga son estimados a partir del ajuste de los datos obtenidos al modelo asumido [Task, 94].

Las ventajas de los métodos basados en mediciones son obvias en cuanto a que representan al sistema real a estudiar.

Entre las desventajas de estos métodos están: la no exportabilidad de los datos a otros puntos del sistema, y que si se quiere tener en cuenta las variaciones de carga debido a la estacionalidad, el clima y a los cambios en la composición de la carga, se requiere un sistema de monitorización continuo.

II.4.1.2.- Métodos basados en componentes

El propósito de los métodos basados en componentes es desarrollar un modelo de carga equivalente a partir del conocimiento de los componentes individuales que forman parte de la demanda. Las características de las cargas (p.e. aire acondicionado, iluminación, etc.) pueden ser determinadas de forma teórica o por medio de ensayos en laboratorio y, por tanto, utilizadas por las compañías en general.

A partir de estos modelos de cargas individuales se pretende construir un modelo de carga agregada que represente al total. Esta aproximación requiere del conocimiento de la composición de la carga en el punto donde se quiere obtener el modelo.

Obtener la composición de la carga es una tarea difícil y, normalmente, lo que se suele hacer es obtener el equivalente a partir de la siguiente información:

- Composiciones de cargas típicas (fracciones de cargas del total) según la clase de carga (residencial, comercial, industrial).
- Proporción de cada clase de carga sobre el total.

Existen programas informáticos, LOADSYN, que a partir de estas dos informaciones básicas construyen el modelo agregado [Price, 88]. En cuanto a los datos de composición de la carga, se obtienen a partir del censo y del conocimiento de la demanda. Como son difíciles de obtener, se suele elaborar una primera aproximación a partir de datos típicos y estimaciones de la composición. Dada que esta composición varía en cada bus del sistema y, al mismo tiempo, es dependiente de la hora del día y del clima, es difícil obtener con certeza la composición; interesando a las compañías eléctricas la determinación de este dato [Task, 93].

II.4.2.- Monitorización

Los métodos utilizados en los estudios de mercado han utilizado extensamente la monitorización para estos fines, y conforme estos estudios han sido más exhaustivos, la monitorización se ha ido especializando alcanzando una mayor complejidad.

A lo largo de las últimas décadas se puede hablar de las siguientes generaciones:

- Registradores de propósito general.
- Equipos de campo para monitorización de potencia.
- Monitorización de cargas no intrusivas.
- Automatización Vivienda.

En los siguientes apartados se va a realizar una revisión sobre las técnicas de monitorización disponibles actualmente en el mercado.

II.4.2.1.- Registradores de propósito general

Los registradores de propósito general han experimentado un avance significativo en las últimas décadas debido, sobre todo, a la aplicación de microprocesadores cada vez más potentes, mayores densidades de memoria, conexión directa de señales analógicas y posibilidad de comunicación con ordenador, todo integrado en un equipo compacto y que, al carecer de piezas móviles, lo hacen bastante útil y robusto para medir cualquier magnitud

física en condiciones difíciles. La posibilidad de comunicación con el ordenador permite, además de poder leer los datos medidos, eliminar el riesgo de que modifiquen los parámetros del registrador otras personas ajenas al proyecto, siempre que la única forma de parametrizar el registrador sea por medio del ordenador.

Sus prestaciones son muy variadas, pero no es raro encontrar equipos con entradas analógicas que van desde 8 a 42 e incluso más canales, y de 4 a 16 entradas digitales, algunos tienen hasta salidas analógicas para control [**Carltext**]. Las opciones también son muy variadas, pudiendo ir con batería propia, almacenamiento en memoria de estado sólido de los datos adquiridos etc.

En la gama alta de estos equipos se encuentran aquellos que utilizan al ordenador para almacenar los datos adquiridos por medio de tarjetas de adquisición de datos, conectadas al bus de expansión del ordenador, con posibilidades de ampliación realmente grandes, entrando ya dentro de los sistemas SCADA, con multitud de entradas y de salidas analógicas.

Para la monitorización de las cargas eléctricas se suelen utilizar tarjetas de adquisición de datos de 12 a 16 bits de resolución que, conectadas al ordenador, y tras el desarrollo del software específico para la aplicación, suele ser una combinación muy potente para obtener a precios bastante económicos equipos que de otra forma serían prohibitivos. Fabricantes de tarjetas de adquisición existen muchos, destacándose National Instruments.

Actualmente, existen también en el mercado herramientas de software para desarrollo rápido de aplicaciones basadas en PC y que utilizan estas tarjetas, como ejemplo están la herramienta LabView [**Labview**] y la herramienta Agilent VEE, ambas con un lenguaje de programación totalmente gráfico y multitud de funciones para adquisición, procesado y almacenamiento de los datos. Las posibilidades de ampliación de estos equipos son grandes, ya que ésta se realiza incorporando tantas tarjetas como conectores de expansión tenga la placa madre del ordenador.

II.4.2.2.- Equipos de campo para monitorización de potencia

A veces llamados analizadores de potencia, estos equipos portátiles se suelen utilizar para la realización de auditorías energéticas, evaluación del comportamiento de la carga ante cambios en la alimentación, evaluación de la efectividad de las medidas de

conservación de la energía y medidas del consumo real de los equipos. Al ser equipos de campo están pensados para medidas cuya duración sea corta.

Las características de estos equipos varían según fabricantes y según las prestaciones ofrecidas por estos (trifásicos/monofásicos, precisión, potencia máxima, almacenamiento de medidas, valores RMS, factor de potencia, etc.). Los precios varían en consonancia, como ejemplo, actualmente se pueden conseguir equipos básicos que permiten medir la energía (integral de la potencia instantánea) consumida por un equipo por precios sobre las 30.000 pts. y que, además, permiten obtener la energía total consumida desde la última vez que se pone a cero el contador y el costo de la energía consumida si se le introduce el precio del kWh. **[AnalysisNorth]**.

Cuando son de gama alta, estos equipos ofrecen capacidades como análisis armónico de tensión y corriente con capacidad de almacenamiento de varias formas de onda y comunicación a ordenador. La casa Fluke **[Fluke]** ofrece un equipo, Fluke 41B, con prestaciones de este orden; su precio está en torno a las 300.000 pts.

II.4.2.3.- Sistemas de monitorización

Los sistemas de monitorización son utilizados para el estudio de varias cargas de un mismo usuario en paralelo; es por eso que son sistemas jerárquicos, compuestos normalmente por un conjunto de sensores y un servidor que recoge los datos de estos sensores, y los procesa posteriormente para obtener la composición de la carga y el tiempo de uso de éstas. Básicamente existen dos tipos de sistemas: aquellos que utilizan un conjunto de sensores para monitorizar las cargas de forma individual, y un software sencillo que procesa la información de cada uno de ellos, y aquellos que utilizan un solo sensor que monitoriza el consumo total de una instalación (normalmente una sola vivienda), y por medio de un software más complejo pretende obtener la misma información.

II.4.2.3.1.- Sistemas de gestión de la energía

Su objetivo no es exclusivamente la monitorización ya que además realizan acciones de control.

Un sistema de gestión de la energía (SGE) monitoriza la energía consumida por un conjunto de equipos, actuando sobre ellos para disminuir la energía total consumida. Normalmente, los SGE monitorizan las cargas eléctricas más grandes, incluyendo los

equipos de refrigeración, bombas, calentadores de agua, iluminación etc. A su vez, estos sistemas son capaces de controlar el estado de encendido o apagado de estas cargas o, en el caso de cargas más complejas, estados intermedios.

Puesto que estos sistemas están monitorizando de forma continua las cargas eléctricas a controlar, se puede obtener de éstos la información sobre el estado de conexión y desconexión en función del tiempo y por lo tanto, la composición de la carga.

La complejidad de estos sistemas va desde instalaciones básicas con solo 8 puntos de medida comunicados por medio de una red Ethernet a un PC, a sistemas más complejos capaces de monitorizar el consumo de toda una empresa, incluso, aunque sus instalaciones estén alejadas geográficamente entre sí [GeIndustrial].

II.4.2.3.2.- Sistemas de monitorización invasiva

Los sistemas de monitorización invasiva son así llamados por el hecho de que, para poder realizar la medición de la composición de la carga, han de tener acceso a las cargas individuales que pretenden monitorizar, frente a los sistemas de monitorización no invasiva, que no requieren de acceso a éstas.

Tabla II.2 Proyectos Europeos y Características de los sistemas de monitorización

Nombre Proyecto	CIEL1	ECODROME 3	CCE2	NUTEK4
Características	MultiCanal	MultiCanal	Registrador/carga	MultiCanal
Comunicación Local	Portadora en Línea	Portadora en Línea	Bus Local	Bus Local
Descarga Datos	MODEM	MODEM	Manual a PC	Manual a PC
Exactitud	< 2%	< 2%		

Constan de una unidad central y de unos sensores que miden potencia activa consumida por las cargas a estudio. La forma de realizar la comunicación entre los sensores y la unidad central da lugar a dos variantes: la comunicación con enlaces punto a punto y la comunicación por el propio cable de alimentación utilizando una frecuencia portadora.

Los sistemas de monitorización invasiva tienen el gran inconveniente del precio, pero a la vez, la gran ventaja de ser los más fiables. Normalmente estos sistemas son desarrollos propietarios. Como ejemplo, en la tabla II.2, se muestran las características de varios sistemas de monitorización utilizados en proyectos Europeos de monitorización de consumidores finales [Lebot, 97].

II.4.2.3.3.- Sistemas de monitorización no invasiva (MNI)

Estos sistemas miden la potencia activa y reactiva consumida por todas las cargas del usuario y, por medio del análisis de las formas de ondas medidas en el tiempo pretenden obtener el número, naturaleza, consumo y variaciones en el tiempo de estas cargas.

Consisten en un dispositivo electrónico que se conecta en un solo punto a la entrada de la vivienda, utilizando un adaptador que se acopla entre el contador y su conexión. Al estar el contador en el exterior de la vivienda, no se necesita acceder a cada uno de los aparatos eléctricos de ésta para instalar sensores. Ello hace que sea fácil su instalación a la vez que no modifica el comportamiento de los usuarios ni el resultado real de las medidas, puesto que algunos clientes pueden desconectar los sensores utilizados en las cargas de los sistemas intrusivos convencionales.

Concebido inicialmente en el MIT [Hart, 92], ha sido posteriormente desarrollado por EPRI [Drenker, 99], que luego, a través de la empresa EneticsInc. [Enetics], ha comercializado éste desde mediados de 1996. El dispositivo MNI está orientado al servicio residencial y comete errores aceptables con respecto a los sistemas de monitorización invasiva, oscilando entre el 3% y el 14% según cargas [Drenker, 99]. Actualmente, se encuentra en periodo de pruebas una versión de este dispositivo para aplicaciones comerciales. No es directamente aplicable la solución residencial a la comercial, debido a que los patrones de uso de cargas son distintos (continuo en comerciales y discontinuo en residenciales) y debido a los tipos de cargas a detectar, ya que el mayor uso de la electricidad, en los usos comerciales, es para iluminación y refrigeración/calentamiento.

Su funcionamiento se basa en la constatación del hecho de que la potencia activa y reactiva consumida por los aparatos electrodomésticos, cuando estos se conectan y desconectan, son como una firma que permite identificarlos en un análisis de la curva de potencia activa y reactiva.

El algoritmo utilizado para procesar los datos funciona en cinco etapas principales: detección de bordes, análisis de grupo, concordancia de grupos, resolución de anomalías e identificación de aparatos.

La **detección de bordes** compara los cambios en la carga consumida con un umbral definido por el usuario del sistema.

El **análisis de grupos** clasifica los eventos de conexión y desconexión en función de la magnitud de la potencia activa y reactiva asociada con él. Los cambios observados de potencia cuando son dibujados en un diagrama de activa frente a reactiva dan como resultado un conjunto de puntos dispersos que hay que agrupar en grupos de puntos con aproximadamente igual valor de escalón de activa y reactiva. Idealmente, cada grupo representa el cambio de estado de un aparato (de on a off o viceversa).

La **concordancia de grupos** pretende emparejar grupos creados en la etapa anterior para poder asociarlos unívocamente a un equipo.

En la etapa de **resolución de anomalías** se intentan procesar aquellos grupos que no han podido ser concordados en la etapa previa, y se pretende relacionarlos con combinaciones lineales de otros ya emparejados para saber si ese grupo anómalo ha sido generado por la conexión o desconexión de dos equipos al mismo instante.

Por último en la etapa de **identificación de aparatos** se asocian grupos con cargas por medio de una base de datos que almacena los valores de activa y reactiva que consumen estas. El usuario selecciona en la base de datos aquellas cargas que se utilizaran para la asociación con los grupos y conforme el algoritmo va procesando los datos irá identificando cargas.

Estos dispositivos son capaces de monitorizar con bastante eficiencia aparatos con solo dos estados de operación, es decir conectados o desconectados, pero presentan problemas con aquellos aparatos que tienen varios estados de operación como por ejemplo un lavavajillas, una lavadora, aparatos con distintas salidas, etc. También tienen problemas con aquellos aparatos que tienen un consumo pequeño, estando actualmente el límite en aquellos que consumen menos de 100W [Drenker, 99]; esto es así puesto que al tener un umbral de cambio todos los que estén por debajo de este umbral no serán detectados. Los aparatos que tengan consumos similares de activa y reactiva también son difíciles de identificar; por ejemplo la diferenciación entre un secador y una tostadora es difícil, si no imposible, puesto que al estar ambos compuestos por una resistencia, y como en ambos casos sólo se puede utilizar la información de activa, cuando éstos sean de potencias semejantes, es imposible decir cuando se conecta uno u otro. Por último, aquellos aparatos que tengan una variación continua de su consumo tampoco pueden ser detectados con esta aproximación.

Para poder mejorar el margen de identificación de estos equipos es necesario ampliar la información recibida del aparato para incluir otras señales que nos ayuden en el proceso de identificación, entre las que se encuentran como principales candidatos la información de los armónicos de corriente, aspecto que no ha sido utilizado en los desarrollos comerciales de los MNI, ya que según Drenker [Drenker, 99], sólo utiliza variaciones en la potencia activa y reactiva a lo largo del tiempo para realizar la identificación.

II.4.2.4.- Automatización de viviendas

El proceso de automatización de la vivienda ha evolucionado en tres etapas:

Desarrollo de **equipos con sistemas de control propios**. Ejemplos de estos equipos son las lavadoras, aire acondicionado, etc.

Desarrollo de **subsistemas inteligentes**. Ejemplos de estos equipos son la aparición de lavadoras con entrada de agua caliente externa. Estos sistemas deben estar conectados con una fuente de agua caliente externa y deben comunicarse entre ellos para que no funcione la lavadora mientras la temperatura del agua no supere el valor esperado.

Desarrollo de **sistemas de automatización total**. Esta es la última etapa de automatización y tiene el mayor potencial. En estas viviendas los principales sistemas estarían conectados y comunicándose entre sí, pudiendo trabajar de forma conjunta para optimizar la energía consumida por el conjunto de los equipos. A su vez, se ahorraría mucho en sistemas redundantes, pues no haría falta adquirirlos de forma separada. Por ejemplo, existiría un único programador de electrodomésticos que podrían utilizar todos cuando éstos se conecten con el sistema central.

Estas viviendas estarían conectadas a redes externas, pudiendo actuar como clientes o como servidores de datos. Ejemplos de servicios, en los que actuaría como cliente, podrían ser: el de vigilancia de la vivienda o el de tarificación en tiempo real de la energía. Como servidor de información, una vivienda podría suministrar datos individuales o agregados (por habitación o medias) de temperatura, presión y consumo de agua, nivel de luminosidad, humedad, partículas de polvo y por supuesto su composición de la carga.

En cuanto a la tecnología actual disponible, existen muchas plataformas hardware y software orientadas a este mercado. Algunos de estos sistemas son propietarios como los ofrecidos por Echelon con su sistema LONWORKS [Echelon] y X10 Limited con su

sistema X10 [X10]. Existen estándares abiertos, tanto Europeos [EHS] como Americanos [CEBus], que favorecen el desarrollo de este mercado, para que puedan competir todos los fabricantes en igualdad de condiciones. Finalmente, como suele ocurrir en otros mercados, también se está desarrollando un estándar internacional por la ISO y la IEC, conocido como el Home Electronic System [HES], cuyo objetivo es el de establecer estándares tanto a nivel de hardware como de software válidos para todas las empresas y aceptados por toda la comunidad internacional.

II.5.- Conclusiones

Se ha analizado en este capítulo la evolución de la planificación a lo largo de la historia del mercado eléctrico y esto, ha permitido ver que, el estudio de la demanda ha sido siempre un dato fundamental para la planificación de las empresas eléctricas. Esta entrada era utilizada inicialmente de forma agregada en la planificación tradicional, pero actualmente, y dada la transición del mercado de una posición monopolística a otra de libre mercado, es fundamental el estudio de la demanda desagregada, entre cuyas aplicaciones se encuentran:

Permitir a las empresas realizar estudios de mercado y ofrecer productos que se adapten a las necesidades y preferencias de sus potenciales clientes, que serán fundamentales para la supervivencia de estas empresas.

La obtención de mejores previsiones de la demanda a largo plazo, que es cuando las variables socioeconómicas tienen más peso que los factores climáticos y cuyo dato es utilizado para la expansión de la generación y de la red de transporte y distribución del sistema.

Optimizar la operación del sistema asignando límites de operación con menor error y que traerán mejoras en la calidad del suministro.

Optimización de algoritmos de conexión/desconexión en aplicaciones de control de cargas.

Optimización del despacho económico, tanto en la gestión del suministro tradicional, como en aquellas empresas que puedan elegir la mezcla adecuada de acciones del lado del suministro y del lado de la demanda.

El seguimiento de los programas de gestión de la demanda lanzados por la compañía, es otra de las aplicaciones de la demanda desagregada y permitirá a estas corregir posibles ineficiencias en la implantación de estos programas.

También encuentra aplicación en actividades relacionadas con el mantenimiento, como es el caso de la localización de faltas en alimentadores de distribución.

Finalmente, se han estudiado los sistemas existentes en la actualidad para obtener la demanda desagregada, comentándose sus características particulares e intentando ser exhaustivos hasta donde se ha estimado necesario, puesto que la amplitud de determinados temas, como es el caso de la automatización de las viviendas, aconseja tratarlos de forma abreviada.

II.6.- Bibliografía

- [Agilent] Agilent Technologies, <http://www.gpinstruments.com>
- [Al-Alawi, 96] S. Al-Alawi, S. Islam, “Principles of electricity demand forecasting: Part 1, Methodologies”, Power Engineering Journal, Vol 10 3, pp 139-143, June 1996.
- [AnalysisNorth] Analysis North fabricante y distribuidor de equipos y software para monitorización energética. <http://www.energytools.com>
- [Carltext] Carltext International Inc, <http://www.carltext.com/>
- [CEBus] CEBus Industry Council, Inc. <http://www.cebus.org/>
- [Chiou, 91] C. Y. Chiou, C. H. Huang, A. S. Liu, Y. T. Chen, T. H. Li, C. J. Lin, “Development and Application of Microprocessor-based Load Transient Data Recording Systems,” IASTED International Conference, Power High Technique 1991, Taiwan, March 1991.
- [DeAlmeida, 94] A. De Almeida, E. Vine “Advanced monitoring technologies for the evaluation of Demand Side Management Programs”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994.
- [DGET] Directorate General for Energy and Transport, DGXVII de la Comisión Europea <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/mission.htm>.
- [Drenker, 99] S. Drenker, A. Kader “Nonintrusive Monitoring of Electric Loads”, IEEE Computer Applications in Power, Vol 12, No 4, pp:47-51, october 1999.
- [Echelon] Echelon Corporation, <http://www.echelon.com>
- [EHS] European Home Systems Association <http://www.ehsa.com/>
- [Enetics] Enetics Inc., <http://www.enetics.com>

[**Fluke**] Fluke Corporation, <http://www.fluke.com/>

[**Gardner, 95**], E. Gardner, “Load Management DSM: Past, Present & Future”, Rural Electric Power Conference, pp A2/1- A2/13, 1995.

[**GeIndustrial**] GE Industrial, <http://www.geindustrial.com>

[**Gellings, 89**] C.W. Gellings, W. M. Smith, “Integrating Demand-Side Management into Utility Planning”, Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No.6 pp 908-918, June 1989.

[**Hart, 92**] G. W. Hart “Nonintrusive Appliance Load Monitoring”, Proceedings of the IEEE, Vol 80, No 12, pp 1870-1871, december 1992.

[**HES**] IEC/ISO JTC1 SC25 Working Group, Home Electronic System,
<http://www.metrolink.com/sc25wg1/>

[**Hubele, 89**] N.F. Hubele, Y. Lin “Decision problems of Electric Power Systems: A call for research”, Conference Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1989. Vol 3, pp 1158-1165, Nov. 1989.

[**Klom, 96**] A. M. Klom, “Desregulación de la electricidad en la Unión Europea”, European Commission
Directorate-General XVII, (Energía), Sept. 1997.

[**Labview**] National Instruments, <http://www.ni.com/labview>

[**Lauby, 98**] M. Lauby, R. Reddy, “Deregulation and Electricity Markets in the USA”, Proceedings of the International Conference on Power System Technology, POWERCON’98, Vol. 1, pp 23-26, August 1998.

[**Lebot, 97**] B. Lebot, C. Lopes, P. Waide, O. Sidler, “Lessons Learnt from European Metering Campaigns of Electrical End Uses in the Residential Sector”, Proceedings of the ECEEE 1997, <http://www.ecee.org/Library/Proceedings/1997/pdf97/97p4-82.PDF>.

[**Molina, 00**] A. Molina, A. Gabaldon, J.A. Fuentes, F.J. Cánovas, “Approach to Multivariable Predictive Control Applications in Residential HVAC Direct Load Control”, Conference Proceedings of the IEEE Summer Meeting, July 2000.

[**Pal, 92**] M. K. Pal, “Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992.

[**Price, 88**] W.W. Price, K. A. Wirgau, A. Murdoch, J.V. Mitsche, E. Vaahedi, M.A. El-Kady, “Load Modeling for Power Flow and Transiente Stability Computer Studies,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No 1, pp 180-187, Feb. 1988.

[**PTI, 00**] Power System Simulator ADEPT 4.0, Power Technologies Incorporated,
<http://www.pssadep.com>.

- [Rabl, 88]**, V. A. Rabl, C.W. Gellings, “The Concept of Demand-Side Management”, , Demand Side Management and Electricity End-Use Efficiency ISBN 90-247-3698-6, Kluwer Academic Publishers pp: 99-112.
- [Reineri, 00]** C. Reineri, “Contribuciones al Proceso de Localización de Faltas en Alimentadores de Distribución,” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2000, Valencia, España.
- [Schweppe, 88]**, F. Schweppe, D. White “Power system planning for the next 20 years”, Demand Side Management and Electricity End-Use Efficiency ISBN 90-247-3698-6, Kluwer Academic Publishers pp: 85-96.
- [Smith, 89]** W. Smith, “Utility planning perspective: A review”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [Task, 93]** IEEE Task Force for Load Representation for Dynamic Performance, “Load Representation for Dynamic Performance Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 8, No. 2, pp 472-482 May 1993.
- [Task, 94]** IEEE Task Force for Load Representation for Dynamic Performance, “Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 10, No. 1, pp 523-538, February 1995.
- [Willis, 95]**, H.Willis, M. Engel, M. Buri, “Spatial Load Forecasting”, IEEE Computer Applications in Power, Vol 8 2, pp 40-43 April 1995
- [X10]** X10 limited, <http://www.x10.com>
- [Xu, 97]** W. Xu, E. Vaahedi, Y. Mansoor, J. Tamby, “Voltage Stability Load Parameter Determination from Field Tests on B.C. Hydro’s System”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, August 1997.

III.- Modelos de carga

III.1.- Introducción

Para modelizar cualquier sistema físico se debe realizar un proceso de abstracción por el cual se analizan aquellas características físicas que son consideradas importantes, y aplicando leyes y relaciones entre las magnitudes físicas resultantes, se obtiene una representación simplificada de la realidad.

La simplificación realizada dependerá del punto de vista del ingeniero, siendo ésta función del objetivo del estudio [Kheir, 93]. Por lo tanto, un modelo es una simplificación del conocimiento de la realidad, sus componentes y sus interrelaciones que del sistema tiene el que realiza el proceso de modelado.

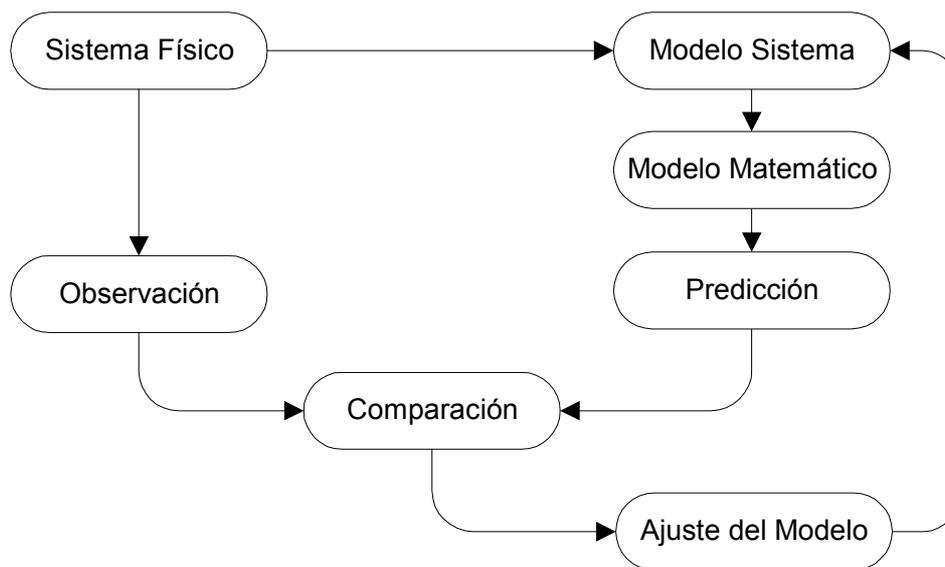


Figura III.1 Proceso de obtención de un modelo

En la figura III.1 se muestran cada una de las etapas básicas que llevan a la obtención de un modelo de un sistema físico. Se parte, inicialmente, de un sistema físico existente: “Sistema Físico”, que se desea modelar. La etapa correspondiente a “Modelo Sistema” es aquella en donde se estudian los mecanismos internos del sistema, y utilizando básicamente leyes físicas y relaciones matemáticas se deduce un modelo que, puesto que normalmente

hace uso del lenguaje matemático para su descripción, se denomina “Modelo Matemático”. Una vez que se dispone del modelo matemático, se está en condiciones de poder realizar una predicción del comportamiento físico del sistema. La etapa de validación del modelo es aquella en donde se hace una “Comparación” entre los valores obtenidos del sistema físico: “Observación” y los valores predichos por el modelo matemático: “Predicción”. Para disminuir las diferencias entre el comportamiento del sistema y la predicción realizada, se modifican los parámetros y las hipótesis de partida del modelo del sistema hasta que se alcanzan los requisitos deseados de precisión y complejidad. Etapas realizadas en “Comparación” y “Ajuste del Modelo”.

Básicamente, a lo largo de este capítulo, se van a ir describiendo cada una de estas etapas utilizando el diagrama de la figura III.1. Este servirá de esquema a seguir para la obtención de varios modelos distintos que finalmente se compararán para, de ellos, escoger el más adecuado para su utilización en la identificación de cargas.

III.2.- Sistema físico: cargas eléctricas

Es necesario definir el sistema físico que se está estudiando y, al mismo tiempo, se debe identificar qué información es relevante para ser posteriormente modelada.

El sistema físico que se pretende estudiar consiste en todas las cargas eléctricas conectadas a un sistema de distribución, monofásico o trifásico, cuya topología sea radial.

El termino “carga eléctrica”, puede tener varios significados en la ingeniería de sistemas eléctricos de potencia entre los que se incluyen **[Task, 93]**:

- a. Un dispositivo, conectado a un sistema eléctrico, que consume potencia.
- b. La potencia total consumida por todos los dispositivos conectados a un sistema eléctrico.
- c. Una parte del sistema que no es explícitamente representada en un modelo del sistema, pero que más bien es tratada como si fuera un consumo de un único dispositivo conectado a un punto del sistema.
- d. La potencia suministrada por un generador o por una central generadora.

De todos estos significados, la definición que más se ajusta a nuestros propósitos de identificación es la de un dispositivo conectado a un sistema eléctrico, que consume potencia. Esta definición es, a veces, demasiado amplia ya que comprende, como cargas, a aquellas que tienen una alimentación común, aunque estén formadas por componentes

eléctricamente distintos. Por ejemplo: un lavavajillas es una carga eléctrica, a pesar de que eléctricamente se podría dividir en los motores que mueven las bombas, que impulsan el agua, y la resistencia eléctrica que la calienta.

Como se pretende una clasificación de las cargas y una posterior identificación de éstas, es necesaria una definición más relacionada con la respuesta eléctrica de las cargas. Se definirá así la carga eléctrica como: todo aquel componente que absorba potencia del sistema y cuyo comportamiento eléctrico sea semejante. Siguiendo con el ejemplo del lavavajillas, el motor eléctrico sería una carga eléctrica y la resistencia otra. Son distintas, puesto que las formas de onda de las corrientes absorbidas por ellas son distintas ante una misma tensión de alimentación.

Habiendo definido lo que son las cargas, objeto de estudio, se debe decir cómo se pretende realizar el proceso de identificación, ya que la estrategia adoptada será la que indique la información que es relevante para la solución del problema, así como esta se pueda ver afectada por la agregación de cargas.

La idea principal es utilizar la red de distribución como fuente de información. Como la topología de la red de distribución es radial, es posible conectarse aguas arriba y medir la corriente total absorbida por todas las cargas aguas abajo. El estudio de las distintas formas de onda de las corrientes absorbidas por las cargas de forma individualizada, se intenta que sea la base que permita obtener la composición de la carga de forma agregada. Se pretende obtener una descomposición de la corriente total absorbida por todas ellas como una combinación lineal, en las proporciones adecuadas, de las corrientes absorbidas por las cargas de forma individualizada. Por tanto, se desea utilizar la corriente absorbida por las cargas individuales como una firma o señal, la cual, la red de distribución hace llegar hasta el punto de medida.

La forma de onda de la tensión de alimentación varía a lo largo del tiempo en el nivel de distribución y, en consecuencia, las corrientes absorbidas por las cargas también puesto que depende de ella. Es de interés realizar una clasificación de las posibles señales que se pueden medir y, a partir de esta clasificación, seleccionar las que se estimen más adecuadas para el proceso de identificación. Esta clasificación se puede ver en la figura III.2.

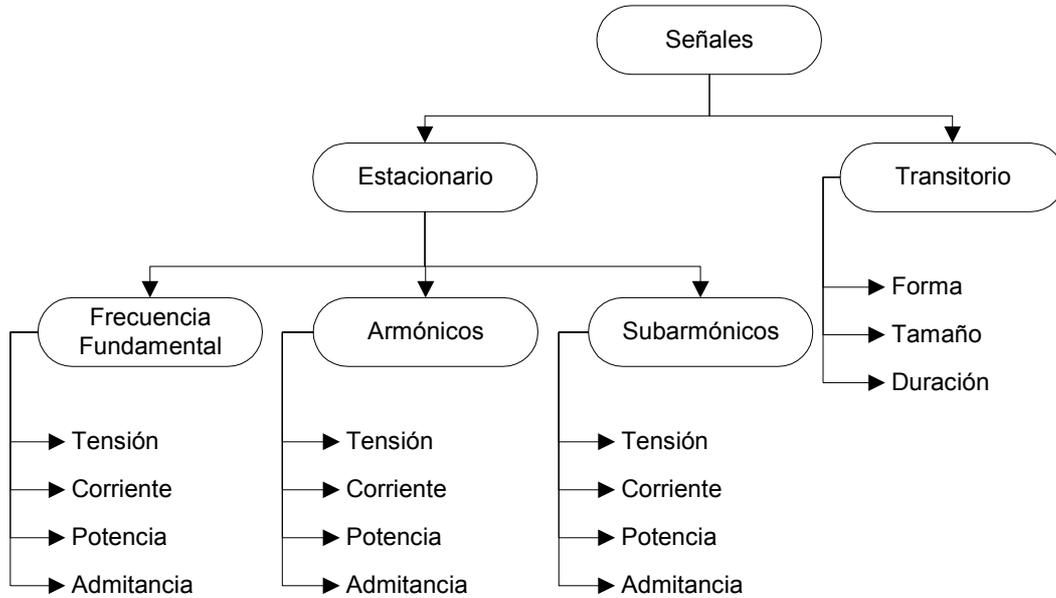


Figura III.2 Clasificación de señales

Básicamente existen dos fuentes de información:

- Los transitorios.
- El estado estacionario.

Los transitorios, fundamentalmente, se dan en el momento de la conexión o desconexión de las cargas. A partir de la medición de la forma de onda de intensidad (función de la onda de tensión existente) se pueden extraer parámetros como la amplitud del transitorio, la forma en el tiempo y la duración en segundos de éste. La gran ventaja de estos transitorios estriba en que pueden ser fácilmente medibles en determinadas ocasiones. Por poner un ejemplo, la corriente de arranque de los aparatos de aire acondicionado que se han medido han alcanzado valores de hasta seis veces la intensidad nominal en régimen permanente (unos 35 amperios). Si se está a un nivel de agregación de 350 Amperios este valor representa un 10% del total y es fácilmente observable en la forma de onda. El gran inconveniente de estos transitorios es que no tienen una señal equivalente en la desconexión, y al absorber solo el 17% del total, pueden ser identificados como ruido o enmascarados por la conexión, en el mismo instante, de otras cargas.

Además de los transitorios de conexión y desconexión, pueden existir otros transitorios debidos a las perturbaciones de la tensión de alimentación, pero que, como éstas son aleatorias, no constituyen un medio adecuado para la identificación si se pretende que se realice ésta continuamente en el tiempo.

Las señales procedentes del estado estacionario, al poderse medir en cualquier instante, son las más idóneas para la identificación además de medir sólo aquello que está absorbiendo energía en el momento de la medida. El inconveniente de estas señales es que deben ser separadas y clasificadas, dándose el caso de que, si el comportamiento eléctrico es idéntico, sea imposible la identificación. Pongamos por ejemplo una tostadora y un horno eléctrico. Puesto que ambas están formadas básicamente por resistencias, su comportamiento eléctrico es indistinguible y por tanto, para poder separarlas, la única forma disponible, sin incorporar elementos externos, sería a partir de la variación de potencia en los momentos de conexión o desconexión, esperando que estas variaciones de potencia sean distintas entre sí. La solución a este problema, incluso teniendo en cuenta el transitorio de conexión/desconexión, es prácticamente imposible incluso a bajos niveles de agregación. Una solución podría ser la de incorporar, a cada uno de los dispositivos, algún elemento que permitiera separarlos eléctricamente. Por ejemplo, añadir un condensador a la tostadora permitiría modificar el comportamiento eléctrico de ésta y separarlo del horno. La solución definitiva a todos estos inconvenientes sería la utilización de la línea de alimentación como una red por la cual cada carga informe de su consumo de potencia, cuando ésta esté conectada, por medio de un protocolo dado. La futura automatización de las viviendas hará posible esta solución.

Normalmente, tratándose del estado estacionario, se suele representar la información de este régimen en dos dominios distintos pero que, al mismo tiempo, representan la misma información. Estos son el dominio temporal y el frecuencial. Ya que también se suelen estudiar las señales en el dominio frecuencial, se incluyen en la figura III.2.

A pesar de la limitación expresada en párrafos anteriores, no se debe despreciar la información que se pueda obtener del estudio de las señales del permanente, puesto que constituyen una buena y económica aproximación al problema del conocimiento de la composición de la carga en cada instante.

Se tiene ya definido cuál es el sistema físico y el procedimiento deseado para la identificación, y se han comentado las ventajas de las señales del permanente frente a las señales del transitorio. Por lo tanto, se tiene acotado el bloque “Sistema Físico” de la figura III.1. A continuación se puede continuar por el bloque de “Modelo Sistema” o por el de “Observación”. Se ha preferido seguir por este último, puesto que es una parte

relativamente independiente del resto del proceso y así no se interrumpe el desarrollo del capítulo cuando se empiece a hablar de los modelos.

Como conclusión, al ser las señales del transitorio una fuente de información no disponible en cada instante, se hará uso de las señales del permanente del sistema físico que se está estudiando, es decir las cargas. Las características que se consideran importantes y que se desean modelar son, por lo tanto, las relativas al permanente. Vista la necesidad de modelos de cargas que modelen el régimen permanente, se efectuó una búsqueda bibliográfica cuyos frutos se comentaran en el apartado III.4.-, Modelo del sistema: modelos de cargas. Sobre el sistema de medida desarrollado para medir la tensión y la intensidad en el permanente, éste se tratará en el siguiente apartado.

III.3.- Observación: sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos implementa el bloque de “Observación” de la figura III.1, el cual consta de dos partes independientes:

- El generador de funciones
- La adquisición de datos

Para el estudio del comportamiento de las distintas cargas ante distintas tensiones de alimentación, se necesita un generador de funciones de onda arbitraria y un amplificador en serie que permita, al modificar la tensión de alimentación de las cargas, observar la intensidad absorbida por estas en función del tiempo.

Las respuestas, en forma de onda de corriente, ante las excitaciones ejercidas, en forma de onda de tensión, a las que son sometidas las cargas son medidas con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos, la cual permite adquirir los datos directamente en el mismo ordenador donde serán posteriormente procesadas.

La filosofía de diseño del sistema de adquisición ha sido la de utilizar los estándares existentes en el mercado, cuando los hubiera, y, en caso contrario, crear los interfaces necesarios para independizar los elementos hardware y software entre sí.

Normalmente, si se habla de interconexión de equipos a nivel hardware, la estandarización es norma común, pero no se puede decir lo mismo del software que se comunica con estos. A veces, algún fabricante de hardware tiene una posición suficientemente dominante, dentro de su mercado, como para que la competencia no tenga

más remedio que cumplir con el API (interface software del hardware) que éste utiliza para sus productos. Este no es el caso del mercado de la adquisición de datos. Es cierto que han existido intentos de estandarización (SCPI, VXIplug&play), pero éstos limitan la selección de los equipos a aquellos que utilizan un determinado bus, o son de un determinado fabricante, sin buscar la independencia total del software sobre el hardware¹. Nuestro interés en la independencia del hardware es debido a que inicialmente se dispuso de un hardware que, durante los ensayos conducentes a la obtención de modelos de cargas se averió, y posteriormente se cambió por otro de un fabricante distinto. Esta experiencia hizo que el desarrollo del software tuviera como requisito de diseño imprescindible la independencia del hardware.

III.3.1.- Generador de funciones

El generador de funciones tiene como misión ser capaz de generar una forma de onda de tensión, programable, con la potencia suficiente para alimentar a varias cargas simultáneamente.

III.3.1.1.- Arquitectura hardware

El equipo del que se disponía en el laboratorio al comienzo de esta tesis constaba de un generador de funciones de formas de onda arbitraria, modelo HP33120A de la casa Hewlett-Packard, a cuya salida se conectaba la entrada de un amplificador monofásico, modelo ACM-500 de la casa Behlman, cuya potencia de salida era de 500VA. El generador de funciones se comunicaba con un ordenador por medio de una tarjeta que implementa el bus IEEE-488, también conocido como GPIB (General Purpose Interface Bus).

El GPIB, que permite tener conectados hasta 15 dispositivos en el mismo bus, ha sido estandarizado por la IEEE que estableció dos estándares: el IEEE-488-1, orientado hacia las especificaciones hardware (eléctricas, mecánicas, etc.), y el IEEE-488-2, orientado hacia las especificaciones software (formatos de datos, estado, procesamiento de errores, etc...).

El estándar IEEE-488-1 especifica tres tipos de dispositivos que pueden estar conectados: los controladores, los que escuchan (listeners) y los que hablan (talkers),

¹ Actualmente, existe un intento en este sentido que, con el nombre de IVI (Interchangeable Virtual Instruments), persigue este objetivo.

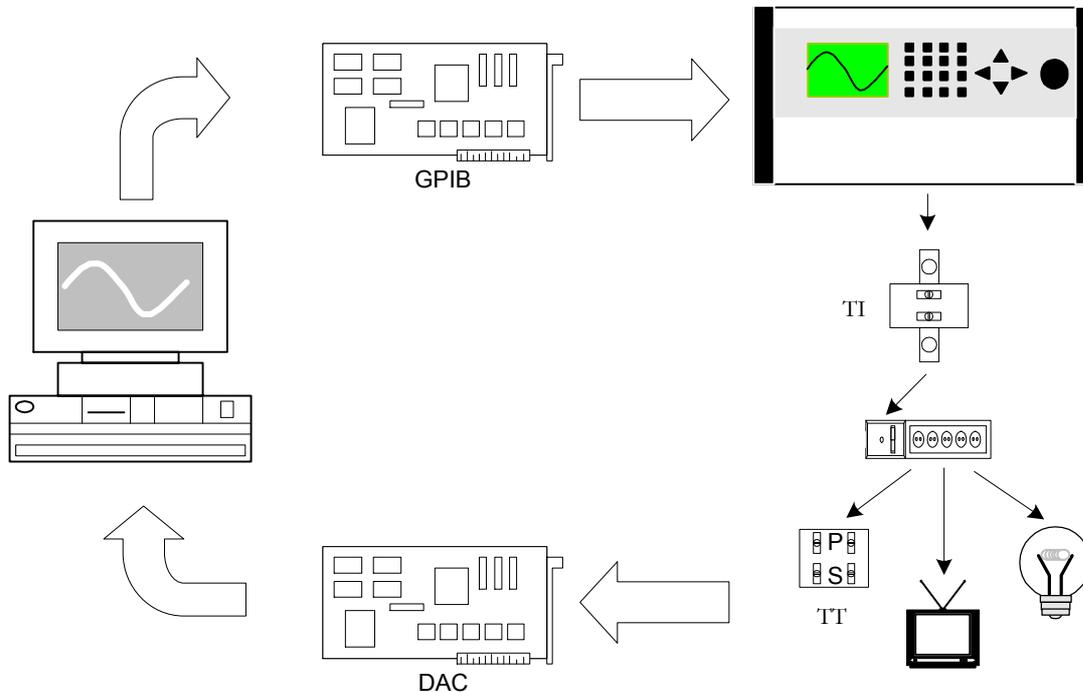


Figura III.3 Arquitectura hardware del sistema de generación y adquisición de datos

pudiendo algunos dispositivos implementar varias de esas funciones al mismo tiempo. Los controladores, a su vez, pueden ser de dos tipos: controladores del sistema y controladores activos. En todo bus GPIB debe existir un controlador del sistema, que es el que toma control del bus al inicializarse, que en nuestro caso es implementado por la tarjeta de expansión GPIB conectada al ordenador. El generador de funciones, conectado por medio del cable apantallado de 24 hilos estándar a la tarjeta GPIB, implementa un listener y un talker.

El estándar IEEE-488-2 no especifica sin embargo, un lenguaje de control remoto independiente del dispositivo, pudiendo darse el caso de que un mismo comando tuviera distinto significado para equipos distintos. Por eso, en 1990, un conjunto de fabricantes adoptó un lenguaje común de control remoto para instrumentos programables, el SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) **[SCPI]**. Los comandos estándar implementados con este lenguaje proveen de homogeneidad entre las distintas formas de programar dispositivos diferentes. El conjunto de comandos estándar no es cerrado, sino que puede ser expandido para ser ampliado por los fabricantes que así añaden las funciones proporcionadas por sus equipos más complejos, como los generadores de funciones. Esta expansibilidad, su punto fuerte, es al mismo tiempo su talón de Aquiles, ya que los fabricantes realizan la expansión de forma distinta.

Durante el desarrollo de la tesis se dispuso de un nuevo generador de funciones arbitrario que incluía, además, el amplificador de potencia integrado en el mismo equipo: el SW5250 de la casa ELGAR, que podía trabajar tanto como fuente trifásica como monofásica y que es de mayor potencia.

Ambos generadores de funciones utilizan el lenguaje SCPI para su programación a través de GPIB, pero el conjunto de comandos utilizados, tanto para su programación inicial como el paradigma de programación de la forma de onda, eran distintos. Como se estaba utilizando el generador HP, se podía haber seguido utilizando a éste, mientras que el SW5250 actuaría sólo como amplificador, pero como el generador de funciones HP tenía el inconveniente de que, cuando se modificaba la salida de la forma de onda generada, había un momento en que ésta no estaba completamente definida, entonces cuando alguna carga era sensible al nivel de tensión al que estaba siendo alimentada, como por ejemplo los ordenadores, una caída de la tensión podía provocar su reinicialización, y por lo tanto, entre ensayo y ensayo, se debía esperar el tiempo necesario a que volviera a alcanzar el permanente. Este inconveniente también se presentó con la fuente ELGAR, pero sólo cuando se ensayaron las lámparas de descarga. Por esta razón, se decidió utilizar como generador el integrado en el equipo SW5250. Esto hizo que se tuviera que volver a escribir la parte de comunicación con el hardware, pero esta vez, bajo la filosofía de la independencia de éste.

Por lo tanto, la configuración hardware del equipo consistió en un ordenador PC estándar con una tarjeta de expansión GPIB que comunicaba las formas de onda deseadas al SW5250, donde finalmente se conectaban las cargas a ensayar.

III.3.1.2.- Arquitectura software

Para conseguir la independencia del hardware interesa utilizar un diseño orientado a objetos, con lo que se puede aprovechar su débil acoplamiento con el exterior y al mismo tiempo, su gran cohesión interna y su reutilización.

Como las necesidades básicas eran dos: la programación del generador y la programación de la onda deseada, el diseño más intuitivo era la definición de dos clases que cubrieran cada una de estas necesidades. La figura III.4 muestra los métodos públicos y privados de estas dos clases, donde el signo “+” identifica a los métodos públicos que forman el interface de las clases y que definen los servicios ofrecidos al programador.

Con estas dos clases se han cubierto las necesidades básicas, en cuanto a generación de funciones se trata, del resto de programas desarrollados en esta tesis. Como ejemplo de utilización de estas clases se muestra en la figura III.5 un diagrama de secuencia -donde se describe una interacción entre objetos organizadas visualmente por orden temporal y utilizando el lenguaje unificado de modelado (UML) [UML]- la utilización de estas clases en la aplicación GPIB. Esta aplicación tiene como única función la programación de la fuente ELGAR con una forma de onda arbitraria. El diagrama expresa las llamadas entre objetos que se producen cuando un usuario ejecuta la aplicación e interactúa con el objeto “va”, que es una instancia de la clase Ventana_Armonicos, para leer un fichero de armónicos ya creado y lo utiliza para programar esa forma de onda en el generador.

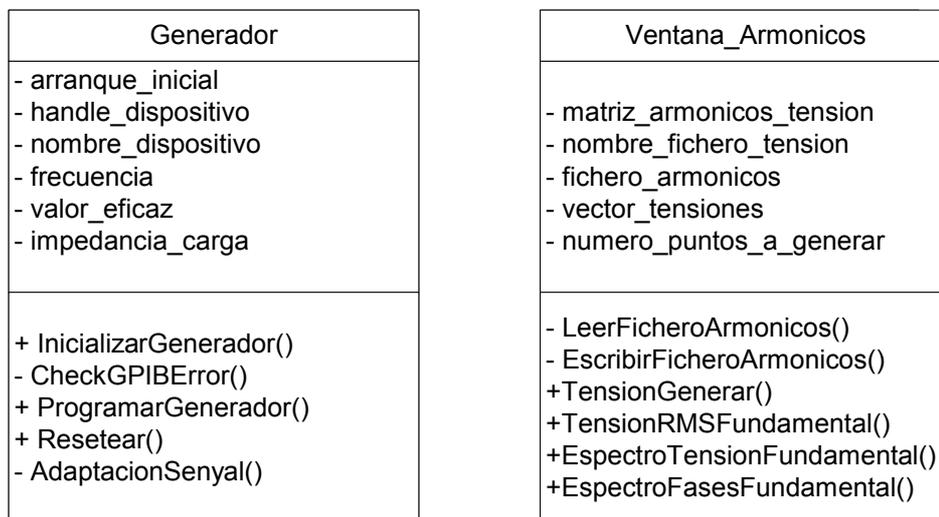


Figura III.4 Clases desarrolladas para la generación de funciones

Estas clases han sido reutilizadas en las siguientes aplicaciones desarrolladas para la tesis:

- GPIB
- ENSAYO
- LINEALIDAD

La aplicación GPIB sirve para poder programar el generador de funciones de forma independiente, y al mismo tiempo comprobar que los objetos hacen la función que de ellos se espera.

La aplicación ENSAYO sirve para poder obtener el modelo generalizado de admitancias cruzadas, y es utilizada en la etapa de “Modelo Sistema” de la figura III.1.

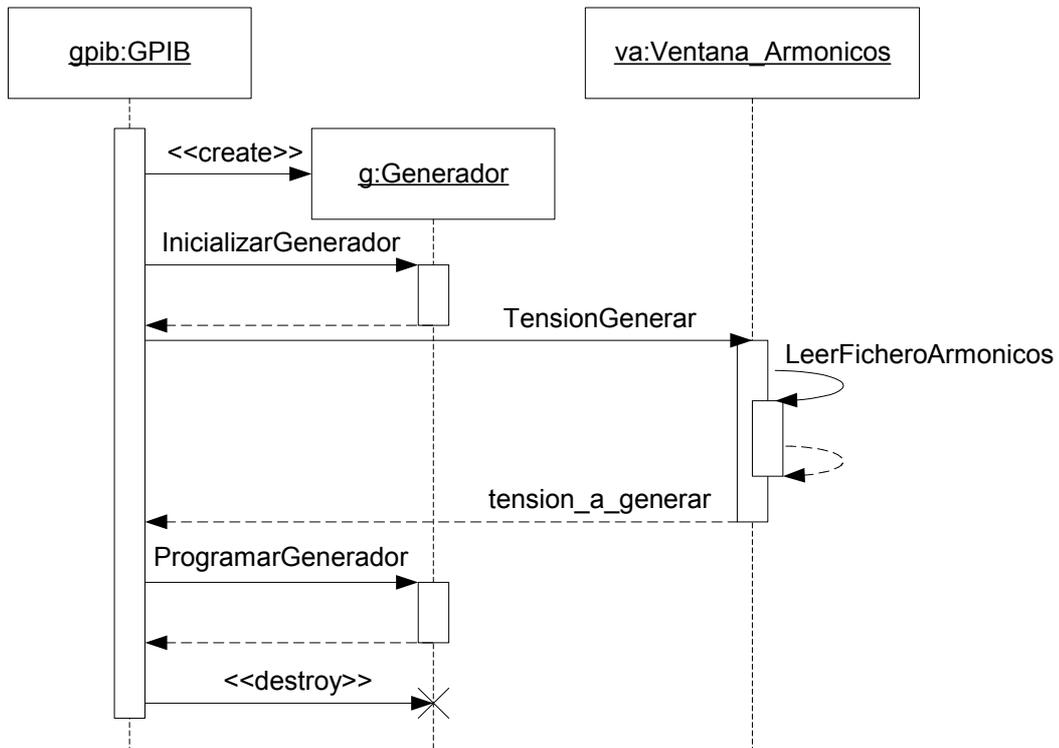


Figura III.5 Diagrama de secuencia de la aplicación GPIB

La aplicación LINEALIDAD sirve para poder realizar comparaciones entre tensiones reales y tensiones predichas por los modelos de las cargas, y es utilizada en las etapas de: “Comprobación” y en la de “Predicción”.

III.3.2.- Adquisición de datos

El otro subsistema del sistema de adquisición de datos es la adquisición de datos propiamente dicha. Éste se encarga de adquirir los valores de la tensión de alimentación y de la corriente absorbida por las cargas que se estén ensayando. A partir de las medidas, se obtendrán los modelos de las cargas.

A pesar de que se describa como subsistema, este es de por sí, independiente del de la generación, compartiendo entre sí únicamente al ordenador. Esta independencia se manifiesta en que, con el único cambio de los transformadores de corriente, es el utilizado para la identificación.

De forma semejante al generador de funciones se describirá al subsistema de adquisición de datos a través de su arquitectura hardware y software.

III.3.2.1.- Arquitectura hardware

En la parte inferior de la figura III.3, se muestra el hardware que forma parte del subsistema de adquisición de datos. Su composición es la típica de los sistemas de medida que utilizan a un ordenador para su implementación. Consta de los siguientes elementos:

- Transformador de Intensidad 10/5, clase de precisión 0,1.
- Transformador de Tensión 220/100, clase de precisión 0,5.
- Divisores de tensión para adaptar los valores de tensión.
- Tarjeta Adquisición Datos.
- Ordenador.

Los transformadores de tensión y de intensidad son los encargados de adaptar las magnitudes que se quieren medir a valores más bajos. Más bajos, pero no lo suficiente como para ser utilizados directamente por las entradas de las tarjetas de adquisición de datos. Es por eso que los divisores de tensión son necesarios tanto para terminar de adecuar los niveles a los de la tarjeta, como para convertir la señal de corriente del secundario del transformador de intensidad en señal de tensión. Los divisores deben estar correctamente calculados para no superar la máxima tensión de entrada de la tarjeta, en cuyo caso la señal de tensión es recortada a partir de los valores máximos.

La tarjeta de adquisición de datos es de la casa ComputerBoard [**CompBoard**], modelo CIO-DAS1602/16. Una tarjeta de hasta 16 canales que, entre sus características principales, destaca su convertidor analógico digital de 16 bits de resolución con una velocidad máxima de captura de muestras de 100 000 muestras/segundo. Además, dispone de un modo de funcionamiento por el cual puede adquirir datos, de canales distintos, con un intervalo mínimo de tiempo de 13,3 μ s. Esto significa que, siendo el tiempo de conversión de 10 μ s (correspondiente a 100 kmuestras/segundo), el multiplexor es capaz de estabilizar la señal a la entrada del convertidor analógico digital (CAD) en 3,3 μ s, disminuyendo por tanto el tiempo de retraso entre muestras tomadas de canales distintos. Esta característica se ofrece para minimizar las diferencias, en el tiempo, con el que se toman las muestras de los distintos canales. Error que siempre se comete con las tarjetas que sólo disponen de un CAD.

El fabricante, ComputerBoard, suministra su propia API: la Universal Library, que es común a todas sus tarjetas de adquisición pero que no sigue ningún estándar.

III.3.2.2.- Arquitectura software

Al inicio de la tesis se utilizó, para los primeros desarrollos de las aplicaciones², un entorno de desarrollo gráfico orientado especialmente a la adquisición de datos de la casa HP: el HPVEE [HPVEE]. Este es similar al LABVIEW, de la casa National Instruments, pero con la ventaja respecto a éste de que el tiempo de desarrollo es menor.

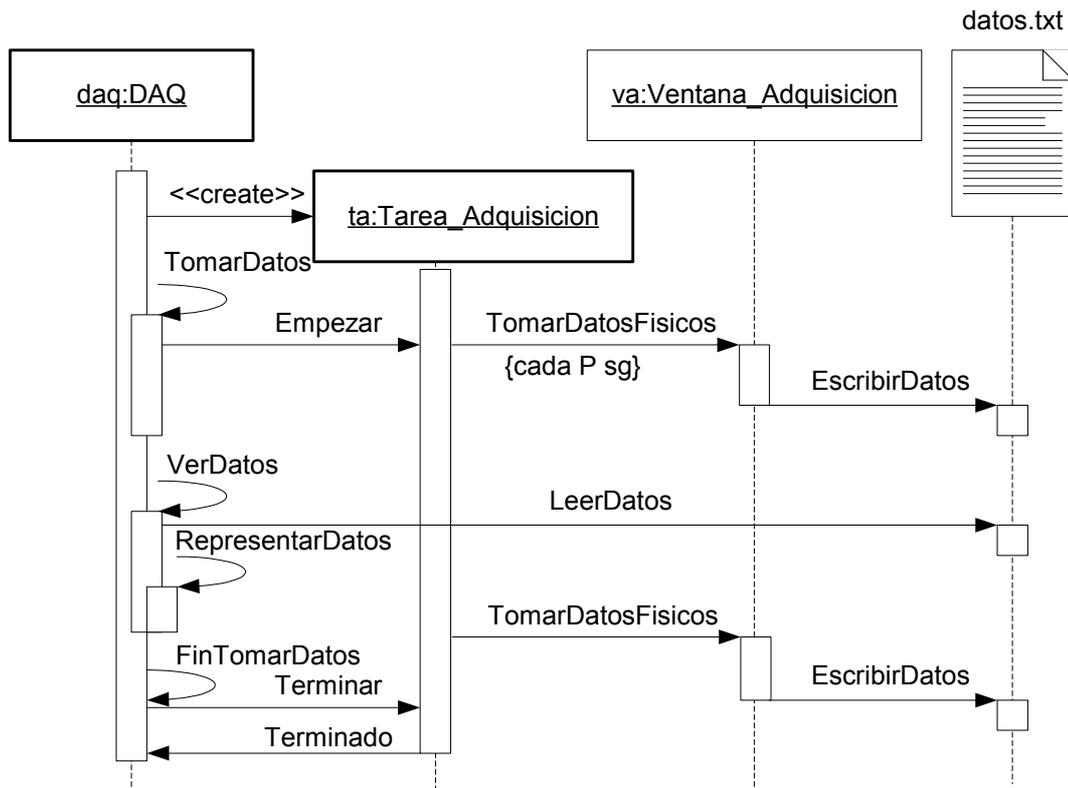


Figura III.6 Diagrama de secuencia de la aplicación DAQ

Se desarrolló una aplicación con esta herramienta que, conforme fue creciendo en complejidad, se vio que si la funcionalidad deseada no estaba directamente implementada en la herramienta, su implementación posterior era compleja. Por ejemplo, el almacenamiento en archivo de estructuras de datos complejas. Este problema hizo que se evaluara la herramienta de desarrollo C++Builder, de la casa Borland. Con este entorno se ganaba en flexibilidad y en velocidad de ejecución, pero se perdía en la no-disponibilidad de componentes ya diseñados orientados al tratamiento de la señal y a la adquisición de datos. Estos inconvenientes se consideraron superados por las ventajas de velocidad y flexibilidad.

² Cuando se utilizaban la fuente Behlman y el generador HP.

Como se quería implementar una aplicación que realizase el proceso de identificación en tiempo real, ganar en velocidad de ejecución no era una cualidad que se debiera despreciar, ya que no se podría conocer cuál sería la velocidad de ejecución hasta que todo el trabajo estuviera ya hecho. Por último, una buena arquitectura y un buen diseño del software tienen la ventaja de permitir ir añadiendo funcionalidad a una aplicación sin que la calidad de ésta se resienta. Por estos motivos se optó, finalmente, por el C++ Builder, herramienta con la que se han escrito todas las aplicaciones de la tesis.

Siguiendo con la filosofía de diseño de independencia del hardware, se diseñó una clase: *Ventana_Adquisicion*, que pudiera ser reutilizada por otros programas y que aislara los detalles de la adquisición de datos dependientes de la tarjeta. Un objeto instanciado de esta clase provee, en el momento de su creación, de una pantalla gráfica donde se introducen los parámetros de adquisición necesarios y que serán posteriormente utilizados durante todo el tiempo de vida del objeto. Posteriormente, sólo es necesario utilizar un método, *TomarMuestrasFisicas(double * valores_fisicos)*, para tomar datos tantas veces como sea necesario. Gracias al interface que es implementado por este objeto, el software que se escriba y haga uso de él es independiente del hardware subyacente y por lo tanto, no sería necesario reescribirlo si, durante el proceso de desarrollo, se utilizara una tarjeta de otro fabricante. Los detalles de la implementación quedan ocultos por la clase *Ventana_Adquisicion*.

Esta clase ha sido utilizada por las aplicaciones siguientes:

- DAQ
- LINEALIDAD
- IDENTIFICACION

La aplicación DAQ ha sido diseñada para la adquisición de datos y posterior procesamiento de éstos, por medio de una herramienta de propósito específico para el tratamiento de los datos como por ejemplo MATLAB. La aplicación LINEALIDAD sirve para poder realizar ensayos de tensiones a cargas y comparar el comportamiento de los modelos con la realidad. El programa IDENTIFICACION sirve para realizar el proceso completo de identificación de cargas agregadas a partir de los modelos de las cargas.

El diagrama de secuencia de la aplicación DAQ, figura III.6, muestra el paso de mensajes entre los objetos de la aplicación a lo largo del tiempo y cómo hacen uso del objeto **va**, de tipo *Ventana_Adquisicion*, para realizar la adquisición.

III.4.- Modelo del sistema: modelos de cargas

Se ha descrito en el apartado anterior el sistema de medida desarrollado para el bloque “Observación” de la figura III.1. En este apartado se tratarán los bloques: “Modelo Sistema”, “Comparación” y “Ajuste del Modelo”, para cada uno de los modelos estudiados en la presente tesis.

En los estudios de los sistemas eléctricos, las magnitudes que normalmente se suelen predecir son o las potencias, o las corrientes absorbidas por las cargas y, normalmente, en función de la tensión. El conocimiento de la corriente es un nivel superior de información, pero suele ocurrir que, con el conocimiento de la potencia activa y de la reactiva ya es suficiente, ahorrando en el tiempo necesario para llegar a resultados. Es por eso que, en la bibliografía, se encuentran más artículos que tratan sobre el modelado de la activa y la reactiva, utilizados para representar el comportamiento de un conjunto de cargas agregadas en estudios de estabilidad, flujos de potencias, etc., que sobre la modelización de la corriente, utilizados, sobre todo, en estudios de transitorios electromagnéticos.

En una serie de tres artículos sobre modelización de cargas: [Task, 93], [Task, 95a] y [Task, 95b], la “IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance” recoge las publicaciones relacionadas con la modelización de la activa y la reactiva (algunos modelos lo son de corriente), ofreciendo además unas recomendaciones para promover la estandarización de éstos, con el ánimo de promover el intercambio de datos entre programas de simulación.

Su estudio permite clasificarlos en dos grandes bloques:

- Estáticos
- Dinámicos

La diferencia entre ambos radica en que, mientras en los estáticos sólo se utilizan valores instantáneos para calcular la respuesta del modelo, en los dinámicos se utilizan tanto los valores instantáneos como los pasados. En la figura III.7 se puede ver el esquema creado tras su clasificación según la dinámica del modelo.

Los modelos más sencillos son los estáticos, que han sido utilizados desde hace años [Concordia, 82]. En estos modelos se realiza la predicción de la activa y la reactiva en función del valor eficaz de la tensión y, a veces, se considera la influencia de la frecuencia

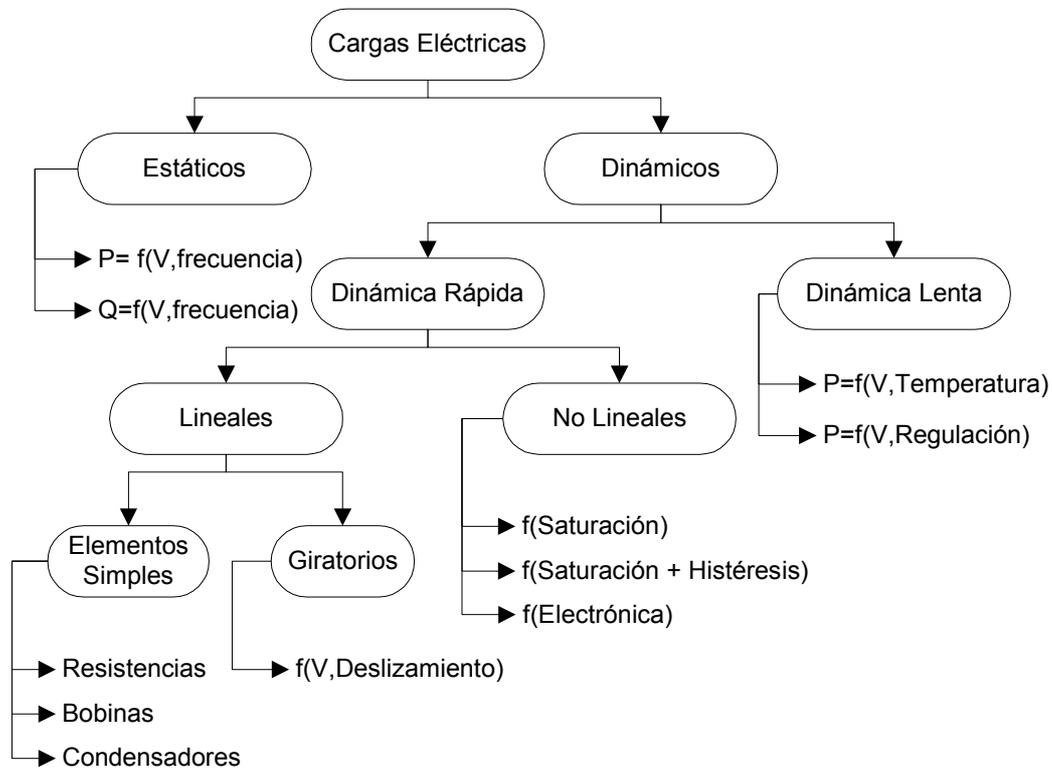


Figura III.7 Clasificación de modelos de carga según la dinámica

en otro término. Pudiera parecer que todos los modelos dinámicos intentarían predecir la corriente en función de la tensión, pero esto no es así puesto que, por ejemplo, los modelos dinámicos lentos suelen predecir la potencia en función de aquellas magnitudes de las que depende. Como ejemplos de modelos de dinámica lenta están la predicción del consumo de potencia en función, entre otros parámetros, del tiempo y la temperatura para equipos con almacenamiento térmico [Alvarez, 92] y la predicción del consumo de potencia en función de la regulación, de un transformador con regulación bajo carga (TCUL) [Hill, 93].

La idea principal, para la identificación, de la descomposición de la corriente absorbida por las cargas hace que se esté interesado, principalmente, aunque no se descarten los de potencia por su sencillez, en los modelos que predicen la corriente en función de sus variables de entrada. Estos modelos son los que, en la figura III.7, se clasifican como de dinámica rápida. La posterior clasificación de éstos en función del dominio utilizado para su representación se muestra en la figura III.8.

Según el dominio utilizado para su representación, los modelos de corriente se clasifican en:

- Modelos en el dominio temporal
- Modelos en el dominio frecuencial

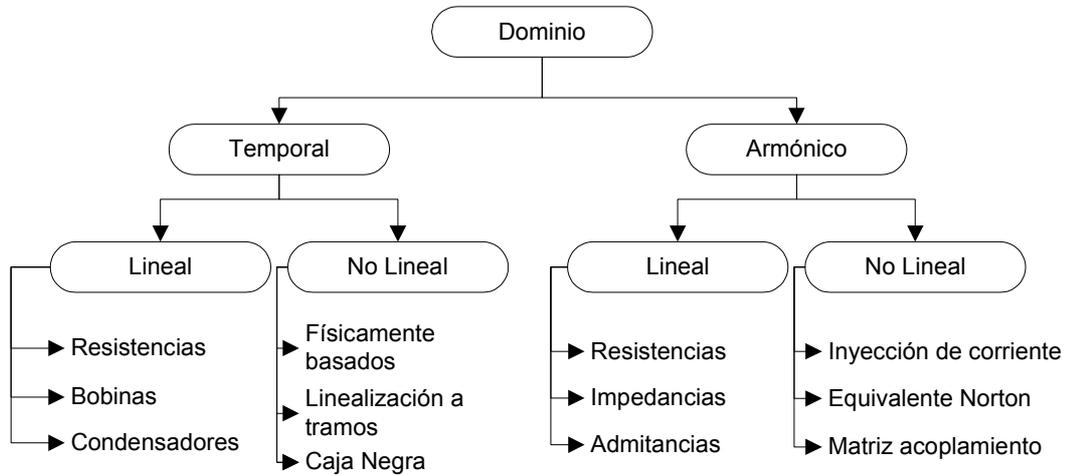


Figura III.8 Clasificación de modelos de carga según el dominio

Las leyes físicas generales están expresadas en el dominio del tiempo, pero cuando las excitaciones son armónicas, el dominio frecuencial presenta la ventaja, respecto del temporal, de la rapidez con que se puede obtener una respuesta sin más que realizar una operación algebraica entre magnitudes complejas.

Cuando la carga a modelar se sabe que tiene un comportamiento lineal, o es suficiente con una aproximación lineal, se suele modelar utilizando a los elementos lineales de la teoría de circuitos (elementos simples de la figura III.7), tanto en el dominio temporal como en el frecuencial, y normalmente es físicamente basada.

La extensión a la no-linealidad se puede hacer de diferentes formas según se esté en el dominio frecuencial o en el temporal. En el temporal, se hace de las siguientes:

- Físicamente basada
- Linealización a tramos
- Caja negra

La linealización a tramos se suele obtener simplificando a la físicamente basada. Como ejemplo, la no-linealidad de un diodo presenta en el tramo de conducción una exponencial función de la tensión. Una linealización de ésta hace que la exponencial se aproxime por una recta. Un ejemplo, de entre los muchos posibles, de modelo de carga físicamente basado sería el modelo de balasto magnético presentado por Cidrás ([Cidrás, 96], [Cidrás,

98]). Un ejemplo del modelo del balasto magnético linealizado a tramos sería el de [Boix, 96]³.

La aproximación por caja negra no hace uso de relaciones físicas entre las magnitudes, y sólo intenta predecir el comportamiento de la salida a partir de algún procedimiento matemático más o menos complejo de la entrada. Presentan la gran ventaja de que no hace falta analizar físicamente a la carga, con lo que se pueden utilizar como modelos generalizados de éstas. Ejemplo de esta aproximación sería el modelo generalizado de carga en presencia de armónicos y distorsión que presenta [Varadan, 93].

En cualquier caso, en todas las aproximaciones realizadas en el dominio temporal, la obtención de una respuesta del modelo suele ser el resultado de una simulación en el tiempo, que necesita de un tiempo de cálculo superior al necesario para el caso de los frecuenciales.

La extensión de la no-linealidad en el dominio frecuencial se suele hacer por medio de la superposición. Existen, principalmente, tres métodos:

- Inyección de corriente
- Equivalente Norton
- Matriz de acoplamiento.

El método de inyección de corriente es la técnica más común para modelar convertidores estáticos de potencia [MSPH], y consiste en utilizar linealización para cada armónico y finalmente superposición, sin tener en cuenta el acoplamiento entre armónicos. Su representación matemática es en forma de fuentes de corriente cuyas magnitudes están extraídas de medidas de la carga. Entre sus ventajas, está la de que computacionalmente no requieren de ninguna iteración, y entre sus desventajas, la de que no puede modelar la carga fuera del punto de operación del que se extrajeron las medidas. Puesto que se utilizan valores medidos, se puede considerar un método del tipo caja negra.

Considerar un equivalente Norton, para cada frecuencia, es una mejora del anterior en cuanto a que la admitancia Norton representa una aproximación de la respuesta de la carga ante las variaciones en los armónicos de la tensión de alimentación. En [Xu, 94b], se

³ Además se presentan la linealización a tramos de otras cargas no-lineales

presenta un modelo, en este caso físicamente basado, de convertidor estático trifásico. En [Boix, 96], se hace uso del equivalente Norton para modelar cargas, en este caso como caja negra.

La matriz de acoplamiento es el último método de extensión de la no-linealidad considerado. Con la matriz, se pretende retener toda la interacción armónica entre los armónicos de tensión y los de corriente. En [Jalali, 94], se presenta un modelo físicamente basado de un convertidor estático monofásico y en [Fauri, 97], se plantea este modelo, ahora como caja negra, para varias cargas.

La idea de descomponer la corriente total en suma de las corrientes individuales hace que los modelos que más se adaptan a nuestro propósito sean los de corriente. Como se desea realizar un sistema que sea capaz de identificar en el menor tiempo posible, es interesante que el tiempo necesario para obtener la respuesta del modelo no sea grande. Esta última razón parece sugerir algún tipo de modelo frecuencial, máxime si la identificación se realiza en el permanente donde el contenido armónico de la tensión suele restringirse a pocas frecuencias, pero dado que no se conoce el error que se puede cometer utilizando uno u otro, se estudiarán ambos tipos, los armónicos y los físicamente basados. Además, también se considerarán a los estáticos por la posibilidad de utilizar la información que ellos proporcionan en alguna etapa del proceso de identificación.

III.4.1.- Modelos estáticos

Estos modelos han sido utilizados desde hace años, razón por la que existen muchas variantes, como se puede ver de la gran cantidad de referencias que se citan en [Task, 95a], pero todos ellos se pueden derivar de la formulación generalizada presentada por el grupo de trabajo de la IEEE [Task, 95b].

La representación matemática de la formulación generalizada es:

$$\frac{P}{P_{frac}P_0} = P_{pz} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + P_{pi} \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_{pc} + P_{p1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{npv1} (1 + K_{pf1} \Delta f) + Q_{p2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{npv2} (1 + K_{pf2} \Delta f) \quad (III.1)$$

$$P_{pz} = 1 - (P_{pi} + P_{pc} + P_{p1} + P_{p2})$$

$$\frac{Q}{Q_{frac} Q_0} = Q_{qz} \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + Q_{qi} \left(\frac{V}{V_0} \right) + Q_{qc} + Q_{q1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nqv1} (1 + K_{qf1} \Delta f) + Q_{q2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nqv2} (1 + K_{qf2} \Delta f) \quad (III.2)$$

$$Q_{qz} = 1 - (Q_{qi} + Q_{qc} + Q_{q1} + Q_{q2})$$

$$Q_0 \neq 0$$

Donde:

P_0 y Q_0 son las Potencias activas y reactivas a tensión nominal.

P_{frac} y Q_{frac} son las fracciones del total de P y Q modeladas.

P_{pz} y Q_{qz} proporción de la parte modelada como impedancia constante.

P_{pi} y Q_{qi} proporción de la parte modelada como intensidad constante.

P_{pc} y Q_{qc} proporción de la parte modelada como potencia constante.

Es de notar, que los términos cuarto y quinto incluyen un parámetro para modelar la dependencia con la frecuencia, y que los parámetros P_{pz} y Q_{qz} se han de calcular según las formulas expuestas. También se definen dos tensiones para cada término de potencia: V_{1p} , V_{2p} , V_{1q} y V_{2q} , que se utilizan para reducir, linealmente, las potencias nominales cuando la tensión está entre ambos valores y hacerlas nulas cuando esté por debajo del límite inferior.

El modelo generalizado incluye a los modelos exponencial y polinomial en su formulación como casos particulares. Éstos fueron los primeros en ser utilizados y sus expresiones matemáticas son:

Modelo exponencial:

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np} \quad (III.3)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (III.4)$$

Modelo polinomial (también conocido como ZIP):

$$\frac{P}{P_0} = Z_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_p \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{Q}{Q_0} = Z_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_q \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_q \quad (\text{III.6})$$

Normalmente no se suelen tener en cuenta la dependencia de P y Q con la frecuencia, puesto que la variación en por unidad de este parámetro va a ser bastante menor que la excursión de la tensión [Karlsson, 94]. Por lo tanto, la utilización del exponencial o del modelo polinomial, como principales casos particulares del estático generalizado, se considera suficiente para representar el comportamiento estacionario de las cargas. A pesar de que modelan el comportamiento estacionario, existen modelos dinámicos que utilizan a los estáticos exponenciales para su formulación [Pal, 92][Hill, 93][Xu, 94][Karlsson, 94], en estos casos se parte de una ecuación diferencial de primer orden que relaciona potencias con variaciones en el tiempo de esta o de alguna otra variable intermedia, estando estos modelos orientados a estudios de estabilidad de la tensión y su ámbito de aplicación encaminado al estudio de la variación de potencia, tanto activa como reactiva, tras una perturbación de la tensión.

Los modelos estáticos que se estudiarán serán los modelos exponencial y polinomial. Se obtendrán los parámetros para las cargas que se ensayen sin tener en cuenta la dependencia con la frecuencia, y se estudiarán sus propiedades para su aplicación a la identificación de cargas.

III.4.1.1.- Potencia activa y reactiva

Los modelos estáticos sólo intentan predecir la potencia activa y reactiva consumida por las cargas en función del valor eficaz de la tensión. Puesto que se pueden realizar ensayos con formas de onda arbitrarias, para no tener en cuenta la influencia que puedan tener los armónicos de tensión, sólo se utilizarán para los ensayos formas de onda de tensión cuyo espectro sólo tenga la frecuencia fundamental. A pesar de esto, la forma de onda de intensidad sí que puede tener armónicos, por lo que se ha decidido incluir toda la información derivada de la medida de ésta para el cálculo de la potencia activa y reactiva. Se pensó que al tener en cuenta la información armónica en el cálculo de la reactiva se podría

tener mayor resolución a la hora de su aplicación en la identificación entre cargas. Por poner un ejemplo, un ordenador prácticamente tiene un factor de desplazamiento (desfase entre las componentes fundamentales de tensión y de intensidad) de cero. Por lo que la reactiva que hiciera uso de éste daría un valor numérico de cero. En cambio, se puede ver en la tabla III.1, cómo el valor de reactiva utilizando la información armónica es incluso mayor que el valor de activa, aunque, como finalmente se comprobará más adelante, no es posible utilizar ésta porque no cumple con la propiedad de linealidad.

La definición de potencia activa y reactiva que se ha utilizado coincide con la definición en el dominio del tiempo, y cargas monofásicas, propuesta, en 1989, por Cox y Williams [Lara, 99], y que entre otras cosas tiene la ventaja de que la implementación algorítmica es bastante eficiente puesto que no hace falta realizar una transformación de dominio. Estos autores definen la potencia aparente, activa y reactiva como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$S = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T v^2(t) dt} \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (\text{III.7})$$

$$P = \frac{1}{T_0} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (\text{III.8})$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{III.9})$$

En el caso de que se disponga de la información en el dominio armónico, también se puede evitar el cambio de dominio utilizando las expresiones presentadas en [Agunov, 97], y que se reproducen a continuación:

$$v(t) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\alpha_n \cos\left(\frac{2\pi}{T} nt\right) + \beta_n \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T} nt\right) \right) \quad (\text{III.10})$$

$$i(t) = \frac{\gamma_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\gamma_n \cos\left(\frac{2\pi}{T} nt\right) + \delta_n \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T} nt\right) \right) \quad (\text{III.11})$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha_n^2 + \beta_n^2)} \quad \text{y} \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{\gamma_0}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (\gamma_n^2 + \delta_n^2)} \quad (\text{III.12})$$

$$S = V_{rms} I_{rms}, P = \frac{\alpha_0 \gamma_0}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha_n \gamma_n + \beta_n \delta_n) \text{ y } Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{III.13})$$

III.4.1.2.- Ensayos

Para la obtención de los modelos exponenciales y polinomial se han utilizado un total de 41 ensayos por carga. Partiendo de una forma de onda sin ningún contenido armónico se fue incrementando la amplitud de la fundamental en intervalos de un voltio. Así, la amplitud de la componente fundamental variaba desde los 200Vrms hasta los 240Vrms ($\pm 10\%$ de la tensión nominal).

Tanto para el modelo exponencial como para el polinomial los parámetros se ajustaron por el método de los mínimos cuadrados [NumRec], en el cual se minimiza la siguiente función de mérito:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[y_i - \sum_{k=1}^M a_k X(x_i) \right]^2 \quad (\text{III.14})$$

Y donde se persigue ajustar los coeficientes del polinomio generalizado:

$$y(x) = \sum_{k=1}^M a_k X_k(x) \quad (\text{III.15})$$

Donde $X_1(x), \dots, X_M(x)$ son funciones fijas y arbitrarias de la variable x , llamadas funciones base.

Para el modelo polinomial estas funciones son: $1, (V/V_{nominal}), (V/V_{nominal})^2$ y para el modelo exponencial son: $1, \ln(V/V_{nominal})$.

Para el caso del modelo exponencial, se debe realizar la transformación siguiente para obtener la representación de la función en forma de polinomio generalizado.

$$P = S_0 k_p \left(\frac{V}{V_{nominal}} \right)^{np} \Rightarrow \ln(P) = \ln(S_{no\ min\ al} k_p) + \ln\left(\frac{V}{V_{no\ min\ al}}\right) n_p \quad (\text{III.16})$$

A pesar de que el coeficiente k_p sea el factor de potencia de la carga y se pueda calcular directamente de los datos, se ha utilizado el valor obtenido del ajuste para el cálculo de este.

El proceso de cálculo de k_q y de n_q ha sido análogo al utilizado para los coeficientes de la activa.

III.4.1.3.- Resultados

En este apartado se presentan los resultados y los parámetros de los modelos polinomiales y exponenciales obtenidos para cargas típicas del nivel de distribución en aplicaciones comerciales y residenciales. Aunque el conjunto de las cargas no es exhaustivo, sí se ha pretendido que sea representativo.

Se debe hacer notar que la aproximación por el modelo polinomial da, en todos los casos, menores errores al comportamiento real que la aproximación por el modelo exponencial. Esto es lógico, puesto que en el modelo polinomial se hace uso de tres parámetros en el ajuste, frente a solo dos en el exponencial.

Tabla III.1 Coeficientes ZIP (polinomial) derivados de las medidas

Cargas	Po	Activa			Qo	Reactiva		
	Wattios	Zp	Ip	Pp	VAr	Zq	Iq	Pq
Balastos Elect..								
Cipesa	38,24	-0,35	1,52	-0,16	55,81	-0,03	1,18	-0,14
Pritec	32,36	-0,43	2,21	-0,77	54,37	0,04	1,41	-0,46
Lámparas Elect.								
Attralux	6,78	0,24	0,59	0,15	10,65	0,34	0,58	0,06
Biax_GE	10,79	-0,33	2,03	-0,69	22,32	0,06	1,41	-0,48
Philips Ecotone 11	10,54	-0,20	1,45	-0,25	13,70	-0,12	1,50	-0,38
Philips Ecotone 14a	12,01	-1,49	4,01	-1,52	15,16	-1,04	3,32	-1,27
Philips Ecotone 14b	12,54	-0,80	2,73	-0,93	15,94	-0,44	2,19	-0,74
Energy Saver	17,67	-0,36	2,01	-0,64	28,98	-0,15	1,78	-0,62
Flash	18,51	-0,76	2,77	-1,01	29,65	-0,30	2,05	-0,74
Bombilla Incand..	92,75	0,44	0,66	-0,10	2,12	0,13	1,13	-0,26

Luz Mezcla	158,68	0,86	-0,31	0,45	38,55	-0,13	1,63	-0,49
Lamparas Descarga								
Vapor Sodio Alta	82,74	2,84	-3,50	1,66	14,84	23,05	-43,08	21,02
Vapor Mercurio	86,62	2,30	-2,16	0,86	17,63	29,38	-55,80	27,42
Balasto Magnético	88,60	1,09	0,04	-0,13	114,01	2,94	-2,53	0,59
Placa Calefactora	518,33	-0,41	2,76	-1,34	2,51	-15,48	30,64	-14,15
Ventilador	42,26	0,56	0,76	-0,32	1,53	2,12	0,02	-1,14
Ordenadores								
Compaq Deskpro	89,06	-0,27	0,57	0,70	146,36	-0,50	1,42	0,08
Compaq Prolinea	29,35	0,06	0,25	0,68	58,38	0,045	0,64	0,30
Philips	88,91	-0,32	0,80	0,52	139,03	-0,43	1,42	0,01
Televisor JVC	77,70	0,24	-0,38	1,13	111,39	0,02	0,48	0,49

Se debe decir que, a pesar de que el modelo polinomial sea conocido como modelo ZIP porque consta de la suma de los términos formados por una impedancia constante (Z), una fuente de corriente (I) y un término de potencia constante (P), esto no tiene ningún significado físico puesto que, si se observan los valores obtenidos para la placa calefactora como ejemplo de modelo de resistencia supuesta constante con la variación de la tensión, se observa que su coeficiente Z_p es negativo, al igual que el coeficiente P_p , mientras que el I_p lo es positivo. La interpretación de estos resultados desde el punto de vista físico es difícil. Algo similar ocurre con la bombilla incandescente que tiene valores parecidos de Z_p e I_p . Los coeficientes, se deben interpretar como aquellos pertenecientes al polinomio de 2º grado que mejor ajusta la curva de potencia activa y reactiva en función de la tensión, y no buscarle ninguna interpretación física.

El análisis de la dispersión de los parámetros obtenidos permitirá saber si éstos pueden ser utilizados para la identificación. Por ejemplo, si todas las cargas electrónicas tuvieran sus parámetros en torno a un conjunto estrecho de valores, distinto del resto de las cargas, entonces tal vez éstos se podrían utilizar para la identificación. Por eso, a continuación se

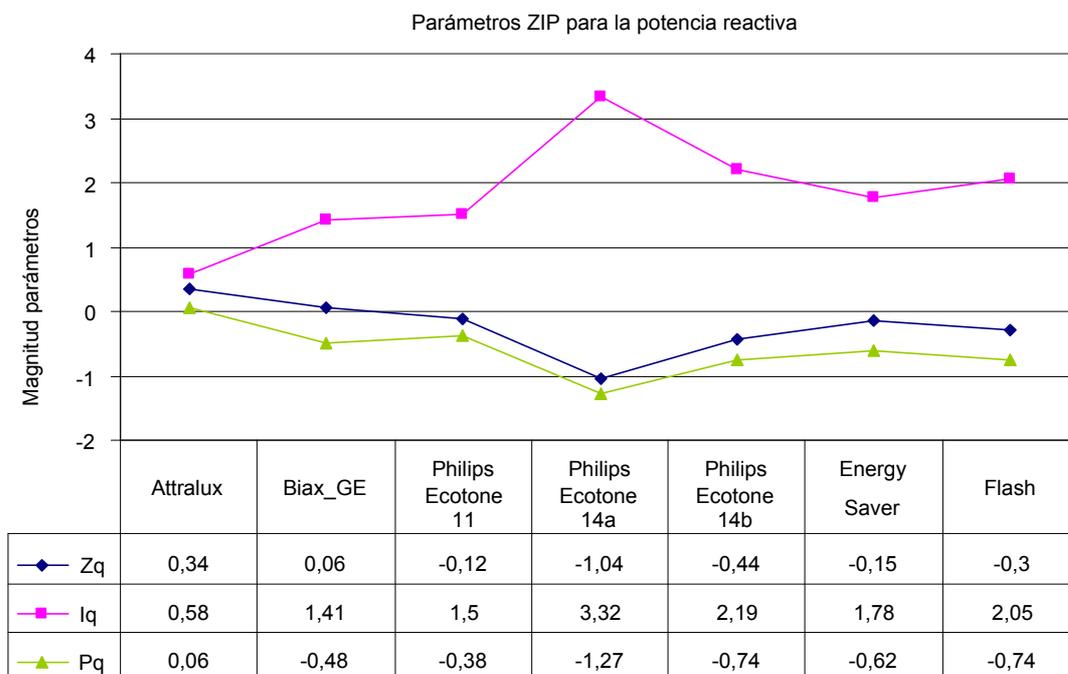
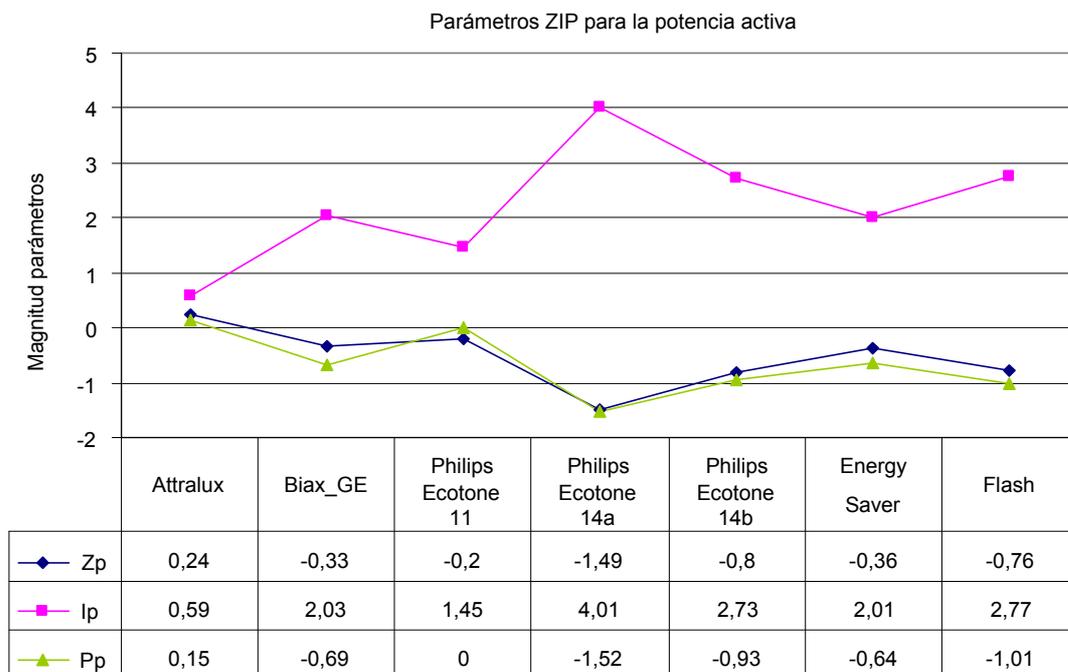


Figura III.9 Coeficientes del modelo polinomial para las lámparas electrónicas

va a realizar un estudio de la dispersión de los parámetros obtenidos para los dos modelos, y en el caso de que las cargas sean lámparas electrónicas.

Si se estudia la dispersión de los parámetros obtenidos para la potencia activa y reactiva de las lámparas electrónicas para el caso del modelo polinomial (ver tabla III.1), y cuyas representaciones gráficas están en la figura III.9, se puede ver que los valores que toman los

parámetros de las lámparas no son uniformes, existiendo grandes variaciones entre éstos. Como caso extremo las Philips Ecotone 14a y 14b, lámparas del mismo tipo y fabricante pero que presentan parámetros totalmente distintos.

Esta gran variabilidad en los parámetros ZIP obtenidos para las cargas electrónicas y que, analizando los valores de la tabla III.1, se refleja para el resto (cuyo comportamiento eléctrico se presupone semejante), impide utilizar a los parámetros de la representación polinomial como variables que permitan clasificar a las cargas según su comportamiento eléctrico.

Tabla III.2 Coeficientes EXP derivados de las medidas

	So	Activa		Reactiva	
Cargas	VA	kp	Np	Kq	Nq
Balastos Elect..					
Cipesa	67,65	0,56	0.81	0.82	1.11
Pritec	63,28	0,51	1,34	0,85	1,51
Lámparas Elect.					
Attralux	12,63	0,53	1,08	0,84	1,28
Biax_GE	24,79	0,43	1,36	0,89	1,55
Philips Ecotone 11	17,28	0,60	1,05	0,79	1,25
Philips Ecotone 14a	19,34	0,61	1,03	0,78	1,23
Philips Ecotone 14b	20,28	0,61	1,13	0,78	1,30
Energy Saver	33,95	0,51	1,29	0,85	1,48
Flash	34,96	0,52	1,27	0,84	1,45
Bombilla Incand..	92,77	0,99	1,55	0,02	1,40
Luz Mezcla	163,29	0,97	1,39	0,23	1,37
Lamparas Descarga					
Vapor Sodio Alta	84,06	0,98	2,12	0,18	2,34

Vapor Mercurio	88,40	0,98	2,41	0,21	2,02
Balasto Magnético	144,39	0,61	2,24	0,78	3,38
Placa Calefactora	518,34	0,99	1,97	0,004	-0,09
Ventilador	42,28	0,99	1,89	0,03	4,48
Ordenadores					
Compaq Deskpro	171,33	0,51	0,009	0,85	0,40
Compaq Prolinea	65,34	0,44	0,37	0,89	0,73
Philips	165,03	0,53	0,14	0,84	0,55
Televisor JVC	135,81	0,57	0,10	0,82	0,52

Si se realiza el mismo estudio de dispersión de parámetros para las lámpara electrónicas, pero con los valores obtenidos para el caso del modelo exponencial, se ve que la dispersión de los coeficientes es bastante menor, ver figura III.10, oscilando dentro de márgenes más estrechos. Por ejemplo k_p , que coincide con el factor de potencia de las cargas, oscila entre 0,51 y 0,61 ($\approx 16\%$) y N_p oscila entre 1,03 y 1,36 ($\approx 24\%$).

Los parámetros del modelo exponencial presentan, además de que los valores de los parámetros para cargas del mismo tipo estén agrupados, la propiedad de que los valores de los parámetros obtenidos para cargas con distinto comportamiento eléctrico son distintos. Por ejemplo, los ordenadores y el televisor, que son fuentes de continua conmutadas, tienen factores de potencia (k_p) que oscilan entre 0,44 y 0,57, rango en el que también están incluidas las lámparas electrónicas, pero en cambio el parámetro N_p es bastante diferente, puesto que entre las fuentes conmutadas este parámetro está en torno al 0,2 mientras que en las lámparas electrónicas está en torno a 1,2.

Al contrario de lo que ocurría en el modelo polinomial, los parámetros de las lámparas Ecotone ahora sí que toman valores próximos entre sí e independientes de la potencia como se esperaba, puesto que se suponía que las lámparas deberían ser semejantes por construcción y no debería, por lo tanto, existir esa variación de parámetros.

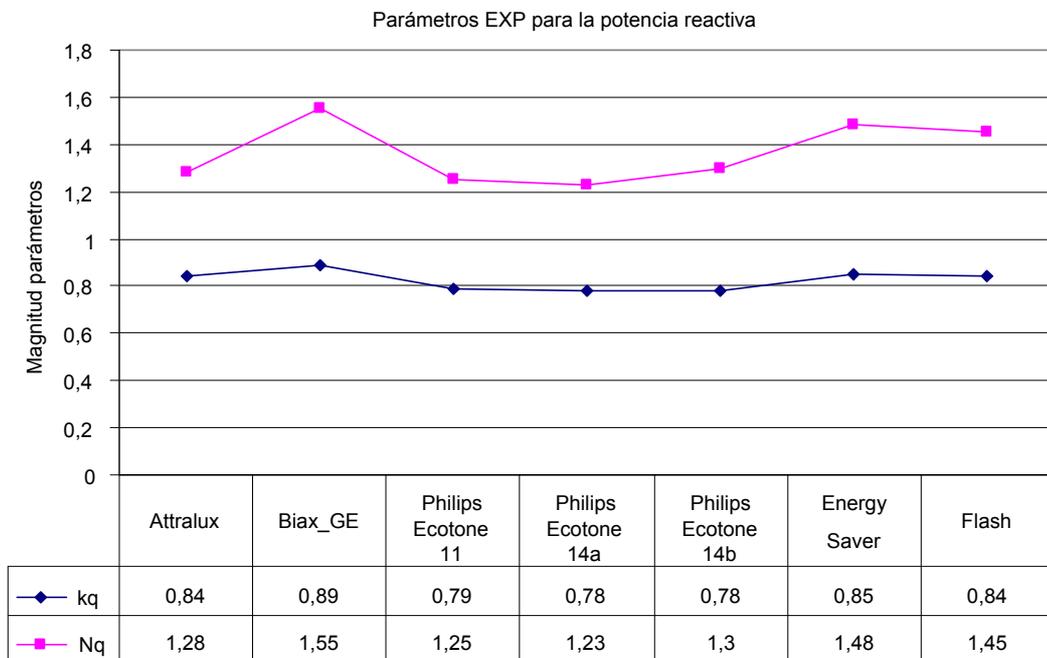
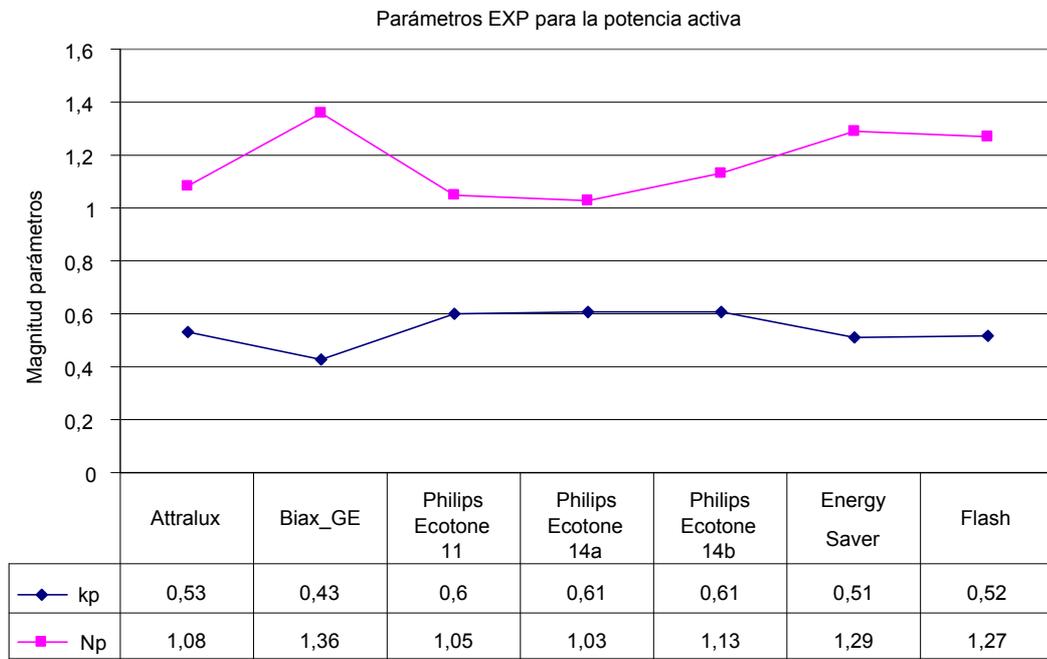


Figura III.10 Coeficientes del modelo exponencial para P en las lámparas electrónicas

Los resultados obtenidos para las cargas ensayadas han sido comparados con los valores obtenidos por otros autores [Hajagos, 98][Kundur] y éstos son semejantes a los presentados.

De las medidas, se pueden comentar además, dos detalles que sorprendieron: por un lado el comportamiento de la bombilla incandescente, la cual se esperaba que tuviera un

coeficiente de 2 -puesto que se pensaba que se comportaría como una impedancia resistiva constante, pero dada la temperatura que alcanza el filamento de wolframio, la variación de su resistencia con la temperatura es apreciable-, presentando al final el coeficiente de 1,55. Por otro lado, el comportamiento de las cargas tipo ordenadores y televisión, que presentan un consumo de potencia que depende del uso que se esté haciendo de ellas (lógico a posteriori). Por ejemplo, si el disco duro de un ordenador está siendo utilizado el consumo aumenta respecto al consumo cuando está desconectado. Igualmente, en los televisores, la posición del indicador del volumen hace variar el consumo de estas cargas. Esto lleva también a la conclusión de que los modelos obtenidos para estas cargas y las semejantes no representan el consumo en todo instante sino más bien aquel en el que se obtuvieron los parámetros del modelo.

III.4.1.3.1.- Linealidad

Respecto al comportamiento del modelo exponencial en la agregación de cargas, se sabe que la potencia activa es una variable cuyo comportamiento debe aumentar conforme se van conectado cargas, pero surgen dudas en cuanto a si esa propiedad se sigue cumpliendo con la potencia reactiva.

Tabla III.3 Resultado del ensayo de linealidad

	Tensión	kp	Np	kq	Nq	Activa	Reactiva
Predicción exponencial							
(1) Balasto Magnético	212,85	0,61	2,24	0,78	3,38	81,79	100,72
(2) Balasto Electrónico	212,85	0,51	1,34	0,85	1,51	30,87	51,17
Superposición (1)+(2)						112,66	151,89
Observación sistema real							
Magnético y Electrónico						112,00	103,95
Error Absoluto						0,66 W	47,94 VAr

Para verificar la propiedad de linealidad, se realizó el ensayo siguiente: se midió el comportamiento agregado de dos cargas y se obtuvo tanto la potencia activa como la reactiva agregada, comparándose con el resultado de sumar el comportamiento predicho

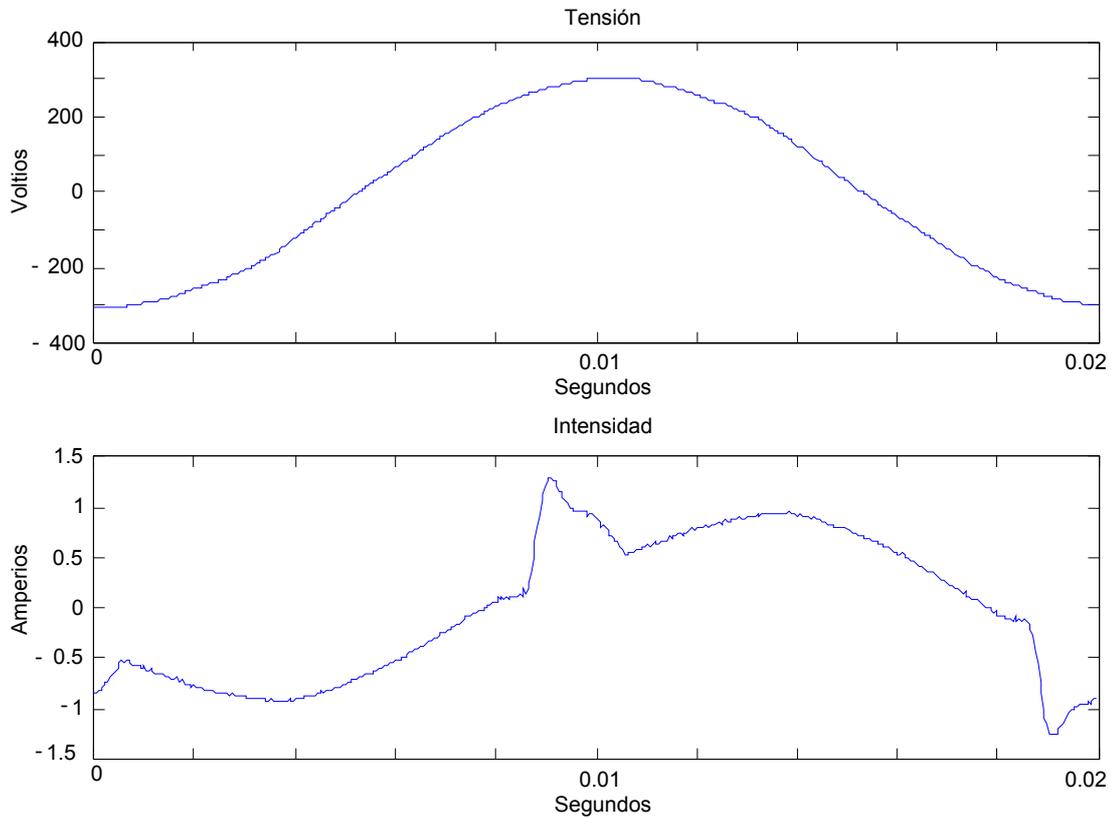


Figura III.11 Tensión y corriente absorbida en el ensayo de linealidad de P y Q

por los modelos. En caso de que se cumpla la propiedad de linealidad tanto para la activa como para la reactiva los resultados deben ser similares.

Para el ensayo, se escogieron como cargas al balasto magnético y al balasto electrónico de la casa Pritec y se conectaron a la fuente programable simultáneamente. A continuación, se sometieron a ambas cargas a la forma de onda de tensión mostrada en la figura III.11, y se midió la forma de corriente que también se muestra en la misma figura. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla III.3.

El resultado del ensayo muestra que no se puede aplicar superposición para la potencia reactiva y sí para la activa.

III.4.1.3.2.- Imposibilidad de utilizar modelos de potencia para la identificación a niveles de agregación de centro de transformación

El resultado obtenido en el apartado anterior hace imposible identificar a las cargas utilizando modelos estáticos en cuya definición de reactiva se utilice la información proveniente del contenido armónico de la onda de tensión y de corriente. Esto se ve fácilmente observando que, según sea el orden de conexión y desconexión de las cargas, los

valores de reactiva que se medirán serán distintos. Por ejemplo, supongamos inicialmente que no se tiene ninguna carga conectada y que se conecta el balasto magnético. A continuación, se medirá un incremento de 100,72 VAR, si seguidamente se conecta el balasto electrónico, se medirá entonces un incremento de 3,95 VAR. En cambio, si el orden de conexión se invierte, los incrementos medidos serán de 51,17 y 52,78 VAR respectivamente. Para un mismo estado final tenemos dos caminos posibles. Cuando en vez de sólo dos cargas pasan a ser varias, los posibles caminos se multiplican. Por lo tanto, sólo se podrá utilizar la potencia activa y la reactiva tomando la definición tradicional para esta última.

Un problema que surge del hecho de utilizar la definición tradicional de reactiva es la pérdida de resolución para separar cargas. Por ejemplo, las lámparas electrónicas no absorberán reactiva, puesto que el desfase entre las componentes fundamentales de tensión y de corriente es cero, con lo que el comportamiento de éstas no podrá diferenciarse de aquellas que tengan el mismo consumo de activa.

La información de la activa también tiene sus problemas ya que conforme el nivel de agregación de cargas es mayor, los incrementos de potencia activa respecto al total son menores y, por lo tanto, la resolución disminuye puesto que estas variaciones de potencia pueden ser provocadas por las variaciones de la tensión de la red de distribución o por la conexión simultánea de varios equipos, posibilidad esta que se ve notablemente incrementada con la agregación.

La figura III.12 sirve de ejemplo para reflejar estos problemas. En esta figura se representan cuatro gráficas de consumo de cuatro circuitos que no son independientes, ya que del circuito de la acometida se derivan los otros tres. Por lo tanto, los escalones que se ven en los circuitos derivados son agregados en el circuito de la acometida. Como se puede ver, la actividad de los circuitos derivados aumenta conforme aumenta el nivel de potencia, o lo que es lo mismo, el nivel de agregación, reflejándose la mayor actividad del conjunto en la acometida.

Para ver cómo la conexión simultánea de equipos y las variaciones de la tensión pueden enmascarar la conexión de otro, se puede poner como ejemplo al escalón de potencia que se ve en el gráfico de potencia del circuito nº1 a partir del segundo 40. Este puede ser

debido, perfectamente, a un aparato de aire acondicionado que arranca⁴ y alcanza el estacionario antes del siguiente pico a los 53 segundos. El escalón de potencia medido es de unos 800 Watios, que se corresponde con el consumo de los equipos en torno a las 2200 frigorías, suficiente para acondicionar un despacho. Este escalón tan nítido en el circuito nº1, no tiene su equivalente en la acometida donde la desconexión de una o varias cargas en el circuito nº3 hace que, en conjunto la señal no esté presente en la acometida más de 0,3 segundos, sin haberle dado tiempo al equipo a alcanzar su permanente. En cuanto a las variaciones de tensión, siempre presentes, se reflejan en el nivel de rizado. Por ejemplo, la potencia absorbida por la acometida presenta oscilaciones de ciclo a ciclo de más de 100 Watios con mucha frecuencia, por lo que cualquier carga por debajo de este valor no se puede identificar por el aumento de consumo en el momento de su conexión.

Se concluye, por los problemas ya comentados, que difícilmente se podrán identificar cargas a un nivel de agregación de centro de transformación utilizando como fuente de señal el incremento del consumo de potencia activa y reactiva que se produce en el momento de la conexión y desconexión de éstos. Esta conclusión impide utilizar, de manera única, a los modelos de potencia para la identificación de cargas al nivel de agregación de centro.

⁴ Este pico de potencia podría reflejar el pico de corriente que se produce en el momento del arranque. Este pico se ha visto en todos los aparatos de aire acondicionado que fueron medidos.

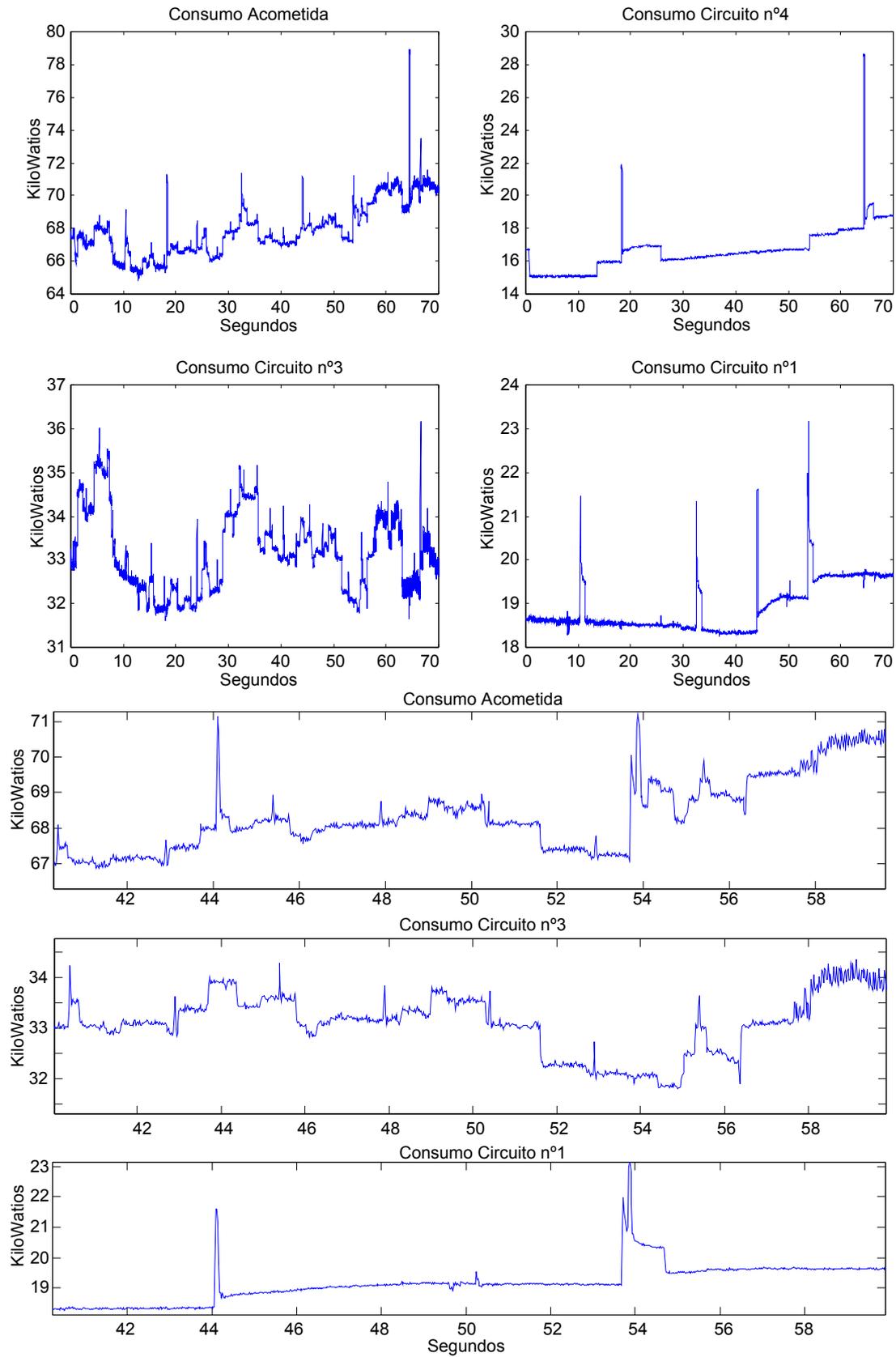


Figura III.12 Potencia activa absorbida por distintos circuitos en función del tiempo

III.4.2.- Modelos armónicos

En el apartado anterior se ha visto la no-idoneidad de los modelos estáticos para identificar cargas conforme el nivel de agregación aumenta. Aun así, el estudio de los modelos estáticos muestra que la potencia absorbida por las cargas depende del nivel de tensión y, asimismo, de la carga. Queda por estudiar si los modelos que predicen a las corrientes absorbidas por las cargas, en función de la tensión, serán capaces de servir para la identificación de la composición de las cargas, tema que se estudiará en el siguiente capítulo.

En este apartado se estudiará el primer grupo de modelos de corriente de los considerados en esta tesis: los modelos armónicos, y en el apartado siguiente, los físicamente basados.

Lógicamente, se espera más de ambos ya que predicen toda la información posible en el permanente, esto es la corriente instantánea. Lo deseable en estos modelos es que su predicción en régimen permanente sea la mejor posible. Dado que en el régimen permanente las cargas suelen absorber corrientes con contenido armónico no despreciable, y éstas, a su paso por las impedancias de los medios de distribución, dan lugar a caídas de tensión armónicas, se concluye que normalmente las cargas son alimentadas por tensiones con contenido armónico. De aquí el interés que tiene modelar la respuesta de las cargas ante tensiones de alimentación distorsionadas. Distorsión ésta, en parte causada por aquellas cargas no lineales conectadas en el mismo punto del nivel de distribución que la carga estudiada y en parte por las no linealidades de las cargas que estén conectadas en otros.

Las cargas que absorben corrientes no lineales se pueden clasificar en alguno de los siguientes tipos [TaskH, 96]:

- Existe un estado periódico y estacionario. La onda de corriente absorbida se puede expresar por medio de una serie de Fourier cuya frecuencia fundamental es igual a la frecuencia fundamental del Sistema Eléctrico.
- Existe un estado periódico y estacionario. La onda de corriente absorbida se puede expresar por medio de una serie de Fourier cuya frecuencia fundamental es un submúltiplo de la frecuencia fundamental del Sistema Eléctrico.

- La onda de corriente absorbida no es periódica pero se puede considerar cuasiperiódica. Se puede utilizar un desarrollo en serie de funciones trigonométricas como aproximación.

Fundamentalmente, existen dos fuentes de armónicos en los sistemas convencionales:

- Dispositivos que incluyen electrónica conmutada: tales como fuentes de alimentación, balastos electrónicos, etc.
- Dispositivos con una relación no lineal entre la tensión instantánea y la corriente absorbida. Ejemplo típico de este comportamiento son las reactancias que tienen núcleos magnéticos.

A nivel residencial y comercial, que es el que se está estudiando, cargas típicas que generan armónicos son por ejemplo: los ordenadores, televisores y demás cargas que tienen una fuente de alimentación conmutada o un rectificador basado en un puente de diodos, la iluminación con lámparas de descarga, como los tubos fluorescentes, y los motores de pequeñas cargas, como los frigoríficos y equipos de aire acondicionado, entre otras.

Para almacenar las formas de onda de estas y otras cargas se han elegido modelos armónicos para cargas periódicas y estacionarias cuya frecuencia fundamental sea igual a la frecuencia del sistema, puesto que prácticamente todas las cargas, excepto los aparatos de aire acondicionado⁵, presentan este comportamiento. Esta elección de por sí no es una restricción del modelo, pudiendo utilizarse para modelar cargas cuyas corrientes absorbidas contengan subarmónicos. En este caso la frecuencia del subarmónico de corriente se trataría como la fundamental y las demás como armónicos de ésta, y se debería hallar la respuesta del modelo cuando se alimenta con una tensión cuya frecuencia sea el armónico correspondiente con la frecuencia de la red.

III.4.2.1.- Aproximación mínimo cuadrática

Para almacenar la información de la onda a lo largo del tiempo se va a utilizar el desarrollo en serie de Fourier que, como es sabido, no es más que la aproximación mínimo cuadrática de un conjunto de funciones ortonormales a la función objetivo **[MSPH]**. Esta

⁵ En el capítulo siguiente se comprobará que éstas presentan un subarmónico en torno a 1Hz.

aproximación sigue la misma filosofía que la utilizada para la aproximación de una función por exponenciales y polinomios (ecuación (III.15)) pero ahora, cambia la forma de obtener los coeficientes. En este caso, éstos son obtenidos por medio de la FFT, algoritmo que se ha implementado a partir del publicado en [Oppenheim]. En el Anexo A se profundiza un poco más en el tema, justificando cómo se obtienen los coeficientes de la serie de Fourier a partir de la FFT. El interés de utilizar la FFT es debido a que el tiempo de cálculo de los coeficientes de la serie es menor utilizando la FFT que el necesario en el caso de utilizar directamente la definición. La proporción entre los tiempos necesarios puede llegar a ser de 37 a 114 veces, en función de cual sea la frecuencia de muestreo utilizada.

Este último dato justifica la utilización de la FFT para disminuir el tiempo de cálculo de la obtención de la respuesta del modelo armónico, que repercutirá en el tiempo de cálculo del algoritmo de identificación.

Por último, cuando se da el caso de que el espectro de frecuencias de una función sólo contiene a la frecuencia fundamental de la red y a los armónicos de ésta, entonces con sólo estos datos se tiene representada a toda la función. Es normal asumir que no hay otras frecuencias en el sistema excepto la fundamental y sus armónicos, y entonces se habla del dominio armónico, entendiéndose a éste como una caso particular del dominio frecuencial.

III.4.2.2.- Elección del modelo armónico

Existen en la literatura varios modelos armónicos que se han utilizado con anterioridad para la modelización de cargas no lineales. En general, éstas se modelan como fuentes de corriente dependientes de los armónicos de tensión, [TaskH, 96]:

$$\bar{I}_h = F(\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_n, C) \quad h = 1 \dots m \quad (III.17)$$

En donde $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_n$ son los fasores armónicos de la tensión de suministro, C es un conjunto de variables de control (ángulos de disparo, etc.) y h el orden del armónico.

Esta modelización por fuentes de corriente dependientes de los armónicos de tensión, puede ser utilizada para modelos físicamente basados, cuando se conoce con exactitud

cuáles son los componentes de la carga a modelar⁶, [Jalali, 94][Xu, 94b], o para modelos tipo caja negra, [Gilker, 89][Boix, 96] [Fauri, 97], donde la variedad, y/o desconocimiento físico de las cargas a modelar hace que no sea posible, o práctica, la modelización físicamente basada de estas. Como en esta tesis se busca la identificación de un gran conjunto de cargas, se preferirá a aquellos modelos que hagan uso de la filosofía caja negra. Éstos, normalmente, hacen que el tiempo empleado en el modelado sea pequeño o despreciable, mientras que el empleado en obtener los parámetros de las cargas, lo sea grande. Así, se podrán modelar a un gran número de cargas que sean semejantes pero no idénticas, como por ejemplo los balastos electrónicos. El comportamiento eléctrico de los balastos de los distintos fabricantes pueden llegar a ser bastante diferentes entre sí, a pesar de que se supone que rectifican a la alterna por medio de un puente de diodos. Esto es debido a los diferentes componentes electrónicos con que cada fabricante hace los suyos, con variaciones en sus consumos, y al filtrado que hagan de los armónicos de corriente que generan.

Este tipo de modelos, en conjunto, es especialmente adecuado para su uso en métodos de análisis armónicos iterativos, [TaskH, 96], en los cuales se pretende retener la interacción armónica entre armónicos de distinta frecuencia. En estos estudios, se divide al sistema en una parte que es lineal, normalmente la red de transporte, y en otra que no lo es, normalmente las cargas, y, partiendo de una tensión inicial, se obtiene la corriente absorbida por las cargas por medio de (III.17). A continuación, se resuelve el sistema formado por las ecuaciones de nodo del sistema eléctrico de potencia (ecuación (III.18)) para cada una de las frecuencias nf_0 (siendo f_0 la frecuencia fundamental), y obteniendo la nueva tensión del sistema en el punto de alimentación, ésta se utiliza como punto de partida para volver a iterar hasta alcanzar el grado de convergencia deseado.

$$[\bar{Y}_n][\bar{V}_n] = [\bar{I}_n] \quad (III.18)$$

Una clase especial de estos modelos son los que pretenden encontrar una relación lineal entre armónicos de tensión y los armónicos de corriente absorbidos por la carga. Éstos aplican linealidad en torno al punto de trabajo y superposición. Generalmente son modelos a los que se puede representar matricialmente como:

⁶ Normalmente son modelos de convertidores estáticos de gran potencia.

$$[\bar{I}_n] = [\bar{Y}][\bar{V}_n] \quad (\text{III.19})$$

El modelo más sencillo que sigue este esquema es el que utiliza Gilker **[Gilker, 89]**, el cual modela la carga no lineal por medio de fuentes de intensidad independientes de la tensión. Por lo tanto, en este caso la matriz de admitancias es idénticamente nula. Boix, **[Boix, 96]**, propone un modelo que retiene la interacción armónica entre tensión y corriente, el cual puede escribirse como:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \dots \\ \bar{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \bar{Y}_{31} & 0 & \bar{Y}_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Y}_{m1} & 0 & 0 & \dots & \bar{Y}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \dots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Según este modelo, la carga tiene, a cada una de las frecuencias armónicas, un esquema equivalente formado por una fuente de corriente dependiente de la componente fundamental de tensión y una admitancia en paralelo. La obtención de los parámetros se realiza de forma secuencial calculando primero el parámetro dependiente de la componente fundamental y posteriormente la admitancia alimentado la carga con la fundamental más un armónico.

Posteriormente se propuso en la bibliografía una extensión del modelo, **[Fauri, 97]**, en el que la componente armónica de corriente se calcula a partir de una combinación lineal de los armónicos de tensión, ecuación (III.21).

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \dots \\ \bar{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \dots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \dots & \bar{Y}_{2n} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \dots & \bar{Y}_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Y}_{m1} & \bar{Y}_{m2} & \bar{Y}_{m3} & \dots & \bar{Y}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \dots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

A la matriz $[\bar{Y}]$, de orden $m \times n$, se la denomina matriz de admitancias cruzadas y tiene en cuenta la interacción armónica no sólo de la componente fundamental de tensión, sino también del resto de armónicos de tensión.

Se eligió, como modelo armónico para las cargas, a la matriz de admitancias cruzadas puesto que, en los ensayos realizados por el autor a balastos magnéticos y a motores

monofásicos [Fauri, 97], existía muy buena concordancia entre los valores medidos y los predichos, incluso cuando la tensión de alimentación contenía armónicos. Además, presenta las ventajas de que al ser de tipo caja negra, éste podía ser utilizado como modelo generalizado para todo tipo de cargas no-lineales, y que el procedimiento de obtención de los parámetros de la matriz era automatizable.

III.4.2.3.- Modelo de admitancias cruzadas

Se realizaron ensayos al mismo conjunto de cargas de la Tabla III.1, y se obtuvieron los parámetros del modelo de admitancias cruzadas de éstas. Para ello se hizo uso del generador de funciones arbitrario y se desarrolló una aplicación software que realizaba el conjunto de ensayos de forma automática, obteniendo la matriz y guardándola en forma de un fichero de texto en el disco duro del ordenador.

Los ensayos necesarios para obtener los elementos de la matriz son semejantes a los utilizados para obtener el modelo equivalente Norton. Su proceso consta de dos etapas:

1) Obtención columna fundamental ($j=1$)

Se alimenta la carga con una fuente de tensión senoidal,

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t) \quad (\text{III.22})$$

y a continuación se mide la corriente absorbida. Este test nos proporcionará la columna correspondiente a la componente fundamental.

2) Resto de columnas de la matriz ($j=2..n$)

Se alimenta la carga con una forma de tensión que incluirá la componente fundamental del paso 1 y a la que se le incorpora el armónico de orden j con una amplitud fracción de la amplitud de la fundamental.

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t) + \sqrt{2} V_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (\text{III.23})$$

Con estos ensayos se está en condiciones de obtener todos los elementos de la matriz. Los correspondiente a $j=1$ se obtienen directamente de la siguiente expresión:

$$\bar{Y}_{k1} = \frac{\bar{I}_k}{\bar{V}_1} \quad (\text{III.24})$$

Se debe tener en cuenta que se están realizando operaciones matemáticas con fasores de distinta frecuencia angular y por tanto se debe elegir un origen de referencias fasorial común y único para todas las frecuencias. La consecuencia de no hacerlo sería que el elemento calculado tendría el mismo módulo, pero distinta fase en función del instante en el que se tomen los datos. Como origen de fases se eligió, para todos los cálculos entre fasores de distinta frecuencia, al armónico fundamental.

El proceso de giro de los fasores armónicos hasta que el fasor correspondiente al armónico fundamental tenga fase cero se hace al principio del tratamiento de los datos, justo después de la corrección de errores de los transformadores de tensión, intensidad, y de la tarjeta de adquisición. El procedimiento seguido, a partir de la toma de datos, es el siguiente:

1. Transformación al dominio armónico de las formas de onda de tensión e intensidad por medio de la FFT.
2. Corrección de errores del transformador de tensión.
3. Corrección de errores del transformador de intensidad.
4. Corrección de errores de la tarjeta de adquisición.
5. Giro fasorial en el dominio armónico hasta que la fase del fundamental sea igual a cero.

Es en esta última etapa, donde se debe girar el fasor de orden k por la cantidad: $\phi_k = -k \cdot \arg(\bar{V}_1)$, para $k = 2..n$.

La corrección de errores se realiza, para los transformadores de tensión e intensidad que previamente se han calibrado en el laboratorio, corrigiendo los errores de transformación y de fase para cada armónico. En cuanto al error cometido por la tarjeta de adquisición, éste es de distinta índole. En este caso, el error es cometido por el hecho de que, por construcción, la mayoría de las tarjetas de adquisición consta de un solo convertidor analógico-digital y un multiplexor que cambia el canal de entrada de datos y lo

redirige al convertidor ADC. Puesto que el proceso de conmutación de canales no es instantáneo, sino que lleva parejo un retraso, entonces se está cometiendo un error ya que las dos ondas no se corresponden con el mismo intervalo de tiempo, sino que una está desfasada con respecto a la otra. Para corregir este error se puede optar por soluciones software o hardware. Por hardware, se puede utilizar un trigger que detecte cuando la onda de tensión cruza por cero desde valores negativos. En el primer paso por cero se toma sólo la tensión, y en el segundo sólo la intensidad. La solución software, implementada en el sistema de adquisición, consiste en corregir este error desplazando la onda de corriente el tiempo de retraso de la tarjeta. En concreto, con la tarjeta de adquisición disponible, el error en radianes se midió y se obtuvo un valor de $t=15\mu s$, que se corresponde con un adelanto de la onda de intensidad de unos $0,27^\circ$ para la frecuencia fundamental. Se observa que el error es pequeño, pero que conforme se incrementa la frecuencia del armónico, al ir multiplicado por el orden del armónico, se pueden alcanzar errores de aproximadamente 25° para el armónico 50. En tarjetas que no dispongan de burst-mode, el error es considerablemente mayor. El error de la tarjeta se corrige, por tanto, girando el fasor de orden k , un ángulo $\varphi_k = -k*0,27^\circ$ para $k = 2..n$.

Las restantes columnas de la matriz se obtienen por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{Y}_{kj} = \frac{\bar{I}_k - \bar{Y}_{k1}V_1}{\bar{V}_j} \quad (\text{III.25})$$

Y, como se ha comentado anteriormente, se toma como origen de fases a la componente fundamental

La principal hipótesis utilizada en la obtención del resto de los parámetros de la matriz es la linealidad en torno al punto de trabajo, que en este caso sería la tensión del armónico fundamental. Si se supone linealidad, entonces se puede aplicar superposición y asignar la diferencia, respecto a la intensidad absorbida cuando se está alimentando la carga con una onda senoidal pura, totalmente al armónico de tensión añadido.

Por lo tanto, el proceso a seguir es realizar, para todas las frecuencias de interés, ensayos donde a la componente fundamental de tensión se le añade el armónico j , y por medio de la ecuación (III.25) se obtiene \bar{Y}_{kj} , que contiene la información sobre la influencia del armónico j de tensión en el armónico k de corriente.

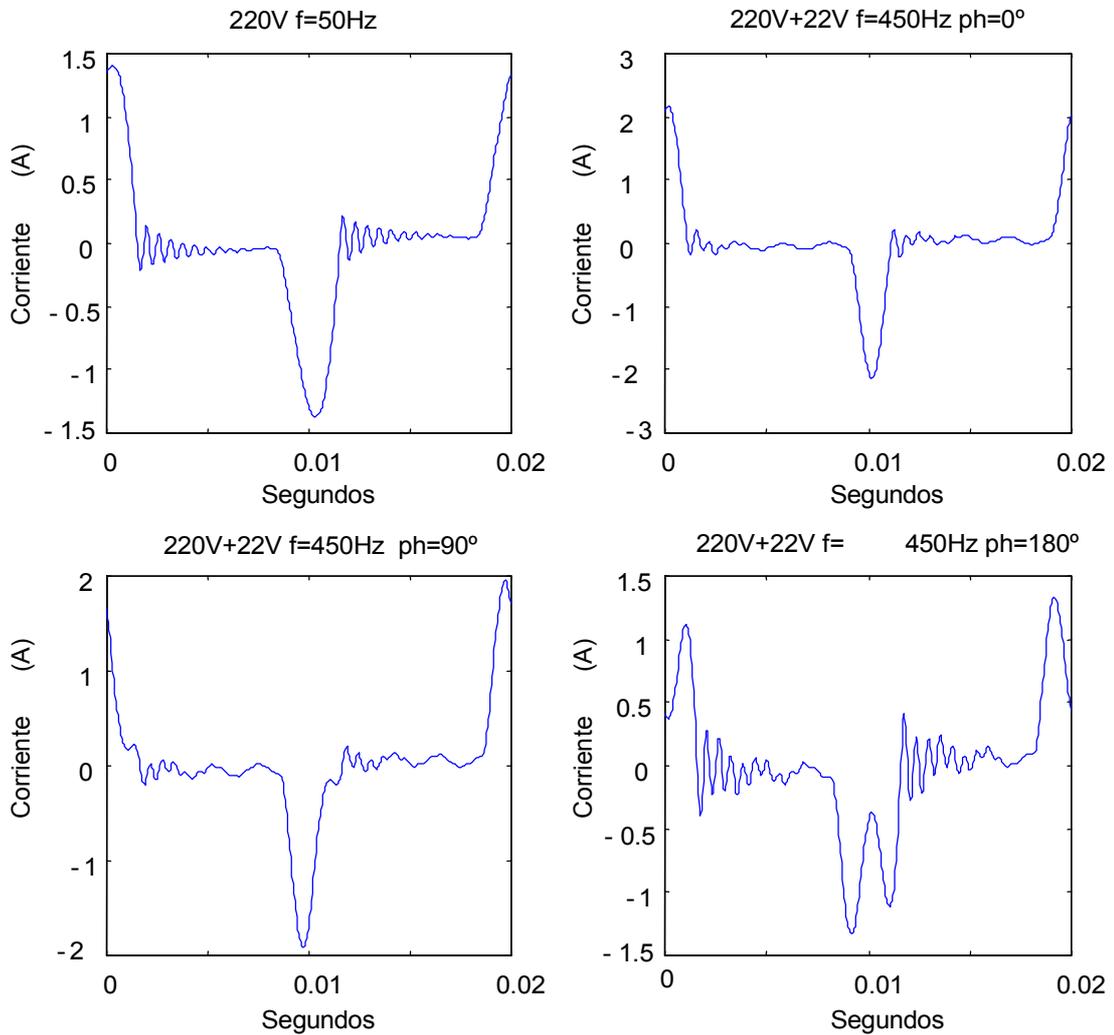


Figura III.13 Formas de onda de la corriente absorbida por un ordenador cuando se hace variar la fase del armónico 9

Existen, además de las combinaciones entre armónicos, tres parámetros que se pueden variar de forma independiente cuando se estudia la respuesta de las cargas ante tensiones distorsionadas por armónicos: la amplitud de la componente fundamental, la amplitud del armónico y el desfase del armónico respecto del fundamental. En la validación experimental del modelo de admitancias cruzadas [Fauri, 97], se estudia la influencia de la amplitud del armónico y del desfase en las formas de onda de la corriente absorbida, utilizando como cargas eléctricas a motores y tubos fluorescentes con balasto magnético, y comprobando en estos casos que la hipótesis de superposición ofrece buenas predicciones cuando se estudian combinaciones de armónicos. En los ensayos que se realizaron para las cargas cuyo comportamiento no-lineal tenía el mismo origen, es decir aquellas cuya no-linealidad se debía a núcleos magnéticos, se ha podido comprobar que la utilización de la matriz de admitancias cruzadas daba buenos resultados, pero no se podía decir lo mismo

del comportamiento de las cargas cuya no-linealidad provenía de la electrónica utilizada para la rectificación de alterna. En estos casos, la forma de onda sí que depende de la fase del armónico respecto al fundamental, tal como se recoge en la figura III.13 donde se pueden ver los dos picos de corriente cuando el desfase introducido es de 180°. En general la variación de la fase del armónico da, como norma general, un desplazamiento del pico de corriente en torno al instante en que se produce en caso de la ausencia de armónicos. Estos adelantos y retrasos en el tiempo son pequeños, pero al tener la onda de intensidad forma de pico estrecho, el error cuadrático medio cometido en la comparación punto a punto en cada instante de los valores medidos de corriente y los valores simulados da lugar a errores de solapamiento. Es importante que el modelo refleje este comportamiento, puesto que se pretende realizar una identificación de las cargas a partir de la intensidad medida, e interesa que el error cometido por este fenómeno sea el menor posible. Por tanto, se justifica la necesidad de extender el modelo de admitancias cruzadas para que incluya las modificaciones que la variación en la fase de los armónicos produce en la intensidad absorbida por aquellas cargas cuya no-linealidad derive de componentes electrónicos.

III.4.2.4.- Modelo generalizado de admitancias cruzadas

La dependencia con respecto a la fase de los elementos de la matriz de admitancias se va a modelar por medio de un vector de matrices. Cada matriz del vector almacena el comportamiento de la carga para un desfase dado entre el armónico y la componente fundamental. El vector tendrá, por lo tanto, tantas matrices como fases se hayan ensayado. La representación gráfica de la estructura de datos generada sería, por tanto, un paralelepípedo que, por simplicidad, denominaremos matriz cúbica. Matemáticamente se expresará como:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \dots \\ \bar{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11}(\theta) & \bar{Y}_{12}(\theta) & \bar{Y}_{13}(\theta) & \dots & \bar{Y}_{1n}(\theta) \\ \bar{Y}_{21}(\theta) & \bar{Y}_{22}(\theta) & \bar{Y}_{23}(\theta) & \dots & \bar{Y}_{2n}(\theta) \\ \bar{Y}_{31}(\theta) & \bar{Y}_{32}(\theta) & \bar{Y}_{33}(\theta) & \dots & \bar{Y}_{3n}(\theta) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{Y}_{m1}(\theta) & \bar{Y}_{m2}(\theta) & \bar{Y}_{m3}(\theta) & \dots & \bar{Y}_{mn}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \dots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

El armónico i -ésimo de corriente se calculará como una combinación lineal de los elementos de la matriz cúbica por los elementos del vector columna formado por los armónicos de tensión. Para cada armónico, la columna utilizada para evaluar su contribución a la corriente total será aquella obtenida para ese mismo armónico y fase:

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n \bar{Y}_{ik}(\theta_k) V_k \exp(j\theta_k) \tag{III.27}$$

En la figura III.14 se representa el lugar geométrico de los valores obtenidos para Y_{71} cuando se utilizó como carga al ordenador Compaq Deskpro y se hizo variar la fase del armónico de orden 7 de 30 en 30 grados. Se observa que la variación relativa de la amplitud, entre distintos términos, puede ser incluso mayor del 50%.

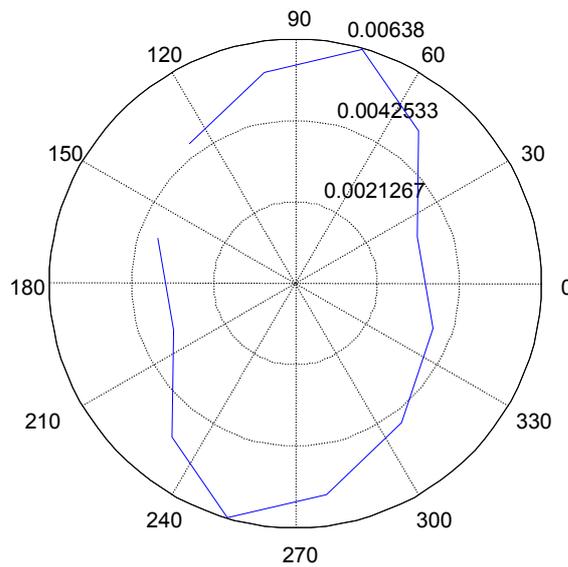


Figura III.14 Lugar geométrico de los valores obtenidos para Y_{71} cuando la carga alimentada es un ordenador

Cuando la fase del armónico no se corresponde con alguno de los valores utilizados para obtener el modelo, se interpola entre los valores más próximos que se hayan ensayado para la carga. Esta interpolación se realiza respecto al módulo y la fase, es decir, devuelve como resultado el punto medio del módulo de la admitancia existente entre los dos puntos y el punto medio de la fase entre ambas. Esto se ha hecho así, puesto que analizando la figura III.14, se observa que el conjunto de puntos forma una especie de elipse y, por lo tanto, se desea que los valores interpolados estén en un arco que una a dos puntos medidos. Si se interpola de forma lineal, se corre el riesgo de que el resultado de la interpolación dé un módulo mucho más pequeño que los módulos de partida.

Como en el estudio de los modelos estáticos se comprobó que el comportamiento de las cargas era función de la tensión y, al mismo tiempo, de la carga modelada, se extendió al modelo generalizado para que también reflejara este comportamiento. Para ello, el proceso

seguido fue el de incrementar un grado más la estructura de datos y obtener así un vector de matrices cúbicas. Cada elemento del vector almacena una matriz cúbica distinta del resto, en donde ésta ha sido obtenida para un único valor de tensión de la componente fundamental. Entre dos tensiones de la fundamental no ensayadas se realiza una interpolación lineal entre matrices cúbicas. Para los modelos obtenidos en esta tesis se han considerado suficientes tres tensiones distintas de la fundamental: 204, 220 y 235Vrms.

Por lo tanto, de las tres variables independientes (a excepción de sus combinaciones, en cuyo caso se utiliza superposición), se ha tenido en cuenta a dos de ellas: la amplitud de la fundamental y la variación de la fase del armónico. No se ha extendido el modelo para que tuviera en cuenta la amplitud del armónico, puesto que el tamaño de la estructura de datos resultante aumentaba de forma lineal en función del número de tensiones distintas de los armónicos consideradas. Este problema (memoria necesaria para crear la estructura de datos) se podría minimizar utilizando técnicas de almacenamiento de matrices dispersas, en el caso en que se consideren despreciables aquellos términos que sean algún orden de magnitud menor que el valor de la admitancia Y_{11} . La solución adoptada en esta tesis para tener en cuenta la influencia de la amplitud del armónico, fue la de obtener los modelos generalizados de admitancias cruzadas para distintas tensiones de los armónicos y comparar sus predicciones con los valores observados, proceso que en la figura III.1 se corresponde con el “Ajuste del modelo”, seleccionando aquella tensión que se consideró más adecuada. Ensayo, cuyos resultados se comentarán en el siguiente apartado.

Dada la gran cantidad de ensayos que se deben realizar para la obtención del modelo generalizado de admitancias cruzadas, se ha desarrollado un software que permite la automatización total del proceso. Esta aplicación se denomina ENSAYO y hace uso de las clases desarrolladas GENERADOR y Ventana_Adquisicion, para la programación del generador y la adquisición de datos respectivamente. Su diagrama de actividades se muestra en la figura III.15. Como resultado final de la ejecución del programa se obtienen los parámetros del modelo generalizado, que son almacenados en un fichero de texto en formato ASCII con el nombre del modelo y la extensión “.mod”.

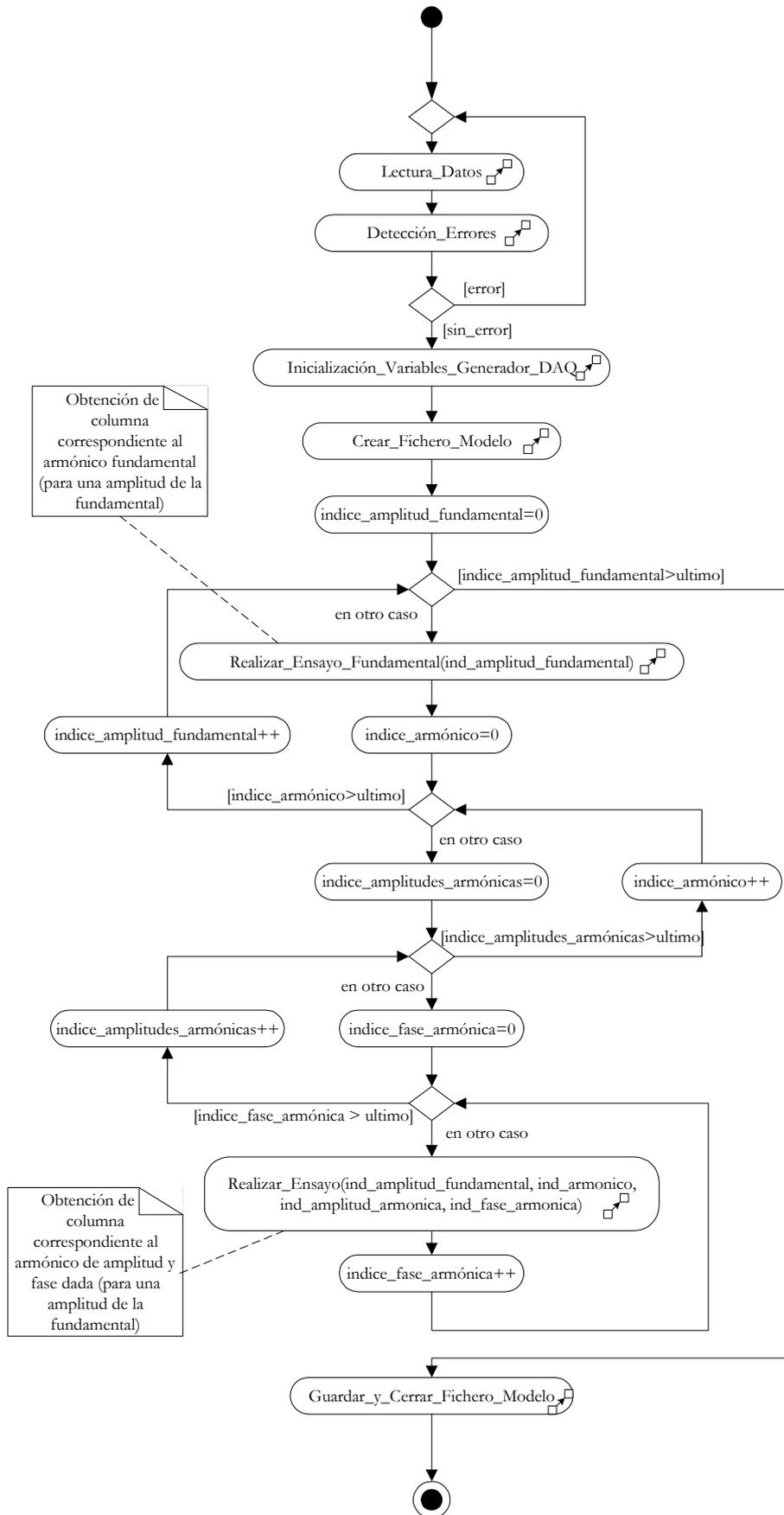


Figura III.15 Diagrama de actividad de la aplicación ENSAYO

III.4.2.5.- Ensayos y resultados

Para comparar los valores predichos por el modelo y los observados en el caso de cargas reales, se realizó una batería de ensayos formada por un conjunto de tensiones que se podían agrupar en los siguientes tres grupos:

Tensiones simuladas: en donde a una onda de tensión con contenido armónico arbitrariamente elegido, sin armónicos pares y con amplitudes relativas a la componente fundamental menores del 2,5%, se le hace variar la fase del de mayor amplitud a lo largo de los 360°. En total 17 formas de onda (tabla III.5).

Tensiones sin contenido armónico: en donde se hace variar la componente fundamental desde los 200 Vrms hasta los 240 Vrms. En total 40 formas de onda.

Tensiones reales: En total 15 formas de onda de tensión medidas en distintos puntos de la red de distribución de la Región de Murcia (tabla III.4). Estos puntos se eligieron para que cubrieran los tipos de usos más comunes de la energía eléctrica que son:

- Residencial
- Comercial
- Industrial

Esta clasificación, normal en los estudios de modelos de cargas, sirve para agrupar consumos en zonas donde la composición de la carga es más o menos homogénea. En la tabla III.4, se muestra la amplitud y los desfases de los distintos armónicos de las ondas de tensión medidas, clasificadas en función de su clase de cargas.

Tabla III.4 Amplitud, fase y distorsión armónica total de las tensiones de ensayo reales

Clase		50	100	150	200	250	300	350	450	THD
Comercial	TR01	222,8		2,1 ^{∠147°}		3,3 ^{∠-175°}		4,0 ^{∠-2°}	1,0 ^{∠-129°}	2,55%
Industrial	TR02	221,3	0,4 ^{∠1°}	1,9 ^{∠42°}		8,3 ^{∠-12°}		2,0 ^{∠-177°}	0,5 ^{∠-47°}	3,96%
Comercial	TR03	229,5		1,5 ^{∠-6°}		4,5 ^{∠-174°}		0,4 ^{∠-152°}	1,5 ^{∠-82°}	2,17%
Comercial	TR04	215,2		1,2 ^{∠-170°}		1,5 ^{∠-91°}		1,8 ^{∠-25°}	0,8 ^{∠-96°}	1,27%
Residencial	TR05	230,4		0,8 ^{∠-73°}		1,0 ^{∠-174°}		1,3 ^{∠-13°}	0,5 ^{∠-130°}	0,82%
Comercial	TR06	215,4	0,3 ^{∠-164°}	2,2 ^{∠-124°}		1,4 ^{∠-127°}		3,4 ^{∠-7°}	1,7 ^{∠-150°}	2,14%
Comercial	TR07	215,4		2,9 ^{∠-98°}		2,7 ^{∠-179°}		2,8 ^{∠-11°}	2,4 ^{∠-170°}	2,51%
Residencial	TR08	229,23		1,0 ^{∠-81°}		0,8 ^{∠-143°}		1,4 ^{∠-29°}	1 ^{∠-125°}	0,93%
Comercial	TR09	227,7		4,2 ^{∠-49°}		6,9 ^{∠-155°}		1,1 ^{∠-100°}	1,8 ^{∠-136°}	3,66%

Comercial	TR10	230,4	3,7 ^{∠45°}	6,2 ^{∠160°}	0,4 ^{∠35°}	2,3 ^{∠-121°}	3,29%
Residencial	TR11	221,5	1,4 ^{∠-8°}	4,6 ^{∠-129°}	1,7 ^{∠32°}	0,3 ^{∠145°}	2,30%
Residencial	TR12	221	2 ^{∠35°}	5,8 ^{∠-84°}	0,7 ^{∠75°}	1,2 ^{∠-180°}	2,84%
Residencial	TR13	228	2,2 ^{∠32°}	6,4 ^{∠-85°}	0,8 ^{∠70°}	1,4 ^{∠-173°}	3,05%
Residencial	TR14	221,4	0,2 ^{∠-125°}	3,8 ^{∠-7°}	1,9 ^{∠178°}	0,2 ^{∠121°}	1,92%
Comercial	TR15	229,2	1,5 ^{∠103°}	4,9 ^{∠155°}	0,4 ^{∠-1°}	1,4 ^{∠-165°}	2,32%

Las tensiones de distribución reales, como se puede ver en la tabla, no contienen armónicos pares excepto en dos ensayos (TR02 y TR06) en los que apenas existe alguna traza del armónico 2. Este hecho puede servir para, al no incluir la información de los armónicos pares, reducir tanto las necesidades de memoria del modelo, como el tiempo de obtención de éste, al considerar sólo los armónicos impares.

En cuanto a la elección de los ensayos simulados, se pretendió que no se alejaran de los casos reales, por eso la ausencia de armónicos pares, pero se pretendía obtener el comportamiento en dos situaciones distintas: que las tensiones armónicas fueran mayores (llegando hasta el 5% respecto al fundamental en el caso SIM16) y la otra situación era que el contenido armónico permaneciera constante en amplitud, modificando sólo el desfase con respecto a la componente fundamental a todo lo largo del rango de variación de éste.

Tabla III.5 Amplitud y fase distorsión armónica total de las tensiones de ensayo simuladas

	50	100	150	200	250	300	350	450	THD
SIM16	230		5 ^{∠23°}		11 ^{∠46°}		5 ^{∠64°}	3 ^{∠-270°}	5,83%
SIM17	225		3 ^{∠45°}		4 ^{∠0°}		6 ^{∠350°}	4 ^{∠0°}	3,89%
SIM18	215		3 ^{∠13°}		8 ^{∠25°}		2 ^{∠132°}	4 ^{∠-165°}	4,48%
SIM19	215,2		1,2 ^{∠-170°}		1,5 ^{∠91°}		1,8 ^{∠-25°}	0,8 ^{∠-96°}	1,27%
SIM20	220		2 ^{∠34°}		6 ^{∠23°}		6 ^{∠90°}	6 ^{∠135°}	4,81%
SIM21	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠0°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM22	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠30°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM23	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠60°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM24	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠90°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM25	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠120°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM26	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠150°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM27	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠180°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM28	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠210°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM29	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠240°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM30	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠270°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM31	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠300°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%
SIM32	220		3 ^{∠0°}		5 ^{∠330°}		4 ^{∠0°}	3 ^{∠0°}	3,49%

Al mismo tiempo que se trataba de comparar los valores predichos con los observados, se pretendía proceder al ajuste del modelo.

Para ajustar el modelo se modificaron tanto los parámetros de obtención de la matriz, como el proceso de cálculo de la respuesta del modelo.

En los primeros ensayos se utilizó una amplitud relativa del 10% para obtener los modelos de admitancias cruzadas. Tras analizar las tensiones medidas se comprobó que, en ningún caso, las amplitudes de los armónicos relativas al fundamental eran mayores del 5% (y en sólo dos casos eran mayores del 2,5%). Por lo tanto, era posible que el error cometido en la predicción por el modelo obtenido con amplitudes relativas del 10% fuese mayor, que cuando se utilizaran amplitudes del 5% o del 2,5%, puesto que, implícitamente, existe una linealización. Lógicamente, cuanto más nos alejemos del punto de operación (en nuestro caso la componente fundamental), el comportamiento será más no-lineal. Para conocer la respuesta a esta pregunta, se deben obtener los modelos generalizados para las mismas cargas y para distintas amplitudes armónicas, y comparar cuál realiza la mejor predicción.

A su vez, se hace una combinación lineal de los efectos que cada armónico de tensión tiene en la intensidad absorbida, ecuación (III.27), que define el proceso de cálculo de la respuesta del modelo. Es posible adoptar otras estrategias, entre las que se encuentran:

- Considerar todos los armónicos de tensión, ecuación (III.27).
- Considerar sólo los armónicos de tensión impares.
- Considerar sólo la aportación del armónico de tensión de mayor valor absoluto.

Para estudiar la influencia sobre la respuesta de estas dos variaciones, se obtuvieron los modelos generalizados de admitancias cruzadas para tres tipos de carga y para tres amplitudes relativas (10%, 5% y 2,5%). Las cargas que se eligieron como representantes fueron:

- Balasto Magnético.
- Balasto Electrónico de Cipesa.
- Ordenador Compaq Deskpro.

Éstas se seleccionaron porque representaban a distintas clases de cargas: el balasto magnético porque su no-linealidad era debida al comportamiento del material, el balasto electrónico porque representaba a aquellas cargas que rectificaban la tensión por medio de un puente de diodos, y el ordenador Compaq porque era representante de las que rectificaban la tensión por medio de una fuente conmutada.

Estas tres cargas se sometieron a la batería de ensayos y los resultados obtenidos para cada una de ellas se muestran en las figuras III.16 y III.18, en donde se dibujan la suma de los errores cuadráticos medios cometidos, clasificados según el tipo de ensayos, y en función de la combinación de amplitud y superposición elegida. Las combinaciones elegidas se detallan en la siguiente tabla:

Tabla III.6 Números de combinación, su amplitud relativa y superposición utilizada

Combinación	Amplitud relativa	Combinación lineal utilizada
1	5%	Todos armónicos.
2	5%	Armónico Superior.
3	5%	Armónicos Impares.
4	10%	Todos armónicos.
5	10%	Armónico Superior.
6	10%	Armónicos Impares.
7	2,5%	Todos armónicos.
8	2,5%	Armónico Superior.
9	2,5%	Armónicos Impares.
10	-	Solo la fundamental

A la vista de los resultados obtenidos, ver figuras III.16 y III.18, se pueden extraer las conclusiones siguientes:

Para el balasto electrónico Cipesa, (**BEC**), figura III.16, los menores errores acumulados, gráfica superior izquierda, se consiguen para las combinaciones 4 y 6, ambas obtenidas con amplitudes relativas del 10%. La peor aproximación es la conseguida en la combinación 10, en donde la suma de los errores cometidos es mayor del doble de la cometida en la combinación 6. Si se observa el gráfico de los ensayos reales, se ve que la mejor combinación es la 8 seguida por la 2, es decir, las obtenidas utilizando sólo la superposición del armónico más grande en valor absoluto. Lo mismo ocurre con los ensayos variando sólo la tensión. Finalmente, los valores acumulados de menor valor en el conjunto de ensayos simulados se da en las combinaciones 4 y 6, es decir, para amplitudes

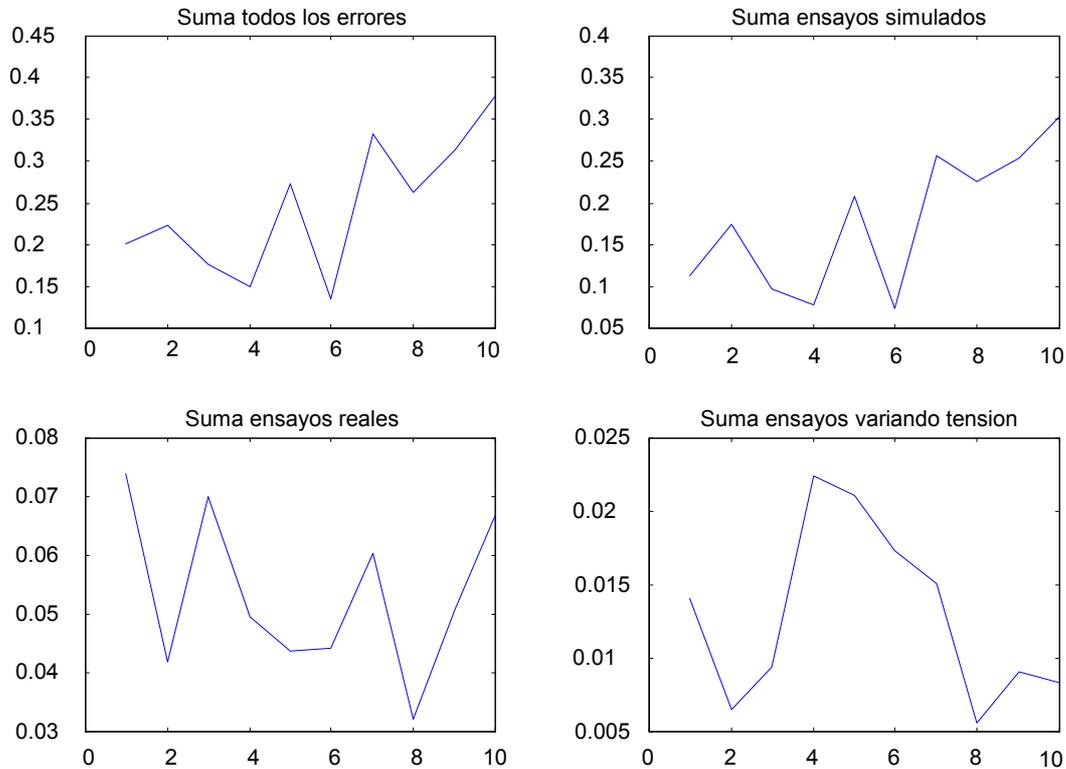


Figura III.16 Errores obtenidos en los ensayos de tensión para el balasto electrónico Cipesa relativas del 10%. Como la magnitud en los ensayos simulados es sustancialmente mayor que en los otros, no es de extrañar que la gráfica de la suma de todos los errores siga fielmente a ésta.

Para la fuente conmutada del ordenador Compaq Deskpro (**OCD**), ver figura III.18, ahora, en la gráfica donde se muestran la suma de todos los errores, los valores menores se consiguen con las combinaciones 9 y 3, es decir, donde sólo se consideran los armónicos impares. Las combinaciones 2 y 8 dan los menores valores para los ensayos reales (sólo el armónico superior), la 10 y la 2, seguidos muy de cerca por la combinación 5 (sólo el armónico superior), para los ensayos donde sólo se varía la tensión a una onda senoidal pura. Finalmente la 3 y la 9 para los ensayos simulados (armónicos impares).

Para el balasto magnético, (**BMG**), se obtuvieron magnitudes muy bajas en todos los ensayos comparándolas con las cargas electrónicas. En la suma total, las combinaciones 1 y 9 fueron las que se comportaron mejor, mientras que las 4 y 6 lo hicieron en los ensayos reales, frente a las 9 y 1 de los ensayos variando la tensión. Finalmente, las 1 y 4 lo hicieron para los simulados.

Estos resultados se agrupan en la figura III.17, donde se puede ver que, excepto en un solo caso, para la carga BMG (siglas de balasto magnético), los resultados de todos y simulación están siempre en la misma casilla. Esto indica que los errores cometidos en los ensayos simulados son de mayor magnitud que en los reales y los de tensión, y por lo tanto

		COMBINACIÓN LINEAL		
		Todos	Superior	Impares
AMPLITUD RELATIVA	5%	1 BMG_todos BMG_tension BMG_simul	2 BEC_reales BEC_tension OCD_reales OCD_tension	3 OCD_todos OCD_simul
	10%	4 BEC_todos BEC_simul BMG_reales BMG_simul	5	6 BEC_todos BEC_simul BMG_reales
	2,5%	7	8 BEC_reales BEC_tension OCD_reales	9 OCD_todos OCD_simul BMG_todos BMG_tension
		10 OCD_tension		

Figura III.17 Errores obtenidos en los ensayos de tensión para el balasto electrónico Cipsa dominan cuando los tres ensayos son sumados para obtener el error agregado. Hasta cierto punto es lógico, puesto que los ensayos simulados presentan una distorsión armónica mayor que los otros dos grupos de ensayos. Examinando las cargas electrónicas, se puede decir que los mejores resultados se obtienen cuando sólo se utiliza el armónico superior para obtener la respuesta del modelo, y cuando la amplitud relativa es del 5 o del 2,5%. Se observa también que, los ensayos simulados suelen dar mejores resultados con amplitudes del 10% y utilizando sólo los armónicos impares.

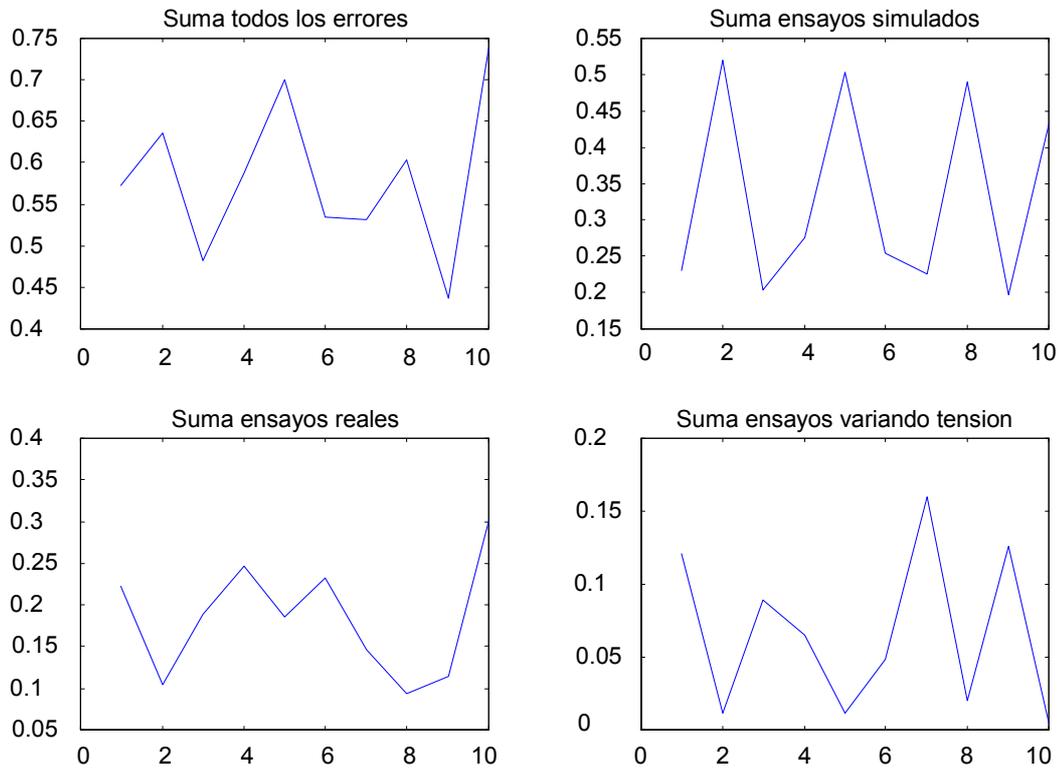
El comportamiento observado puede ser debido a que conforme nos alejamos de la forma de onda senoidal se incrementan las magnitudes de los armónicos, y el error cometido por el modelo de admitancias cruzadas generalizado aumenta considerablemente. Es por ello que los mayores errores se cometen en los ensayos simulados. Por lo tanto, parece lógico utilizar amplitudes relativas lo más pequeñas posibles, teniendo en cuenta que

los armónicos de tensión de las medidas reales realizadas son, en general, menores del 2,5%. La explicación que se da a los mejores resultados del armónico superior es que se produce una cancelación de armónicos, cuando se realiza la superposición para obtener la corriente total absorbida, debido a los desfases existentes entre las aportaciones a la corriente total de cada uno de los armónicos de tensión. Como se puede observar, en el caso de los ensayos simulados, se obtienen mejores resultados cuando se consideran sólo a los armónicos impares. Esto nos indica que no se debe despreciar la aportación de todos los armónicos existentes, puesto que cuando éstos son grandes en magnitud dan mejores resultados que cuando no se tienen en cuenta. Finalmente, obsérvese que existe un caso en que no considerar la información armónica da mejores resultados: el ordenador Compaq Deskpro, no obstante, como esto ocurre para los ensayos donde sólo se varía la amplitud de la fundamental, se considera que lo que predomina en este caso es el fenómeno de cancelación de armónicos.

Se utilizarán amplitudes relativas del 2,5% para obtener los parámetros de los modelos, y, a pesar de que los resultados no lo apoyen directamente, se utilizará la superposición de todos los armónicos. Se decidió así porque la inclusión de todos los armónicos impares es importante, y en principio se deseaba utilizar el mismo modelo para cargas cuyo comportamiento podía ser muy distinto, pero que al mismo tiempo eran no lineales, como puedan ser el balasto magnético y el ordenador. Al ser la superposición una etapa realizada al final del proceso de obtención de la respuesta del modelo, la modificación posterior es relativamente sencilla, pudiendo adoptarse estrategias más elaboradas dependientes del tipo de carga, como por ejemplo, utilizar una combinación u otra en función de la distorsión o la amplitud relativa de varios armónicos, etc.

Por lo tanto, se obtuvieron los modelos generalizados de admitancias cruzadas extendidas para las mismas cargas para las que se obtuvieron sus modelos estáticos (ver tabla III.2), y considerando amplitudes relativas del 2,5%. Además, puesto que se pretende identificar el consumo de los aparatos de aire acondicionado, se ensayó un motor monofásico de arranque por condensador (de 1 CV de potencia), la demanda más importante de éstos. Para este motor no se obtuvieron los modelos estáticos por limitaciones del freno disponible. Asimismo, el generador de funciones se veía afectado por la corriente de arranque del motor, que disparaba su protección contra sobreintensidades. El proceso de arranque se hizo incrementando la tensión hasta llegar al valor nominal.

Ordenador Compaq Deskpro



Balasto Magnético

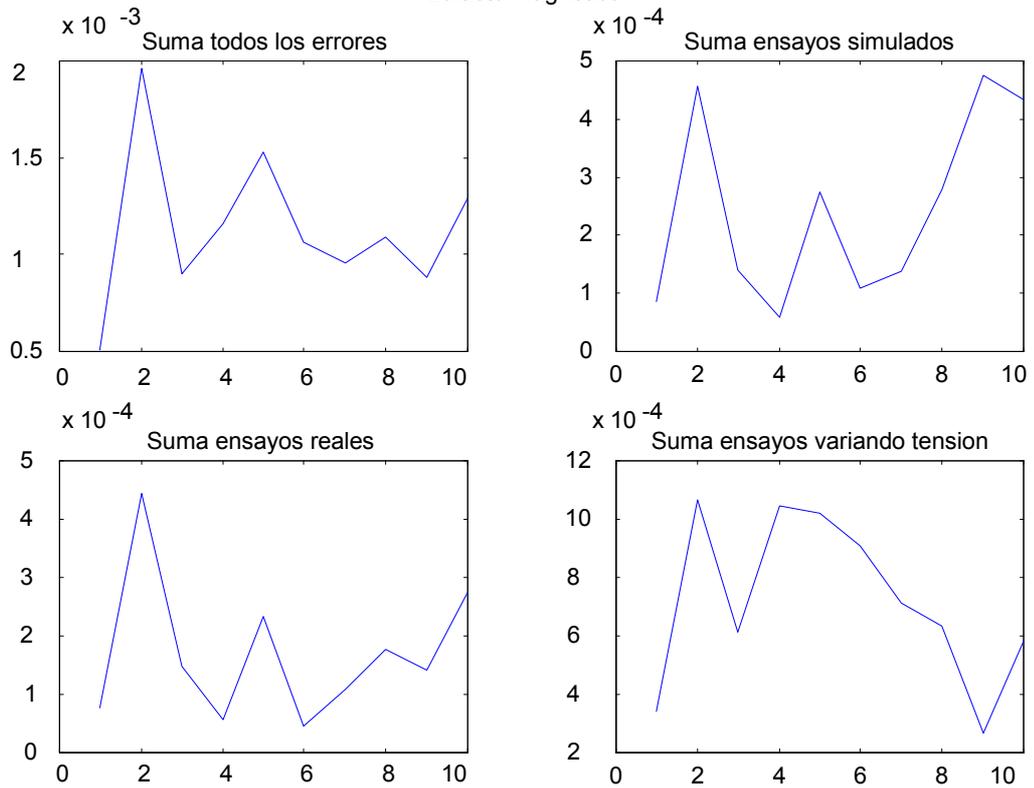


Figura III.18 Errores obtenidos en los ensayos de tensión para el ordenador Compaq Deskpro (superior) y para el balasto magnético (inferior)

III.4.3.- Modelos físicamente basados

Los modelos físicamente basados hacen uso de leyes y relaciones entre magnitudes del sistema para realizar su predicción.

Si se conociera, a priori, la composición exacta de los elementos que forman parte de las cargas eléctricas que se quiere modelar, el problema tendría fácil solución en el dominio del tiempo conociendo las fuentes de excitación que alimentan a estas: cualquier simulador de circuitos electrónico obtendría el comportamiento en régimen estacionario resolviendo las ecuaciones del modelo en el tiempo.

Normalmente, es difícil conocer exactamente la composición y las relaciones de los distintos componentes electrónicos y eléctricos de una carga. Es preciso, por tanto, hacer simplificaciones, y considerar un modelo más sencillo que simule el comportamiento de ésta. Finalmente, es necesario realizar la identificación de los parámetros del modelo simplificado. Imprescindible, para que éste sea utilizado posteriormente.

A veces, la simplificación realizada es excesiva y no tiene en cuenta fenómenos físicos que sí afectan al comportamiento eléctrico de la carga. Este tipo de error se puede llegar a producir incluso en el caso de cargas cuyo modelo físico es considerado simple. Como ejemplo, estudiemos la bombilla incandescente y la placa calefactora. El comportamiento de estas cargas sería modelado directamente por una resistencia lineal, cuyo valor se podría determinar a partir de alguna relación entre dos magnitudes físicas medidas para un caso particular, como por ejemplo sus potencias absorbidas a una tensión dada. Se obtuvieron la resistencia eléctrica, en función de la tensión, para estas dos cargas partiendo de los datos del ensayo realizado para la obtención del modelo estático y, en la figura III.19, se puede ver el resultado obtenido. Se comprueba que la bombilla no es una resistencia constante, sino que depende de la temperatura que alcanza y esta es función de la tensión de alimentación. Mas difícilmente justificable es la parábola de la placa calefactora, aunque, en este caso, al ser las variaciones porcentuales de la magnitud medida muy pequeñas, el error cometido por modelar a la placa como una resistencia constante es despreciable. Probablemente, la resistencia se mantenga constante, porque la temperatura de la placa también lo haga. Aunque la conversión de energía eléctrica en calorífica aumenta con la tensión, también debe hacerlo la convección en su superficie en proporción semejante.

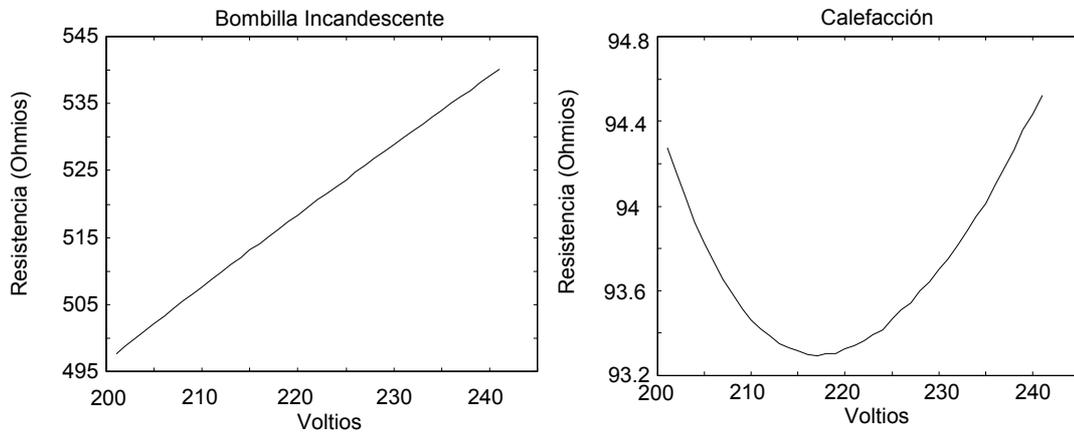


Figura III.19 Resistencia en función de la tensión para la bombilla incandescente y la calefacción

A pesar de las variaciones de la resistencia con la temperatura en la bombilla, una simplificación razonable es considerarla como constante. Asimismo, se suelen utilizar modelos que hacen uso de un puente de diodos para rectificar la tensión, como base para los modelos de las cargas electrónicas en general.

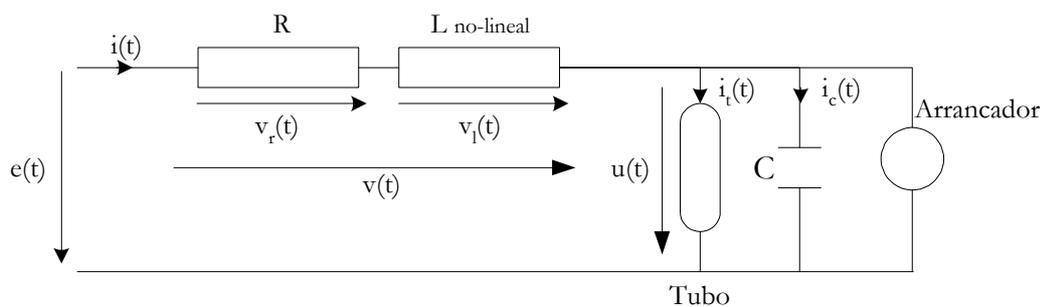


Figura III.20 Modelo físicamente basado para el balasto magnético

Como ya se dijo en apartados previos, para el modelo de balasto magnético también existen modelos físicamente basados bastante completos, como el que se estudia y modela en [Cidrás, 96] y [Cidrás, 98], ver figura III.20. En concreto, el proceso seguido en ambos artículos consiste en obtener la característica tensión corriente, $i_r(t)$ frente a $u(t)$, para el tubo fluorescente y la curva intensidad-flujo, $i(t)$ frente a $\phi(t)$, para el núcleo magnético del balasto. Posteriormente, conociendo la tensión de excitación, $e(t)$, se resuelve el circuito en el dominio del tiempo por medio de un proceso iterativo, hasta que se alcanza la convergencia cuando la diferencia entre dos iteraciones sucesivas es reducida. Este proceso, que es común a todos los modelos físicamente basados, tiene el inconveniente de tener que

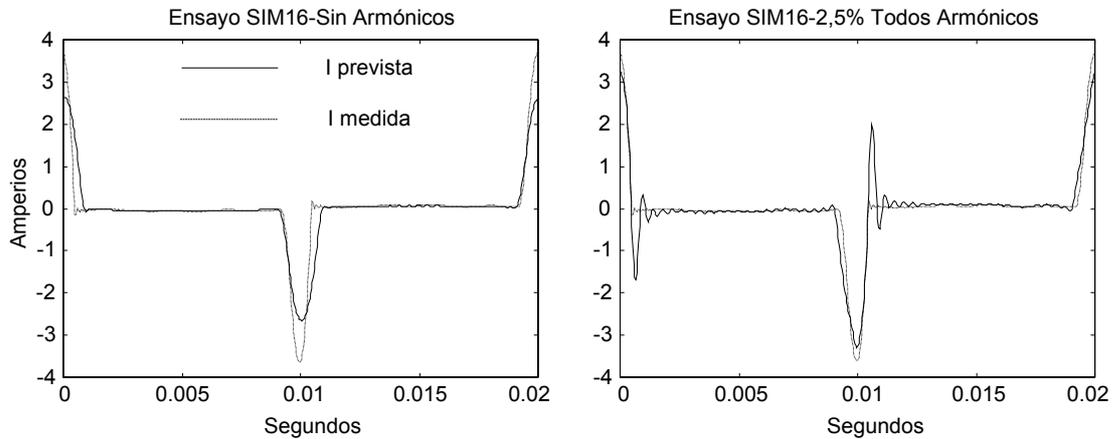


Figura III.21 Intensidades medidas y previstas en ensayos del ordenador Compaq Deskpro

realizar un proceso iterativo que se debe mantener durante varios ciclos si se quiere obtener el comportamiento en régimen permanente del sistema, por lo que consume tiempo. Además, también se deben realizar ensayos para determinar las características de sus componentes no-lineales y medir los parámetros de los lineales.

La predicción de la corriente absorbida por el balasto magnético, utilizando el modelo generalizado de admitancias cruzadas, se consideró suficientemente buena y, por tanto, no se pensó necesario estudiar un modelo físicamente basado que mejorase a ésta. No sucedía lo mismo con las cargas electrónicas.

Como se puede ver en la figura III.21, no siempre el resultado predicho era considerado como óptimo. Por ejemplo, en el ensayo SIM16-2,5% Todos Armónicos, se ve que se produce una especie de sobreoscilación en la intensidad prevista, que no se corresponde con la medida. A pesar de ello, el error que se comete si no se utiliza la información armónica es mayor (ver gráfica SIM16-2-5% Sin armónicos), debido a que en este caso el valor máximo del pico de intensidad previsto es bastante menor que el medido, y además, el pico de intensidad está ligeramente descentrado, combinándose ambos efectos para que, al integrar la diferencia al cuadrado entre valores previstos y medidos, el error sea mayor que cuando se considera la información armónica. Como conclusión, se pensó que la utilización de modelos físicamente basados podía dar mejores predicciones de la corriente absorbida.

III.4.3.1.- Rectificador puente de diodos

En este apartado se va a obtener un modelo físicamente basado de las cargas electrónicas. Este modelo debe ser capaz de dar buenas predicciones de la corriente y

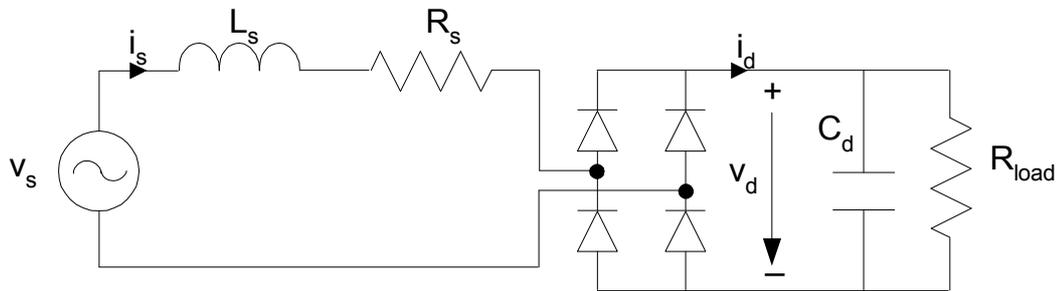


Figura III.22 Modelo físicamente basado cargas electrónicas

además, ser suficientemente general. Se especificará también cual es el proceso de simulación necesario para obtener predicciones de la corriente absorbida a partir de las ecuaciones del modelo. Por último, en el apartado siguiente, III.4.3.2.-Ensayos y resultados, se tratará la obtención de los parámetros del modelo a partir de ensayos.

La utilización del puente de diodos como modelo físicamente basado para estudiar el comportamiento de las cargas electrónicas es frecuente en la literatura, destacando sobre todo la serie de tres artículos publicados por Mansoor y Grady, [Mansoor, 95][Mansoor, 95b][Mansoor, 95c]. El modelo del circuito utilizado, mostrado en la figura III.22, es tratado en muchos libros, como por ejemplo en [Mohan]. En éste se estudia además el caso particular del puente de diodos trabajando en régimen de corrientes altamente discontinuo, como ocurre en las cargas electrónicas, y que se da cuando la corriente i_d pasa por cero antes del cruce por cero de v_s . Cuando el puente está trabajando en este régimen, es posible hacer uso del circuito equivalente de la figura III.23.

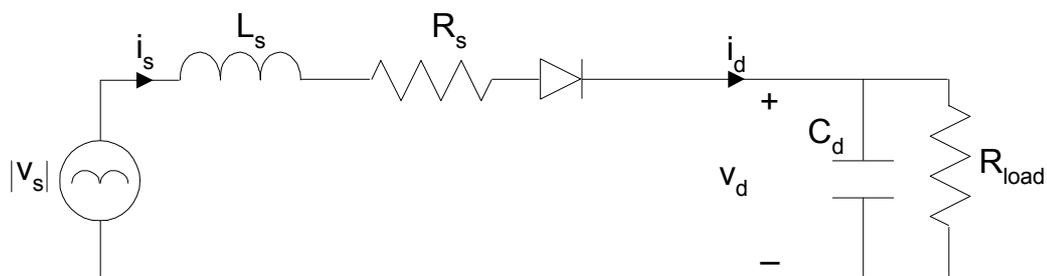


Figura III.23 Modelo equivalente del puente de diodos cuando trabaja en régimen de intensidades discontinuo

Para analizar el circuito de la figura, se utilizarán como variables de estado la corriente de la bobina i_d y la tensión del condensador v_d . En este circuito, en cada medio-ciclo de la frecuencia de alimentación, existen dos intervalos distintos de funcionamiento:

- i) $t_b < t < t_r$. En este periodo, el diodo conduce. Luego la corriente i_d es positiva, y el condensador se está cargando al mismo tiempo que alimenta a la carga. El instante a partir del cual el diodo conduce es t_b y t_r cuando deja de conducir.

Las ecuaciones que describen al circuito en este intervalo de funcionamiento son:

$$|v_s| = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} + v_d \quad (\text{III.28})$$

$$i_d = C_d \frac{dv_d}{dt} + \frac{v_d}{R_{load}} \quad (\text{III.29})$$

Si las ecuaciones obtenidas, aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito equivalente, se expresan en forma de ecuaciones de estado, entonces, éstas se pueden escribir para el periodo de conducción ($t_b < t < t_r$), como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad \text{donde } x=[i_d, v_d] \text{ y } u(t)=\text{abs}(v_s) \quad (\text{III.30})$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_d} & -\frac{1}{C_d R_{load}} \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & D &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{III.31})$$

- ii) $t_r < t < t_b + 1/2T$. Durante este intervalo, el puente de diodos no conduce y, por lo tanto, las ecuaciones del circuito son:

$$i_d = 0 \quad (\text{III.32})$$

$$\frac{dv_d}{dt} = -\frac{1}{C_d R_{load}} v_d \quad (\text{III.33})$$

Teniendo ya las ecuaciones que sirven para modelar al circuito en función del estado del diodo, se deben resolver ambos conjuntos de ecuaciones y se debe decidir cuando utilizar un juego de ecuaciones u otro.

La solución del periodo correspondiente a cuando el puente de diodos no conduce, no presenta ninguna dificultad y es la siguiente:

$$i_d = 0 \tag{III.34}$$

$$v_d = v_d(t_f) e^{-(t-t_f)/(C_{load}R_{load})} \tag{III.35}$$

No se puede decir lo mismo de la solución correspondiente a cuando el puente de diodos conduce. Para obtener los valores de la corriente durante el periodo de conducción se resolvió el sistema de ecuaciones (III.30) de forma numérica. Finalmente, una comprobación del estado del diodo, en cada paso de tiempo, decide cual es el estado de este y por tanto las ecuaciones a utilizar.

El proceso a seguir para la obtención de la corriente simulada absorbida por la carga durante el periodo de conducción pasa por la integración numérica de la ecuación (III.31) **[Mohan]**, que utilizando un paso de tiempo Δt se puede expresar en función de los valores obtenidos en el instante previo $t-\Delta t$ como:

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \int_{t-\Delta t}^t [A(\zeta)x(\zeta) + B(\zeta)u(\zeta)]d\zeta \tag{III.36}$$

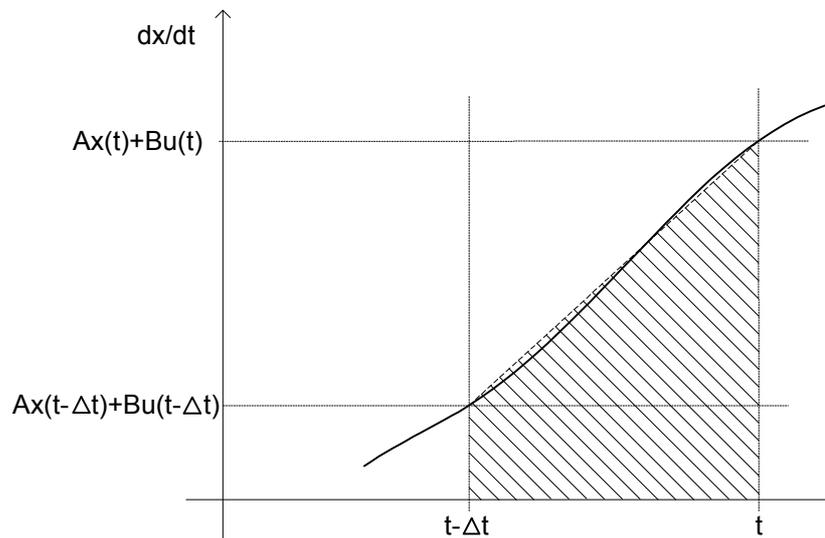


Figura III.24 Método trapezoidal de integración

Para resolver esta integral se utilizó el método trapezoidal, el cual hace uso de una interpolación lineal entre los valores en los instantes $t-\Delta t$ y t , suponiendo que el valor de x en el instante t es conocido a priori.

Aplicando este método a la ecuación (III.36) se obtiene la siguiente expresión:

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \frac{1}{2} \Delta t [A(t - \Delta t)x(t - \Delta t) + A(t)x(t)] + \frac{1}{2} \Delta t [B(t - \Delta t)u(t - \Delta t) + B(t)u(t)] \quad (\text{III.37})$$

Reagrupando términos se obtiene:

$$\left[I - \frac{1}{2} \Delta t A(t) \right] x(t) = \left[I + \frac{1}{2} \Delta t A(t - \Delta t) \right] x(t - \Delta t) + \frac{1}{2} \Delta t [B(t - \Delta t)u(t - \Delta t) + B(t)u(t)] \quad (\text{III.38})$$

Multiplicando ambos miembros por la inversa de $\left[I - \frac{1}{2} \Delta t A(t) \right]$ permite obtener $x(t)$ como:

$$x(t) = \left[I - \frac{1}{2} \Delta t A(t) \right]^{-1} \left(\left[I + \frac{1}{2} \Delta t A(t - \Delta t) \right] x(t - \Delta t) \right) + \left[I - \frac{1}{2} \Delta t A(t) \right]^{-1} \left(\frac{1}{2} \Delta t [B(t - \Delta t)u(t - \Delta t) + B(t)u(t)] \right) \quad (\text{III.39})$$

En general, la matriz $A(t)$ y $B(t)$ son función del tiempo. Pero manteniendo la topología del circuito uniforme durante el periodo de estudio, hace que éstas sean independientes del tiempo y entonces la ecuación (III.43) se puede escribir como:

$$x(t) = Mx(t - \Delta t) + N(u(t - \Delta t) + u(t)) \quad (\text{III.40})$$

En donde las matrices M y N se calculan una sola vez, siempre que el intervalo de discretización del tiempo permanezca constante para cada uno de los posibles estados del circuito, calculándose por medio de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 M &= \left[I - \frac{1}{2} \Delta t A \right]^{-1} \left[I + \frac{1}{2} \Delta t A \right] \\
 N &= \left[I - \frac{1}{2} \Delta t A \right]^{-1} \left[\frac{1}{2} \Delta t B \right]
 \end{aligned}
 \tag{III.41}$$

En cada instante de la simulación se deben comprobar si cambia el estado del diodo, y cuando se produzca éste, entonces los valores finales de un estado serán, por supuesto, los valores iniciales del siguiente.

III.4.3.2.- Ensayos y resultados

En este apartado se va a estudiar la predicción del modelo físicamente basado del apartado anterior cuando es utilizado para modelar a una carga electrónica. Se considerarán dos variaciones: en un caso R_s será cero y en el otro no, evaluando sus predicciones. En el apartado siguiente se compararán las predicciones realizadas por éste y por el modelo generalizado de admitancias cruzadas para una misma carga.

Los parámetros del modelo físicamente basado se pueden obtener por medio de los siguientes tres caminos:

- Bibliografía
- Solución analítica
- Optimización

El primero de ellos hace uso de datos de otros autores que se encuentran en la bibliografía, como por ejemplo **[Mansoor, 95][Mohan]**, y aplicando un coeficiente de escala a la resistencia de carga, para que la potencia activa sea la realmente consumida por nuestras cargas, ajusta el modelo.

El segundo camino parte de la solución analítica **[Mansoor, 95]**. Esta solución no es nada práctica por la complejidad de las expresiones analíticas. Además, ésta no es única, existiendo dos juegos de soluciones posibles y teniendo que utilizar un juego u otro en función de las magnitudes de los parámetros que se pretenden identificar. Existen también problemas de identificabilidad **[Ju, 97]**, es decir, existen problemas para obtener los parámetros a partir de un experimento específico de entrada-salida. Esto es así, por que los parámetros a identificar, R_s, L_s, C_d, R_{load} , aparecen siempre en las expresiones analíticas como productos entre ellos y como sumas de productos entre ellos. En el caso de que se

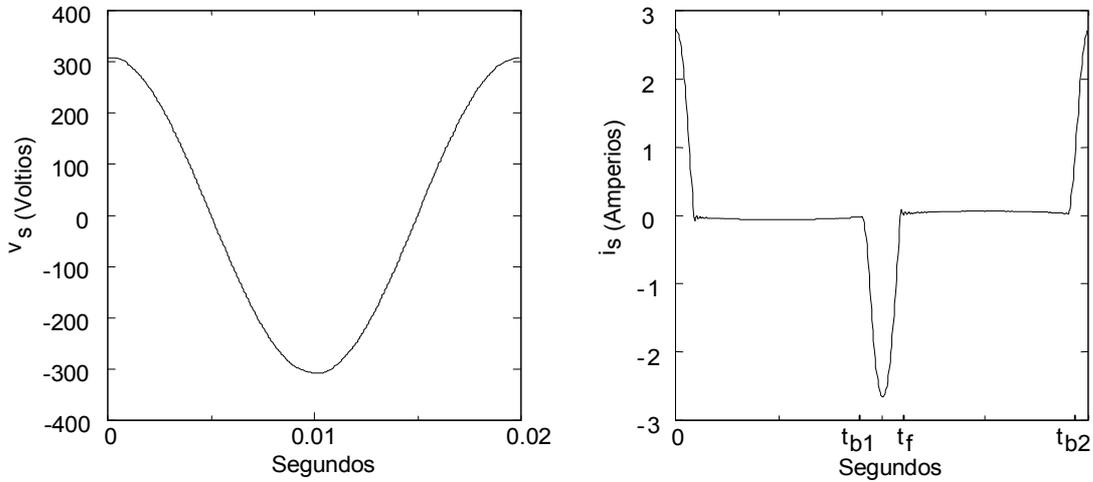


Figura III.25 Intensidad absorbida por el ordenador Compaq-Deskpro cuando la tensión de alimentación es perfectamente senoidal y de amplitud 220Vrms

pretenda partir de la expresión analítica para obtenerlos, se podrá identificar al producto de éstos, pero no a los parámetros de forma individual.

El tercer camino, el utilizado en esta tesis, se basa en el procedimiento de encontrar aquellos parámetros, dentro del espacio de parámetros válido, que minimicen una función de mérito no negativa y que, al mismo tiempo, satisfagan las restricciones del problema de optimización. Entre estas restricciones, debe incluirse que los parámetros del modelo han de ser positivos.

Por lo tanto, el procedimiento de optimización realizado para la identificación se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma:

Minimizar :

$$E = \sum_{j=0}^N (i_{medida}(j) - i_{modelo-fisico}(j))^2 \quad (III.42)$$

Restricciones :

$$R_s, L_s, R_{load}, C_d > 0$$

Para poder resolver este problema de optimización, es necesario disponer de la forma de onda de la corriente absorbida ante una onda de tensión dada. Como ensayo, se escogió el correspondiente a una tensión de excitación sin armónicos, cuya amplitud era de 220Vrms. Como carga, se escogió al Ordenador Compaq-Deskpro. Las formas de onda de tensión y de corriente para esta carga se muestra en la figura III.25, donde también se representan a los puntos t_{b1} , t_f y t_{b2} . Puntos, que se definen a continuación como:

t_{b1} : Es el instante de tiempo en el que comienza el periodo de conducción del diodo. Es decir, cuando se verifica que: $\text{abs}(v_s) > v_d$.

t_f : Es el instante en que termina el periodo de conducción, $t(i_s < 0)$.

t_{b2} : Se define como el instante de tiempo cuando finaliza el periodo de descarga. Es decir $t(\text{abs}(v_s) > v_d)$.

Se necesitan unos valores iniciales de los parámetros del modelo con los que simular el puente de diodos y, a partir de la comparación de la predicción con los datos reales observados, seguir con el proceso de optimización. El proceso de obtención de estos valores iniciales no es trivial y se describirá a continuación de forma detallada.

El proceso de obtención de los valores iniciales parte de una aproximación del circuito y consiste en suponer $R_s=0$. Esta aproximación es utilizada por dos razones: porque los valores de este parámetro encontrados en la literatura son de pequeña magnitud en comparación con R_{load} ($R_s=1\text{m}\Omega$ frente a $R_{load}>20\Omega$), y porque el conjunto de restricciones físicas que se pueden aplicar al problema es limitado, por lo que al hacerlo cero se reduce el número de parámetros a determinar.

Teniendo en cuenta que R_s se hace cero, entonces al circuito del que se pretenden obtener los parámetros solo le quedan tres parámetros independientes: R_{load} , C_d y L_s .

Para obtener R_{load} y C_d se utilizará la ecuación de descarga, ecuación (III.35). Para ello es necesario conocer la tensión v_d en dos instantes de tiempo cualesquiera dentro del periodo de descarga. Los valores utilizados serán los valores inicial y final de este periodo. Uno de ellos, el valor final, es fácilmente obtenible, ya que coincide con el valor de la tensión de alimentación, v_s , en el momento en que el puente empieza a conducir ($t=t_{b2}$). El otro, el valor inicial, se obtiene de forma gráfica por medio de una aproximación del valor de v_d en el instante t_f . Este valor aproximado se obtiene tras el proceso de interpolación realizado en la parte del ciclo en que el diodo conduce. Los puntos utilizados son: cuando el puente empieza a conducir, $t=t_{b1}$, en que v_s coincide con v_d , y cuando la corriente absorbida alcanza el valor máximo, entonces la derivada de la corriente en la bobina se hace cero y v_s coincide con v_d . Utilizando estos dos puntos se traza una recta que corta a la recta $t=t_f$ para obtener, finalmente, el punto $v_d(t_f)^{aprox}$, que era el valor inicial buscado para el periodo de descarga, como se puede ver en la figura III.26.

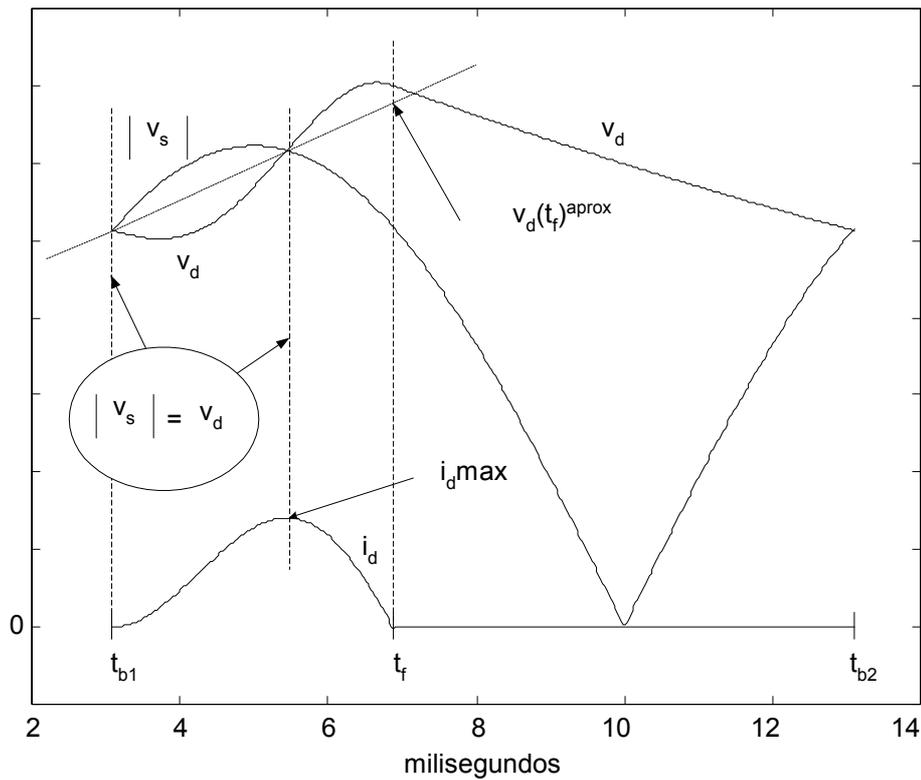


Figura III.26 Circuito aproximado para el cálculo del valor inicial junto con la tensión de alimentación y la intensidad absorbida para unos valores dados

A partir de los dos valores de tensión en t_f y t_{b2} , y la distancia entre ellos en el tiempo, $t_{b2}-t_f$, se aplica la ecuación (III.35) y se obtiene el producto $R_{load} \cdot C_d$, que para el ordenador Compaq da un valor de 0.109 segundos.

El siguiente paso consiste en separar al producto $R_{load} \cdot C_d$ en sus dos términos. Para ello se debe utilizar la medida de la potencia activa consumida por la carga, y se debe igualar ésta con la potencia activa que predice el modelo. Puesto que no se conoce la expresión analítica de la tensión v_d durante el periodo de conducción del puente de diodos en función del tiempo, se utilizará una aproximación lineal durante ese tramo, mientras que en el periodo en que el condensador se está descargando, al conocerse su expresión analítica, se utilizará ésta. La expresión analítica que aproxima el valor de la potencia activa absorbida por el modelo físicamente basado es:

$$P = \frac{1}{t_{b2} - t_{b1}} \int_{t_{b1}}^{t_{b2}} \frac{v_d^2(t)}{R} dt = \frac{1}{R_{load} (t_{b2} - t_{b1})} \left[\int_{t_{b1}}^{t_f} (at + b)^2 dt + \int_{t_f}^{t_{b2}} \left(v_d(t_f) e^{\frac{-(t-t_f)}{R_{load} C_d}} \right)^2 dt \right] \quad (III.43)$$

Utilizando la ecuación (III.43) se puede despejar R_{load} y, por tanto, realizar la separación entre R_{load} y C_d . A partir de los valores tomados del ensayo a 220 Vrms del computador Compaq-Deskpro se obtuvieron los siguientes valores de los anteriores parámetros: $R_{load}=1035.5 \Omega$ y $C_d=105.3910 \cdot 10^{-6} F$.

Para estimar el parámetro L_s es necesario utilizar la ecuación (III.28) y la simplificación de $R_s=0$. Por lo tanto, se obtiene una expresión que relaciona la pendiente de la corriente absorbida y la diferencia entre la tensión de alimentación, en módulo, y la tensión del condensador:

$$L_s \frac{di_d}{dt} = |v_s| - v_c \quad (III.44)$$

El módulo de v_s es dato, pero no se puede decir lo mismo de v_c , por lo que se volverá a utilizar la interpolación lineal, y para disminuir el error se calculará, de forma numérica, la pendiente de i_d cuando ésta sea máxima. Realizando todos los cálculos se obtuvo un valor de $L_s = 0.46 \text{ mH}$.

Finalmente, se escribió un script de sentencias ejecutables por Matlab que, utilizando la función FMINCON que resuelve el problema de optimización con restricciones, intentaba calcular el valor de los parámetros que minimizaban el valor de la función objetivo, ecuación (III.42), cumpliendo además con las restricciones de que los parámetros debían ser positivos.

Varios problemas surgieron cuando se ejecutó el script en Matlab. El primero fue que el conjunto de puntos que se habían muestreado era insuficiente para la función FMINCON, puesto que al ser un método numérico complejo, cuando la solución obtenida cambiaba con excesiva rapidez, disminuye, de forma automática, el intervalo Δt entre valores de la función objetivo. Esto no es problema cuando la función objetivo se conoce de forma analítica, pero cuando se da el caso de que se está comparando una función muestreada con una analítica, es posible que, el Δt sea menor que el intervalo de muestreo utilizado en la adquisición de datos. Este problema se resuelve interpolando de forma lineal entre muestras. El segundo problema es que, incluso con la interpolación, el script no convergía a una solución válida, a pesar del cuidado tomado para el cálculo de los valores iniciales.

Para evitar los problemas de convergencia se tuvieron que añadir más restricciones. La restricción más lógica, a priori, era la de imponer que la energía absorbida a la entrada del circuito, por ciclo, debía ser igual a la energía consumida por las resistencias R_s y R_{load} .

Imponiendo esta última condición, el problema a resolver expresado de forma matemática es ahora:

Minimizar :

$$E = \sum_{j=0}^N (i_{medida}(j) - i_{modelo-fisico}(j))^2$$

Restricciones :

(III.45)

$$R_s, L_s, R_{load}, C_d > 0$$

$$\sum_{j=0}^N v(j)i_s(j) = \sum_{j=0}^N R_s i_s(j)^2 + \sum_{j=0}^N v_d(j)^2 / R_{load}$$

Este mismo problema sirve para obtener las dos variaciones que se querían estudiar, es decir, el circuito con tres y cuatro parámetros independientes, ya que el caso de tres parámetros es un caso particular del de cuatro, tomando $R_s=0$. Aún siendo uno un caso particular del otro, existen diferencias importantes entre los parámetros obtenidos, como se puede ver en la siguiente tabla donde se reproducen los valores de ambos casos.

Tabla III.7 Valores obtenidos para el puente de diodos

	R_s	L_s	C_d	R_{load}	E (error)
Tres parámetros	0	24.23e-4H	101.86μF	1117.3Ω	1.65e-4
Cuatro parámetros	3.71Ω	8.96e-4 H	409.5μF	1016.4Ω	8.29e-7

Como se puede ver, los valores de la resistencia de carga varían poco entre ambos modelos, pero no se puede decir lo mismo de los valores de la capacidad, C_d , y de la inductancia, L_s . Además, la sensibilidad del método a los valores iniciales es notable, hasta el punto de que no convergía a una solución válida, no sólo cuando los valores de partida se escogían arbitrariamente, sino cuando éstos no estaban próximos a los valores finales. Esto hace que el método gráfico para la identificación de los parámetros sea necesario.

III.5.- Comparación de modelos armónicos y físicamente basados

Puesto que, tanto los modelos armónicos como los físicamente basados desarrollados en esta tesis están orientados a la simulación de la forma de onda de la corriente absorbida

por la carga cuando es alimentada por una onda de tensión que puede contener armónicos, es lógico preguntarse cuál de ellos es el que mejor aproxima a las cargas reales cuando son alimentadas por tensiones típicas del nivel de distribución.

Claramente, el modelo físicamente basado presenta la ventaja de poder simular no sólo el régimen permanente, sino también el transitorio. Pudiendo ser utilizado en el caso de que existan subarmónicos e interarmónicos de tensión, mientras que el modelo armónico, al no contener esta información, no. No obstante, al orientar la aplicación de estos modelos al terreno en el que las tensiones esperadas son las normales en el nivel de distribución y, su predicción, al régimen permanente, entonces ambos son comparables.

En este apartado se va a realizar una comparación de las formas de onda de corriente predichas por ambos modelos para el ordenador Compaq Deskpro, carga que se está utilizando como representante de las electrónicas. Como tensiones representativas del nivel de distribución se utilizarán las ya presentadas en la tabla III.4, que como se recordará son tensiones reales tomadas al nivel de distribución en zonas de la región de Murcia con distintas composiciones de carga.

Se alimentó al ordenador con las 15 tensiones representativas y se midió la corriente absorbida. Al mismo tiempo se utilizaron estas tensiones como entradas para el modelo generalizado de admitancias cruzadas y para los modelos físicamente basados de 3 y 4 parámetros, obtenidos en el apartado anterior, y se obtuvieron las corrientes predichas por éstos. Finalmente, como figura de mérito que sirve para compararlos, se utilizó el error cuadrático medio, definido como la integral a lo largo de un ciclo de la diferencia entre los valores observados y los predichos, en cada uno de los tres casos, al cuadrado. Los resultados obtenidos son representados en las gráficas de la figura III.27.

Como se puede ver en dicha figura, el modelo generalizado de admitancias cruzadas obtiene mejor aproximación al comportamiento real de la carga en todos los ensayos excepto dos: los ensayos TR09 y TR10. En esos casos, el modelo físicamente basado de 4 parámetros da los menores errores (por debajo del 8%). Este resultado puede ser debido a que el modelo de admitancias cruzadas se obtuvo utilizando amplitudes del 2,5% de la amplitud de la fundamental (220Vrms), y resulta que la amplitud de los armónicos presentes en TR09 y TR10 superan este porcentaje (6,2 Vrms y 6,9 Vrms frente a 5,5Vrms para el 2,5%). Aunque, si se observa el ensayo TR02, la amplitud del 5 armónico es aún mayor (8,3 Vrms), y los resultados en este caso son buenos.

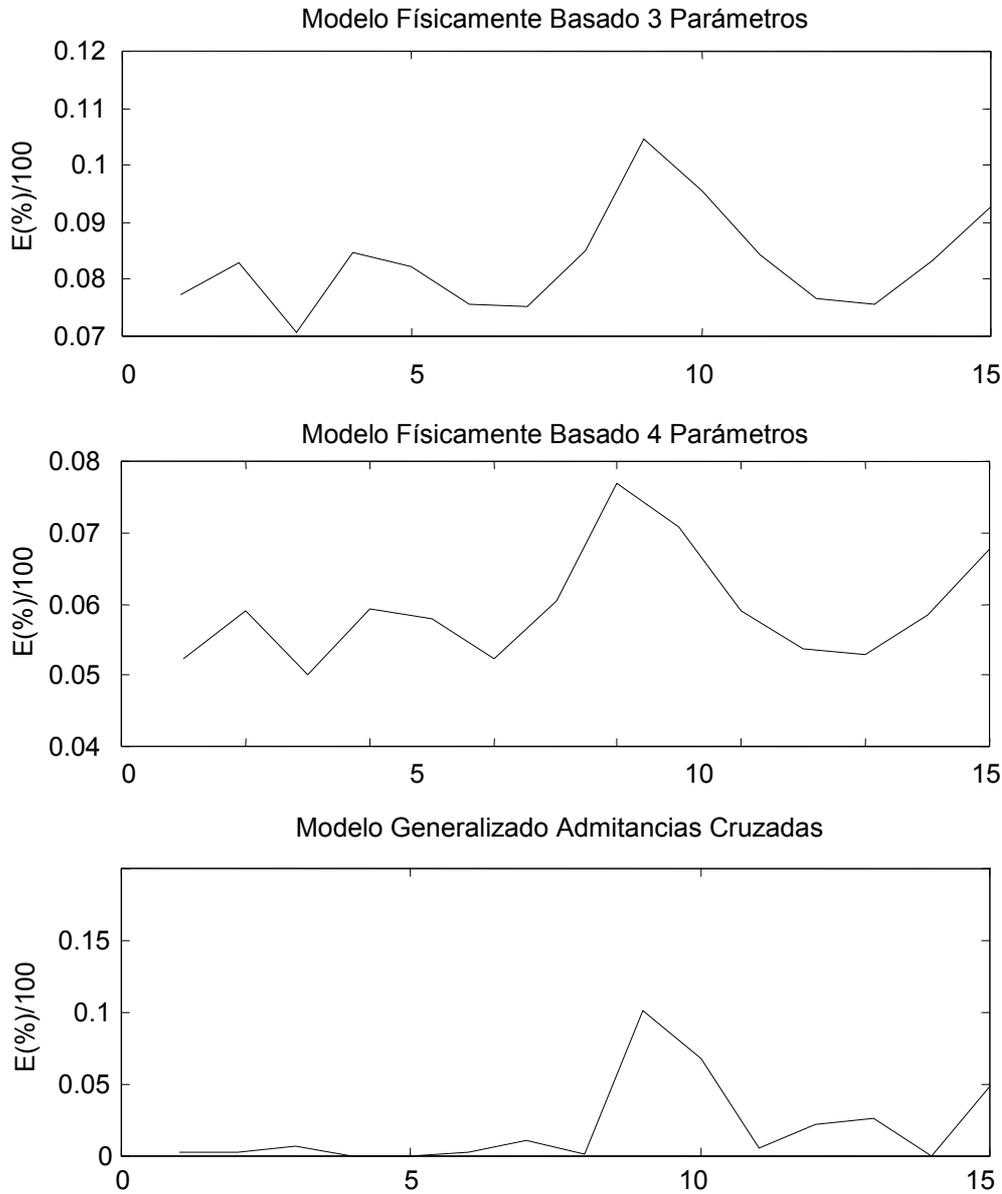


Figura III.27 Error cuadrático medio obtenido en los ensayos a tensiones reales para los modelos de 3 y 4 parámetros, y el generalizado de admitancias cruzadas

La diferencia entre el TR02 y los otros dos es doble: por un lado, la amplitud de la fundamental en éstos ronda los 230Vrms, y por otro los armónicos que están presentes en éstos están más igualados en magnitud que para el caso TR02. Como resulta que existen otras tensiones con magnitudes de la componente fundamental en torno a 230Vrms y con errores bajos, la justificación que se encuentra es que la hipótesis de superposición para tener en cuenta los efectos de los armónicos individuales, cuando éstos son de valores semejantes, no ofrecen tan buenos resultados como las predicciones de los modelos físicamente basados.

III.6.- Conclusiones

Como conclusiones de este capítulo se pueden enumerar las siguientes:

Si se quieren utilizar modelos estáticos para identificación, no se puede utilizar una definición de la reactiva que utilice los armónicos. Esto hace que se produzca una pérdida de información, puesto que cargas con distinta reactiva, cuando ésta es calculada utilizando una definición armónica, pueden dar el mismo valor cuando sólo se tiene en cuenta la componente fundamental.

Los modelos estáticos sólo predicen potencia activa y reactiva, mientras que los otros dos predicen el comportamiento a lo largo del ciclo y, por tanto, ofrecen más información.

Cuando el nivel de agregación aumenta, la posibilidad de utilizar los modelos estáticos disminuye, debido a que el aumento de la actividad (ciclos y conexiones de carga) en los datos medidos enmascara la señal del escalón de potencia.

Las tensiones normales a nivel de distribución tienen amplitudes armónicas de pequeña magnitud con respecto a la componente fundamental y, por lo tanto, un valor de 2,5% de amplitud del armónico para la obtención del modelo generalizado de admitancias cruzadas es suficiente en la mayoría de los casos.

El modelo generalizado de admitancias cruzadas tiene mejor comportamiento que el físicamente basado cuando las condiciones de aplicación están dentro de las que se han utilizado para determinar los parámetros de la matriz.

El modelo generalizado sólo puede ser utilizado en régimen estacionario y cuando el contenido armónico no incluye subarmónicos ni interarmónicos (aunque ésta no sea una limitación importante, puesto que es rara su presencia).

El tiempo de obtención del modelo generalizado es elevado. Concretamente en torno a las 2 horas cuando se consideran tres amplitudes de la componente fundamental, 20 armónicos de tensión y 12 fases distintas para cada armónico.

El modelo físicamente basado es más fácil de obtener, puesto que se pueden identificar los parámetros a partir de un solo ensayo, aunque el proceso de identificación requiere un

tratamiento más complejo. A su vez, el algoritmo de identificación es más inestable, debiendo introducir condiciones que ayuden a la convergencia.

El modelo físicamente basado puede ser utilizado en cualquier régimen.

El tiempo de proceso necesario para obtener el resultado de la corriente absorbida, en el caso del modelo generalizado de admitancias cruzadas, es muchísimo menor que el necesario para el físicamente basado. Esto es así, porque en el modelo de admitancias sólo es necesario realizar operaciones de productos y sumas entre los elementos de la matriz y las amplitudes y fases de los armónicos, mientras que en el físicamente basado se deben simular varios ciclos para obtener el régimen permanente, puesto que se desconocen los valores iniciales de sus variables de estado.

La generación de nuevos modelos a partir del modelo físicamente basado es más rápida. Por ejemplo, en el caso de una carga electrónica cuyo consumo de potencia varíe en función de su uso, su adaptación a una nueva situación es inmediata sin más que aumentar R_{load} . En el caso de la matriz de admitancias se deben realizar los ensayos para esta nueva situación.

Visto lo anterior, es de interés no descartar la posibilidad de utilizar modelos distintos según el tipo de carga. Aunque se preferirá, en condiciones estacionarias y cuando sea de aplicación, los modelos de admitancias frente a los físicamente basados por su mayor precisión.

III.7.- Bibliografía

[Agunov, 97] M.V. Agunov, A. V. Agunov, I. G. Globenco, “Energy Balance in Electric Circuits with Non-Sinusoidal Voltage and Current”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, pp: 1507-1509, November 1997.

[Alvarez, 92] C. Alvarez, R. Malhamé, A. Gabaldón, “A Class of Models for Load Management Application and Evaluation Revisited”, IEEE Transactions on Power System, N°4, pp:1435-43, November 1992.

[Apostol] T. M. Apostol, *Análisis Matemático 2ª Edición*, Editorial Reverté 1981, ISBN 84-291-5004-8.

[Boix, 96] O. Boix, “Estudio y Modelización en Régimen Permanente de Cargas No Lineales para el Análisis Armónico de Redes Eléctricas” Tesis Doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona 1996.

[Cidrás, 96] J. Cidrás, C. Carrillo, J. Arrillaga, “An Iterative Algorithm for the Analysis of the Harmonic Currents Produced by Fluorescent Lamps”, Proceedings. 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, pp: 687-692, October 1996.

[Cidrás, 98] C. Carrillo, J. Cidrás “Harmonic Model for the Fluorescent Lamp”, Proceedings. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, pp: 1211-1217, October 1998.

[CompBoard] Measurement Computing, <http://www.measurementcomputing.com>

[Concordia, 82] C. Concordia, S. Ihara, “Load Representation in Power System Stability Studies”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N°4, pp:969-979, April 1982.

[Enetics] Enetics Inc., <http://www.enetics.com>

[Fauri, 97] M. Fauri, “Harmonic Modelling of Non-Linear Load by means of Crossed Frequency Admittance Matrix”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, pp: 1632-1638, November 1997.

[Gilker, 89] C. Gilker, V. Dwyer, R. Dugan, “A program for analysis of Power System Harmonics”, IEEE Computer Applications in Power, Vol 2, No. 4, pp:36-41, October 1989.

[Hajagos, 98] L.Hajagos, B. Danai, “Laboratory Measurements and Models of Modern Loads and Their Effect on Voltage Stability Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No.2, pp:584-592, May 1998.

[Hill, 93] D. Hill, “Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 1, pp: 166-176, February 1993.

[HPVEE] Agilent VEE,

<http://www.get.agilent.com/gpinstruments/products/vee/support/>

[Jalali, 94] S. Jalali, R. Lasseter, “ A Study of Nonlinear Harmonic Interaction Between a Single Phase Line-Commutated Converter and a Power System”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp: 1616-1624, July 1994.

[Ju, 97] P. Ju, E. Handschin, “Identifiability of Load Models”, IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol 144 1, pp: 45-49, January 1997.

[Karlsson, 94] D. Karlsson, D. Hill, “Modelling and Identification of Nonlinear Loads in Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 9, No. 1, pp: 157-166, February 1994.

[Kheir, 93] N. A.Kheir, *Systems Modeling and Computer Simulation*, Marcel Dekker, Inc, NY, 1993.

[Kundur] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Edited by EPRI, McGraw-Hill 1994.

[Lara, 99] P.M. Lara, “Aportaciones a las Definiciones de Potencia en Régimen Sinusoidal” Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria, Mayo 1999.

[Mansoor, 95] A. Mansoor, W. Grady, A. Chowdhury, M. Samotyj, “An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, January 1995.

[Mansoor, 95b] A. Mansoor, W. Grady, R. Thallam, M. Doyle, S. Krein, M. Samotyj, “Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, July 1995.

[Mansoor, 95c] A. Mansoor, W. Grady, P. Staats, R. Thallam, M. Doyle, M. Samotyj, “Predicting the Net Harmonic Currents Produced by Large Numbers of Distributed Single-Phase Computer Loads”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, October 1995.

[Mohan] N. Mohan, T. Undeland, W. Robins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Willey & Sons, Inc. New York, 1995, ISBN 0-471-58408-8.

[MSPH] A. Arsoy, S. Halpin, Y. Liu, P. Ribeiro, *Modeling and Simulation of Power System Harmonics*, IEEE Product #EC102, ISBN 0-7803-4597-5.

[NumRec] H. Willian, S. Teukolsky, W.Vetterling, B. Flannery, *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*, Segunda Edición, Cambridge University Press.

[Oppenheim] A. Oppenheim, R. Schafer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall 1989, ISBN 0-13-216771-9.

[Pal, 92] M. Pal, “Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No.1, pp: 243-249, February 1992.

[SCPI] SCPI Consortium homepage,

http://ourworld.compuserve.com/homepages/acea/Scpi_uk.htm.

[Task, 93] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load Representation for Dynamic Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp: 472-481, May 1993.

[Task, 95a] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1,pp: 523-538, February 1995.

[Task, 95b] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp: 1302-1313, August 1995.

[TaskH, 96] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No. 1, pp: 452-465, January 1996.

[UML] Object Management Group, <http://www.omg.org/technology/uml/index.htm>

[Varadan, 93] S. Varadan, E. Makram, “Generalized Load Modeling in the Presence of Harmonics and Distortion”, Proceedings of the 25th Southeastern Symposium on System Theory 1993, pp: 124-128, Marzo 1993.

[Xu, 94] W. Xu, Y. Mansour, “Voltage Stability Analysis using Generic Dynamic Load Models”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp: 479-493, February 1994.

[Xu, 94b] W. Xu, J. Drakos, Y. Mansour, A. Chang “A Three-Phase Converter Model for Harmonic Analysis of HVDC Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, N°3, pp: 1724-1731, July 1994.

IV.- Identificación de cargas

IV.1.- Introducción

La identificación de cargas eléctricas ha sido un tema muy poco tratado a lo largo de la historia del uso de la energía eléctrica. Es por ello, que los artículos referentes al tema sean escasos en comparación con los que tratan sobre modelos de cargas. Prácticamente sólo se ha encontrado un método utilizado para la identificación, y la mayoría de los artículos referenciados por éste, están publicados en revistas de la IEEE de Teoría de la Información. Esto nos indica el poco interés que ha suscitado hasta la actualidad este tema en Ingeniería Eléctrica. Esto es normal, puesto que el comportamiento agregado de las cargas hace que la información se vaya perdiendo conforme el nivel de agregación es mayor y siempre los mayores esfuerzos se han centrado en el suministro en la cantidad deseada, con la calidad suficiente y en el lugar adecuado de energía eléctrica.

En este capítulo se investigará la posibilidad de obtención de la composición de la carga utilizando un proceso de descomposición de la corriente absorbida a lo largo de un ciclo. La aplicación de este procedimiento a la identificación de la carga, que el autor conozca, no ha sido realizada con anterioridad. Para ello, se utilizaran como elementos base de la descomposición a los modelos desarrollados en el capítulo anterior.

Puesto que se desea que el sistema funcione en tiempo real, se ha desarrollado una aplicación que implementa el proceso de forma automática y que puede medir las tres tensiones fase-neutro y las tres corrientes de fase, realizando la identificación a partir de un punto de un sistema trifásico.

Finalmente, se realizaron ensayos a distintos niveles de agregación, unos a bajo nivel en el laboratorio, y otros a alto nivel en el Campus Alfonso XIII de la UPCT, cuyos datos fueron utilizados como entrada de la aplicación desarrollada. Los resultados y conclusiones de estos se exponen al final del capítulo.

IV.2.- Métodos de identificación de cargas

En este apartado se va a proceder a la descripción de los métodos de identificación encontrados en la literatura.

El método de identificación basado en los escalones de potencia activa y reactiva está directamente implementado en un sistema comercial [**Enetics**]. Se pensó que su aplicación estaba restringida a niveles de agregación muy bajos (prácticamente una vivienda) y así nos lo parece confirmar el hecho de que sólo se ha aplicado a entornos residenciales, teniendo dificultades para implementar el mismo en entornos comerciales -ya que disponen de un prototipo desde 1998 [**Drenker, 99**] todavía en fase de desarrollo-.

Para evitar este gran inconveniente, se realizó una búsqueda bibliográfica para identificar cargas por otros sistemas. En [**Yan, 99**] se realizaba una descomposición de la corriente total absorbida como una combinación lineal de corrientes primarias, pero su aplicación no estaba orientada a la identificación de cargas, sino más bien a la validación de un programa de flujo armónico de cargas. La base de este método ha servido para la realización de esta tesis doctoral, estudiando sus ventajas y limitaciones en la identificación de cargas en aplicaciones a un bajo y a un alto nivel de agregación.

IV.2.1.- Identificación de cargas por su consumo de activa y reactiva

Este método está orientado especialmente a la investigación de los usos de las cargas por los usuarios finales. Para ello utiliza los escalones de activa y reactiva que se producen en el momento de conexión/desconexión de los equipos eléctricos realizando, por medio de un software bastante complejo, el proceso de identificación.

Los distintos escalones que se producen en una casa ficticia por distintos electrodomésticos sirven para entender como funciona este método, ver figura IV.1. En ella se puede ver como durante el periodo dibujado hay una gran actividad, debido principalmente al horno. También se puede apreciar que los escalones de potencia son de distinto tamaño y si además se añade la información de la reactiva se puede tener otro parámetro más que ayude a identificarlos.

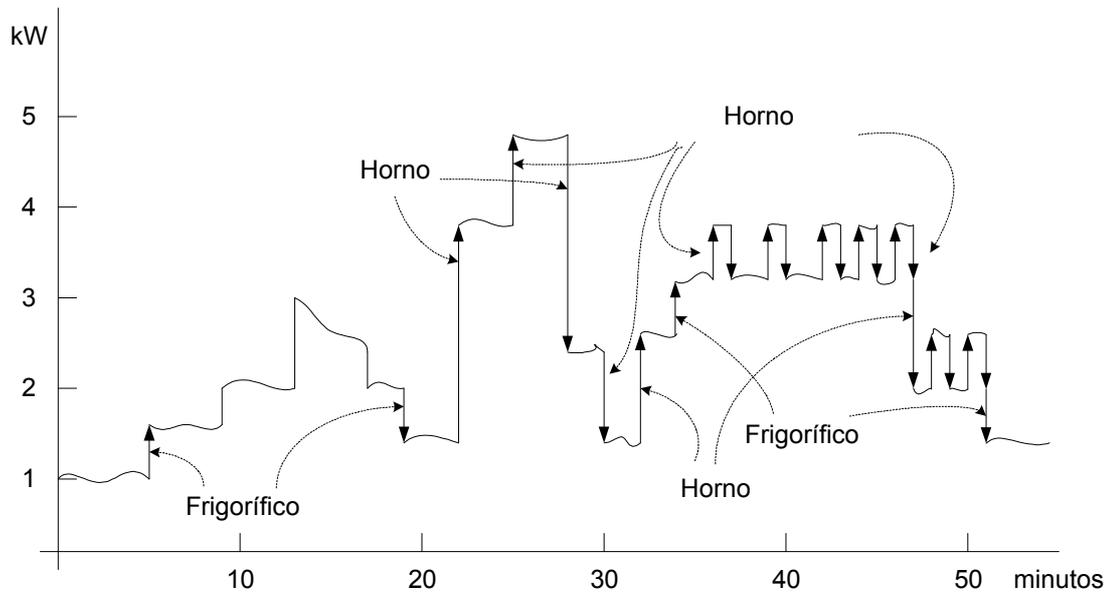


Figura IV.1 Potencia consumida por distintas cargas en función del tiempo

En este método de identificación no se utiliza el comportamiento eléctrico a lo largo de un ciclo, sino que utiliza un modelo estático exponencial para el consumo de activa y reactiva suponiendo, además, que todas las cargas se comportan como impedancias, con lo que el exponente para todas las cargas es de valor 2.

El proceso seguido es el siguiente:

1. Se calcula una admitancia de la carga en los instantes de interés utilizando la expresión:

$$Y(t) = \frac{P(t)}{V^2(t)} \quad (\text{IV.1})$$

Es decir, se utiliza un modelo exponencial, pero considerando a todas las cargas como impedancias.

2. Se normaliza a la tensión nominal del sistema de distribución para que la dispersión de las potencias activas y reactivas en el plano P, Q sea menor:

$$P_{norm}(t) = \left(\frac{220}{V(t)} \right)^2 P(t) \quad (\text{IV.2})$$

La expresión anterior no es más que la admitancia multiplicada por la tensión nominal al cuadrado. Con ello se obtiene el consumo teórico a la tensión nominal.

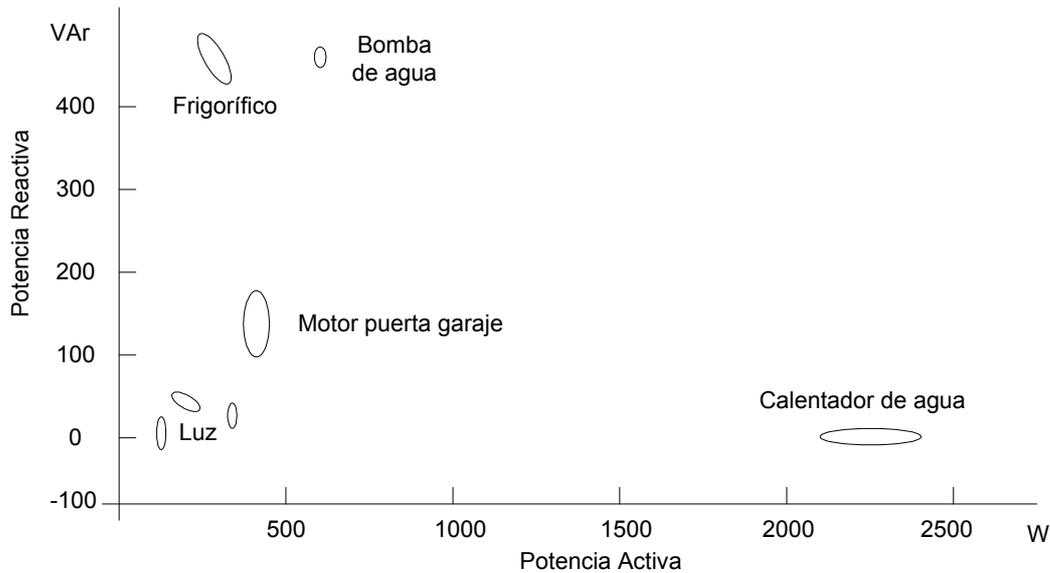


Figura IV.2 Escalones de potencia activa y reactiva dibujados en el plano PQ

Con la ayuda de este modelo se va dibujando en un plano, el formado por la activa y la reactiva, las diferencias de activa y reactiva que hay en cada instante donde se identifica un escalón de potencia activa mayor que un umbral dado.

El conjunto de puntos obtenido da lugar a un gran número de ellos, cuya distribución en el espacio P,Q no es uniforme, sino que se agrupa en regiones con formas más o menos elípticas, ver figura IV.2.

A continuación se realiza un proceso de aprendizaje de máquinas de estado. Identificando máquinas de dos estados (estado ON y estado OFF de las cargas) a partir del emparejamiento de las elipses del primer cuadrante con las elipses que se obtendrían en el cuarto cuadrante.

Este proceso de aprendizaje de máquinas de estado sólo se realiza cuando no se conocen, a priori, las máquinas de estado de las distintas cargas.

Partiendo de las máquinas de estados de las cargas de interés y de los escalones de activa y reactiva a lo largo del tiempo, se pretende seguir su estado por medio de la asignación de estos eventos a los distintos estados de las máquinas. Asimismo, se debe permitir cierta tolerancia en la señal esperada, que dispara la transición entre estados, para permitir posibles variaciones de la carga, ruidos, o la coincidencia en el tiempo de la actividad simultánea de dos o más cargas pequeñas.

Para esta tarea de asignación de eventos a transiciones entre estados de varias máquinas de estados, se utiliza una variante optimizada del algoritmo de Viterbi [Ryan, 93], [Bouloutas, 91], [Hart, 93]. Este algoritmo se puede describir, sencillamente, como un algoritmo que encuentra el camino más probable a través de una red. Los nodos de la red en este caso, están formados por el conjunto de estados posibles a lo largo del tiempo. Los enlaces entre nodos representan una posible transición entre dos estados en intervalos discretos consecutivos en el tiempo. Una descripción del algoritmo se puede consultar en [Ryan, 93]. La aplicación directa del algoritmo no es posible, puesto que existen errores en los datos medidos que no pueden corregir con el algoritmo de Viterbi. El algoritmo de Viterbi permite corregir errores en los que un símbolo, en nuestro caso el par (P,Q) de una transición, es corrompido y transformado en otro símbolo posible de la máquina de estados, otro (P,Q). El problema es que al utilizar el mismo canal de comunicaciones, es decir la línea eléctrica, para recibir la información de las transiciones resulta que se deben eliminar muchas transiciones que no se corresponden con las máquinas de estados cuya actividad se pretende monitorizar. Asimismo, se pueden producir la inserción de nuevos símbolos generados por nuevos equipos, como la fusión de símbolos esperados cuando se dé el cambio simultáneo de estado de dos o más equipos.

En [Hart, 93] se resuelven estas limitaciones del algoritmo de Viterbi, permitiendo corregir tanto la inserción, el borrado, así como la fusión de símbolos procedentes de la máquina de estado. También se describe el algoritmo por medio de un flujo de datos.

Finalmente, una vez que se han identificado los estados por los que han ido pasando las cargas, así como el tiempo que han permanecido en ellos, la última etapa consiste en la identificación de máquinas de estados con cargas reales, proceso para el que es necesario medir, en laboratorio, las cargas reales para poder conocer sus máquinas de estado. Por lo tanto a partir de la biblioteca de máquinas de estado de las cargas, se hace una comparación. El proceso de identificación concluye cuando se produzca la coincidencia entre máquinas.

A pesar de que solo se ha hablado de máquinas de dos estados, ON y OFF, este sistema también es capaz de identificar cargas que posean varios estados, como por ejemplo un frigorífico que posea dos grupos motor-compresor, uno para el congelador y otro para la cámara frigorífica. Lo que no es capaz de identificar son máquinas cuyo estado vaya variando de forma continua, puesto que por el sistema de identificación basado en

escalones de potencia se necesita de un umbral de tolerancia para permitir variaciones de potencia debidas a variaciones de tensión, posibles ruidos en el canal de comunicación, así como variaciones debidas a parámetros externos del sistema eléctrico, como por ejemplo la influencia de la temperatura en el consumo de los aparatos. Por estos mismos motivos, tampoco es capaz de identificar cargas de pequeña potencia. Además, debido a su forma de abordar la identificación, este esquema no funciona de forma adecuada cuando el nivel de agregación de las cargas se incrementa, puesto que la probabilidad de que se produzcan fusiones entre transiciones se incrementa y, al mismo tiempo, se debe aumentar la tolerancia para la detección de los escalones, puesto que al ser la carga mayor, una variación de la tensión hará variar la potencia consumida en mayor grado, con lo que su sensibilidad se ve fuertemente reducida. De igual manera, la posibilidad de equivocarse en el proceso de identificación de máquinas de estado, por solapamiento de elipses, cuando las cargas eléctricas tienen el mismo comportamiento eléctrico no es despreciable. Por ejemplo: una plancha de vapor que tiene un consumo entorno a 1 kW y una freidora también con un consumo de 1 kW.

La aportación a la mejora de la identificación debida a la medida de la potencia reactiva no es importante salvo en contadas ocasiones. Ya se comentó en el apartado de modelos estáticos, que el cálculo de la reactiva utilizando la información armónica no era útil, puesto que no se podía aplicar linealidad. La repercusión de la no-linealidad en este método de identificación es la imposibilidad de realizar el proceso de identificación de las máquinas de estados, básico para el resto del algoritmo. Sólo es aplicable la definición de reactiva utilizando la componente fundamental, que si verifica la linealidad. Medidas realizadas en varios aparatos de aire acondicionado muestran que la reactiva absorbida por estos aparatos es muy pequeña, prácticamente cero, con lo que serían indistinguibles estas cargas de otras de igual potencia, como por ejemplo una placa calefactora. Se necesita más información procedente de las cargas que permita separar estos comportamientos.

IV.2.2.- Identificación de cargas por la corriente absorbida en un ciclo

Este método utiliza toda la información disponible, como resultado de la medida a lo largo de un ciclo, tanto de la tensión a la que está sometida la carga, como de la corriente absorbida por ésta.

La idea básica del método es la descomposición de la corriente total absorbida por un conjunto de cargas, utilizando como base de la descomposición al conjunto de formas de onda de corriente absorbidas por las cargas de forma individual.

La analogía de este método con el de la descomposición en serie de Fourier de una función periódica es total. La diferencia estriba en el conjunto de funciones utilizado para realizar la descomposición. En el método de Fourier el conjunto es una base ortonormal de funciones senoidales. Ahora, el conjunto de funciones será el comportamiento eléctrico, corriente absorbida, de las cargas individuales que forman parte de la carga total, y los coeficientes que se deben calcular son los pesos correspondientes de cada carga individual sobre el total. Por lo tanto, un peso obtenido cercano a 1, para una corriente individual dada, indica que en el total existe una carga unitaria de ese tipo en concreto.

El procedimiento matemático por el cual se puede realizar la descomposición es descrito en [Yan, 99]. No obstante, en esta tesis se utilizan modelos de carga más sofisticados y elaborados. En el trabajo presentado en [Yan, 99], los modelos utilizados son, para unas cargas las corrientes absorbidas en un solo ciclo de su funcionamiento, y para otras, un modelo propuesto en un artículo previo del mismo grupo de investigación [Mancini, 96]. En este último trabajo se modela la dependencia con la tensión midiendo, en laboratorio, la corriente absorbida en un ciclo frente a cinco amplitudes de la fundamental, utilizándose a estas medidas como base para la respuesta del modelo ante cualquier tipo de tensión.

El modelo utilizado no es adecuado, ya que no tienen en cuenta la interacción entre los armónicos de tensión y los armónicos de corriente absorbidos por las cargas. Por ejemplo, este modelo no daría buenos resultados cuando existan un gran número de cargas electrónicas en el sistema, puesto que la distorsión de la tensión modificará las amplitudes de los picos de estas cargas y, al mismo tiempo, los desplazará ligeramente. Este ligero desplazamiento dará grandes errores cuando se calcule la integral del error al cuadrado.

El problema matemático consiste entonces, en la descomposición de la corriente total absorbida por la combinación lineal de corrientes absorbidas por cargas individuales. Si se expresa el consumo de corriente de las cargas individuales en forma de serie de Fourier:

$$l_i(t) = \sum_{k=0}^N (a_{ki} \cos(kwx) + b_{ki} \text{sen}(kwx)) \quad (\text{IV.3})$$

En donde N es el orden del armónico de corriente más alto que se utilizará en la descomposición. La corriente total absorbida por las cargas es:

$$L(t, w) = \sum_{i=1}^M w_i I_i(t) \quad (\text{IV.4})$$

En donde $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ es el vector de pesos. Si se utiliza como criterio de optimización la forma de onda de la corriente, $i(t)$, y se elige como figura de mérito el error RMS como medida del ajuste entre la onda medida, $I(t)$, y la descomposición realizada, $L(t, w)$, entonces, la expresión a minimizar sería:

$$J(t, w) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I(t) - L(t, w)]^2 dt} \quad (\text{IV.5})$$

Con las restricciones de que los pesos w_i , sean todos positivos ($w_i \geq 0$ para todo i). Siendo $T = 2\pi/\omega$ el periodo de la componente fundamental del sistema eléctrico.

Expandiendo la corriente total absorbida $I(t)$ utilizando series de Fourier, ésta se expresa como:

$$I(t) = \sum_{k=0}^N (A_k \cos(k\omega t) + B_k \text{sen}(k\omega t)) + \sum_{k=N+1}^{\infty} (A_k \cos(k\omega t) + B_k \text{sen}(k\omega t)) \quad (\text{IV.6})$$

Sustituyendo esta última expresión y a (IV.3) y (IV.4) en (IV.5), entonces la función a minimizar se expresa como:

$$J(t) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sum_{k=0}^N \left(A_k - \sum_{i=1}^M w_i a_{ki} \right) \cos(k\omega t) + \sum_{k=0}^N \left(B_k - \sum_{i=1}^M w_i b_{ki} \right) \text{sen}(k\omega t) + \sum_{k=N+1}^{\infty} (A_k \cos(k\omega t) + B_k \text{sen}(k\omega t)) \right\}^2 dt \right]^{1/2} \quad (\text{IV.7})$$

Utilizando la propiedad de ortogonalidad de las funciones trigonométricas:

$$\int_0^T \text{sen}(k\omega t) \text{sen}(i\omega t) dt = \int_0^T \cos(k\omega t) \cos(i\omega t) dt = 0 \quad \forall i \neq j$$

$$\int_0^T \text{sen}(k\omega t) \cos(i\omega t) dt = 0 \quad \forall i, j \quad \text{y} \quad \int_0^T \text{sen}^2(k\omega t) dt = \int_0^T \cos^2(k\omega t) dt = \frac{T}{2} \quad (\text{IV.8})$$

La expresión (IV.7) queda como un criterio de optimización solo dependiente del vector de pesos \mathbf{w} .

$$J(\mathbf{w}) = \left[\frac{1}{2} \left[\sum_{k=0}^N \left(A_k - \sum_{i=1}^M w_i a_{ki} \right)^2 + \sum_{k=0}^N \left(B_k - \sum_{i=1}^M w_i b_{ki} \right)^2 + \sum_{k=N+1}^{\infty} (A_k^2 + B_k^2) \right] \right]^{1/2} \quad (\text{IV.9})$$

Omitiendo los términos constantes, la operación de la raíz cuadrada y desarrollando los cuadrados del interior, se obtiene:

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \left(\sum_{i=1}^M w_i a_{ki} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N \left(\sum_{i=1}^M w_i b_{ki} \right)^2 - \sum_{k=0}^N \left(A_k \sum_{i=1}^M w_i a_{ki} \right) - \sum_{k=0}^N \left(B_k \sum_{i=1}^M w_i b_{ki} \right) \quad (\text{IV.10})$$

Definiendo $\mathbf{a}_k = [a_{ki}]_{1 \times M}$ y $\mathbf{b}_k = [b_{ki}]_{1 \times M}$, vectores fila con los componentes del armónico de orden k para todas las cargas individuales, la expresión (IV.10) se puede expresar como la forma cuadrática:

$$Q(\mathbf{w}) = J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \left[\sum_{k=0}^N (\mathbf{a}_k^T \mathbf{a}_k + \mathbf{b}_k^T \mathbf{b}_k) \right] \mathbf{w} - \sum_{k=0}^N (A_k \mathbf{a}_k + B_k \mathbf{b}_k) \mathbf{w} \quad (\text{IV.11})$$

Por lo tanto, el problema de minimización original, entre la forma de onda de la corriente total absorbida y la combinación lineal de formas de onda de corrientes de cargas individuales, se ha transformado en la resolución del problema de minimización de la forma cuadrática (IV.11) junto con las restricciones de que $w_i \geq 0$ para todo i .

En general, sólo se puede esperar de un algoritmo de optimización la obtención de un mínimo local, con lo que no se puede afirmar que el resultado obtenido sea único, dependiendo éste del punto inicial escogido [Schittkowski, 01]. Para que la solución obtenida sea única, se debe verificar que la función objetivo, $Q(\mathbf{w})$, sea convexa, y que, en el caso de que la función sea diferenciable, es equivalente a que el Hessiano sea semidefinido positivo, o lo que es lo mismo, que $\mathbf{w}^T \mathbf{H} \mathbf{w}$ sea mayor o igual a cero para todo \mathbf{w} .

En nuestro caso el Hessiano es:

$$H = \left[\sum_{k=0}^N (\mathbf{a}_k^T \mathbf{a}_k + \mathbf{b}_k^T \mathbf{b}_k) \right] \quad (\text{IV.12})$$

Por lo tanto, el mínimo obtenido será único cuando se verifique la siguiente condición:

$$w^T \left[\sum_{k=0}^N (a_k^T a_k + b_k^T b_k) \right] w \geq 0 \quad \forall w \in \mathfrak{R}^M \quad (\text{IV.13})$$

Si se observa que este término se ha obtenido a partir de los dos primeros sumatorios de (IV.10), y que estos términos son la suma de números reales elevados al cuadrado, se concluye pues, que la forma cuadrática del Hessiano es definida positiva y por lo tanto el mínimo será global y la solución única.

Por lo tanto, el problema de programación cuadrática a resolver se puede expresar como:

Minimizar:

$$Q(w) = \frac{1}{2} w^T H w - \sum_{k=0}^N (A_k a_k + B_k b_k) w \quad (\text{IV.14})$$

Restricciones:

$$w_i \geq 0 \text{ para todo } i = \{1, M\}$$

Este es un problema típico de optimización, y métodos para su resolución se pueden consultar en la bibliografía, como por ejemplo en **[Pike]**, aunque lo normal es utilizar rutinas que implementan los distintos métodos de resolución como si fuesen cajas negras en los que no se sabe muy bien cual es el algoritmo implementado. En nuestro caso, la rutina que resuelve el problema de optimización ha sido realizada por el profesor Schittkowski, e implementa el algoritmo propuesto por Goldfarb e Idnani con modificaciones de este propuestas por Powell. La rutina original se puede consultar en **[Schittkowski, 87]**.

Entre las ventajas de este sistema está la posibilidad de identificar cargas cuya variación de estado sea continua, siempre que se disponga de la variación del comportamiento conforme va cambiando de estado. También presenta la ventaja de poder identificar correctamente las cargas cuando éstas son de pequeña potencia, siempre que el modelo de estas cargas sea suficientemente bueno. Y por último, es posible utilizarlo cuando el nivel de agregación del sistema a identificar aumenta, a pesar de que pierde sensibilidad por dos fenómenos distintos: la atenuación de la distorsión de la tensión y la atenuación de los

armónicos de corriente de las cargas cuando éstas son agregadas. Fenómenos interrelacionados que se explicarán a continuación.

La atenuación de la distorsión de la tensión se debe a la cancelación de los armónicos de corriente que se produce cuando se agregan formas de onda con desfases entre armónicos del mismo orden. Esto da lugar a que, conforme se incrementa el nivel de agregación de cargas, la corriente total absorbida tenga una distorsión armónica menor, dando lugar a caídas de tensión senoidales. Con lo que se atenúan los armónicos de tensión en el punto de medida, aguas arriba de donde la carga está conectada al sistema de distribución, respecto a los que las cargas que están siendo alimentadas tienen. Por lo tanto, la deformación de la onda de tensión siempre será mayor en el punto de conexión de la carga que en el punto donde se realice la medida de esta. A su vez, se cometerán errores de predicción de la corriente absorbida cuando se utilicen las tensiones medidas con los modelos de las cargas.

La atenuación de los armónicos de corriente se produce siempre que se agregan cargas, incluso aunque por fabricación éstas sean iguales, ya que su comportamiento eléctrico no lo es. Este fenómeno se debe a las tolerancias de fabricación con que se fabrican las cargas. Por lo tanto, incluso estando un conjunto de cargas idénticas alimentándose desde el mismo punto de la red de distribución se producirá el fenómeno de cancelación de armónicos. Esta atenuación por dispersión se producirá con mayor intensidad en el caso de que las cargas sean distintas, puesto que entonces la probabilidad de que los desfases de sus armónicos de corriente sean distintos es mayor, y asimismo su cancelación.

Por último, comentar que, a pesar de que el análisis está hecho para un ciclo de la fundamental, evidentemente no hay nada que impida que el tiempo utilizado para la identificación, sea mayor que el periodo de la fundamental, permitiendo entonces, que se utilicen intervalos de tiempo múltiplos de algún subarmónico si así interesara.

IV.3.- Software desarrollado para la identificación

Para el proceso de identificación se ha desarrollado una aplicación específica que dirige, de forma automática, este proceso. Se pensó en realizar una aplicación capaz de poder identificar cargas al nivel del secundario de un centro de transformación y que pudiera identificar una dos o tres fases, según interesara. Por lo tanto, se debían medir la tres tensiones fase-neutro y las tres intensidades de fase.

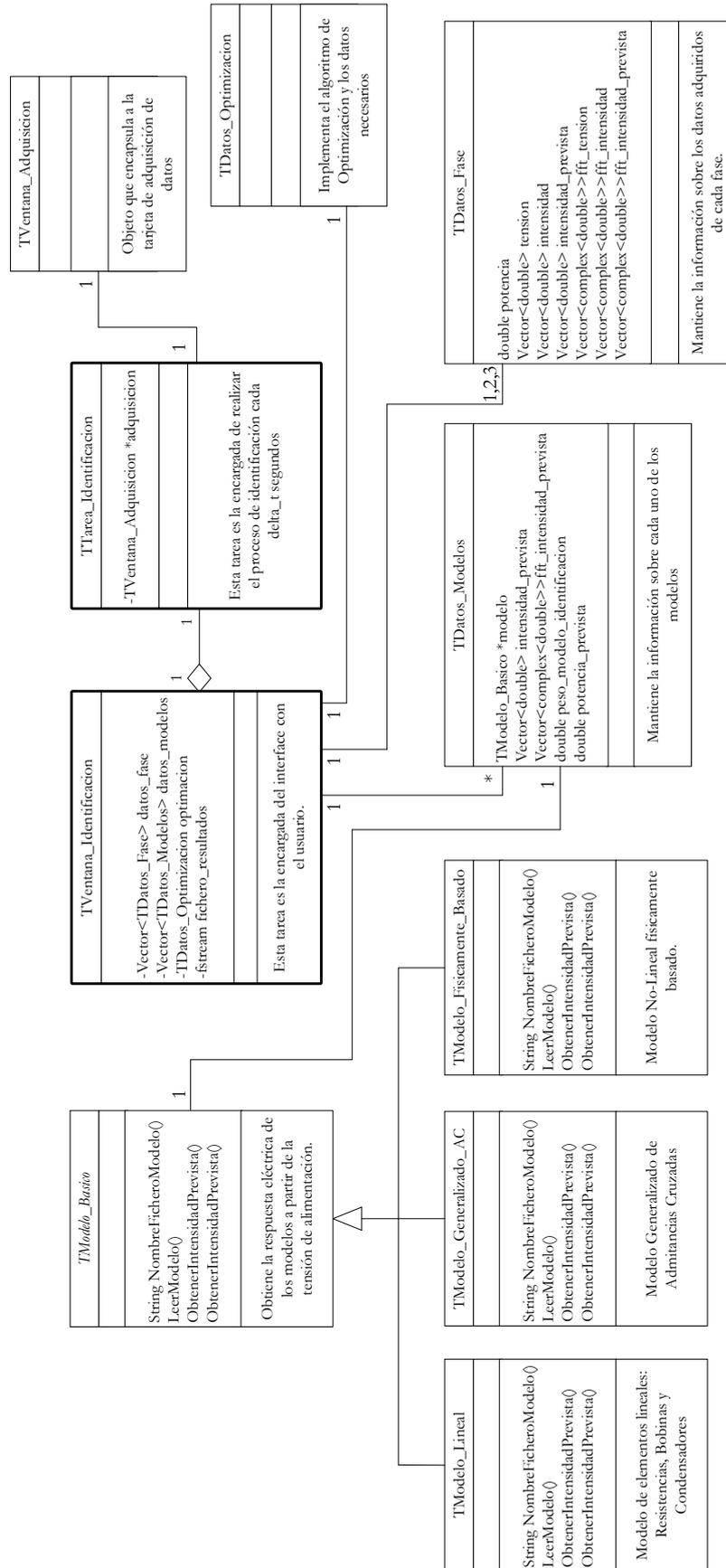


Figura IV.3 Diagrama de Clases de la aplicación Identificación

Como método para la identificación se pensó en la utilización de la forma de onda de la corriente absorbida en un ciclo. Este método no había sido investigado para este tipo de aplicaciones y se desconocía la sensibilidad que podía tener a la hora de la identificación de cargas agregadas, así como la capacidad de identificar cargas de pequeña potencia. La implementación del algoritmo basado en escalones de potencia, ya había sido ampliamente investigado y, a pesar de que no se dispone de datos concretos, se conocían sus puntos fuertes y sus puntos débiles.

Otra decisión que se debía hacer era la elección del modelo de cargas que se utilizaría para la identificación. Es evidente que los modelos candidatos serán aquellos capaces de modelar el comportamiento de las cargas a lo largo de un ciclo completo. Puesto que se iba a utilizar el método de la corriente absorbida en un ciclo, esta decisión nos deja como candidatos a los modelos físicamente basados y a los basados en modelos tipo admitancias cruzadas. Como ambos modelos tienen sus ventajas e inconvenientes, no se limitó el uso del programa a un solo tipo de modelo, sino que se diseñó una arquitectura que diera cabida a distintos tipos de modelos, sean éstos u otros por estudiar. Los lenguajes de programación orientados a objetos tienen un mecanismo para este tipo de aplicaciones: la herencia. Por ello se diseñó una clase abstracta, que definiría el interface deseado para los modelos a integrar en el sistema de identificación y, partiendo de él como generalización, se crearían clases especializadas que modelarían a la carga según el modelo matemático deseado. Con el uso de este mecanismo de herencia no se cierra la posibilidad de utilizar ambos tipos de modelos y se deja la puerta abierta para la implementación de otros tipos, como por ejemplo los modelos basados en redes neuronales, etc.

Por último, se decidió cómo abordar el impacto que podía tener en la sensibilidad de la identificación, los fenómenos ya comentados de atenuación de los armónicos de tensión y de corriente. La solución ideal para el fenómeno de atenuación de la tensión sería el poder definir toda la red de distribución, desde el secundario del centro de transformación hasta sus últimas ramificaciones, y tratar de identificar las cargas que estén conectadas en cada uno de los nodos. Esta solución no es posible, puesto que se trata de un problema cuya implementación algorítmica sería intratable, pues habría que ir probando la corriente absorbida por las combinaciones de todas las cargas situadas en todos los sitios. El tiempo de cálculo sería excesivo, aunque tal vez se pudiera diseñar algún algoritmo heurístico para simplificar este problema. Aun así, obtener los parámetros de toda la red de distribución hace que el sistema no sea práctico de implementar, ni mantener.

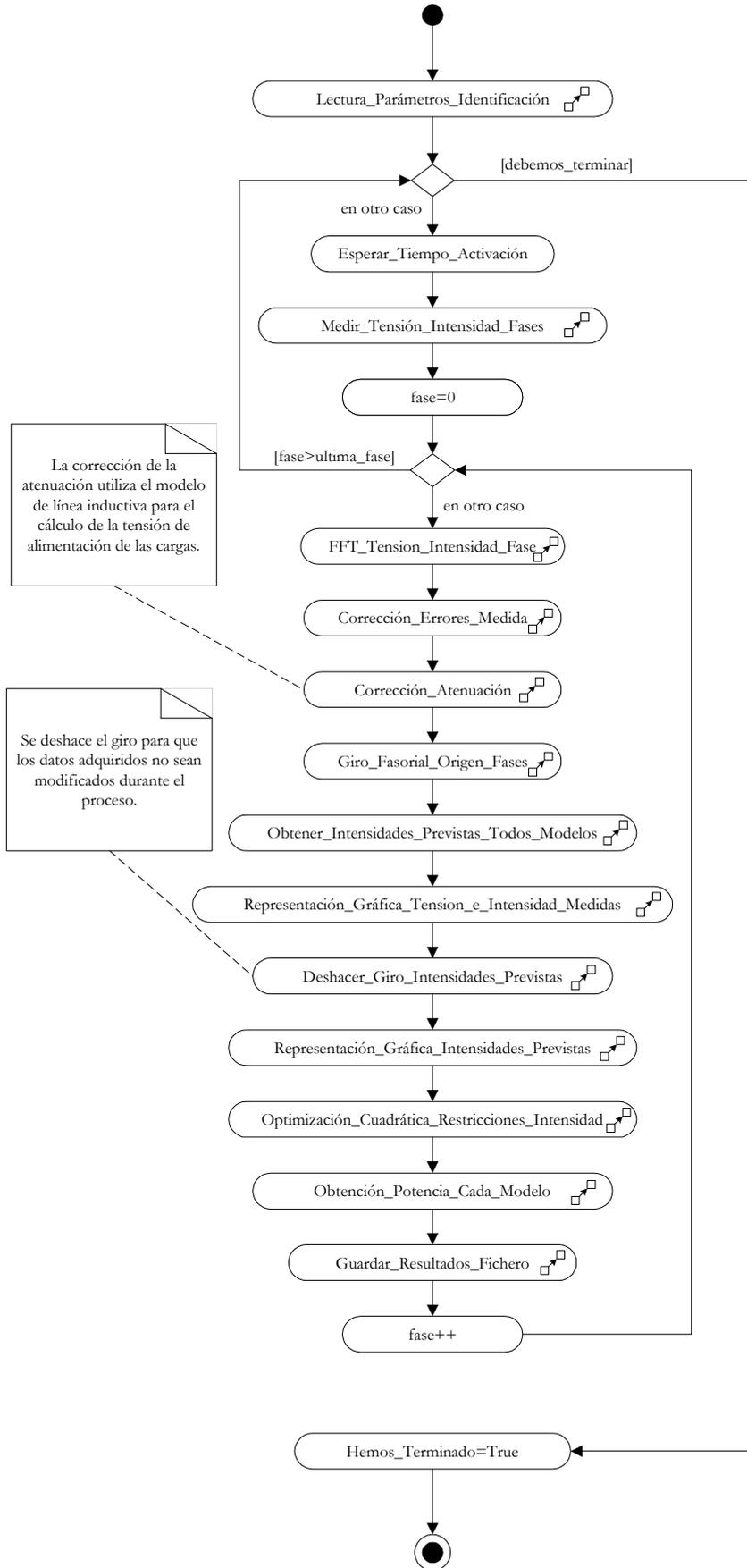


Figura IV.4 Diagrama de Actividad de la Tarea Identificación

La solución adoptada para este problema ha sido la de aproximar la red de distribución radial que alimenta al conjunto de cargas por una impedancia común media. Esta solución modela a la red de distribución radial, con todas sus ramificaciones, por una línea inductiva, estando todas las cargas conectadas al extremo de ésta. Por lo tanto, la tensión a la que están siendo alimentadas las cargas será distinta a la que se está midiendo en el secundario del transformador del centro de transformación, debido a la caída de tensión que se produce en la línea inductiva cuando la atraviesa la corriente total absorbida por las cargas.

La única aproximación posible para el problema de la atenuación de los armónicos de corriente sería la de introducir, como modelos distintos, a las cargas que se prevé que tengan una gran dispersión. Por ejemplo, si se piensa que un conjunto de ordenadores presenta una gran dispersión, se pueden introducir como modelos independientes a varios de estos. A pesar de que no sea una solución ideal es fácilmente implementable y compensa, en parte, este problema.

Finalmente, la aplicación debía ir guardando en un fichero el resultado de la identificación.

Habiendo precisado los requisitos básicos del sistema, la arquitectura diseñada para llevar a cabo esta tarea se puede ver representada en el diagrama de clases de la figura IV.3, donde se puede ver que el programa está estructurado en torno a dos clases activas: `TVentana_Identificacion` y `Ttarea_Identificacion`. Ambas clases colaboran entre ellas y su diseño es similar al utilizado en la aplicación DAQ, donde la clase `Tventana_Identificación` se ocupa de todo el tratamiento de gráficos y procesamiento de los comandos del usuario y, la tarea de identificación, se ocupa de realizar el proceso de identificación con una prioridad superior, para así no ser interrumpida hasta que no termina su trabajo periódico y espera el tiempo para su siguiente activación.

En la figura IV.4, se puede ver el diagrama de actividades de la tarea identificación. Este conjunto de actividades se ejecuta cada intervalo de activación, siendo éste parametrizable.

IV.4.- Ensayos y resultados

En este punto se presentarán los resultados obtenidos en los ensayos de identificación de cargas utilizando los modelos generalizados de admitancias cruzadas y el algoritmo de descomposición de corriente presentado en el apartado anterior.

Como una de las cargas que más interés se tiene en identificar es la debida a los aparatos de aire acondicionado y no se pudieron ensayar en laboratorio (por las intensidades de arranque de éstos) se presentarán las medidas realizadas y se verá cómo, a partir de éstas, se llega a la definición de una señal. Señal, que pretende ser utilizada para obtener, de forma independiente a la descomposición de la corriente, la carga absorbida por un conjunto de aparatos de aire.

Finalmente, se compararan ambas predicciones.

IV.4.1.- Ensayos en laboratorio

Se va a estudiar el comportamiento conjunto del algoritmo de identificación y de los modelos generalizados de admitancias cruzadas tomados para las distintas cargas.

Como tensiones de alimentación se han vuelto a utilizar las tensiones reales tomadas en distintos puntos de la red de distribución de la Región de Murcia, y que ya fueron utilizadas en el apartado de ensayos y resultados del modelo generalizado de admitancias cruzadas, apartado III.4.2.5.-.

Se escogieron seis cargas, de las veinte que se habían modelado, con el criterio de que hubiera una de cada grupo representativo y que al mismo tiempo cubriera el comportamiento eléctrico de las posibles cargas en un consumo residencial o comercial. Las cargas seleccionadas fueron: Calefacción, Ordenador Compaq_Deskpro, TV, Lámpara de Vapor Sodio, Balasto Electrónico Pritec, Balasto Magnético.

Puesto que, a priori, no se sabía que propiedades se debían evaluar en el algoritmo, se escogieron aleatoriamente, de entre las seis, cuales serían las alimentadas en cada una de las tensiones del ensayo.

La tabla IV.1 muestra el estado de conexión/desconexión, después del ensayo aleatorio, para cada una de las seis cargas y cada una de las tensiones de ensayo.

Tabla IV.1 Estado de conexión/desconexión de las cargas para cada uno de los ensayos

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético
TR01	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada
TR02	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada
TR03	Conectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Desconectada
TR04	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Conectada
TR05	Conectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada
TR06	Conectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Conectada
TR07	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada
TR08	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Desconectada	Conectada
TR09	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada
TR10	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Desconectada
TR11	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada	Conectada
TR12	Conectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada
TR13	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada
TR14	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada	Conectada
TR15	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada

A pesar de haber seleccionado solo seis cargas, se decidió realizar la identificación en las dos situaciones siguientes: 1) Donde se incluyen todos los modelos y 2) Donde solo se incluyen los modelos de las cargas conectadas.

Con la elección de estos dos escenarios se pretende estudiar, tanto el comportamiento del algoritmo cuando trabaja con más modelos que cargas –su aplicación normal–, como la idoneidad de los modelos de cargas, haciendo trabajar al algoritmo con los mismos modelos de las cargas conectadas.

En la figura IV.5 se puede ver una de las hojas de resultados donde se anotaron los valores devueltos por el algoritmo de identificación.

La conclusión más importante del ensayo, en el que se utilizaban todos los modelos de cargas disponibles para que el algoritmo seleccione de entre éstos los que mejor ajustan la intensidad total absorbida, es que, es prácticamente imposible identificar cargas de forma individualizada si su comportamiento eléctrico es semejante. Por poner un ejemplo, si se observan los resultados del ensayo TR01, figura IV.5, se ve que la Calefacción_Placa ha sido identificada como Motor_Ventilador_54. Esto es así, porque ambas tienen un comportamiento resistivo puro y no es posible, a partir de la medida de la forma de onda de la corriente absorbida, discernir entre ambas. Resultado análogo se obtiene con la lámpara de descarga de Vapor de Mercurio y la de Vapor de Sodio de Alta, resultado lógico puesto que ambas son lámparas de descarga y su principio físico es idéntico. A favor, en cambio, está la plena identificación del TV JVC y la casi perfecta identificación del Balasto Magnético.

TR01

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético
TR01	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Peso
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	76.6908	0.840537
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	5.96205	0.544668
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	27.0077	0.163643
Bomb_Sodio_Alta	17.5387	0.208421
Bomb_Vapor_Mercurio	167.365	1.851
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	125.825	0.113993
Motor_Ventilador_54	250.422	5.77328
Ord_Compaq_Deskpro	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	12.4546	0.151437
Ord_Compaq_Prolinea	12.3412	0.454577
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	83.7487	1.09089

Observaciones: El balasto magnético y el televisor han sido detectados bien. Hay restos de otros elementos y la lámpara de vapor de sodio de alta no ha sido detectada, siendo sustituida por la de vapor de mercurio (no es de extrañar puesto que el principio físico es el mismo). La calefaccion_placa no ha sido identificada como tal, sino que ha sido identificada como motor_ventilador (ambas son resistivos puros).

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	100.841	1.10264
Bomb_Sodio_Alta	92.7809	1.10099
Calefaccion_Placa	486.111	0.946016
Televisor_JVC	101.439	1.33141

Observaciones: Se ve que ha identificado correctamente a todos los componentes conectados y en cuanto a las proporciones se ve que hay una menor potencia asignada a la placa y que ésta se ha repartido entre los demás modelos.

El proceso de identificación se ha realizado en más de un ciclo y los resultados obtenidos son representativos puesto que oscilan sobre esos valores.

Figura IV.5 Hoja de resultados del ensayo de identificación de cargas en laboratorio

La utilización de un algoritmo heurístico para mejorar los resultados obtenidos es difícil, aunque no imposible. Por ejemplo, se podría ir realizando un proceso de identificación iterativo en el que sucesivamente se vayan quitando cargas cuyo peso esté cercano a cero hasta que los pesos estén dentro de un intervalo dado. Este algoritmo propuesto fallaría al identificar la lámpara de Vapor de Sodio, puesto que tiene un peso muy bajo y probablemente sería filtrado en las etapas iniciales. Se ve entonces, que no es inmediato el desarrollo de un algoritmo basado en la heurística.

Teniendo en cuenta que nuestro mayor interés es la identificación de la carga total consumida por los aparatos de aire acondicionado, la identificación de cargas cuyas características eléctricas sean similares, no es un gran inconveniente para nuestros objetivos.

Por lo tanto, para nuestros objetivos, es admisible agrupar a las cargas según su comportamiento eléctrico, pudiendo clasificarse por su uso final en: Iluminación, Resistivas, Electrónicas y Aire Acondicionado. De este algoritmo de identificación se puede decir que, con los modelos generalizados de admitancias cruzadas y en los ensayos de laboratorio, puede clasificar entre Resistivas, Electrónicas e Iluminación con fiabilidad.

La separación del comportamiento de las cargas de Aire Acondicionado no se ha podido estudiar en laboratorio por no disponer de este tipo de cargas, aparte del problema de disparo de las protecciones cuando se conecta una carga con un gran pico de corrientes (caso del motor monofásico). En el siguiente apartado, se presentan los resultados obtenidos tras medir varios de éstos equipos en condiciones normales de operación.

En los ensayos, como sustituto del aire acondicionado, se utilizó a un motor monofásico, con arranque por condensador de 1000 Watios. Tras los ensayos se verificó que el comportamiento eléctrico de este motor era similar al de un balasto magnético en su forma de onda. Posteriormente se realizaron medidas de aparatos de aire acondicionado y se comprobó que el comportamiento eléctrico era bastante peculiar, su factor de potencia era prácticamente 1, pero aparecía un subarmónico de frecuencia, entre 1 y 3 Hz, que podía servir como firma para el proceso de identificación. Por lo tanto, a pesar de que el motor monofásico sea el componente eléctrico más importante de los aparatos de aire acondicionado, el hecho de que parte de la carga sea identificada como Motor Monofásico no implica que ésta provenga de un aparato de aire, puesto que las corrientes absorbidas por ambas cargas no son iguales.

En cuanto a los resultados obtenidos, cuando solo se seleccionan como modelos los correspondientes a las cargas conectadas, son muy buenos, puesto que en todos los ensayos las cargas son identificadas con pesos que oscilan entre 0,8 y 1,3. Por ejemplo, si se observa la figura IV.5, se ve que en el caso del ordenador el peso es de 1,33, mientras que en las otras tres cargas el error del peso está dentro $\pm 10\%$. Si se miran en las hojas de resultados del resto de los ensayos los pesos obtenidos en el proceso de identificación, se puede ver que en determinadas ocasiones se confunden los pesos de las cargas electrónicas, debido a

que las formas de onda de la corriente absorbida son semejantes entre sí. Por ejemplo, en el ensayo TR03, ver Anexo B, se observa que las cargas eléctricas del Ord_Compaq_Deskpro, del Televisor_JVC y del Balasto_Elec_Pritec no son correctamente identificadas, asignando unos pesos de 1.52, 0.03 y 1.19 respectivamente. En este caso, no se ha podido resolver entre las tres cargas a pesar de que la potencia agregada sí que se corresponde con la consumida por todos ellos.

Estos resultados junto con sus conclusiones, son análogos a los obtenidos en el resto del conjunto de los ensayos realizados en laboratorio. Todas las hojas de resultados se presentan en el Anexo B. Estos y otros ensayos nos llevaron a las siguientes conclusiones:

- Los balastos magnéticos son perfectamente identificados. Las lámparas de Vapor de Sodio y Vapor de Mercurio se confunden entre si pero, dado que el principio físico es el mismo y su utilización es la de iluminación, este efecto no es importante. La potencia total correspondiente a la iluminación utilizando lámparas de descarga era identificada.
- Las cargas electrónicas son identificadas a veces correctamente y otras como combinación lineal de varias de ellas. Esto es probablemente debido a que el modelo generalizado de admitancias cruzadas no sea lo suficientemente exacto para estas aplicaciones. A pesar de ello se puede identificar correctamente la potencia total absorbida por estas cargas. Este hecho es importante porque, a pesar de que el consumo individual de las cargas electrónicas suele ser pequeño en comparación con las resistivas, su gran número puede hacer que el consumo total sea importante. Por ejemplo, en una identificación de cargas de tipo comercial es de esperar que el número de ordenadores y de iluminación con balastos electrónicos, sea importante.
- Las cargas resistivas son siempre identificadas como combinación lineal de éstas. Se mezclará la identificación de las bombillas incandescentes con otras cargas resistivas (calefacción, cocina eléctrica, tostador, etc.). Para la identificación de este tipo de cargas, a un bajo nivel de agregación, es posible que la utilización combinada del modelo de máquinas de estados y de la identificación por la descomposición de la corriente total mejore los resultados; aunque el solapamiento de las potencias típicas de los electrodomésticos hace realmente difícil asignar los escalones de potencia medidos con el

electrodoméstico que los genera. La tabla IV.2 sirve para ver la dificultad de la identificación por escalones de potencias, debido al solapamiento de las potencias de varios de estos electrodomésticos [Roldán, 95].

Tabla IV.2 Potencias aproximadas de aparatos electrodomésticos

Aparatos electrodomésticos	Potencia (Wattios)
Lavavajillas	900 a 2000
Lavadoras	2000 a 3000
Secadoras de ropa	1500 a 3000
Frigoríficos	150 a 300
Congeladores	500 a 1200
Hornos resistencia inferior	2000, según elementos
Hornos resistencia superior	1500, según elementos
Hornos resistencia grill	3000, según elementos
Horno portátil	1500
Cocina Eléctrica	Hasta 6000, según elementos
Placa Eléctrica	1000
Tostador	600 a 1200
Vitrocerámicas	Hasta 8000, según elementos
Microondas	500 a 1500
Placas Radiantes	500 a 2000
Convectores	500 a 2000
Radiadores de cuarzo	500 a 1000
Acumuladores de calor	1000 a 5000
Plancha ligera	50 a 1200
Plancha de vapor	1000 a 2000
Termo Eléctrico	1500 – 2000 - 2500
Freidora	1000 a 2000
Secador de pelo	500 – 1000 - 1500
Televisor	150 a 250
Equipo de música	Variable, 100

Finalmente de los aparatos de aire acondicionado no se puede concluir nada del ensayo realizado en laboratorio al no disponer de cargas para realizar el ensayo. Se necesitan medidas realizadas durante su funcionamiento normal, que se presentarán y comentarán en el apartado siguiente.

Por las conclusiones del ensayo de laboratorio, realizadas a un nivel de agregación bajo, se puede decir que la aplicación directa de este sistema de identificación no permite separar el consumo individual de las cargas, como interesaría para un estudio, pero si que es capaz de clasificarlas agrupadas por su comportamiento eléctrico.

Para la identificación directa de cargas individuales, se debe incluir además, alguna otra información de éstas que permita clasificarlas dentro del grupo al que pertenecen, que parece lógico pensar, deberá ser el escalón de potencia. Por lo que una combinación de este método con el basado en máquinas de estado parece la mejor opción.

IV.4.2.- Medidas de la corriente absorbida por aparatos de aire acondicionado

Se necesitaba medir el comportamiento de los aparatos de aire acondicionado para poder utilizar sus respuestas en la identificación, y por ello se procedió a la medición de cinco de estos aparatos de marcas comerciales distintas. Los aparatos medidos pertenecen a las casas comerciales siguientes:

- Fujitsu
- Mitsubishi
- Toshiba
- Fujitsu-General Limited
- Panasonic

Las potencias frigoríficas eran de 2.200 frigorías/h para todos excepto para el Fujitsu-General Limited, en cuyo caso era de 3.000 frigorías/h.

Los ensayos consistieron en medir, a partir de su arranque y a lo largo de 2 minutos, la tensión y la corriente absorbida por estos equipos. Los equipos estaban previamente conectados durante un intervalo de tiempo de aproximadamente 20 minutos; así la maniobra de arranque simula la conexión del compresor cuando éste está trabajando en condiciones estacionarias. La frecuencia de muestreo fue de 6400 muestras/segundo y los transformadores de tensión e intensidad fueron los mismos que se utilizaron para obtener los modelos en el laboratorio.

La primera comprobación que se realizó fue la de obtener la frecuencia de la onda de tensión. Esto se hizo así puesto que no se sabía si realizar el análisis con una definición integral o frecuencial de la potencia activa y reactiva. Para obtener esta frecuencia, se aplicó la FFT al conjunto total de los datos adquiridos y, como era previsible, se obtuvo un pico centrado sobre los 49.97 Hz, prácticamente 50 Hz. También se comprobó que el espectro de la tensión de alimentación contenía principalmente armónicos de orden 5 y 7, aunque estos eran de amplitudes menores a 4 Voltios.

A continuación, se dibujó en una gráfica la forma de onda de tensión e intensidad para un primer análisis, cuyas ondas pueden verse en la figura IV.6.

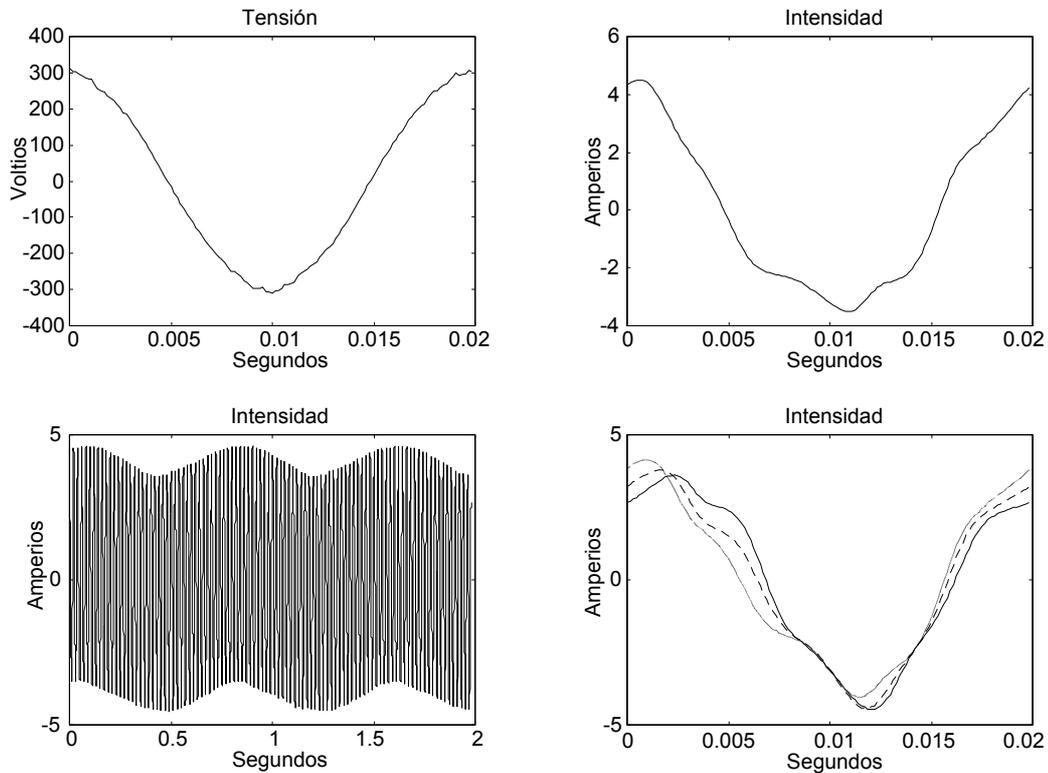


Figura IV.6 Formas de onda de la corriente absorbida por el aire acondicionado Fujitsu

En la figura se puede ver que las ondas de intensidad y de corriente están prácticamente en fase, por lo tanto el factor de potencia debe estar próximo a uno. Este comportamiento, aunque no se esperaba realmente, se corresponde con el observado para el motor monofásico de arranque por condensador, cuyo factor de potencia estaba entorno a 0,98. Creemos que la potencia reactiva absorbida por los aparatos de aire acondicionado, en general, es prácticamente nula, dado que todos los equipos que se midieron daban resultados similares.

En cuanto a la forma de la onda de intensidad de un solo ciclo (gráfica superior derecha) se comprobó que era similar a la del motor monofásico, aunque el contenido armónico del aire acondicionado es mayor. Por ejemplo, en el motor monofásico el armónico de tercer orden, el de mayor magnitud, tiene una amplitud de 0,22 Amperios (para un THD de 3,71%), en comparación al del aire acondicionado, cuyo armónico de quinto orden, el de mayor magnitud, tiene una amplitud de 0,28 Amperios (THD de 17,24%). Este comportamiento se imputa a que el material magnético del motor del aparato del aire acondicionado debe entrar más en saturación, en condiciones normales, que el motor utilizado en el ensayo de laboratorio. En el ensayo del motor monofásico del laboratorio se utilizó como carga mecánica un freno de polvo y se comprobó que la forma

de onda de la corriente absorbida variaba según el par resistente del freno, incrementándose los armónicos de corriente cuando se incrementaba el par de frenado, hecho que se justifica por la no-linealidad del material magnético.

A continuación se representó gráficamente la onda de intensidad absorbida a lo largo de 2 segundos (gráfica inferior izquierda) donde se puede comprobar que la envolvente de los valores máximos de la corriente en cada ciclo, y también la de los mínimos, oscilan con un periodo en torno al segundo. Como se puede observar en la gráfica inferior derecha, además de que varían las amplitudes máximas positivas y negativas, también lo hace la propia forma de onda en cada ciclo, que no se conserva puesto que esta se va deformando periódicamente con un periodo igual al de la envolvente de las amplitudes máximas. Este comportamiento ha sido observado en el resto de los aparatos de aire acondicionado y en dos frigoríficos que también se midieron, siendo la única diferencia importante entre ambos equipos que el factor de potencia disminuía ligeramente en los frigoríficos, tomando valores respectivamente de 0,96 y 0,89. La justificación de la envolvente de los máximos y mínimos se atribuye a los compresores, cuyo ciclo de trabajo debe coincidir con el periodo de la envolvente.

Por lo tanto, al no conservarse la forma de onda para todos los ciclos, la aplicación directa de la identificación por medio de la forma de onda es difícil. Entre las posibles soluciones a este problema están las siguientes:

1. Representar al aparato de aire acondicionado por medio de varios modelos que simulen el comportamiento a lo largo del periodo de la envolvente.
2. Obtener el modelo para un ciclo igual a todo el periodo de la envolvente.
3. Aproximarlo por el modelo del motor monofásico ya obtenido.
4. Utilizar la envolvente de los máximos como huella o firma para la identificación.
5. Utilizar magnitudes derivadas de las medidas para encontrar otras firmas candidatas. Tal vez las formas de onda de la activa y la reactiva a lo largo del periodo de la envolvente pudieran ser de utilidad.

La opción 1 es difícil de realizar utilizando el modelo generalizado de admitancias cruzadas, puesto que una de sus premisas es que la carga esté en estado estacionario, y, en

este caso, el estacionario del aire acondicionado tiene un periodo igual al periodo de la envolvente. El modelo físicamente basado podría servir para modelar, de forma aproximada, los distintos estadios del periodo de la envolvente.

La opción 2 no tiene interés práctico, puesto que cuando se realiza la medida de la corriente absorbida por un conjunto de aparatos de aire no se puede determinar en que momento del ciclo de la envolvente se encuentra cada uno de ellos, y por lo tanto no se puede tomar una referencia común para agregarlos.

La opción 3 podría ser la solución mas adecuada, principalmente debido a que se pensaba que aproximaría mejor la forma de onda media del aire acondicionado, y más si se tiene en cuenta que se buscaba la identificación en un nivel más alto de agregación que una única vivienda. Es razonable pensar que cuando varias cargas se agreguen, se producirá la atenuación armónica de la corriente, debido a la desfases introducidos por los distintos contenidos armónicos de los equipos, y en media estas se podrían aproximar por el comportamiento del motor.

Las opciones 4 y 5 se tratarán con mayor amplitud en los siguientes apartados.

Para la identificación de los equipos de aire acondicionado, también se podía utilizar su intensidad de arranque como una buena fuente de información para conocer exactamente cuando se conectan. Como en los ensayos realizados se medía el instante en que se conectaban, se pudo medir que la relación entre el valor de la intensidad máxima en el momento del arranque y el valor medio de la amplitud de la corriente absorbida en estado estacionario oscilaba entre los 3,75 y los 10,71. Esta huella, o firma, podría ser utilizada para detectar la conexión del equipo, y puesto que puede tomar valores de hasta 30 Amperios o más, teóricamente se podría observar en el secundario del centro de transformación.

El problema de esta huella, es que no existe una señal equivalente del momento de la desconexión del grupo motor-compresor, puesto que un escalón negativo de unos 5 amperios probablemente sería demasiado pequeño para ser observado. Además, presenta el problema de que si el equipo está permanentemente conectado y absorbiendo su potencia nominal esta señal no sirve puesto que no se presenta nunca.

Tabla IV.3 Distintos parámetros obtenidos en los ensayos a cargas con compresores

	Activa	Factor de Potencia	I _{max} /I _{nominal}	Amplitud Envolvente Max + Min	Frecuencia Envolvente
Fujitsu	576 W	0,99	5,63	1,12 A	1,31 Hz
Mitsubishi	546 W	0,99	6,05	0,93 A	1,31 Hz
Toshiba	477 W	0,99	7,14	0,77 A	1,02 Hz
Fujitsu_GL	1120 W	0,99	3,80	1,67 A	2,78 Hz
Panasonic	594 W	0,99	6,87	1,00 A	1,50 Hz
Frigorifico1	223 W	0,95	11,46	0,30 A	1,07 Hz
Frigorifico2	273 W	0,89	6,72	0,25 A	1,56 Hz

En la tabla IV.3 se pueden ver los distintos valores que se obtuvieron para la corriente de conexión en los ensayos a las distintas cargas, así como otras magnitudes.

IV.4.2.1.- Estudio de la envolvente de las amplitudes máximas y mínimas

La señal más evidente, para su empleo en la identificación de cargas como firma, era la oscilación de la envolvente de las amplitudes máximas y mínimas en cada ciclo. A continuación se desarrollará esta idea.

Se representó gráficamente la envolvente de la amplitudes máximas por ciclo y la envolvente de las amplitudes mínimas por ciclo -de aquí en adelante envolvente de los máximos y mínimos respectivamente-, figura IV.7.

Se observó en todos los casos que el valor máximo de la oscilación de la envolvente de los máximos, coincidía con el valor mínimo en valor absoluto de la oscilación de la envolvente de los mínimos, y viceversa. También se representó la forma de onda obtenida de la operación matemática de sumar algebraicamente las envolventes de los máximos y de los mínimos, gráfica que se puede ver en la figura IV.7.

La observación de éstas gráficas permite ver claramente las oscilaciones de la envolvente de los máximos, la de los mínimos, y la obtenida por medio de la operación algebraica entre ambas. Se procedió al análisis espectral de las tres formas de onda cuyas gráficas también están en la figura IV.7.

La representación gráfica del análisis espectral de las tres señales candidatas permite ver que en los tres casos la frecuencia de la envolvente se conserva, presentándose el pico correspondiente a ésta sobre los 1,31 Hz.

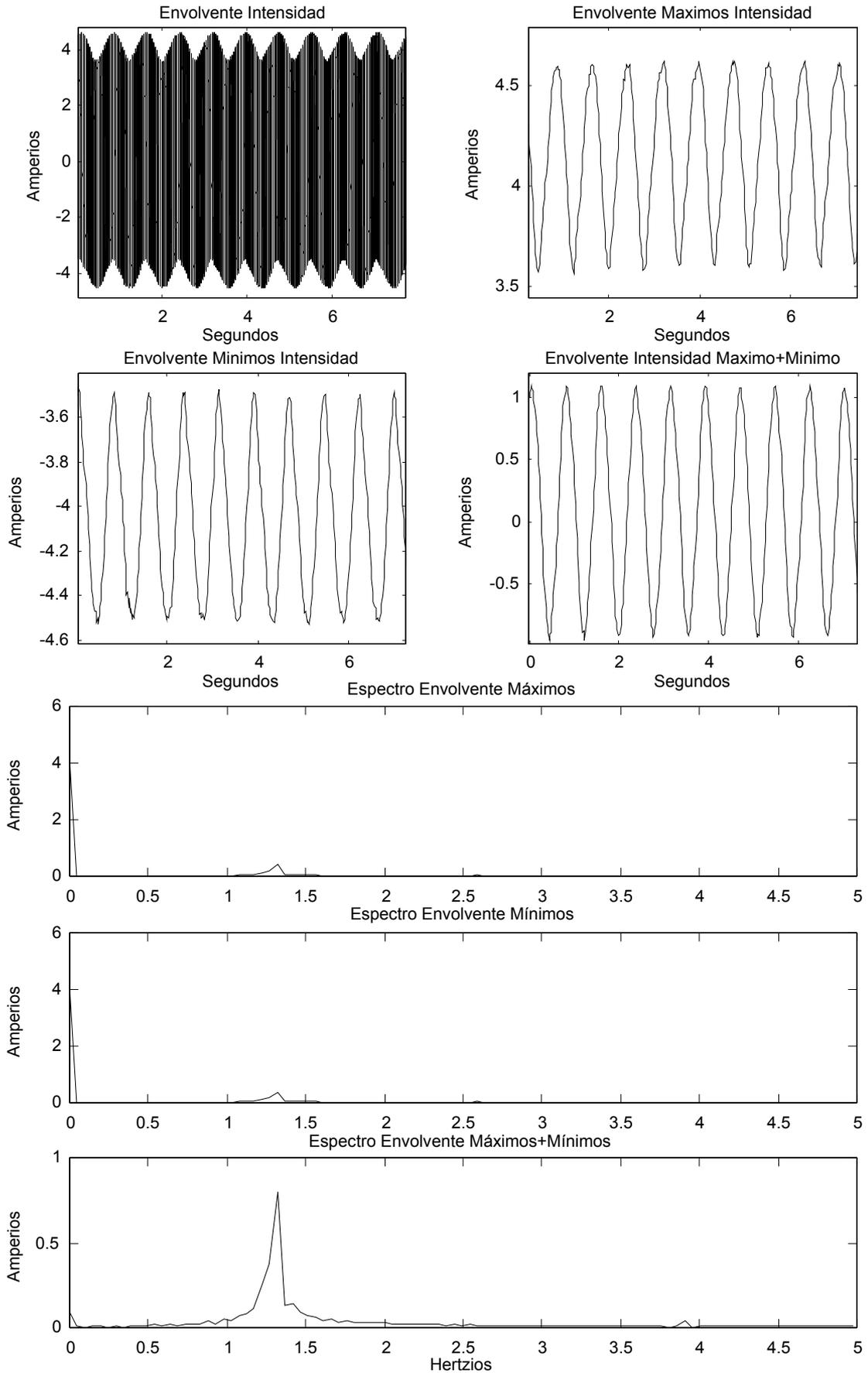


Figura IV.7 Formas de onda de la corriente absorbida por el aire acondicionado Fujitsu

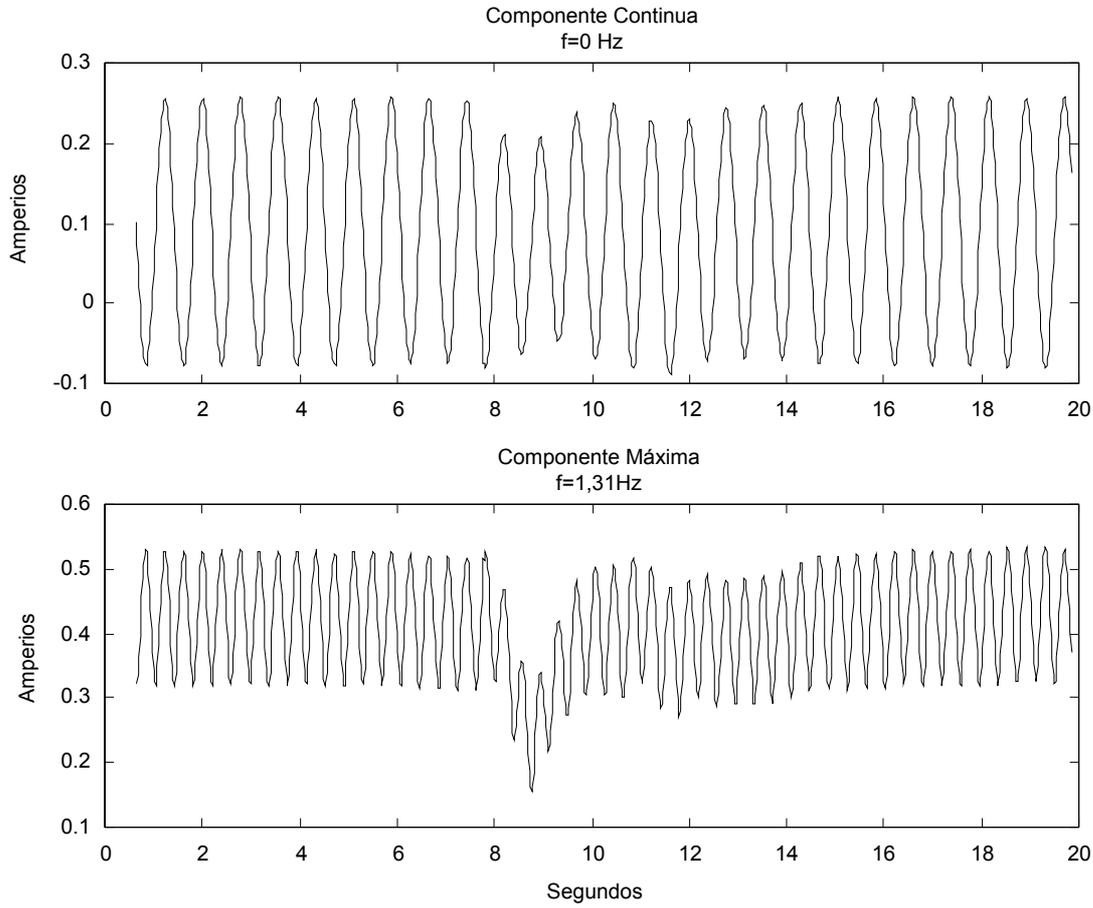


Figura IV.8 Evolución de las amplitudes, en función del tiempo, para las frecuencias máxima y continua, del espectro de la suma de envolventes máximos y mínimos para el equipo Fujitsu

La ventaja de sumar algebraicamente las envolventes, es que la amplitud del pico de la curva resultante se duplica respecto a las amplitudes de las originales. Además, la señal obtenida por la suma de las envolventes de los máximos y mínimos no presenta la componente de continua que si aparece en los otros dos casos. Por lo tanto, se ha cancelado la componente de continua y duplicado la amplitud de la señal por medio de la operación matemática realizada. Claramente, esta señal es candidata a ser utilizada como firma de los aparatos de aire acondicionado presentando la ventaja de que se puede obtener de forma independiente al proceso de descomposición de corrientes implementado.

Se realizó el mismo proceso matemático en las otras cargas ensayadas y se obtuvieron las frecuencias de sus envolventes. Los resultados están reflejados en la tabla IV.3.

En la mencionada tabla se puede ver que ni la amplitud de la envolvente, ni la frecuencia a la que se produce son constantes para todas las cargas ensayadas, aunque se puede observar que a mayor potencia absorbida, mayor amplitud de la envolvente,

conservándose en un rango estrecho la relación entre potencia absorbida y amplitud de la envolvente.

IV.4.2.2.- Estudio de magnitudes derivadas de las medidas

Con el objetivo de ver si las magnitudes derivadas podían ser utilizadas como señales que sirvieran como firmas se analizaron las siguientes:

- Intensidad Eficaz.
- Factor de desplazamiento, $\cos(\phi)$.
- Potencia Activa.
- Potencia Reactiva.
- Factor de potencia, relación P/S.

Todas las magnitudes fueron obtenidas teniendo en cuenta la aportación de los armónicos, calculadas para cada ciclo utilizando una definición integral, mostrándose sus representaciones gráficas en la figura IV.9. En ella, entre otras gráficas, se representa la tensión eficaz a lo largo del tiempo, con el objeto de entender mejor el comportamiento de algunas de las magnitudes.

Como se puede ver, el valor eficaz de la tensión está oscilando con un periodo en torno a unos 15 segundos y justo en medio, se ve un hueco de tensión probablemente provocado por la conexión de una carga de gran potencia, tal vez un ascensor. Este hueco se puede identificar visualmente en el resto de las gráficas de la figura.

La oscilación de la tensión explica la oscilación de la potencia activa y la de la intensidad eficaz.

No se ve que ninguna otra magnitud tenga un comportamiento similar al observado en las envolventes del apartado anterior. Es cierto que estas magnitudes derivadas también oscilan, pero el ruido que presentan es ahora mucho mayor y la amplitud relativa de las oscilaciones con respecto al valor de continua también es menor por lo que no parecen mejorar la firma de la suma de las envolventes. Por ejemplo, el análisis de la potencia instantánea no refleja nada significativo, apreciándose la oscilación ya observada en la intensidad instantánea pero con una amplitud prácticamente despreciable, 1,2 Watios, frente al valor de continua, 564 Watios.

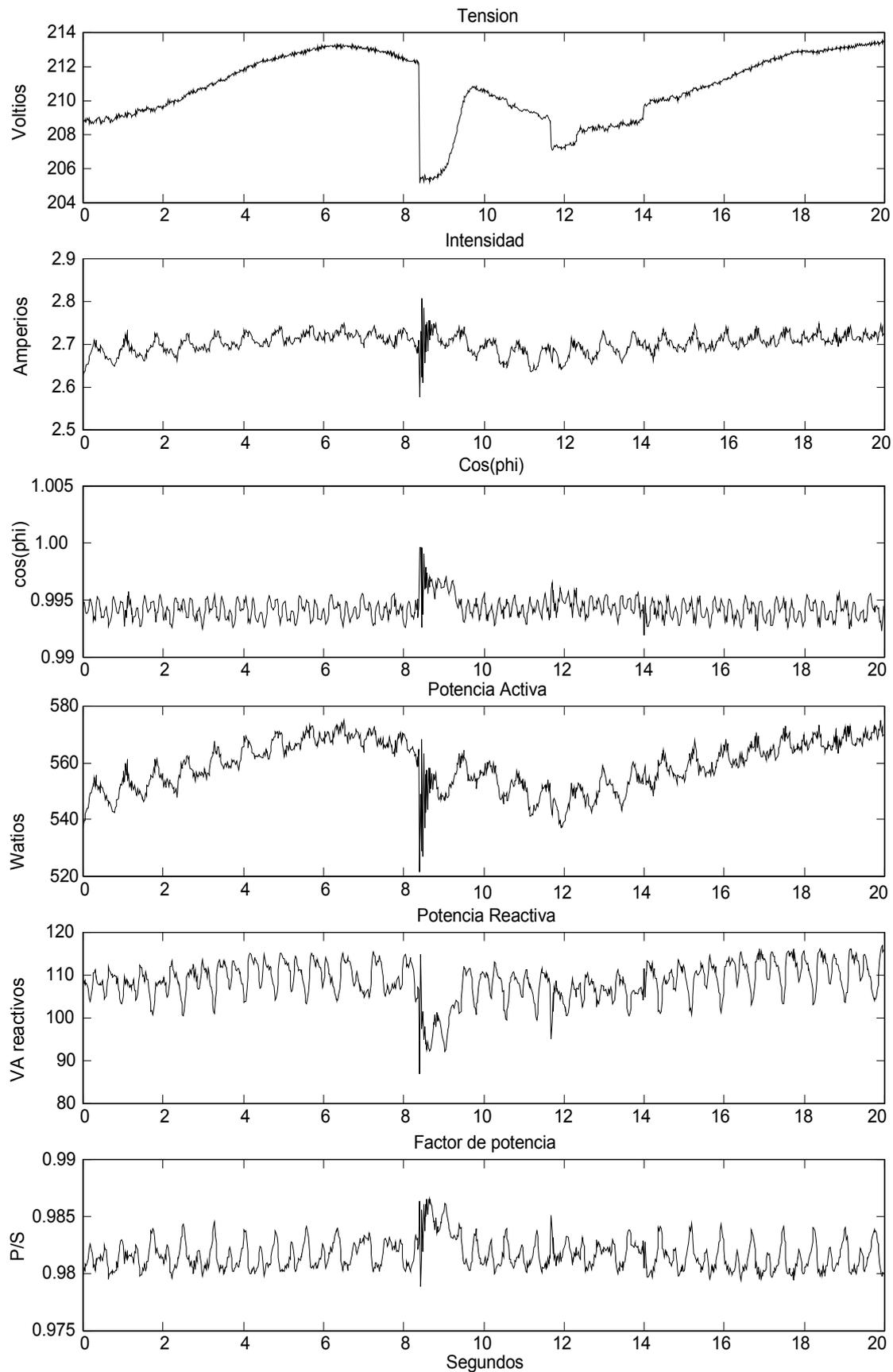


Figura IV.9 Formas de onda de las magnitudes derivadas obtenidas del ensayo del aire acondicionado Fujitsu

Aprovechando la presencia del hueco se procedió a comprobar si la señal correspondiente a la suma de la envolvente de los máximos y de los mínimos era influida por esta caída de tensión. Para ello se analizó espectralmente la señal, con un ancho de ventana de 64 ciclos y un solapamiento entre ventanas de 63, y se dibujaron la amplitud del valor de continua y la amplitud de la frecuencia correspondiente al pico máximo. Los resultados se pueden ver en la figura IV.8, donde se comprueba como la amplitud de la componente donde se produce la oscilación de la envolvente si que se ve afectada por esta caída de la tensión.

Como conclusión, se puede decir que de las estudiadas, la mejor firma para ser utilizada para la identificación de los aparatos de aire acondicionado, es la señal correspondiente a la obtenida por medio del proceso matemático de sumar las formas de onda de la envolvente de los máximos y la envolvente de los mínimos. Esta firma tiene la ventaja de que presenta una amplitud doble a cualquiera de las otras dos por separado, al mismo tiempo que la amplitud de la continua se hace prácticamente cero. Como inconveniente, la amplitud, y sobre todo la frecuencia donde se produce ésta varía entre aparatos de distintos fabricantes.

IV.4.3.- Estudio simulación cargas agregadas

Tras el estudio de la corriente absorbida por los distintos equipos de aire acondicionado, se ha visto que la mejor señal para identificarlos es la obtenida a partir de la Suma de las Envolventes de los Máximos y de los Mínimos de la intensidad medida por ciclo (de ahora en adelante, señal SEMM). Falta por saber si ésta puede servir para la identificación de un grupo de aparatos de aire acondicionado, ya que la señal SEMM varía en amplitud y, sobre todo, en frecuencia. Es decir, se está interesado en saber cómo la señal SEMM se comporta cuando se agregan varios aparatos y si de ésta se puede deducir la carga consumida por estos equipos.

Por las características que presenta esta señal, distinta amplitud y frecuencia para equipos de distintos fabricantes, el comportamiento de la señal agregada puede variar conforme se agreguen equipos cuyas frecuencias coincidan o sean distintas. Si son distintas, y suponiendo que el comportamiento de la señal es aditivo, la señal resultante contendrá las frecuencias de los distintos equipos con sus amplitudes respectivas. Por lo tanto, la obtención del valor eficaz del SEMM permite obtener una magnitud escalar que reflejará la presencia agregada de estos aparatos de aire acondicionado. Si son iguales, difícilmente estarán en fase y por lo tanto se producirá el fenómeno de atenuación de la señal conforme

el nivel de agregación se incrementa. Aún así, el cálculo del valor eficaz del SEMM dará una medida de la presencia de estos aparatos.

En ambos casos es difícil obtener a partir del cálculo del valor eficaz del SEMM, la potencia absorbida por un conjunto de aparatos de aire acondicionado, puesto que sería necesario disponer físicamente de un gran número de ellos. El proceso seguido en el desarrollo de esta tesis se ha basado en la realización de un experimento tipo Montecarlo para la obtención de este parámetro. Con tal fin, se ha diseñado un algoritmo utilizando la herramienta Matlab que, a partir de los datos de tensión y corriente medidos de todos los aparatos de aire acondicionado, realiza una agregación de forma aleatoria para simular el comportamiento de varios de ellos.

Para que el experimento fuera lo más verosímil posible se iban agregando equipos de aire acondicionado de uno en uno, hasta que se alcanzaba la potencia deseada. Como tensión a lo largo de todo el ensayo se escogía, de forma aleatoria, una de las muestras. Cada vez que se agregaba un aparato de aire acondicionado, se escogía también de forma aleatoria tanto el aparato que se estaba agregando como el instante inicial del segmento de datos tomado, desfasando así los equipos idénticos y simulando la atenuación de la señal.

Entre las precauciones que había que tomar para la agregación de muestras tomadas en distintos momentos del día estaba la sincronización de los ciclos de cada una de las intensidades. Puesto que la frecuencia de la red sufre ligeras variaciones con el tiempo, no se pueden agregar segmentos grandes de datos, sino que hay que ir construyendo los datos simulados ciclo por ciclo. Para ello, hay que detectar el paso por cero de la tensión en cada ciclo y tomar a partir de ahí el número adecuado de muestras.

Por lo tanto, se procedió a la realización de este experimento, agregando cargas de aparatos de aire acondicionado hasta que la potencia total coincidía con la potencia objetivo. A esta potencia objetivo se la hizo variar desde los aproximadamente 2 kW hasta los 106 kW (10 A hasta 500 A), con escalones del 5% entre ellas. Puesto que los resultados obtenidos para cada potencia proceden de un experimento aleatorio, no se pueden extraer conclusiones a partir de los resultados obtenidos de uno solo de ellos, debiéndose realizar un número suficiente y obtener su distribución estadística. En concreto, este experimento se realizó 20 veces a fin de obtener los valores medios y sus desviaciones típicas.

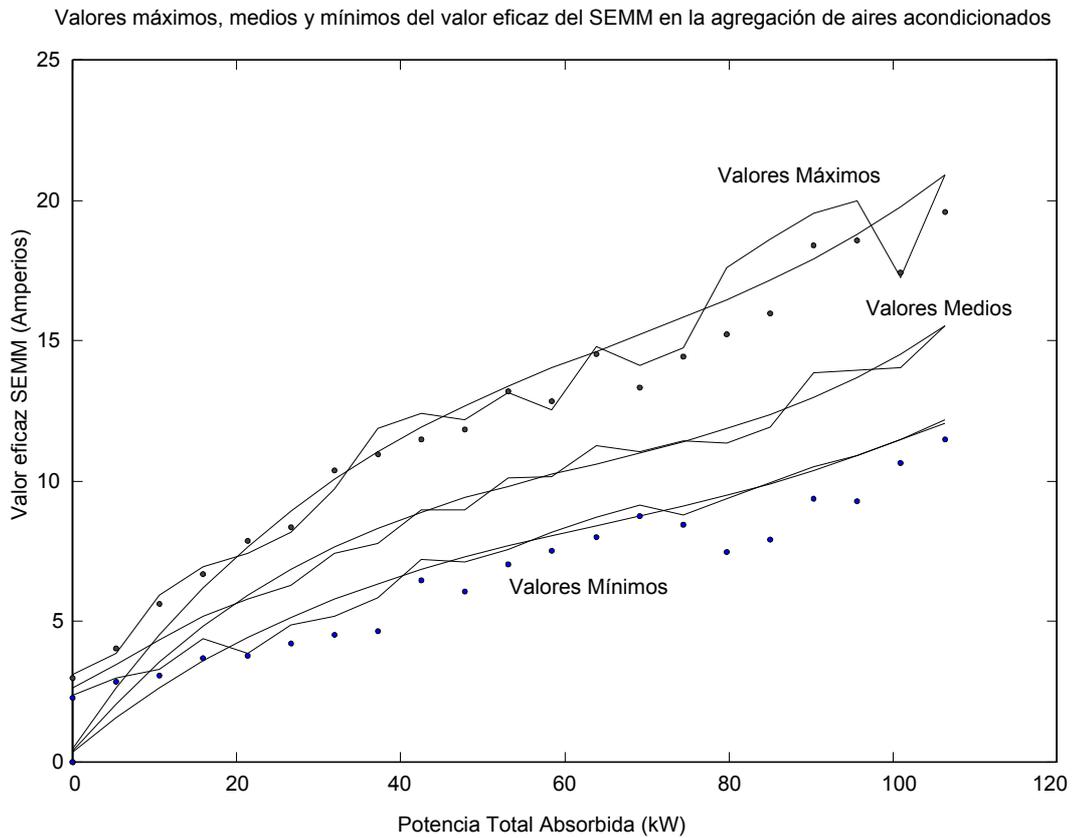


Figura IV.10. Resultados de la simulación del comportamiento agregado de la señal SEMM

Además, para estudiar la influencia que podía tener la agregación de otras cargas en el valor eficaz del SEMM, se iba variando, para cada potencia, la proporción entre el consumo realizado por los aparatos de aire y el realizado por cargas resistivas, de tal forma que la suma siempre coincidía con el total.

Como se puede ver en la figura IV.10, donde se representa la gráfica obtenida para un valor eficaz de 500 A de corriente total simulada, la carga resistiva sí que tenía influencia sobre el valor eficaz del SEMM, puesto que, para los 0 kW de carga eléctrica absorbida por los equipos de aire acondicionado -y por lo tanto 500 Amperios de carga resistiva-, se obtiene un valor eficaz de la señal SEMM superior a 2,5 Amperios, cuando se esperaba que debería ser de cero. La explicación física para este resultado es que, debido a que para simular la carga resistiva se hacía uso de una de las ondas de tensión de los ensayos de los aparatos de aire, multiplicada por una constante adecuada para obtener una carga absorbida de 1kW, la caída de tensión provocada por la onda de corriente del propio aparato deformaba la onda de tensión de tal forma que, al ser agregada una y otra vez para obtener la corriente total, hacía que el valor eficaz del SEMM no fuera nulo. El reconocimiento de este fenómeno es la razón por la que se ajustan las curvas de los valores máximos, medios,

y mínimos del valor eficaz del SEMM obtenidas a partir de los resultados de los 20 ensayos realizados para cada proporción, para que tiendan a cero en el origen de abscisas.

La relación obtenida entre la potencia agregada y el valor eficaz medio del SEMM, figura IV.10, sigue una curva cuya pendiente es siempre creciente. Por lo tanto existe la relación inversa inyectiva, posibilitando la utilización del valor eficaz del SEMM para la identificación de la carga debida a los equipos de aire acondicionado.

El proceso a seguir es el siguiente: realizar una medida durante varios segundos, a partir de esta medida se obtiene el SEMM y su valor eficaz, y apoyándonos en la relación entre potencia y valor eficaz, se obtiene la potencia absorbida por los equipos de aire acondicionado. Este proceso se puede realizar a partir de la corriente total absorbida, o a partir de la diferencia entre la corriente total y la corriente asignada a cada uno de los grupos, resultado de un proceso de descomposición.

Además, también se puede obtener un intervalo de potencias para las cuales el valor medido es factible, es decir, un intervalo estadístico de confianza. Esto se puede hacer a partir de las curvas que ajustan los valores medios más-menos dos veces la desviación típica, curvas representadas en la figura IV.10 por puntos. En vez de éstas, se ha preferido utilizar como curvas límite las obtenidas del ajuste a los valores máximos y mínimos de los ensayos realizados que, como se puede ver, para una potencia dada ofrecen valores mayores, en Amperios, tanto para el límite superior como para el inferior.

IV.4.4.- Ensayos de identificación de cargas agregadas

Para conocer el comportamiento del algoritmo de identificación a un nivel de agregación mayor, se procedió a realizar varios ensayos en el secundario del centro de transformación del Campus Alfonso XIII de la UPCT. Este centro de transformación suministra energía eléctrica a cuatro edificios:

- Aulario General
- Edificio de Minas
- Edificio de Empresariales
- Edificio de Aulas y despachos del Departamento de Dibujo.

Los ensayos fueron realizados durante el mes de Septiembre de 2000. Por lo tanto, todavía había un elevado consumo por parte de los aparatos de aire acondicionado y, al no

haber empezado el periodo lectivo, el consumo tanto del Aulario General como del Edificio de Aulas y despachos del Departamento de Dibujo era menor que el del resto de los edificios.

IV.4.4.1.- Estimación de la composición de carga

Estos edificios están ocupados por despachos de profesores y por laboratorios de los distintos grupos de investigación. Los equipos normales en los despachos suelen ser los siguientes: un aparato de aire acondicionado -bien tipo ventana los más viejos, o bien tipo split los más modernos-, un ordenador y 2 tubos fluorescentes de 40 Watios para iluminación. En los laboratorios los equipos son muy diversos, pero suelen ser equipos de investigación de propósito específico, y por lo tanto únicos, con lo que sus características eléctricas ha sido imposible de medir. Los pasillos utilizan tubos fluorescentes para su iluminación, y en las conserjerías sólo hay aparatos de aire acondicionado e iluminación fluorescente.

La imposibilidad de tener un ambiente totalmente controlado, es decir, saber exactamente el estado de conexión/desconexión de todas las cargas de los cuatro edificios, impide conocer exactamente la composición de la carga en cada instante de tiempo durante los ensayos. Una estimación razonable de ésta es que la mayor parte de la carga es debida al consumo de los despachos (como hemos comentado no se imparte clase en Septiembre) frente al consumo de los laboratorios de investigación, por lo que se espera que la composición esté más próxima a la de los despachos.

En los despachos se estima que los equipos de aire acondicionado, el ordenador y la iluminación están conectados. Esto hace que la potencia sea de 700 Watios por aire acondicionado, 100 Watios por ordenador y 80 Watios por iluminación, a los que se sumarán 320 Watios por despacho para tener en cuenta la iluminación de los pasillos y los laboratorios. Haciendo cálculos, la proporción aproximada sobre el total es la siguiente: un 58% de aire acondicionado, un 33.33% de iluminación y el resto, 8.33%, de ordenadores. Lógicamente ésta sería la composición esperada hacia el mediodía, indudablemente por la tarde y noche esta composición variará, esperándose que por la noche sólo exista consumo de iluminación y ordenadores, puesto que los ordenadores utilizados como servidores de correo, etc., están en el edificio de Minas. También es posible una carga residual, debida a los equipos de investigación que se queden conectados durante la noche, pero su composición y comportamiento eléctrico es desconocido.

IV.4.4.2.- Descripción de los ensayos

Los transformadores de tensión e intensidad, junto con el ordenador que realizaba el proceso de identificación, se instalaron en una caseta en cuyo interior se encuentra el armario de protección y reparto de las líneas que alimentan a los distintos edificios. Hacia este armario va la línea principal, que proviene directamente del centro de transformación, y de este armario salen 5 líneas que alimentan a los 4 edificios y al equipo compensador de reactiva.

Se realizaron los siguientes tipos de ensayos:

- Ensayos de corta duración, pocos ciclos, a una velocidad de muestreo de 25600 muestras/segundo, la máxima posible.
- Ensayos de larga duración, varios días, tomando un ciclo cada cinco minutos, a una velocidad de muestreo de 6400 muestras/segundo.
- Ensayos de varios minutos de duración, midiendo de forma continua tensión e intensidad, a una velocidad de 3200 muestras/segundo.

Si la tarjeta de adquisición lo hubiera permitido, estos últimos ensayos se habrían realizado a una velocidad, como mínimo, de 6400 muestras/segundo para así poder alcanzar hasta el armónico 50 como frecuencia de Nyquist, pero por problemas que el propio fabricante no pudo resolver tras consultar con él, fue imposible adquirir datos de forma continuada durante más de dos minutos en seis canales simultáneamente y a más de 3200 muestras/segundo.

IV.4.4.3.- Resultados de los ensayos de corta duración

Estos ensayos de corta duración se realizaron a la máxima frecuencia de adquisición de datos de la tarjeta disponible, 25600 muestras/segundo, y con ellos se quería estudiar el comportamiento del algoritmo de identificación por descomposición de la corriente cuando utilizaba toda la información almacenada en los modelos generalizados.

Para comprobar que los datos obtenidos de la identificación de los circuitos de alimentación era coherente con lo que se obtenía de la acometida, se procedió a medir ésta y a dos de los circuitos de salida: el edificio de minas (circuito n°1) y el de empresariales, (circuito n°2).

Tabla IV.4 Potencia en función de la carga identificada en un solo ciclo

Grupo	Modelo	Acometida Wattios	Circuito 1 Wattios	Circuito 2 Wattios
	Bobina	0	0	0
	Condensador	0	0	0
4	Aire acondicionado	0	0	371,681
2	Balasto Elec. Cipesa	17,69	4,96	0
2	Balasto Elec. Pritec	66,20	0	0
1	Balasto Magnético 80W	2.284,72	0	3.816,25
2	Bomb. Attralux	34,08	157,36	46,09
2	Bomb. Biax Ge	46,40	0	11,85
2	Bomb. Ecotone 11	0	0	30,04
2	Bomb. Ecotone 14	0	0	4,12
2	Bomb Flash	0	24,50	89,64
3	Bomb. Incandescente	17.727,60	0	0
1	Bomb. Luz Mezcla	337,92	0	669,70
1	Bomb. Sodio Alta	0	639,92	0
1	Bomb. Vapor Mercurio	15.015,80	0	986,18
3	Calefacción Placa	0	0	0
4	Motor Monofásico	0	0	197,50
3	Motor Ventilador 54W	12.263,70	12.516,60	2.078,51
2	Ord. Compaq Deskpro	0	0	9,43
2	Ord. Compaq Prolinea	1085,94	9,91	59,28
2	Ord. Philips	0	20,19	63,25
2	Televisor JVC	2.030,25	0	234,76
3	Resistencia	1.977,70	0	3.302,22
Total Grupos				
1	Iluminacion Magnética	17.637 / 33.3%	639 / 4.78%	5.472 / 45.7%
2	Electronica	3.280 / 6.20%	207 / 1.54%	548 / 4,57%
3	Resistivo	31.969/ 60.4%	12.516 / 93.6%	5.380 / 44,9%
4	Motores	0	0	568 / 4,74 %
	Total	52.886 / 100%	13.362 / 100%	11.968 / 100%

Como se puede ver de los resultados del ensayo que se muestran en la tabla IV.4, la asignación de potencia a cargas cuyos comportamientos eléctricos son semejantes se sigue cumpliendo, al igual que ocurría en los ensayos de laboratorio. Como ejemplo, el Motor Ventilador 54W se comporta eléctricamente, desde el punto de vista de la corriente absorbida, como una resistencia y, si se observan los resultados obtenidos de la identificación resulta que la suma de la parte correspondiente a los circuitos n°1 y n°2 suman más que la parte de la acometida, suceso imposible.

Por tanto, en este nivel de agregación sólo se puede hablar de la identificación de cargas por grupos de comportamiento eléctrico, al igual que ocurría con los ensayos realizados en el laboratorio.

En la primera columna de la tabla IV.4 se asigna un número de grupo a cada carga según su comportamiento eléctrico, para luego ser agregadas al final de la tabla. En ésta se puede observar que la carga identificada como Motores es de 0 Watios en la acometida, y en torno a los 600 Watios en el circuito n°2. El mismo fenómeno de intercambio de modelos que se había observado ya. Lo interesante de este grupo consiste en que los modelos pertenecientes a éste son el motor monofásico y el modelo de aire acondicionado. Este último modelo es obtenido a partir de uno solo de los ciclos de la corriente absorbida por el aire acondicionado Fujitsu. En conjunto, la carga asignada a este grupo es nula. Esto lleva a pensar que, dada la proximidad del comportamiento eléctrico entre la forma de onda del aparato de aire acondicionado y la resistencia -ambas tienen un factor de potencia próximo a 1 y el aire acondicionado pocos armónicos-, por el fenómeno de atenuación de los armónicos de corriente debido a la agregación de cargas, el algoritmo de identificación no es capaz de identificar entre cargas resistivas y cargas de aire acondicionado, sino que en conjunto, ambas son identificadas como resistivas.

En esta situación, la utilización del valor eficaz del SEMM podría servir para separar la carga asignada como resistiva en sus partes contribuyentes. Como procedimiento se propone, por lo tanto, la identificación de la parte de iluminación magnética y la parte electrónica, a continuación restar su contribución del total de la corriente absorbida, y finalmente calcular el valor eficaz del SEMM para, a partir de ahí, obtener la potencia agregada de aparatos de aire acondicionado.

IV.4.4.4.- Resultados de los ensayos de larga duración

En estos ensayos, realizados a lo largo de varios días, se han medido las tres fases de un circuito, variando de circuito en cada ensayo. Con este tipo de ensayos, se pretendía ver si los patrones de comportamiento que se obtenían de la potencia identificada por grupos eran lógicos.

En estos ensayos la velocidad de adquisición de datos era de 6400 muestras/segundo, tomando un ciclo cada cinco minutos durante los días que duraba cada ensayo. Se midieron las tres tensiones fase neutro y las tres intensidades de fase, datos que fueron introducidos en el programa de identificación, guardando en un fichero la potencia asignada a cada uno de los modelos para cada ciclo.

Como se ha concluido en el apartado anterior, el estudio de la potencia asignada a las cargas individuales no da información útil, sino que lo que tiene sentido es el estudio de la carga agrupada. Los grupos que se considerarán aquí serán: el Resistivo, que incluirá todas las cargas resistivas más motores, el grupo de Iluminación, que incluye la iluminación basada en lámparas de descarga, y el grupo Electrónico, que incluye a ordenadores y cargas que rectifican la tensión para su alimentación.

Los resultados obtenidos para una sola de las fases y cinco días completos se muestran en la figura IV.11. En los gráficos de esta figura se puede observar la curva de carga del consumo total de una de las fases. El pico de consumo se acerca, en esta fase, a los 100kW, mientras que en las otras dos fases, no representadas, este valor es superado. La diferencia de altura de los picos se debe al descenso de consumo en los días no laborables. Así, el medio pico del día 3, sábado, se corresponde con una media jornada, mientras que el día 4, domingo, se corresponde con un día festivo. Los consumos ya agrupados después del proceso de identificación también se representan en sus gráficas correspondientes. En cuanto a los porcentajes, éstos oscilan, pero si nos fijamos en los porcentajes a mediodía – 0.5, 1.5, 2.5 días-, se observa que el porcentaje del total de carga electrónica es mínimo. Los valores de estos porcentajes son los siguientes:

Tabla IV.5 Porcentajes de carga, por grupos, al mediodía

Grupo	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Lunes
Iluminación	50%	54%	59%	49%	52%
Resistiva	44%	39%	33%	39%	39%
Electrónica	6%	7%	7%	11%	8%

Es curioso observar cómo se produce en domingo el mayor porcentaje de carga electrónica, es decir, ordenadores. Este fenómeno tiene fácil explicación, teniendo en cuenta que tanto los ordenadores del Servicio de Informática como del SAIT suelen estar conectados continuamente y por lo tanto, porcentualmente, su valor aumenta cuando se produce una disminución del consumo de las cargas de Iluminación y Resistivas, tal como ocurre en domingo. En cuanto a las proporciones de las cargas a mediodía, éstas se mantienen más o menos constantes a lo largo de los distintos días, aunque no coinciden con los valores esperados del 33% para la iluminación, 58% resistiva y 8% electrónica, si bien es cierto que estas estimaciones no se han podido contrastar con la realidad, y éstas están basadas en suposiciones más o menos razonadas.

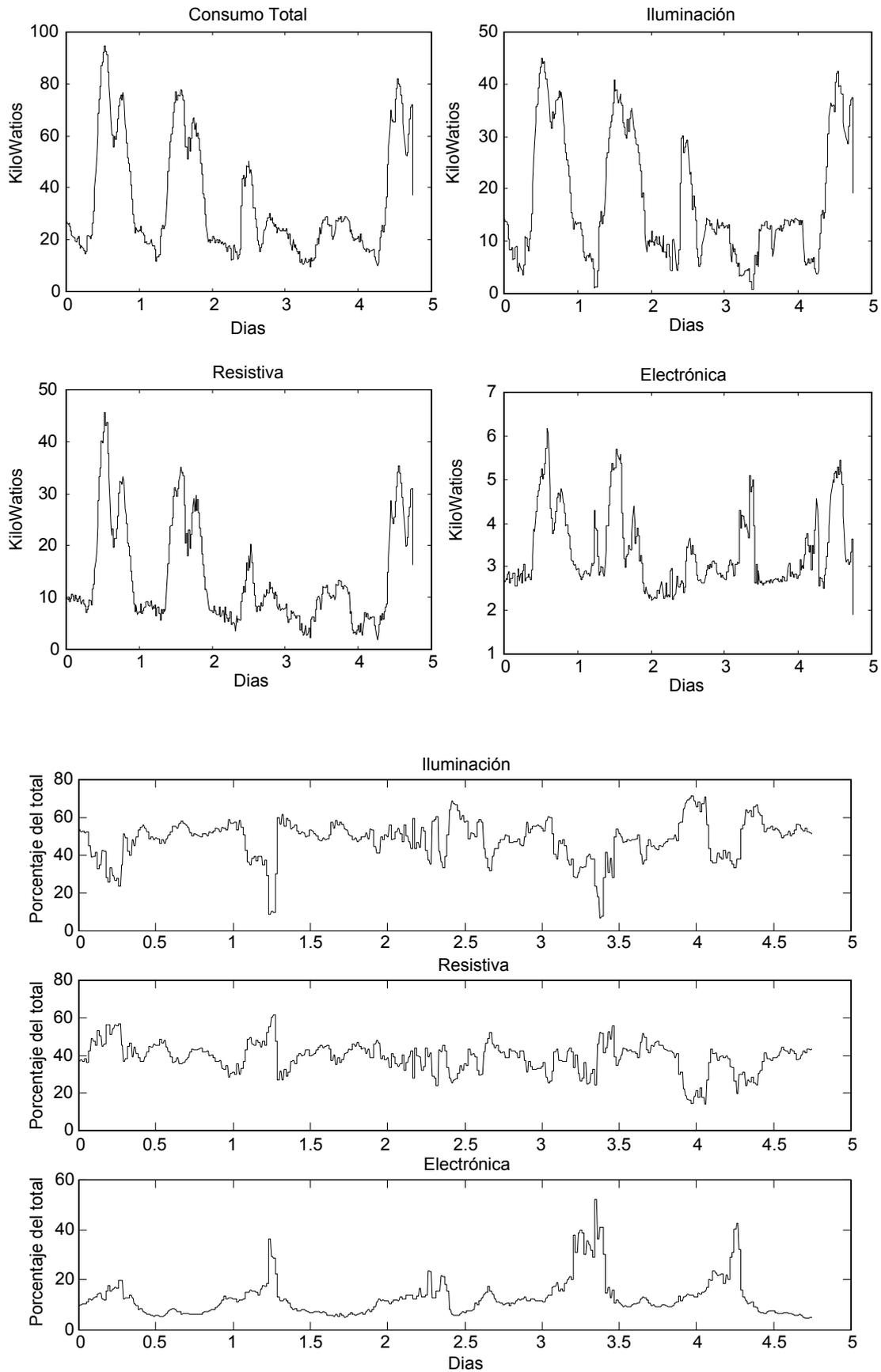


Figura IV.11. Consumos y porcentajes de la identificación de una de las fases de la acometida, agrupadas en Iluminación Resistiva y Electrónica

Un hecho que se desea comentar en profundidad es aquel que se puede observar en la gráfica del porcentaje de carga electrónica de la figura IV.11. En ella se observa cómo diariamente se produce un incremento del porcentaje de este tipo de cargas, incremento que se da durante la noche -los números enteros se corresponden con las 00:00 horas del día-, concretamente el incremento se produce desde un poco antes de las 12 de la noche y termina sobre las 6 de la mañana.

Puesto que este comportamiento parecía extraño, se consultó con el servicio de informática para que nos informaran sobre cuál era el horario que seguían para la realización de las copias de seguridad de los servidores, a lo cual nos respondieron que, según el día, realizaban copias de seguridad de distintos servidores, las cuales se podían prolongar de 1 a 4 horas. El inicio de estas copias se podía producir a las siguientes horas: 22:00, 23:00, 01:00, 02:00, 03:00. A las 06:00 además reiniciaban uno de los servidores. El incremento de consumo de cargas de tipo electrónico debido a esta actividad queda claramente identificado en la gráfica del porcentaje, dando credibilidad a los resultados del modelo.

La gráfica porcentual del grupo de Iluminación también merece ser comentada más a fondo. En ella se observa un descenso de consumo, tanto a nivel absoluto como porcentual, a partir de la 01:00 de la mañana. Este comportamiento tiene su explicación a partir de la consulta realizada al servicio de mantenimiento de la UPCT, el cual confirmó que parte de la iluminación exterior del Campus es desconectada de forma programada para así disminuir el consumo de energía eléctrica. El menor consumo de cargas del grupo de iluminación se da hacia las seis de la mañana, alcanzando mínimos de 1 kW en las noches del viernes y del domingo. Una justificación para este descenso tan importante es la de que al amanecer, en función del nivel de iluminación que haya, es posible la desconexión de toda la iluminación exterior del Campus debido a los fotosensores que dispone el sistema.

IV.4.4.5.- Resultados de los ensayos de varios minutos de duración

Se realizaron estos ensayos para utilizar como método de identificación el valor eficaz de la señal SEMM. Valor que se puede obtener directamente de la corriente total, o a partir de su descomposición en grupos. Además, se podrá estudiar la continuidad ciclo a ciclo de los pesos obtenidos en la descomposición.

Se midieron la tensión fase neutro de una sola de las fases y de la corriente de esa misma fase en varios circuitos simultáneamente. Al tener disponibles 4 transformadores de intensidad con capacidad suficiente para poder medir corrientes de hasta 600 Amperios, se midió la corriente en la acometida y en los tres circuitos con mayor corriente que resultaron ser: circuito nº1, circuito nº3 y circuito nº4. Los datos se tomaron a una velocidad de 3200 muestras/segundo y durante dos minutos completos.

IV.4.4.5.1.- Identificación por descomposición de la corriente

Estos datos fueron utilizados como entrada del algoritmo de identificación, obteniéndose las potencias asignadas a cada uno de los modelos disponibles y para todos los circuitos medidos (véase la figura IV.12). En la gráfica superior izquierda se puede observar la potencia activa consumida por ciclo y a lo largo de varios segundos, que refleja la actividad de conexiones y desconexiones de cargas durante el periodo de medida. Las restantes gráficas de la figura muestran los valores agrupados a lo largo del periodo de observación. Como se puede observar, las variaciones en los valores asignados por grupos presentan una gran fluctuación de ciclo en ciclo, lo que se refleja en que las gráficas de los grupos presentan un gran ruido. Se ha realizado un filtrado de la señal utilizando dos técnicas distintas: Fourier y Wavelets. Los resultados obtenidos con el filtrado por Wavelets dan mejor resolución, a pequeña escala, que los obtenidos por técnicas espectrales. Esto es así porque lógicamente la potencia absorbida por el circuito es discontinua y por lo tanto también las potencias de los grupos. El filtrado por Wavelets es capaz de seguir las discontinuidades con menor pérdida de información que el filtrado espectral, si bien es cierto que para conseguir un resultado aceptable con Wavelets se deben realizar varios intentos con las distintas familias de ondas posibles para ver cuál de ellas da mejor resultado, eligiendo tanto a la onda madre como el grado de descomposición deseado. Tras varios ensayos, se estimó adecuado un nivel de descomposición de grado 5, utilizando como onda madre la biortogonal de orden de reconstrucción 1 y de descomposición 1, resultados que se pueden ver en la misma figura IV.12.

Las potencias identificadas, para cada ciclo, son tan variables debido a que en el proceso de identificación, cuando se obtienen los pesos asignados a cada carga, no existe ninguna condición que fuerce la continuidad ciclo a ciclo de éstos. Esta condición se puede introducir en el algoritmo, pero por las discontinuidades observadas en el consumo total no puede ser muy restrictiva, por lo que no se ha considerado su inclusión.

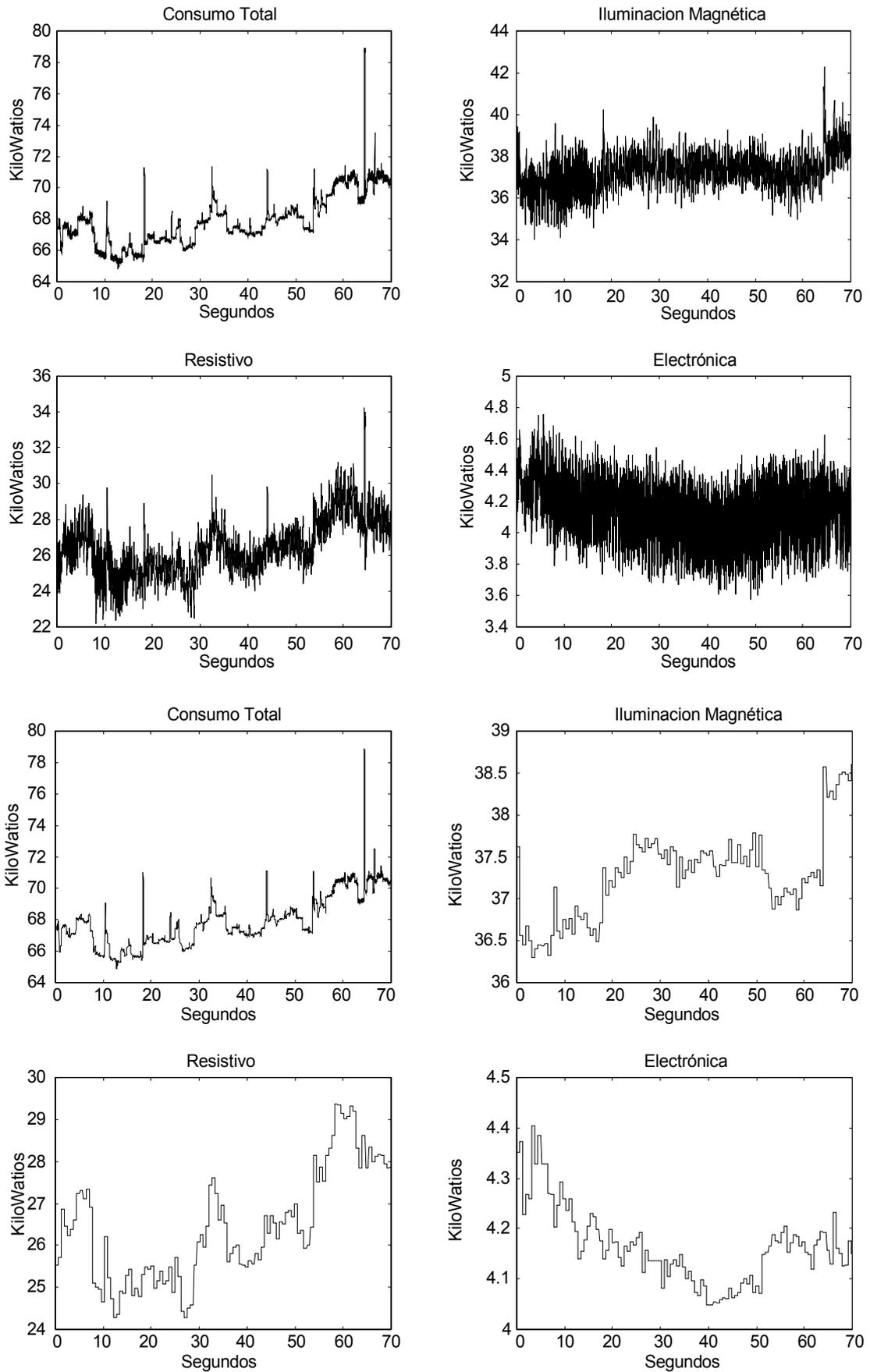


Figura IV.12. Resultados de la identificación, sin filtrar y filtrados por Wavelets, realizada con los datos tomados del circuito de la acometida

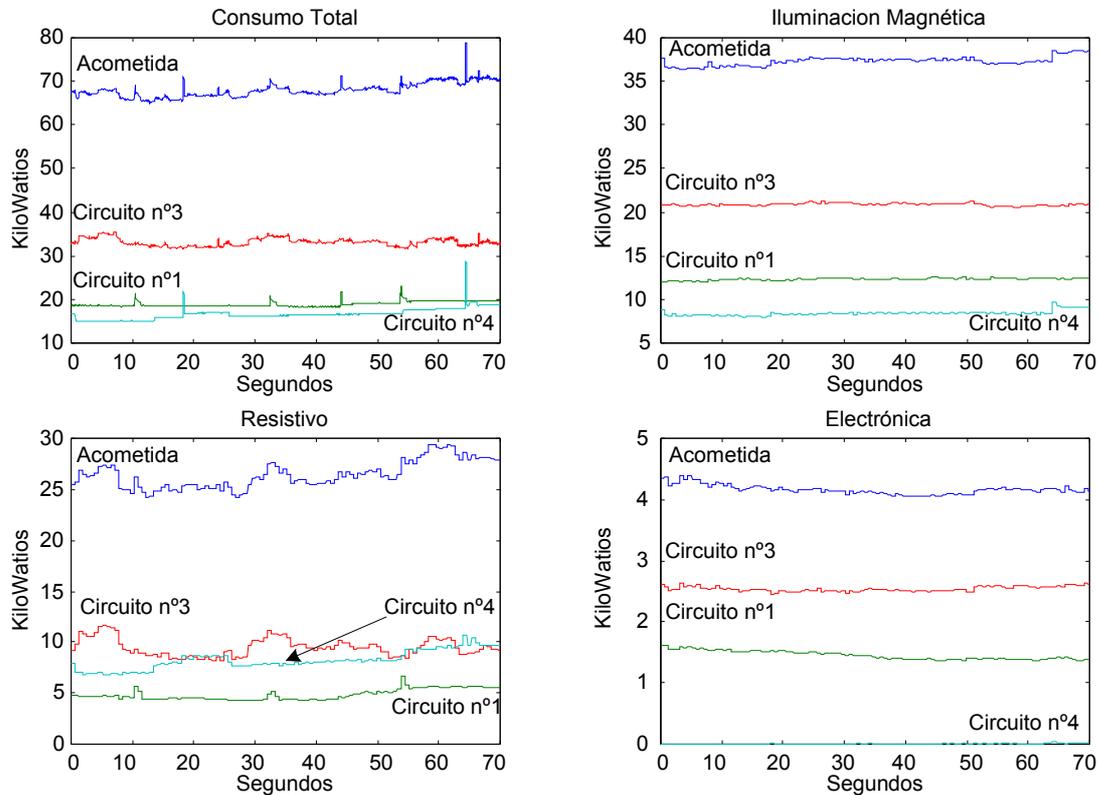


Figura IV.13. Resultados de la descomposición, y la agrupación, para los circuitos medidos

La descomposición para cada uno de los circuitos se muestran en la figura IV.13. Los datos están ya filtrados, se puede ver cómo en el Circuito n°4 la carga Electrónica identificada es prácticamente nula debido a que éste alimenta al Aulario General, y al no tener despachos no debería haber ningún ordenador o carga de tipo electrónico conectada.

La descomposición de corrientes realizada se ajusta bastante bien a la corriente instantánea medida a lo largo de cada ciclo. Si se observa la figura IV.14 se ve que el error porcentual, respecto a la amplitud máxima, está en todo instante por debajo del $\pm 5\%$. En la misma figura se representan las gráficas, para cuatro ciclos, de la corriente total de la acometida y la descomposición en los tres grupos de Iluminación, Resistivo y Electrónico. En las gráficas de los grupos se ve que las formas de onda de los distintos grupos, como era de esperar, tienen distinta composición armónica que la onda de partida. Asimismo, en la figura también se representa la descomposición del grupo Resistivo en sus dos subgrupos constituyentes: el resistivo puro y el de motores, apreciando la discontinuidad de los pesos asignados a estos subgrupos, probablemente debido a la oscilación de los máximos y mínimos que se observó en las medidas de los aparatos de aire acondicionado. También se aprecia el recortamiento de picos en el grupo resistivo, comportamiento debido a los armónicos de orden 3, 5 y 7 en la tensión, siendo el de mayor magnitud el de quinto orden.

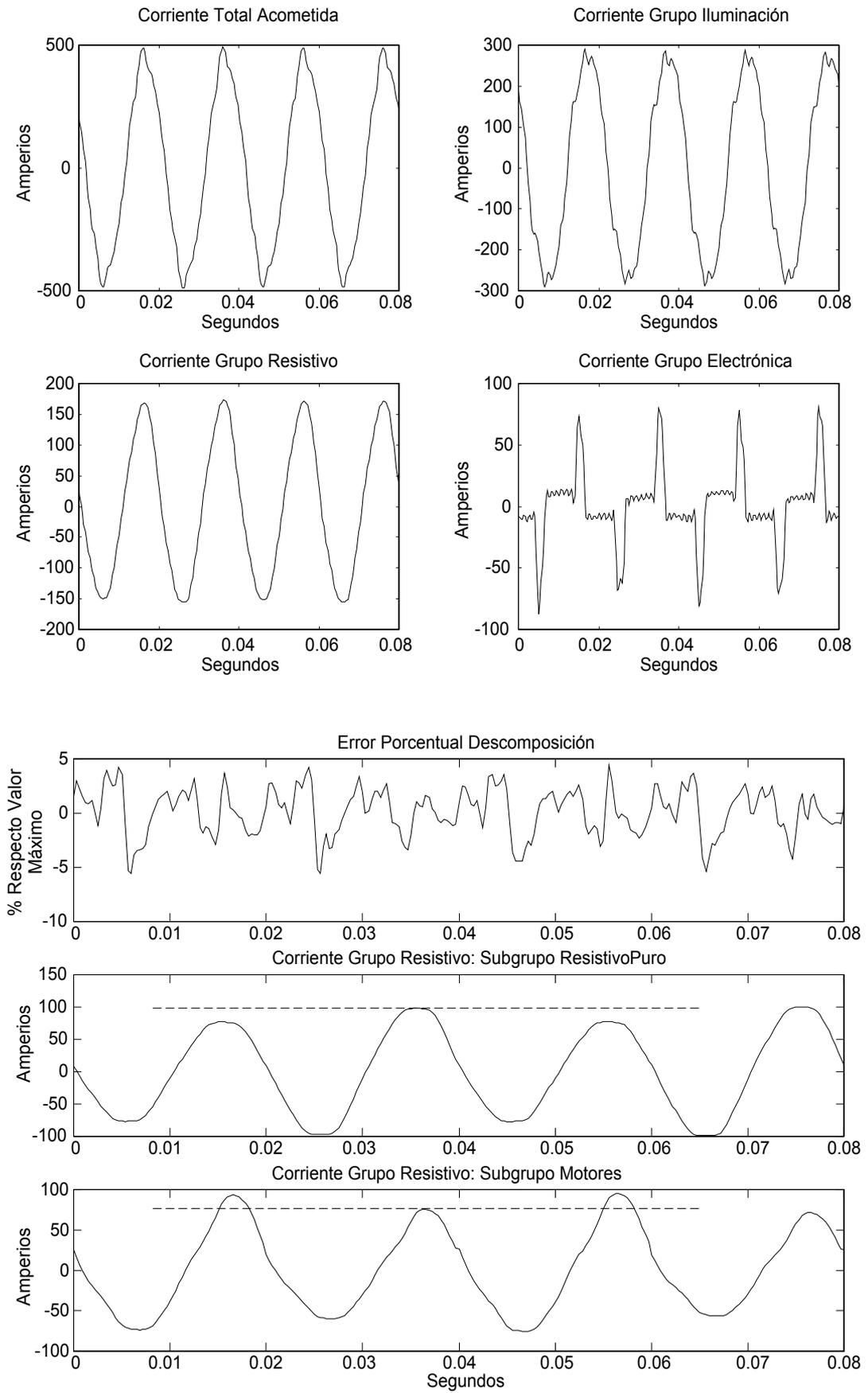


Figura IV.14. Formas de onda, de la acometida y de los grupos identificados a partir de ésta, y error porcentual de la descomposición

IV.4.4.5.2.- Identificación utilizando el valor eficaz del SEMM

Ya se ha comentado anteriormente que el valor eficaz del SEMM se puede utilizar para identificar la carga debida a los aparatos de aire acondicionado partiendo de la corriente total, o de la descomposición realizada por el algoritmo de identificación. En este apartado se procederá al estudio de ambos casos.

Las figuras IV.15 y IV.16 muestran los resultados obtenidos en la obtención del valor eficaz del SEMM sobre varias corrientes, cuando se utilizaron datos tomados del circuito nº1.

En concreto, las corrientes utilizadas han sido la total y dos obtenidas a partir del uso de los resultados de la descomposición en grupos. La primera de ellas, “I Caso 1”, era el resultado de la operación matemática de restar de la total las corrientes identificadas como pertenecientes al grupo de iluminación y el grupo electrónico. Por lo tanto, el resultado debería ser sólo la corriente debida a la carga resistiva y, si la descomposición fuera coherente, se deberían obtener valores eficaces del SEMM próximos entre estas corrientes. La segunda de ellas, “I Caso 2”, es la utilización directa de la corriente ya agrupada como resistiva y, otra vez, se deberían obtener valores eficaces semejantes con las otras dos.

En la figura IV.15 se puede ver, en la parte superior, la potencia activa que cada una de estas tres corrientes estaría absorbiendo. Se ve que, para la corriente total, está en torno a los 18 kW, mientras que para las otras dos corrientes están en torno a los 8 kW. Esto significa que el resultado del algoritmo de descomposición asigna 8 kW al conjunto de cargas resistivas y aparatos de aire acondicionado. En las gráficas inferiores de la misma figura, se puede ver el análisis espectral de la envolvente de los máximos y de los mínimos a lo largo del periodo de medida. En ellas se puede comprobar que existen varios picos dentro del margen de frecuencias esperado, es decir de 1 a 3 Hz, que se corresponden con las frecuencias observadas en los equipos medidos. El espectro en los tres casos es semejante, pero se puede observar cómo los picos para las corrientes obtenidas a partir de la total tienen amplitudes mayores que para ésta. Por lo tanto, se obtendrán valores eficaces del SEMM más grandes. Valores que, cuando se traducen a potencias de aparatos de aire acondicionado por medio de la gráfica IV.10, dan los resultados de la tabla IV.6 .

Cabe reseñar, el gran aumento en el valor de continua que sufre el espectro del SEMM cuando se utiliza la corriente asignada al grupo resistivo, debido a que, como se puede

observar en la figura IV.14, en las gráficas correspondiente al subgrupo motores tienen distintas amplitudes máximas y mínimas por ciclo, siendo siempre superior la amplitud máxima. Este comportamiento es porque el modelo del aparato de aire acondicionado utilizado sólo hace uso de un ciclo, y el ciclo utilizado no estaba centrado con respecto al eje de abscisas.

Tabla IV.6 Potencias asignadas a los aparatos de aire acondicionado

Corriente	I Total	I Caso 1	I Caso 2
kW aire acondicionado	2162	6031	9197
kW límite superior	7164	13542	18400
kW límite inferior	769	2831	4576

En cualquier caso el valor obtenido para “I Caso 1”, que se corresponde con la resta de la corriente agrupada como electrónica y como iluminación del total, 6031 W, es bastante semejante con el valor obtenido para el grupo resistivo, ligeramente por debajo de los 8000 W, ver figura IV.15.

En la figura IV.16 se representa el valor eficaz del SEMM a lo largo del tiempo de medida, habiendo utilizado la gráfica de la figura IV.10 para realizar la conversión del valor eficaz a kilowatios de carga de aire acondicionado. La suavidad de estas tres curvas es debida a que, para poder calcularlas a lo largo del tiempo, se debe utilizar una ventana deslizante que, en nuestro caso, se consideró de un tamaño igual a 256 ciclos –suficiente para no filtrar la información correspondiente a 2.5 Hz donde se consideró que el pico de señal terminaba- y con un solapamiento de 128 ciclos entre ventanas adyacentes. Esto, de hecho, impide que esta señal siga las oscilaciones de consumo de potencia activa, por lo que la forma gráfica de estas no sirve para explicar los escalones de potencia activa.

A pesar de que los valores de potencia son distintos para los tres casos, las formas de onda mantienen la semejanza entre sí.

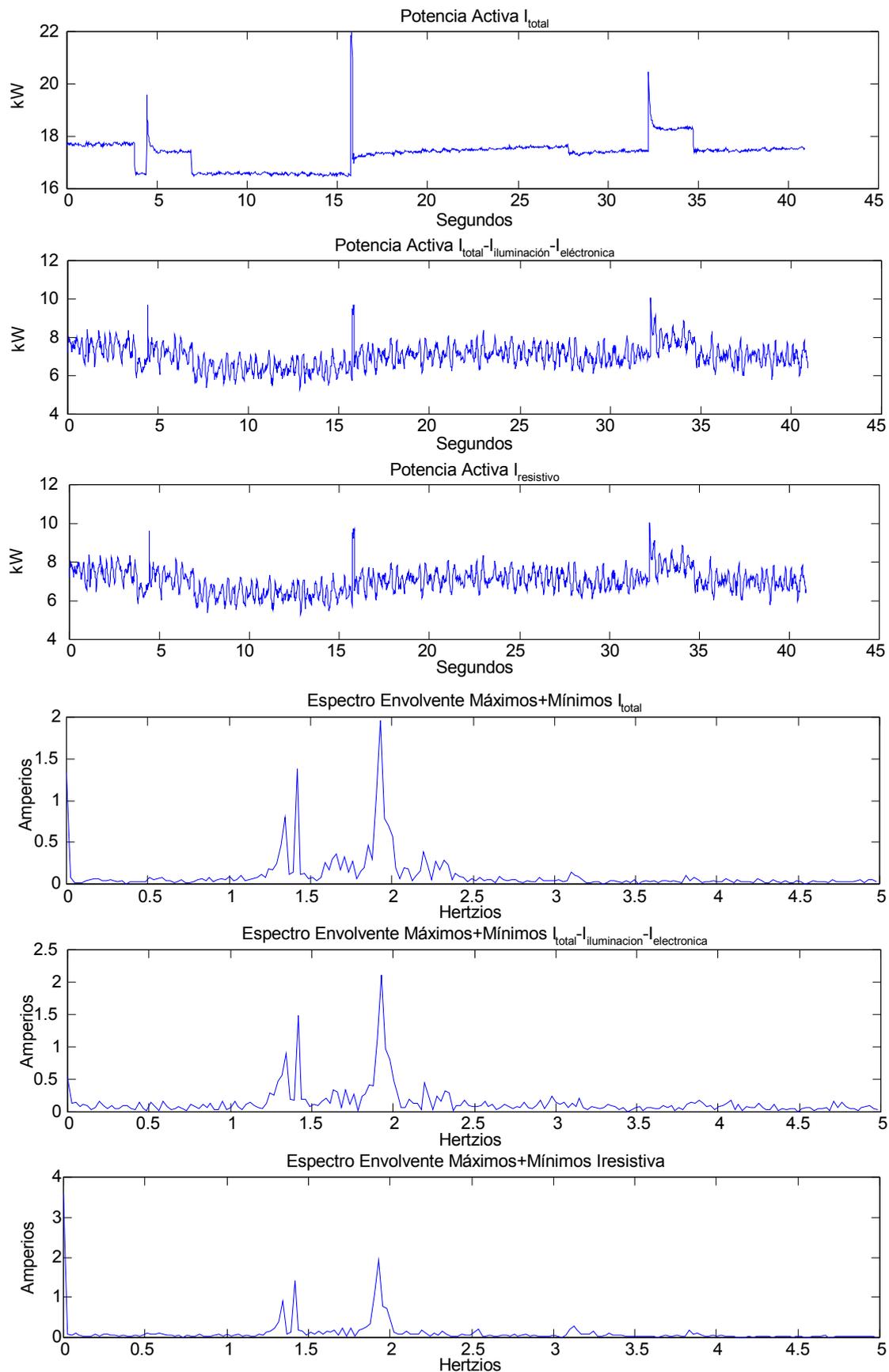


Figura IV.15. Descomposición en grupos de carga de los circuitos medidos y espectro del valor eficaz del SEMM para varias corrientes.

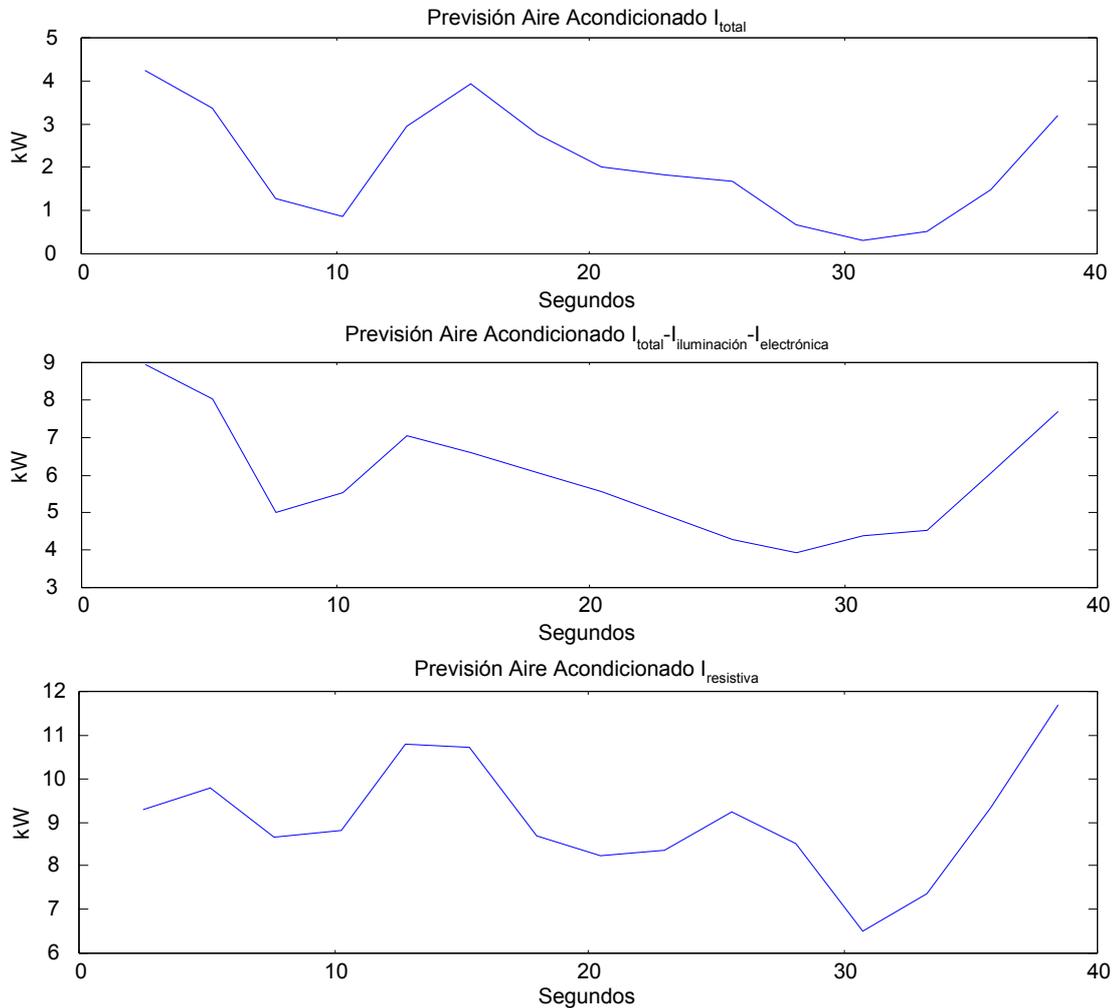


Figura IV.16. Previsión de carga de equipos de aire acondicionado utilizando el valor eficaz del SEMM para datos tomados del circuito n°1.

IV.5.- Conclusiones

El problema de la identificación no había sido tratado a un nivel de agregación superior al del consumo de una sola vivienda, dado los problemas que aparecen por el incremento de actividad y la atenuación de los armónicos, tanto de tensión como de intensidad, aguas arriba de la instalación.

En este capítulo se han analizado los posibles métodos que se pueden utilizar para la identificación de cargas. De los dos posibles, el método de identificación de cargas por la corriente absorbida en un ciclo es el que se ha implementado y para el que se han estudiado sus propiedades respecto a la identificación de cargas.

Las aportaciones de esta tesis van dirigidas a la posibilidad de extraer la información disponible a un nivel de agregación de un centro de transformación, nivel de agregación

mayor que el de una vivienda, pero aún así bajo. La potencia suministrada por el centro elegido para las pruebas, situado en el Campus Alfonso XIII, está del orden de los 300 a 400 kW, potencia pico medida en las pruebas realizadas.

Para que el proceso de identificación se pudiera realizar a la máxima velocidad de proceso posible ha sido necesario desarrollar una aplicación en C++ que implementa el algoritmo de identificación utilizado y que, además, hace uso de los modelos desarrollados en la primera parte de la tesis. Asimismo, se ha tenido en cuenta en el diseño del sistema que éste no fuera una herramienta limitada a un solo tipo de modelo, sino que a su vez pudieran implementarse, sin modificar el diseño fundamental del software, futuros modelos que se puedan desarrollar.

Puesto que no se disponían de aparatos de aire acondicionado para poder ensayarlos en laboratorio, se midieron varios equipos de distintos fabricantes instalados en viviendas para analizar su comportamiento. En los ensayos se observó que la corriente de arranque puede ser una firma utilizada para la identificación de la conexión del compresor. Si bien es razonable que esta señal pueda ser utilizada para conocer el arranque en niveles de agregación bajos, cuando el nivel de agregación es mayor esta señal no es fiable, ya que en periodos en los que estén permanentemente conectados la ausencia de esta señal imposibilita su uso. Asimismo, se comprobó que, en todos los equipos medidos, existía una oscilación a lo largo del tiempo de los máximos y de los mínimos de las amplitudes de un ciclo. Esta observación ha sido utilizada para obtener una señal representativa que sirve de firma para identificar a los equipos de aire acondicionado: la suma de la envolvente de los máximos y de los mínimos (SEMM). También se investigó la posibilidad de que existieran otras firmas que pudieran servir para la identificación, aunque éstas no se hallaron entre las magnitudes estudiadas.

La resolución del algoritmo de descomposición de corrientes se ha investigado para la identificación de cargas a distintos niveles de agregación. En los ensayos en laboratorio, a un nivel de agregación similar a una vivienda y con el conocimiento de las cargas conectadas, se ha comprobado que la utilización de un gran número de cargas modeladas para la identificación de éstas da como resultado unos pesos que no representan perfectamente a las cargas presentes, sino que se produce una sustitución de unas cargas por otras con comportamiento eléctrico semejante, de tal forma que la agrupación de cargas con comportamiento eléctrico semejante sí que es significativa. En el caso en que los

modelos utilizados para realizar la descomposición sean sólo los de las cargas presentes, sí que pueden ser identificadas de forma individual. Seguramente, el desarrollo de modelos que aproximen mejor la intensidad absorbida por las cargas de tipo electrónico nos permitiría una mejor resolución.

Puesto que los usos identificados se corresponden con los grupos Resistivo, Iluminación y Electrónico, y dado que se estaba interesado en la detección de las cargas de los aparatos de aire acondicionado, se obtuvo una relación entre el valor eficaz del SEMM y la potencia activa consumida por éstos que permitía representar el comportamiento agregado de distintos equipos de aire con distintas frecuencias de oscilación del SEMM. Esta relación es posteriormente utilizada para comparar los resultados obtenidos por la descomposición de corrientes, y también por otras magnitudes obtenidas a partir de ésta.

Con los conocimientos adquiridos del comportamiento del algoritmo de identificación y de los equipos de aire acondicionado se procedió a la realización del ensayo a un nivel de agregación mayor: el centro de transformación del Campus Alfonso XIII. Si bien los ensayos realizados no han podido ser contrastados por el desconocimiento real de la composición de la carga, no es menos cierto que en los resultados de larga duración se han podido contrastar pautas muy verosímiles de usos de cargas, como fueron las de los grupos de Iluminación y Electrónico.

Finalmente, con los datos adquiridos durante dos minutos de forma continuada, se han podido comparar los resultados obtenidos directamente del algoritmo de descomposición del circuito nº1 con los que se obtienen tras aplicar la relación entre el valor eficaz del SEMM y el consumo debido a equipos de aire acondicionado. Los resultados obtenidos por ambos métodos son coherentes, y sólo la realización de ensayos donde se conozca la composición de la carga en cada instante, nos permitirá profundizar más en este punto y al mismo tiempo validar la descomposición de la corriente para separar las cargas en grupos básicos, a niveles bajos de agregación.

IV.6.- Bibliografía

[Bouloutas, 91] A. Bouloutas, G. Hart, M. Schwartz, "Two Extensions of the Viterbi Algorithm", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 37, No. 2, pp:430-436, March 1991.

- [Drenker, 99] S. Drenker, A. Kader “Nonintrusive Monitoring of Electric Loads”, IEEE Computer Applications in Power, Vol 12, No 4, pp:47-51, october 1999.
- [Enetics] Enetics Inc., <http://www.enetics.com>.
- [Hart, 92] G. W. Hart “Nonintrusive Appliance Load Monitoring”, Proceedings of the IEEE, Vol 80, No 12, pp 1870-1871, december 1992.
- [Hart, 93] G. W. Hart, A. Bouloutas, “Correcting Dependent Errors in Sequences Generated by Finite-State Processes”, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 39, No. 4, pp: 1249-1260, July 1993.
- [Mancini, 96] R. Mancini, Z. Zabar, L. Birenbaum, E. Levi, J. Hajagos, S. Kalinowsky, “An Area Substation Load Model in the Presence of Harmonics”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996.
- [Pike] R. Pike, L. Guerra, *Optimización en Ingeniería*, Ediciones Alfaomega, México 1989. ISBN: 968-6062-86-6.
- [Roldán, 95] J. Roldan, *Manual de los Electrodomésticos, Normativa, Instalación, Mantenimiento y Reparación*, Editorial Paraninfo, Madrid, 1995, ISBN: 84-283-2184-1.
- [Ryan, 93] M. Ryan, G. Nudd, “The Viterbi Algorithm”, Warwick Research Report RR238 1983.
- [Schittkowski, 87] K. Schittkowski, Algoritmo numérico para la resolución del problema de programación cuadrática con restricciones,
<http://www.isr.umd.edu/Labs/CACSE/FSQP/qld.c>.
- [Schittkowski, 01] K. Schittkowski, C. Zillober, a publicar en: Encyclopedia of Life Support Systems, UNESCO, Topic: Fundamentals of Optimization and Operations Research (2001).
<http://www.uni-bayreuth.de/departments/math/~kschittkowski/eolss.htm>.
- [Yan, 99] H. Yan, Z. Zabar, D. Czarkowski, L. Birenbaum, E. Levi, J. Hajagos, “Experimental test of a load model in the presence of harmonics”, IEE Proceedings in Generation Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 2, pp: 186-192. March 1999.

V.- Conclusiones

V.1.- Aportaciones de la tesis

Las aportaciones de la tesis se pueden clasificar según su relación con los modelos de cargas, el método de identificación de éstas, la implementación del método y los resultados.

Si nos referimos a los **modelos de cargas**, se ha estudiado la idoneidad de la utilización de éstos para la identificación de usos finales de cargas a bajos niveles de agregación. Se ha podido constatar que cuando la actividad (conexiones y desconexiones de las cargas) en la

línea aumenta, como se da en el secundario del centro de transformación del Campus Alfonso XIII, es imposible el empleo de estos modelos para ser utilizados como firmas en un proceso de identificación. La utilización de la reactiva, calculada utilizando la información armónica, no es viable ya que no conserva la propiedad de linealidad, por lo que sólo se puede utilizar la reactiva obtenida a partir de las componentes fundamentales de tensión e intensidad. Por otra parte, el cálculo de la reactiva no añade información sobre la carga ya que, tal y como se ha comprobado, el factor de potencia de las cargas utilizadas para usos comerciales y residenciales están próximos a uno.

Para poder aprovechar toda la información posible del régimen estacionario se necesitan modelos que predigan la forma de onda de la corriente a lo largo de un ciclo. Existen en la literatura modelos que representan perfectamente a las cargas ante tensiones distorsionadas, pero para las cargas electrónicas se ha comprobado que la corriente absorbida por éstas depende no sólo de la amplitud de los armónicos, sino también de los desfases relativos entre ellos. Para tener en cuenta este hecho se ha introducido un nuevo modelo generalizado de admitancias cruzadas que, no sólo tiene en cuenta esto, sino que también modela la dependencia con respecto a la amplitud de la tensión fundamental. Además, se ha desarrollado un método de ajuste a un modelo físicamente basado de una carga electrónica, en concreto un ordenador, y se ha comprobado que en la mayoría de las situaciones, el error cuadrático medio que se comete en la predicción de la corriente absorbida por éste es mayor que el que comete el modelo generalizado de admitancias cruzadas. Esta propiedad hace que, para el proceso de identificación basado en la descomposición de las corrientes absorbidas por las cargas, sea preferible modelar a las electrónicas por medio del generalizado antes que por el físicamente basado.

Es cierto que el modelo físicamente basado, si es completo, dará mejores resultados. No obstante, la obtención de los parámetros necesarios para una carga electrónica desconocida es su punto débil, puesto que el proceso de identificación no es muy estable, siendo éste muy sensible a los valores iniciales del proceso de optimización para la obtención de los parámetros.

En cuanto a la **identificación de las cargas**, la principal aportación de la tesis es la utilización de la descomposición de la corriente para este fin. La descomposición es el resultado de un proceso de optimización que minimiza la distancia entre ésta y la corriente medida. Teniendo en cuenta que la tensión a bajos niveles de agregación suele contener

armónicos, interesa que los modelos que se utilicen para el proceso de descomposición sean capaces de predecir la corriente absorbida ante tensiones distorsionadas.

En segundo lugar, para poder identificar a la carga debida a los aparatos de aire acondicionado se ha definido la señal SEMM y su proceso de obtención, que claramente sirve de firma para la identificación de forma individual de estas cargas. Se ha estudiado y simulado el comportamiento de esta señal cuando se agregan varias cargas de este tipo, obteniéndose una relación entre el valor eficaz del SEMM y la potencia absorbida por los aparatos de aire acondicionado. Relación que se puede utilizar para obtener la carga agregada de los aparatos de aire acondicionado a un bajo nivel de agregación, y por tanto su número, dato necesario para evaluar un posible control de la carga.

La implementación del **algoritmo de descomposición** es otra importante aportación. Se ha diseñado una arquitectura del sistema que permite no sólo la utilización de los modelos estudiados en esta tesis, sino también otras clases de modelos, todo ello gracias a la utilización de un diseño orientado a objetos.

En cuanto a la validación de los **resultados**, los datos obtenidos en el laboratorio con el modelo generalizado y con el algoritmo de descomposición implementado muestran que, a un nivel de agregación de vivienda, se pueden agrupar a la cargas en tres grupos según su uso: Resistivo, Iluminación y Electrónica.

A nivel de centro de transformación, se ha podido identificar, a partir de las descomposiciones realizadas en el Campus Alfonso XIII, patrones de usos de cargas, como la realización de copias de seguridad por parte del Servicio de Informática de la Universidad y la atenuación de la iluminación exterior.

Finalmente, se ha comprobado que los resultados obtenidos por la descomposición y por la utilización del valor eficaz del SEMM dan valores semejantes, aunque es necesario un ensayo controlado que mida el consumo de todas las cargas para poder extraer conclusiones más exactas, no siendo éste posible en la actualidad.

V.2.- Futuras líneas de investigación

La dificultad de poder monitorizar todas las cargas aguas abajo del secundario del centro de transformación haría deseable la realización de un ensayo de estas características. Los resultados que se obtendrían de éste serían la confirmación definitiva de los obtenidos

por el algoritmo de descomposición y por las potencias asignadas por el valor eficaz del SEMM, permitiendo ajustar los algoritmos de identificación. Así, para aprovechar al máximo la información proporcionada por la descomposición, se podrían integrar los resultados obtenidos por este método con otros, como es el caso del valor eficaz del SEMM. Esta información podría ser explotada en caso de que se pudieran contrastar los resultados obtenidos con ensayos reales.

También sería muy útil poder realizar la medida de la corriente absorbida por un conjunto de aparatos de aire acondicionado funcionando en paralelo. Esto permitiría obtener la relación entre valor eficaz del SEMM y la potencia consumida por éstos, no de una simulación, sino a partir de medidas reales.

Se piensa que la mejora de los modelos de las cargas electrónicas mejoraría la resolución del algoritmo de descomposición. Con ello se podría incrementar el número de grupos de cargas identificados a bajos niveles de agregación. Las posibilidades de modelización del comportamiento de estas cargas por redes neuronales es una línea a considerar. Siendo uno de los principales aspectos a evaluar si la aproximación obtenida con estas redes mejora la conseguida por el modelo generalizado de admitancias cruzadas.

Otro aspecto interesante, en caso de ser factible la aplicación en un futuro de este sistema de identificación, sería la optimización de la memoria RAM utilizada por el modelo generalizado de admitancias cruzadas propuesto, ya que requiere de una cantidad de memoria generosa. En el caso de que sea utilizado para modelar muchas cargas puede interesar reducir sus necesidades y en esta tesitura, las redes neuronales podrían ser una mejor solución.

Finalmente, aprovechando que las compañías eléctricas van a comenzar a ofrecer servicios de acceso a Internet a través de la línea de alimentación -Endesa está realizando pruebas piloto en la Villa Olímpica de Barcelona y Sevilla, mientras que Iberdrola lo está haciendo en Madrid-, es evidente que la obtención de la composición de la carga y el ofrecimiento de servicios por parte de la compañía, se podrían realizar en caso de que se desarrollen los dispositivos electrónicos que, colocados en todas las cargas, permitirían obtener de éstas la información sobre su estado, a la vez que ofrecerían mayores posibilidades de control.

VI.1.- Obtención de los coeficientes del desarrollo en serie de Fourier a partir de la FFT

Para almacenar la información de la onda de corriente a lo largo del tiempo se utiliza el desarrollo en serie de Fourier, que como se sabe, no es más que la aproximación mínimo cuadrática de un conjunto de funciones ortonormales a la función objetivo. Esta aproximación es semejante al proceso seguido en el apartado sobre los modelos exponencial y polinomial, pero con las siguientes diferencias: la función a modelar es ahora, la corriente en función del tiempo, cuando antes era la activa y reactiva en función de la tensión, y de que ahora, el conjunto de funciones utilizados para desarrollar la función es el conjunto ortonormal siguiente:

$$\left\{ 1/(T/2)^{1/2}, \cos(kwt)/(T/2)^{1/2}, \text{sen}(kwt)/(T/2)^{1/2}, \dots \right\} \text{ donde } k = 1, 2, \dots$$

Esta representación es adecuada para el estudio de señales periódicas en el tiempo de periodo T. La variable w se define como $w = 2\pi f$, siendo f la frecuencia fundamental que se define como la inversa del periodo T. Como se sabe, a aquellas frecuencias múltiplos enteros de la fundamental se les conoce como armónicos.

El problema de aproximación se recuerda que viene dado por la siguiente expresión:

$$y(x) = \sum_{k=0}^M a_k X_k(x) \tag{VI.1}$$

Y el teorema de óptima aproximación [Apostol] prueba que existe una única elección posible de los coeficientes de las constantes en la aproximación a la función y que estos vienen dados por:

$$y(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kwx) + b_k \text{sen}(kwx)) \tag{VI.2}$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_a^{a+T} y(x) dx \quad (\text{VI.3})$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_a^{a+T} y(x) \cos(kwx) dx \quad (\text{VI.4})$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_a^{a+T} y(x) \text{sen}(kwx) dx \quad (\text{VI.5})$$

La serie también puede ser expresada en forma compleja sustituyendo a los términos seno y coseno por sus equivalencias exponenciales complejas:

$$\cos(kwx) = \frac{e^{jkwx} + e^{-jkwx}}{2}; \quad \text{y} \quad \text{sen}(kwx) = \frac{e^{jkwx} - e^{-jkwx}}{2j} \quad (\text{VI.6})$$

Que sustituidas en la ecuación (VI.2) da como resultado:

$$y(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \frac{e^{jkwx} + e^{-jkwx}}{2} + b_k \frac{e^{jkwx} - e^{-jkwx}}{2j} \right) \quad (\text{VI.7})$$

Si hacemos $b_0 = \frac{a_0}{2}$; $b_k = \frac{a_k - jb_k}{2}$; $b_{-k} = \frac{a_k + jb_k}{2}$ entonces obtenemos la forma compleja de la serie de Fourier:

$$y(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k e^{jkwx} \quad (\text{VI.8})$$

Donde los coeficientes b_k se obtienen a partir de los datos de la función por medio de la expresión:

$$b_k = \frac{a_k - jb_k}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T y(x) (\cos(kwx) - j \sin(kwx)) dx = \frac{1}{T} \int_0^T y(x) e^{-jkwx} dx \quad (\text{VI.9})$$

A la ecuación (VI.8) se le conoce como la ecuación de síntesis y a la (VI.9) como la ecuación de análisis de la serie de Fourier.

En el caso de que la función no sea periódica, entonces $T \rightarrow \infty$, el espaciamento entre frecuencias w , tiende a cero y los coeficientes de la serie pasan de ser una función

discontinua de la frecuencia, a continua. Se habla entonces de la transformada de Fourier y las ecuaciones de síntesis y de análisis pasan a ser:

$$y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} b(f) e^{j2\pi fx} df \quad (\text{VI.10})$$

$$b(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) e^{-j2\pi fx} dx \quad (\text{VI.11})$$

Se observa que la relación existente entre la ecuación de análisis $b(f)$ y los coeficientes b_k del desarrollo en serie de Fourier es: $b(kw) = Tb_k$, en el caso de que la función $y(x)$ sea periódica con periodo T . Por lo tanto, si se quieren obtener los coeficientes de la serie de Fourier a partir de la transformada se debe aplicar la relación: $b_k = b(kw)/T$.

Lo normal es que la función $y(x)$ sea una función muestreada del tiempo, $y(t)$, y solo se tenga el valor de la función en intervalos igualmente espaciados del tiempo. Si se define a Δ como el intervalo de tiempo entre muestras, intervalo de muestreo, entonces, se denomina frecuencia de muestreo a: $f_m = 1/\Delta$.

El teorema de muestreo demuestra que para cualquier intervalo de muestreo, existe una frecuencia, conocida como frecuencia crítica de Nyquist y dada por $f_c = 1/2\Delta$, con la siguiente propiedad: Si una función continua $y(t)$ es muestreada a intervalos Δ , entonces se puede reconstruir a la función original, a partir de sus muestras, si ésta está limitada en frecuencias y, siempre y cuando la frecuencia más elevada distinta de cero sea igual a la frecuencia de Nyquist. En el caso de que la función no sea limitada en frecuencias, entonces cualquier frecuencia que esté fuera del rango $(-f_c, f_c)$ es traducida de forma errónea, fenómeno conocido como aliasing, en alguna frecuencia dentro de ese rango. Esto se puede comprender fácilmente si se observa que, cualquier par de ondas $e^{j2\pi f_1 t}$ y $e^{j2\pi f_2 t}$ muestreadas a intervalos de Δ segundos darán las mismas muestras si y solo si, la diferencia entre f_1 y f_2 es un múltiplo entero de $1/\Delta$, lo cual coincide exactamente con la anchura de $(-f_c, f_c)$ [NumRec].

El problema del aliasing, tiene dos posibles soluciones a partir del conocimiento del ancho de banda de la señal a muestrear: i) Forzar con un filtro analógico pasabaja el límite

en frecuencias de esta señal al deseado, o ii) Muestrear a una velocidad suficiente como para tener al menos dos valores por ciclo de la frecuencia más alta presente.

Para el sistema de adquisición de datos implementado en esta tesis, se optó por la solución ii). Se utilizó como frecuencia de muestreo a $f_m = 25600$ muestras/sg. Con esta frecuencia de muestreo la frecuencia de Nyquist está sobre los 12.800 Hz, muy por encima de los 2.500Hz que se considera como frecuencia más alta de interés para los análisis en los sistemas eléctricos de potencia [MSPH].

La representación de las N muestras de la señal muestreada en el tiempo, $y[n]$, por medio de la transformada de Fourier lleva a las siguientes ecuaciones de síntesis y análisis:

$$y[n] = \int_{-\infty}^{\infty} b(f) e^{j2\pi f n \Delta} df \quad (\text{VI.12})$$

$$b(f) = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j2\pi f n \Delta} \Delta \quad (\text{VI.13})$$

No tiene interés obtener una función continua en frecuencias, $b(f)$, a partir de un conjunto finito de muestras N, y por lo tanto interesa muestrear también a la función $b(f)$, para obtener N muestras de $b(f)$, $b[k]$, a partir de las N muestras de $y[n]$. Estas N muestras se van a muestrear con un espaciamiento uniforme entre ellas de $f_n = n/(N\Delta)$; $n = 0..N$, que cubre por entero el intervalo $(-f_c, f_c)$ de anchura $1/\Delta$.

Las ecuaciones de transformación pasan a ser:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} b[k] e^{j2\pi k/(N\Delta)n\Delta} \frac{1}{N\Delta} = \sum_{k=0}^{N-1} b[k] e^{j2\pi kn/N} \frac{1}{N\Delta} \quad (\text{VI.14})$$

$$b[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j2\pi k/(N\Delta)n\Delta} \Delta = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j2\pi kn/N} \Delta \quad (\text{VI.15})$$

Normalmente no se suele trabajar directamente con esta transformación, puesto que depende de un parámetro dimensional Δ el cual, al aparecer multiplicando en la ecuación de análisis y dividiendo en la de síntesis, se suele eliminar definiendo una transformación conocida como la **transformada discreta de Fourier**, cuyas ecuaciones de síntesis y de análisis son:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} b[k] e^{j2\pi kn/N} \quad (\text{VI.16})$$

$$b[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j2\pi kn/N} \quad (\text{VI.17})$$

La relación entre los coeficientes de la transformada discreta de Fourier y los muestreados de la transformada continua es: $b_{icf}[k] = b_{idf}[k]\Delta$.

El interés de la transformada discreta de Fourier es grande debido a la existencia de algoritmos que permiten su obtención de forma muy eficiente. Colectivamente estos algoritmos son conocidos como algoritmos de la transformada rápida de Fourier, FFT, y el ahorro en tiempo de computación, en función del número de muestras N , del uso de estos algoritmos frente a la utilización directa de la ecuación de análisis es del orden de: $O(N^2)/O(N/2 \log_2 N)$ **[NumRec]**. Para el caso de $N=512$, que serían las muestras tomadas a lo largo de un ciclo a una frecuencia de muestreo de 25600, el ahorro es del orden de 114. Esto quiere decir que si se tarda T_{calc} segundos en hacer el cálculo por medio de la FFT, el tiempo necesario para el cálculo directo sería de aproximadamente 114 veces T_{calc} . Para el caso de una frecuencia de muestreo de 6400, el cual correspondería a una frecuencia de Nyquist de 3200Hz, ligeramente por encima de los 2500 Hz tomados como límite de interés, la proporción sería aproximadamente de 37.

Por lo tanto, puesto que lo que se quiere obtener son modelos en régimen permanente de cargas, cuya corriente absorbida se pueda descomponer en una serie de Fourier formada la fundamental y sus armónicos, interesa el uso de algún algoritmo de cálculo de la FFT que permita el cálculo de la transformada discreta de Fourier, y a partir de ella, el cálculo de los coeficientes de la serie de Fourier.

$$b_k = \frac{b_{icf}[kw]}{T} = \frac{b_{idf}[kw]\Delta}{T} = \frac{b_{idf}[kw] \frac{T}{N}}{T} = \frac{b_{idf}[kw]}{N} \quad (\text{VI.18})$$

La ecuación (VI.18) muestra que, tras obtener la transformada discreta de Fourier se pueden obtener los coeficientes de la serie compleja de Fourier sin más que dividir los valores calculados por el número total de muestras, N . A partir de la serie compleja, se pueden obtener los coeficientes de la serie de Fourier por medio de la ecuación (VI.9), es

decir: multiplicando por dos y conjugando la serie compleja de Fourier, la parte real nos dará el coeficiente de los términos coseno y la parte imaginaria el coeficiente de los términos seno del desarrollo en serie de Fourier, ecuaciones (VI.2) a (VI.5). Cuando se desea la representación fasorial, esta se puede obtener directamente de los coeficientes de la serie compleja de Fourier sin más que multiplicar sus todos coeficientes por 2, excepto a la componente de continua, que no se debe multiplicar.

Bibliografía

[Apostol] T. M. Apostol, *Análisis Matemático 2ª Edición*, Editorial Reverté 1981, ISBN 84-291-5004-8.

[MSPH] A. Arsoy, S. Halpin, Y. Liu, P. Ribeiro, *Modeling and Simulation of Power System Harmonics*, IEEE Product #EC102, ISBN 0-7803-4597-5.

[NumRec] H. Willian, S. Teukolsky, W.Vetterling, B. Flannery, *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*, Segunda Edición, Cambridge University Press.

[Oppenheim] A. Oppenheim, R. Schafer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall 1989, ISBN 0-13-216771-9.

VII.- Anexo B

En este anexo, se incluyen los resultados de los ensayos de identificación de cargas realizados en laboratorio.

La siguiente tabla indica el estado de conexión y desconexión de cada una de las cargas y para cada una de las tensiones ensayadas, TRxx.

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético
TR01	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada
TR02	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada
TR03	Conectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Desconectada
TR04	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Conectada
TR05	Conectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada
TR06	Conectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Conectada
TR07	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada
TR08	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Desconectada	Conectada
TR09	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada
TR10	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Desconectada
TR11	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada	Conectada
TR12	Conectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada
TR13	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada
TR14	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada	Conectada
TR15	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada

Y, en esta tabla, se muestra el contenido armónico y la distorsión de las TRxx.

Clase		50	100	150	200	250	300	350	450	THD
Comercial	TR01	222,8		2,1 ^{<-147°}		3,3 ^{<-175°}		4,0 ^{<-2°}	1,0 ^{<-129°}	2,55%
Industrial	TR02	221,3	0,4 ^{<-1°}	1,9 ^{<-42°}		8,3 ^{<-12°}		2,0 ^{<-177°}	0,5 ^{<-47°}	3,96%
Comercial	TR03	229,5		1,5 ^{<-6°}		4,5 ^{<-174°}		0,4 ^{<-152°}	1,5 ^{<-82°}	2,17%
Comercial	TR04	215,2		1,2 ^{<-170°}		1,5 ^{<-91°}		1,8 ^{<-25°}	0,8 ^{<-96°}	1,27%
Residencial	TR05	230,4		0,8 ^{<-73°}		1,0 ^{<-174°}		1,3 ^{<-13°}	0,5 ^{<-130°}	0,82%
Comercial	TR06	215,4	0,3 ^{<-164°}	2,2 ^{<-124°}		1,4 ^{<-127°}		3,4 ^{<-7°}	1,7 ^{<-150°}	2,14%
Comercial	TR07	215,4		2,9 ^{<-98°}		2,7 ^{<-179°}		2,8 ^{<-11°}	2,4 ^{<-170°}	2,51%
Residencial	TR08	229,23		1,0 ^{<-81°}		0,8 ^{<-143°}		1,4 ^{<-29°}	1 ^{<-125°}	0,93%
Comercial	TR09	227,7		4,2 ^{<-49°}		6,9 ^{<-155°}		1,1 ^{<-100°}	1,8 ^{<-136°}	3,66%
Comercial	TR10	230,4		3,7 ^{<-45°}		6,2 ^{<-160°}		0,4 ^{<-35°}	2,3 ^{<-121°}	3.29%
Residencial	TR11	221,5		1,4 ^{<-8°}		4,6 ^{<-129°}		1,7 ^{<-32°}	0,3 ^{<-145°}	2,30%
Residencial	TR12	221		2 ^{<-35°}		5,8 ^{<-84°}		0,7 ^{<-75°}	1,2 ^{<-180°}	2,84%
Residencial	TR13	228		2,2 ^{<-32°}		6,4 ^{<-85°}		0,8 ^{<-70°}	1,4 ^{<-173°}	3,05%
Residencial	TR14	221,4		0,2 ^{<-125°}		3,8 ^{<-7°}		1,9 ^{<-178°}	0,2 ^{<-121°}	1,92%
Comercial	TR15	229,2		1,5 ^{<-103°}		4,9 ^{<-155°}		0,4 ^{<-1°}	1,4 ^{<-165°}	2.32%

TR01

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR01	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	76.6908	0.840537
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	5.96205	0.544668
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	27.0077	0.163643
Bomb_Sodio_Alta	17.5387	0.208421
Bomb_Vapor_Mercurio	167.365	1.851
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	125.825	0.113993
Motor_Ventilador_54	250.422	5.77328
Ord_Compaq_Deskpro	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	12.4546	0.151437
Ord_Compaq_Prolinea	12.3412	0.454577
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	83.7487	1.09089

Observaciones: El balasto magnético y el televisor han sido detectados bien. Hay restos de otros elementos y la lámpara de vapor de sodio de alta no ha sido detectada, siendo sustituida por la de vapor de mercurio (no es de extrañar puesto que el principio físico es el mismo). La calefaccion_placa no ha sido identificada como tal, sino que ha sido identificada como motor_ventilador (ambas son resistivos puros).

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	100.841	1.10264
Bomb_Sodio_Alta	92.7809	1.10099
Calefaccion_Placa	486.111	0.946016
Televisor_JVC	101.439	1.33141

Observaciones: Se ve que ha identificado correctamente a todos los componentes conectados y en cuanto a las proporciones se ve que hay una menor potencia asignada a la placa y que esta se ha repartido entre los demás modelos.

El proceso de identificación se ha realizado en más de un ciclo y los resultados obtenidos son representativos puesto que oscilan sobre estos valores.

TR02

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR02	Desconectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	1.28963	0.032577
Balasto_Elec_Pritec	12.3651	0.358334
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	89.2742	0.984838
Bomb_Attralux_10	5.15514	0.701744
Bomb_Biax_GE_11	3.31397	0.282347
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0.85304	0.0641427
Bomb_Flash_20	8.67162	0.446215
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	81.7524	0.954869
Bomb_Vapor_Mercurio	0	0
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	30.0604	0.421568
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	7.07229	0.0955424
Televisor_JVC	16.2197	0.221

Observaciones: En este caso vemos que la lámpara de vapor de sodio ha sido correctamente detectada.

El balasto magnético ha sido detectado como en el TR01, correctamente.

El balasto electrónico PRITEC ha sido detectado en parte mezclándose con otros componentes electrónicos. Algo parecido a lo que ha ocurrido al ordenador.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	29.5262	0.846338
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	85.727	0.945919
Bomb_Sodio_Alta	92.2838	1.07912
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	48.7134	0.592663

Observaciones: Resultados similares en cuanto a elementos detectados excepto en el ordenador que solo detecta un 60% de la carga. Posiblemente bajo esta tensión el modelo da mayores errores que en otras situaciones.

TR03

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR03	Conectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Desconectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	41.9299	1.25801
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	0	0
Bomb_Attralux_10	0.0667785	0.0093836
Bomb_Biax_GE_11	3.37885	0.301876
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	1.00958	0.00588607
Bomb_Sodio_Alta	35.6704	0.394901
Bomb_Vapor_Mercurio	0	0
Calefaccion_Placa	23.7254	0.0436638
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	472.522	10.3465
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	97.0957	1.16765
Ord_Compaq_Prolinea	8.59471	0.305902
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	23.8265	0.31017

Observaciones: La calefacción de placa consume sobre los 500 Watios que esta vez ha sido identificado como ventilador_54. Vuelvo a comentar que el modelo del ventilador es totalmente resistivo.

El balasto electrónico PRITEC lo detecta, pero le asigna más potencia que la que le corresponde, cosa que junto con el exceso asignado al ordenador, a su vez detectado con exceso, sirven para compensar la falta de detección del televisor que solo se ve en parte.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	40.0619	1.19959
Calefaccion_Placa	542.799	0.997142
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	122.39	1.52768
Televisor_JVC	2.61736	0.0338812

Observaciones: Se ve que detecta con errores similares a los ensayos anteriores a la calefacción y al balasto electrónico pritec. El caso del ordenador y del televisor sugiere que ambas respuestas son muy similares (y lo son).

TR04

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético o 80W
TR04	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	3.07232	0.098296
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	82.7896	1.00467
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	0.194897	0.0187747
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	29.8597	1.66131
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	0	0
Bomb_Vapor_Mercurio	0	0
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: El balasto magnético es detectado perfectamente frente al balasto electrónico pritec, que es confundido con la lámpara electrónica flash de 20 Watios.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	32.2852	1.03383
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	83.3172	1.00905

Observaciones: Este ensayo es perfecto.

TR05

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR05	Conectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	40.9041	1.23057
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	78.1093	0.788054
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	3.25869	0.289557
Bomb_Ecotone_11	2.12465	0.194866
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	512.732	5.149122
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	0	0
Bomb_Vapor_Mercurio	33.1689	0.339013
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	52.7055	0.659846
Ord_Compaq_Prolinea	2.7408	0.1025
Ord_Philips	51.6628	0.627972
Televisor_JVC	36.3352	0.479554

Observaciones: En este caso se ve que las cargas electrónicas, como de costumbre, son mezcladas aunque la potencia consumida por todas ellas viene a ser equivalente a los componentes conectados.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	50.4315	1.51281
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	113.138	1.13956
Calefaccion_Placa	504.475	0.927896
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	75.6924	0.927209
Televisor_JVC	67.9512	0.874269

Observaciones: Excepto en la cantidad asignada al balasto electrónico Pritec, los resultados son análogos a los de los demás ensayos.

TR06

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR06	Conectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada	Conectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	77.6471	0.935155
Bomb_Attralux_10	4.42498	0.657128
Bomb_Biax_GE_11	1.77396	0.168194
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	32.5081	1.80454
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	10.5483	0.13805
Bomb_Vapor_Mercurio	0	0
Calefaccion_Placa	298.675	0.629026
Modelo_Motor_Monofasico1000W	73.389	0.067586
Motor_Ventilador_54	94.0344	2.32153
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: El balasto electrónico Pritec tiene un consumo en torno a los 30 Watios. Se ve que son los que el algoritmo ha asignado a la lámpara electrónica flash de 20 Watios. Este comportamiento es bastante probable que sea debido a que la forma de onda de ambas cargas sea bastante similar. Por lo demás, la suma de la potencia de la calefacción el motor monofásico y el motor ventilador está en torno a los 500 Watios, los que consume la placa, y ambas cargas tienen comportamiento resistivo aunque el motor mete algunos armónicos.

En cuanto al balasto magnético su comportamiento es el de siempre.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	34.2842	1.10193
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	85.5665	1.03169
Calefaccion_Placa	472.073	0.996974

Observaciones: Detecta perfectamente a los distintos componentes.

TR07

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético o 80W
TR0 7	Desconectad a	Desconectad a	Desconectad a	Conectad a	Desconectad a	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	84.9235	1.00891
Bomb_Attralux_10	0	
Bomb_Biax_GE_11	0.823874	0.0781529
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	74.8905	0.962262
Bomb_Vapor_Mercurio	0.110674	0.00132356
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: Se ve que ha detectado perfectamente a los dos componentes conectados.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	84.4083	1.00023
Bomb_Sodio_Alta	76.8035	0.983683

Observaciones: Detectados con menor error que cuando se utilizan todos los modelos

TR08

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR08	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Desconectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	101.519	1.04753
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	0	0
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	0	0
Bomb_Vapor_Mercurio	0	0
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	65.4632	0.775466
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	71.3562	0.818682
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: Detecta perfectamente el balasto magnético, y el ordenador Compaq Deskpro y la TV las detecta dentro de la categoría de electrónico, pero asignadas a diferentes modelos.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	97.8349	1.011
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	62.0946	0.740833
Televisor_JVC	78.0569	0.999072

Observaciones: El ordenador compaq_deskpro baja su identificación al entrar el TV.

TR09

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR09	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	5.80625	0.177985
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	87.3302	0.901201
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	1.33046	0.119437
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	56.3968	0.632197
Bomb_Vapor_Mercurio	65.9046	0.702903
Calefaccion_Placa	422.098	0.794299
Modelo_Motor_Monofasico1000W	82.1065	0.0729555
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	17.1797	0.205627
Televisor_JVC	72.944	0.953341

Observaciones: El balasto magnético, como siempre, es bastante bien identificado. La calefacción en placa más el modelo motor monofásico suman los cerca de 500Wattios de la placa y el motor al meter armónicos interfiere en la identificación de la lámpara de vapor de sodio de alta. El televisor también es detectado con bastante exactitud.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	100.376	1.03305
Bomb_Sodio_Alta	100.529	1.1242
Calefaccion_Placa	517.533	0.972204
Televisor_JVC	94.4513	1.19901

Observaciones: A pesar de que esta es la tensión con mayor contenido armónico y donde se producía el mayor error para el Ord_Compaq, parece que el televisor es bastante bien identificado en ambos casos.

TR10

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR1 0	Desconectad a	Desconectad a	Desconectad a	Desconectad a	Conectad a	Desconectad a

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	6.00506	0.180395
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	0	0
Bomb_Attralux_10	2.09776	0.295613
Bomb_Biax_GE_11	1.94799	0.172806
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	29.3698	1.54014
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	0	0
Bomb_Vapor_Mercurio	0	0
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0.10127	0.00381851
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: No es que detecte al Pritec muy bien, pero está claro que lo reparte entre componentes electrónicos.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	37.3634	1.12303
---------------------	---------	---------

Observaciones: Es detectado perfectamente, y teniendo en cuenta la distorsión de esta tensión, sólo presenta los errores típicos achacables a errores de modelado.

TR11

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR11	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0	0
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	70.545	0.788019
Bomb_Attralux_10	0.587788	0.0851442
Bomb_Biax_GE_11	0	0
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	47.4987	2.58324
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	74.5679	0.90713
Bomb_Vapor_Mercurio	70.7735	0.794044
Calefaccion_Placa	175.686	0.343538
Modelo_Motor_Monofasico1000W	225.239	0.207853
Motor_Ventilador_54	52.2781	1.21897
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	90.6954	1.11171
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: La TV no es detectada, en cambio aparece el ordenador Philips, que no está.

Detecta bien la lámpara de sodio de alta y menos de lo habitual el balasto magnético, el cual parece que en parte ha sido mezclado con el motor monofásico y la lámpara de vapor de mercurio, ambos inductivos.

Por último la calefacción en placa es mezclada con el modelo del motor monofásico el ventilador y la lámpara de vapor de mercurio.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	40.5592	1.25071
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	95.205	1.06532
Bomb_Sodio_Alta	82.6017	1.00794
Calefaccion_Placa	499.68	0.978051
Televisor_JVC	88.7408	1.1493

Observaciones:

TR12

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR12	Conectada	Desconectada	Conectada	Desconectada	Desconectada	Desconectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0.0215876	0.000556111
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	3.39485	0.0383288
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	1.69593	0.149973
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	7.86193	0.0842678
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	0	0
Bomb_Vapor_Mercurio	7.60103	0.0867583
Calefaccion_Placa	382.595	0.756068
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0.642738	0.000597633
Motor_Ventilador_54	95.8473	2.24777
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	51.9327	0.634402
Televisor_JVC	36.899	0.467943

Observaciones: La calefacción y el ventilador juntos tienen el consumo de la placa. El televisor y el ordenador Philips el mismo que el TV, y aparecen restos sin importancia de otros elementos.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Calefaccion_Placa	495.534	0.982021
Televisor_JVC	91.2165	1.16847

Observaciones:

TR13

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR13	Conectada	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Desconectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	4.14862	0.103573
Balasto_Elec_Pritec	11.7858	0.343526
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	0	0
Bomb_Attralux_10	11.7465	1.60316
Bomb_Biax_GE_11	0.688283	0.0579633
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	12.0163	0.621968
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	0	0
Bomb_Vapor_Mercurio	162.544	1.69346
Calefaccion_Placa	227.106	0.425917
Modelo_Motor_Monofasico1000W	38.4844	0.0342493
Motor_Ventilador_54	169.95	3.77081
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	26.9975	0.32096
Ord_Compaq_Prolinea	11.7682	0.4148
Ord_Philips	27.4153	0.324208
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: Lo mismo de siempre con las cargas resistivas. En cambio, la lámpara de vapor de sodio no es detectada. El balasto Pritec es identificado en parte y asignado a cargas electrónicas.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	27.4068	0.800511
Bomb_Sodio_Alta	98.8928	1.11047
Calefaccion_Placa	522.771	0.97919
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	56.0184	0.677112

Observaciones:

TR14

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético 80W
TR14	Conectada	Desconectada	Conectada	Conectada	Conectada	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0.312883	0.00804791
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	70.7194	0.793783
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	0	0
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	2.19697	0.170803
Bomb_Flash_20	39.8605	2.13662
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	15.2783	0.0944075
Bomb_Sodio_Alta	52.0887	0.627583
Bomb_Vapor_Mercurio	63.6664	0.727102
Calefaccion_Placa	208.067	0.40502
Modelo_Motor_Monofasico1000W	264.438	0.243253
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	5.71962	0.209121
Ord_Philips	87.3303	1.05138
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: Aquí hay cinco cargas conectadas y según esto, detecta el balasto magnético bastante bien. Y luego lo típico: las cargas resistivas las mezcla siempre y el vapor de sodio es mezclado con el vapor de mercurio. Por último, el ordenador Philips, que no está conectado, es detectado en vez del televisor.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Elec_Pritec	35.5974	1.07183
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	95.94	1.07867
Bomb_Sodio_Alta	95.7375	1.15521
Calefaccion_Placa	487.753	0.949466
Televisor_JVC	94.1488	1.21996

Observaciones:

TR15

	Calefacción	Ord. Compaq Deskpro	TV	Vapor Sodio	Pritec	Balasto Magnético o 80W
TR1 5	Desconectad a	Desconectad a	Desconectad a	Conectad a	Desconectad a	Conectada

Resultados estando todos los modelos seleccionados:

Modelos	Potencias	Cantidades
Balasto_Elec_Cipesa_2_5_percent	0.400936	0.0102779
Balasto_Elec_Pritec	0	0
Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	98.242	1.00785
Bomb_Attralux_10	0	0
Bomb_Biax_GE_11	0	0
Bomb_Ecotone_11	0	0
Bomb_Ecotone_14_2	0	0
Bomb_Flash_20	0	0
Bomb_Incand	0	0
Bomb_Luz_Mezcla_2	0	0
Bomb_Sodio_Alta	81.9419	0.906906
Bomb_Vapor_Mercurio	5.83336	0.0622021
Calefaccion_Placa	0	0
Modelo_Motor_Monofasico1000W	0	0
Motor_Ventilador_54	0	0
Ord_Compaq_Deskpro_2_5_percent	0	0
Ord_Compaq_Prolinea	0	0
Ord_Philips	0	0
Televisor_JVC	0	0

Observaciones: Detectados los dos.

Resultado estando seleccionados los componentes conectados:

Balasto_Magnetico_80W_2_5_percent	98.3715	1.00782
Bomb_Sodio_Alta	88.0219	0.973486

Observaciones: