

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
Departamento de Ingeniería Eléctrica



**NUEVAS HERRAMIENTAS PARA FACILITAR LA RESPUESTA
ACTIVA DE CONSUMIDORES EN MERCADOS ELÉCTRICOS
LIBERALIZADOS: IMPLEMENTACIÓN Y RETRIBUCIÓN**

TESIS DOCTORAL

Autor:

D. Guillermo Escrivá Escrivá

Dirigida por:

Dr. Carlos Álvarez Bel

Valencia, Abril 2009

En el momento de finalizar este trabajo es un placer recordar en esta página a todas aquellas personas con las que he compartido muchos momentos de trabajo, y también diversión, durante el tiempo que me ha llevado su realización.

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis, Carlos Álvarez, la ayuda recibida en forma de comentarios y discusiones, que sin duda han contribuido al enriquecimiento de la misma.

También me gustaría recordar a todos mis compañeros del Instituto de Ingeniería Energética, Javi, Fer, Aurelio, Markus, Hector, Manolo, Juan, Rubén, Amada, Jelena, Marga, David, Carolina, etc., por haberme ayudado siempre que se lo he pedido.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 11 |
| 1.1 Introducción | 11 |
| 1.2 Objetivos | 12 |
| 1.3 Estructura de la tesis | 14 |
| CAPÍTULO 2. RESPUESTA DE LA DEMANDA | 17 |
| 2.1 Introducción | 17 |
| 2.2 Objetivos de la gestión de la demanda. Enfoque tradicional | 18 |
| 2.3 Enfoque actual de la respuesta de la demanda. Respuesta a precios..... | 21 |
| 2.3.1 Programas de respuesta de la demanda | 26 |
| 2.3.2 Barreras en la implementación de programas de respuesta de la demanda | 27 |
| 2.4 Otros beneficios de la respuesta de la demanda | 32 |
| 2.4.1 Mejora de la eficiencia energética | 33 |
| 2.4.2 La respuesta de la demanda como mecanismo de garantía de suministro | 34 |
| 2.5 Conclusiones del capítulo | 36 |
| CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE: SISTEMAS DE GESTIÓN Y CONTROL | 39 |
| 3.1 Introducción | 39 |
| 3.2 Características de los sistemas de gestión actuales | 39 |
| 3.3 Arquitectura de un sistema de gestión | 43 |
| 3.3.1 Protocolos de comunicación más utilizados..... | 46 |
| 3.4 Funciones de los sistemas de gestión | 52 |
| 3.4.1 Integración de sistemas..... | 52 |
| 3.4.2 Enlace con el operador..... | 53 |
| 3.4.3 Funcionalidades de seguridad..... | 54 |
| 3.4.4 Base de datos en tiempo real | 55 |
| 3.4.5 Gestor de mantenimiento | 55 |
| 3.4.6 Otras funciones del sistema de gestión..... | 56 |
| 3.5 Necesidades adicionales en los SGC para la implantación de programas de RD | 59 |

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

| | |
|--|------------|
| 3.6 Integración del nuevo sistema de gestión integral..... | 60 |
| 3.7 Conclusiones del capítulo | 61 |
| CAPÍTULO 4. NUEVO SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN | 63 |
| 4.1 Introducción | 63 |
| 4.2 Funcionalidades del sistema | 64 |
| 4.3 Componentes hardware del sistema | 68 |
| 4.3.1 Componentes del sistema en el cliente | 69 |
| 4.3.2 Componentes del sistema en el centro de control | 83 |
| 4.4 Componentes software del sistema..... | 84 |
| 4.4.1 Aplicación de adquisición de datos del cliente <i>Adquisition</i> | 85 |
| 4.4.2 Base de datos SQL <i>Customers</i> | 86 |
| 4.4.3 Funciones de seguridad | 89 |
| 4.5 Interfaz gráfica en un entorno Web | 91 |
| 4.5.1 Diseño e implementación de la plataforma Web | 93 |
| 4.5.2 Aplicaciones básicas desarrolladas..... | 96 |
| 4.6 Implementación del sistema en la UPV | 108 |
| 4.6.1 Acciones realizadas y beneficios de la instalación del sistema..... | 110 |
| 4.7 Conclusiones del capítulo..... | 112 |
| CAPÍTULO 5. ESTADO DEL ARTE: MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE PERFILES DE CONSUMO | 115 |
| 5.1 Introducción | 115 |
| 5.2 Estado actual de los métodos de predicción | 116 |
| 5.3 Técnicas estadísticas clásicas de predicción | 117 |
| 5.3.1 Modelos de regresión | 117 |
| 5.3.2 Modelos heurísticos..... | 118 |
| 5.3.3 Modelo simple de alisado exponencial..... | 119 |
| 5.3.4 Modelo de Holt y Winters..... | 121 |
| 5.3.5 Modelos estocásticos | 122 |
| 5.4 Representación en el espacio de los estados | 128 |
| 5.4.1 Filtro de Kalman..... | 130 |
| 5.5 Técnicas modernas de predicción | 131 |
| 5.5.1 Redes neuronales | 132 |

| | | |
|--|---|------------|
| 5.5.2 | Lógica borrosa y algoritmos genéticos | 133 |
| 5.6 | Valoración de la capacidad predictiva de los modelos | 138 |
| 5.7 | Cálculo de la predicción en niveles de agregación elevados | 141 |
| 5.7.1 | El parámetro de <i>Laboralidad</i> | 142 |
| 5.8 | Conclusiones del capítulo | 143 |
| CAPÍTULO 6. TÉCNICAS NEURONALES APLICADAS AL CÁLCULO DE PERFILES DE CONSUMO | | 145 |
| 6.1 | Introducción | 145 |
| 6.2 | Estructura de un sistema neuronal artificial | 146 |
| 6.2.1 | Modelo general de neurona artificial | 146 |
| 6.2.2 | Modelo estándar de neurona | 149 |
| 6.3 | Arquitectura de las redes neuronales | 151 |
| 6.4 | Modos de operación: Aprendizaje y recuerdo | 152 |
| 6.5 | Redes neuronales supervisadas | 153 |
| 6.5.1 | El asociador lineal | 154 |
| 6.5.2 | El perceptrón simple | 155 |
| 6.5.3 | Modelo Adalina | 157 |
| 6.5.4 | El perceptrón multicapa con aprendizaje por retropropagación (BP) | 160 |
| 6.5.5 | Capacidad de generalización de la red | 163 |
| 6.6 | Modelo de red neuronal propuesta | 167 |
| 6.6.1 | Modelo neuronal extendido | 170 |
| 6.7 | Conclusiones del capítulo | 171 |
| CAPÍTULO 7. MODELADO DE SISTEMAS. ESTUDIO DEL CONSUMO POR USOS FINALES | | 173 |
| 7.1 | Introducción | 173 |
| 7.2 | El proceso de modelado | 174 |
| 7.3 | Modelado de sistemas de climatización | 176 |
| 7.3.1 | Caracterización del modelo empleado | 179 |
| 7.3.2 | Obtención del modelo paramétrico | 181 |
| 7.3.3 | Modelo simplificado de un sistema de climatización | 187 |
| 7.4 | Validación del modelo de cargas de climatización | 189 |
| 7.5 | Agregación de consumos homogéneos | 192 |
| 7.5.1 | Técnica de alisamiento | 193 |

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

| | | |
|--|---|------------|
| 7.5.2 | Aplicación al modelado del UF de climatización en un cliente comercial..... | 194 |
| 7.6 | Modelado del UF de climatización como consumo agregado de un conjunto de equipos heterogéneo..... | 196 |
| 7.7 | Conclusiones del capítulo..... | 200 |
| CAPÍTULO 8. NUEVA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PERFILES DE CONSUMO: DISEÑO Y RESULTADOS | | 203 |
| 8.1 | Introducción | 203 |
| 8.2 | Nueva propuesta de cálculo del perfil de consumo por usos finales..... | 204 |
| 8.3 | Aplicación para la predicción del consumo en la UPV | 209 |
| 8.3.1 | Análisis de un día con control activo del SGI | 213 |
| 8.4 | Aplicación a un edificio con uso departamental..... | 214 |
| 8.5 | Aplicación a un edificio docente | 218 |
| 8.6 | Predicción del consumo en un cliente comercial..... | 222 |
| 8.7 | Predicción en un edificio con usos varios..... | 226 |
| 8.8 | Análisis del método de predicción por Usos Finales | 229 |
| 8.8.1 | Resultados en la UPV..... | 229 |
| 8.8.2 | Resultados en un edificio con uso departamental..... | 231 |
| 8.8.3 | Resultados en un edificio docente..... | 233 |
| 8.8.4 | Resultados en un cliente comercial..... | 236 |
| 8.9 | Evaluación de los modelos propuestos | 237 |
| 8.10 | Funciones adicionales en el método de predicción | 239 |
| 8.10.1 | Número de días de entrenamiento | 240 |
| 8.10.2 | Factor de corrección en datos alejados al día de predicción | 241 |
| 8.10.3 | Influencia de la variable climática humedad en las predicciones | 242 |
| 8.10.4 | Integración de los horarios de cada proceso..... | 243 |
| 8.11 | Conclusiones del capítulo | 243 |
| CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES | | 245 |
| 9.1 | Conclusiones | 245 |
| 9.2 | Líneas futuras de desarrollo | 248 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 251 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 2.1 Modificación de la curva de demanda por gestión de la demanda..... | 19 |
| Figura 2.2 Beneficios de la RD por efecto de la flexibilidad de la demanda..... | 22 |
| Figura 2.3 Relación entre respuesta de la demanda y DSM según la AIE..... | 25 |
| Figura 3.1 Arquitectura de un sistema de gestión y control..... | 46 |
| Figura 4.1 Integración del SGI en un sistema eléctrico..... | 65 |
| Figura 4.2 Servicios del sistema propuesto proporcionados a los componentes de un sistema eléctrico..... | 67 |
| Figura 4.3 Arquitectura del SGI propuesto..... | 68 |
| Figura 4.4 Conexión de la pasarela Ethernet ETG100..... | 71 |
| Figura 4.5 Conexión de la central de medida PM710..... | 72 |
| Figura 4.6 Equipo de actuación Automata Twido..... | 75 |
| Figura 4.7 Circuito de protección para salidas relés tipo A..... | 76 |
| Figura 4.8 Circuito de protección para salidas relés tipo B..... | 76 |
| Figura 4.9 Circuito de protección para salidas relés tipo C..... | 76 |
| Figura 4.10 Circuito de protección para salidas relés tipo D..... | 77 |
| Figura 4.11 Conexión de señales digitales en el controlador..... | 77 |
| Figura 4.12 Interacción entre el sistema de control propuesto y uno existente..... | 78 |
| Figura 4.13 Conexión del cable de comunicaciones TSXPCX3030..... | 80 |
| Figura 4.14 Área de programación de TwidoSoft..... | 81 |
| Figura 4.15 Proceso de certificación digital..... | 91 |
| Figura 4.16 Diagrama de flujo de la aplicación CPP..... | 101 |
| Figura 4.17 Página principal de Punto de Medida..... | 104 |
| Figura 4.18 Página de definición de la aplicación Planificación..... | 105 |
| Figura 4.19 Página de edición de la aplicación Vigilancia..... | 106 |
| Figura 4.20 Página de informe de Consumos Diarios..... | 107 |
| Figura 5.1 Etapas de la metodología Box-Jenkins..... | 126 |
| Figura 5.2 Esquema de representación en el espacio de los estados..... | 128 |
| Figura 5.3 Términos relativos a los conjuntos borrosos..... | 134 |
| Figura 5.4 Funciones de inclusión tipo..... | 134 |

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

| | |
|---|-----|
| Figura 5.5 Estructura genérica y funcionamiento de un algoritmo genético | 137 |
| Figura 5.6 Diagrama de predicciones-realizaciones | 139 |
| Figura 5.7 Gráfico de la demanda de energía eléctrica de REE..... | 142 |
| Figura 6.1 Estructura jerárquica de un sistema basado en ANS | 146 |
| Figura 6.2 Modelo genérico de neurona artificial | 147 |
| Figura 6.3 Funciones de activación habituales | 149 |
| Figura 6.4 Modelo de neurona estándar | 150 |
| Figura 6.5 Arquitectura unidireccional de tres capas | 152 |
| Figura 6.6 Asociador lineal. Función de activación identidad | 154 |
| Figura 6.7 Perceptrón simple y función de transferencia de su neurona..... | 155 |
| Figura 6.8 Neurona lineal de la Adalina | 157 |
| Figura 6.9 Superficie de error $E(w)$ en el espacio de pesos w | 159 |
| Figura 6.10 Arquitectura del MLP por Back-Propagation..... | 161 |
| Figura 6.11 Evolución del error de aprendizaje y del error de generalización | 164 |
| Figura 6.12 Ajuste al ruido de los patrones en el aprendizaje de una red neuronal..... | 165 |
| Figura 6.13 Red neuronal utilizada para la predicción del consumo | 168 |
| Figura 6.14 Evolución de la humedad relativa en Valencia | 170 |
| Figura 6.15 Red neuronal extendida para la predicción del consumo | 171 |
| Figura 7.1 Modelado y simulación | 174 |
| Figura 7.2 Actividades del proceso de modelado y simulación | 176 |
| Figura 7.3 Descripción del sistema real con una carga de climatización | 177 |
| Figura 7.4 Mecanismos de control. Termostatos | 179 |
| Figura 7.5 Balance energético de la zona en estudio | 180 |
| Figura 7.6 Analogía eléctrica. Circuito equivalente global | 181 |
| Figura 7.7 Circuito eléctrico equivalente simplificado | 187 |
| Figura 7.8 Medidas del funcionamiento real de un equipo en el edificio 5E..... | 191 |
| Figura 7.9 Validación del modelo eléctrico de un equipo en el edificio 5E | 192 |
| Figura 7.10 Observaciones: Introducción de funciones tipo núcleo | 193 |
| Figura 7.11 Simulación del Uso Final 1 a partir de la simulación de distintas dependencias..... | 195 |
| Figura 7.12 Descomposición del consumo en usos finales en un cliente comercial | 196 |
| Figura 7.13 Modelado de 10 unidades de AA del edificio 5E | 198 |
| Figura 7.14 Modelado de 3 unidades de AA del edificio 5E | 199 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.15 Consumo agregado real y modelado de un conjunto de máquinas de AA del edificio 5E | 200 |
| Figura 8.1 Metodología de predicción del consumo por Usos Finales | 205 |
| Figura 8.2 Etapas del método de predicción propuesto | 208 |
| Figura 8.3 Predicción del consumo de la UPV para el 25/06/2007..... | 211 |
| Figura 8.4 Predicción del consumo de la UPV para el 25/06/2007 por Usos Finales | 212 |
| Figura 8.5 Previsión del consumo del 28/04/08 al 04/05/08 en la UPV | 213 |
| Figura 8.6 Consumo y predicción en la UPV para un día con CPP | 214 |
| Figura 8.7 Predicción del consumo del edificio 7D para el 27/06/2008 | 216 |
| Figura 8.8 Predicción del consumo del edificio 7D para el 27/06/2008 por Usos Finales | 217 |
| Figura 8.9 Previsión del consumo del 10/12/07 al 16/12/07 en el edificio 7D | 218 |
| Figura 8.10 Predicción del consumo del edificio 71-7J para el 15/05/2008..... | 220 |
| Figura 8.11 Predicción del consumo del edificio 71-7J para el 15/05/2008 por Usos Finales..... | 221 |
| Figura 8.12 Previsión del consumo del 23/07/07 al 29/07/07 en el edificio 71-7J | 222 |
| Figura 8.13 Predicción del consumo de un consumidor comercial para el 01/03/2002..... | 224 |
| Figura 8.14 Predicción del consumo de un consumidor comercial para el 01/03/2002 por Usos Finales..... | 225 |
| Figura 8.15 Previsión del consumo del 11/03/02 al 17/03/02 en un consumidor comercial | 226 |
| Figura 8.16 Predicción del consumo del edificio 5E para el 29/05/2008 | 228 |
| Figura 8.17 Predicción del consumo del edificio 5E para el 29/05/2008 por Usos Finales | 229 |
| Figura 8.18 Representación de los errores de predicción por CT y UF en el edificio 7D | 233 |
| Figura 8.19 Representación de los errores de predicción por CT y UF en el edificio 71-7J..... | 236 |
| Figura 8.20 Representación de los errores de predicción por CT y UF en un consumidor comercial | 237 |
| Figura 8.21 Errores MAPE de las predicciones del 10/12/07 al 23/12/07 en la UPV | 238 |
| Figura 8.22 Errores MAPE de las predicciones del 05/02/07 al 18/02/07 en el edificio 71-7J | 239 |
| Figura 8.23 Predicción del consumo de la UPV para el 03/07/2007 con corrección de datos | 242 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.1 Listado de registros de la central de medida PM710..... | 73 |
| Tabla 4.2 Tablas y campos asociados de la base de datos <i>Customers</i> | 88 |
| Tabla 4.3 Tipo de líneas en la aplicación CPP | 99 |
| Tabla 4.4 Niveles de seguridad en la aplicación CPP | 100 |
| Tabla 4.5 Perfiles de consumo en función del tipo de punto de medida | 103 |
| Tabla 5.1 Métodos más populares utilizados para el cálculo de perfiles de consumo | 116 |
| Tabla 6.1 Valores elegidos de los parámetros de entrenamiento..... | 169 |
| Tabla 7.1 Características de distintas máquinas de AA en el edificio 5E | 197 |
| Tabla 8.1 Criterios de selección en Usos Finales con fuerte dependencia con la temperatura | 206 |
| Tabla 8.2 Laboralidad según el tipo de día en la UPV..... | 209 |
| Tabla 8.3 Datos para el cálculo de la predicción del consumo de la UPV para el 25/06/2007..... | 210 |
| Tabla 8.4 Errores en la previsión del consumo del 28/04/08 al 04/05/08 en la UPV | 213 |
| Tabla 8.5 Datos para el cálculo de la predicción del consumo del edificio 7D para el 27/06/2008 | 215 |
| Tabla 8.6 Errores en la previsión del consumo del 10/12/07 al 16/12/07 en el edificio 7D | 218 |
| Tabla 8.7 Datos para el cálculo de la predicción del consumo del edificio 7I-7J para el 15/05/2008 | 219 |
| Tabla 8.8 Errores en la previsión del consumo del 23/07/07 al 29/07/07 en el edificio 7I-7J | 222 |
| Tabla 8.9 Laboralidad asignada en un cliente comercial | 223 |
| Tabla 8.10 Datos para el cálculo de la predicción del consumo de un cliente comercial para el 01/03/2002 | 223 |
| Tabla 8.11 Errores en la previsión del consumo del 11/03/02 al 17/03/02 en un consumidor comercial..... | 226 |
| Tabla 8.12 Datos para cálculo de la predicción del edificio 5E para el 29/05/2008..... | 227 |
| Tabla 8.13 Resultados de múltiples simulaciones en la UPV..... | 230 |
| Tabla 8.14 Análisis del método de predicción según el MAPE en la UPV | 230 |
| Tabla 8.15 Error MAPE medio según el criterio de selección y método de predicción en la UPV .. | 231 |
| Tabla 8.16 Resultados de múltiples simulaciones en el edificio 7D | 231 |
| Tabla 8.17 Análisis del método de predicción según el MAPE en el 7D | 232 |
| Tabla 8.18 Error MAPE medio según el criterio de selección y método de predicción en el 7D | 232 |
| Tabla 8.19 Resultados de múltiples simulaciones en el edificio 7I-7J | 234 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 8.20 Análisis del método de predicción según el MAPE en el edificio 7I-7J..... | 234 |
| Tabla 8.21 Error MAPE medio según el criterio de selección y método de predicción en el edificio 7I-7J | 235 |
| Tabla 8.22 Resultados múltiples simulaciones en un cliente comercial | 236 |
| Tabla 8.23 Error MAPE medio al emplear diferentes modelos en la UPV..... | 238 |
| Tabla 8.24 Error MAPE medio al emplear diferentes modelos en el edificio 7I-7J..... | 238 |
| Tabla 8.25 Análisis del número de días de entrenamiento en la UPV..... | 240 |
| Tabla 8.26 Análisis del número de días de entrenamiento en el edificio 7I-7J..... | 241 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En la nueva situación en la que se encuentran los mercados eléctricos, inmersos en distintos procesos de liberalización, toma especial importancia la competitividad dentro del sector del suministro eléctrico. Dicha competitividad debe considerar todos los mecanismos posibles para conseguir una gestión óptima de los mismos, tanto técnica como económica. Dentro de estos mercados, la participación activa y decidida del consumidor se define como uno de los objetivos fundamentales para conseguir un funcionamiento adecuado de los mercados en los que está disminuyendo el peso de la regulación. Es en este ámbito donde se enmarca la participación activa o respuesta de la demanda, entendiéndose como toda acción por parte del consumidor que conlleve su participación en los procesos de obtención y reacción a los precios.

Así, desde hace años se han ido definiendo distintos programas de participación activa de la demanda, aunque no se han obtenido los resultados esperados. Distintos factores han marcado dichos resultados como son la baja participación de los consumidores, las pobres reducciones obtenidas como respuesta a las señales del operador del programa, la baja satisfacción de los participantes, etc., lo que ha supuesto uno de los principales problemas en su funcionamiento. Distintos estudios estiman que la respuesta de la demanda puede ser mucho mayor de lo que se ha obtenido hasta el momento [1] y [2].

Hasta la década de los noventa la flexibilidad de la demanda se favorecía con productos de gestión de la demanda (Demand Side Management, DSM) en los que la compañía suministradora controlaba los consumos de los clientes para reducirlos en los periodos que consideraba necesario. Estos productos estaban diseñados desde el punto de vista del suministro y no tenían en cuenta, totalmente, las necesidades y posibilidades de los consumidores. Así, el control de las cargas se producía según las necesidades de la compañía suministradora sin considerar si en ese período las cargas controladas resultaban críticas para el consumidor o no. Este hecho producía disconformidades en los clientes participantes en este tipo de programas que, pese a las remuneraciones económicas, preferían abandonar el programa [5]. Por otro lado, las remuneraciones a los participantes se realizaban a través de tarifas subvencionadas,

generalmente superiores a los precios del mercado, lo que implicaba que los productos de gestión de la demanda, tal y como eran concebidos inicialmente, no fueran válidos en los mercados competitivos.

Para conseguir una participación de la demanda efectiva es necesario disponer de herramientas que permitan la explotación de la flexibilidad de la demanda, tanto desde el punto de vista del consumidor como del resto de agentes implicados en un sistema eléctrico: distribuidores, operadores de red, generadores, agregadores, etc.

Muchas son las razones por las que hasta el momento no se ha producido una participación satisfactoria en dichos programas. Se destaca la importancia de aspectos técnicos, se debe disponer de sistemas que permitan la obtención y tratamiento de la información necesaria para gestionarla, sistemas que en la actualidad existen pero no se implementan con dicha finalidad, aspectos logísticos de definición de productos claros y atractivos para el consumidor, y la necesidad de definición de un mecanismo que permita remunerar de forma objetiva la respuesta del consumidor frente a señales del sistema.

Hay que añadir que la expansión de las tecnologías de comunicación junto con el desarrollo de tecnologías de generación eficientes de pequeño tamaño permiten pensar en escenarios en el que desaparezcan muchas de las barreras detectadas para la implantación a gran escala de la respuesta de la demanda.

1.2 Objetivos

En este escenario, en el que sin duda la participación activa del consumidor es fundamental para el correcto desarrollo de los sistemas eléctricos, se presenta como objetivo principal de esta tesis avanzar en la repuesta activa de la demanda en el funcionamiento dichos sistemas. Del análisis de distintos programas llevados a cabo hasta el momento en distintos países, se identifican cuáles son los problemas que han aparecido en su implantación y que han provocado que los resultados no hayan sido los deseados. De entre los problemas fundamentales, por su importancia, se abordan en este estudio dos de ellos:

- No existen *sistemas* tecnológicos desarrollados específicamente para implantar sistemas avanzados de respuesta de la demanda con respuesta a precios que permitan englobar todas las necesidades de los distintos agentes que intervienen en un determinado programa. Así, no existen sistemas que permitan integrar a la vez las instalaciones del consumidor, las señales de los operadores de los programas, la información de los agregadores, etc.
- Es necesario establecer un mecanismo de *retribución* claro, para todos los integrantes de los sistemas, que cuente con la confianza de todos ellos. En este aspecto, para poder valorar la respuesta de un consumidor es necesario cuantificarla, para lo que es necesario comparar el consumo producido en una instalación al

responder frente a una señal del sistema con respecto al consumo habitual que habría tenido el consumidor y así poder valorar la magnitud de la respuesta de éste.

Considerando el objetivo global comentado y los aspectos presentados, se deducen los objetivos particulares a desarrollar en el presente trabajo:

- El diseño y desarrollo de un nuevo *sistema de gestión integral* que facilite una respuesta de la demanda efectiva y permita la participación de todos los agentes implicados. Con tal fin, es necesario el estudio de los problemas actuales a los que se enfrentan los clientes para gestionar de forma adecuada sus instalaciones, la interacción entre los distintos componentes, etc. Se deben estudiar los sistemas de control existentes en el mercado actualmente, cuyo principal inconveniente que presentan es que han sido desarrollados con otro objetivo, el control desde el punto de vista de funcionamiento de las distintas instalaciones, de climatización, electricidad, protección contra incendios, etc. Además, hay que destacar las limitaciones que éstos presentan a la hora de facilitar la integración de funciones adicionales, como pueden ser las que se necesitan a la hora de implantar nuevos programas de gestión de la demanda.

- Para poder definir un proceso de *retribución* a los consumidores por su participación en un determinado programa, se entiende como requisito necesario establecer un mecanismo para cuantificar su respuesta, para ello, como se ha indicado, es necesario comparar el consumo real producido en un determinado periodo, de duración de la respuesta a una señal del sistema, con el consumo que habría tenido al consumir de forma habitual. Así, por un lado es necesario medir correctamente el consumo (función integrada dentro del sistema propuesto) y por otro disponer de una previsión del perfil del consumo que se habría dado de no realizar ninguna acción de control. Para ello, es necesario analizar las distintas técnicas de previsión utilizadas por el sector, identificar los puntos débiles de éstas y proponer un método nuevo de cálculo de predicción del consumo que sea posible implantar con facilidad en el nuevo sistema integral desarrollado.

- El nuevo procedimiento de cálculo del perfil de consumo o *baseline*¹ que se plantea, se basa fundamentalmente en considerar el consumo total en un punto de la instalación como suma de *usos finales*². Por tanto, la predicción del consumo se obtiene como suma de predicciones de cada uno de sus usos. Para obtener el consumo de éstos es posible, por un lado, disponer de medidas si la instalación eléctrica está así diseñada, por ejemplo, se puede realizar la medida del consumo de todo el sistema de aire acondicionado de un edificio si existe un cuadro general de aire del que se alimenta toda la instalación, o por otro lado, a través de la utilización de

¹ Término utilizado para describir un nivel de consumo de referencia calculado en una instalación dada para un periodo de tiempo determinado, habitualmente un día.

² Cualquier consumo es posible descomponerlo en suma de diferentes consumos, considerando los procesos independientes con características distintas que intervienen en él, llamados usos finales.

modelos, realizar una simulación del consumo para cada uno de los usos, lo que proporcionará los datos para realizar las distintas predicciones.

El grupo, del que forma parte el autor, *Nuevas Aplicaciones de la Industria de Potencia* (NAIP), perteneciente al Instituto de Ingeniería Energética (IIE) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), centra su labor de investigación en el campo de la *gestión de la demanda*. En este ámbito, se han producido colaboraciones en EEUU, por ejemplo, el diseño y seguimiento de la experiencia: Demand Response Opportunity Pilot, DROP, con Progress Energy of Florida, en otros proyectos internacionales (colaboración en el marco del grupo internacional: Flexible, Reliable and Intelligent ENergy Delivery Systems, FRIENDS) y en Europa donde la participación más relevante es el proyecto EU-DEEP (The birth of a EUropean Distributed ENergy Partnership) del VI programa marco de la Unión Europea, cuyo objetivo principal es desarrollar modelos de negocio basados en los requerimientos del mercado para ampliar la penetración a gran escala de recursos energéticos distribuidos en Europa. Por tanto, esta tesis, supone un avance más en esta línea, avance necesario en el ámbito de la respuesta de la demanda, con el objetivo de conseguir un mejor funcionamiento de los sistemas eléctricos.

1.3 Estructura de la tesis

Para alcanzar los objetivos descritos en el apartado anterior, a continuación se indica la estructura que finalmente se ha adoptado en esta tesis, en donde se agrupan en diferentes capítulos los distintos puntos abordados.

En el *Capítulo 2. Respuesta de la Demanda* se recoge una visión general de la gestión de la demanda, definiendo los conceptos más importantes tanto en el enfoque tradicional (modificación de la curva de demanda) como en el actual (respuesta a precios), se indican cuáles son sus objetivos y los problemas que presenta la implementación práctica de la misma. Además, se hace especial hincapié en los motivos que han provocado que hasta el momento no exista una participación masiva de los consumidores en los programas de gestión de la demanda existentes. Finalmente, se comentan algunos de los programas desarrollados hasta el momento.

Del capítulo anterior se identifican distintos problemas que se presentan a la hora de implantar los programas de gestión de la demanda, de los cuales, por su importancia, este trabajo se centra en dos: por una parte, los sistemas de control existentes no están diseñados específicamente para servir de apoyo en la implantación de un programa de respuesta de la demanda por lo que presentan deficiencias y por otra, es necesario establecer una forma de retribución adecuada en dichos programas para lo que es fundamental el cálculo del perfil de consumo de un consumidor para un determinado instante. Por tanto, en el *Capítulo 3. Estado del arte: Sistemas de gestión y control*, se realiza un estudio de los sistemas de gestión existentes en el mercado indicando las posibilidades tecnológicas de los mismos, los objetivos de su instalación y las carencias

que éstos presentan para facilitar una respuesta del cliente frente señales del administrador de un determinado programa.

El *Capítulo 4. Nuevo sistema de gestión integral: Definición y aplicación* se centra en la definición y diseño de un sistema de gestión integral que permite una interacción real entre los distintos elementos del sistema eléctrico. El objetivo fundamental a la hora de diseñar dicho sistema es salvar las barreras tecnológicas que impiden la implantación de programas de respuesta de la demanda en los consumidores. Se indican cuáles son las características básicas que deben disponer este tipo de sistemas y como aplicación se presenta la implementación práctica de un sistema de gestión integral desarrollado en el Instituto de Ingeniería Energética en la Universidad Politécnica de Valencia.

Con el objetivo de abordar el segundo problema planteado a la hora de implantar programas de respuesta de la demanda es necesario establecer un mecanismo de retribución adecuada, aceptado por todos sus participantes, tanto consumidores, agregadores, empresas suministradoras y operador del programa. Para ello, es necesario establecer un método de predicción del perfil del consumo en un determinado cliente. En el *Capítulo 5. Estado del arte: Métodos de predicción de perfiles de consumo*, se realiza un estudio de las distintas técnicas utilizadas para el cálculo de la predicción del consumo. Se analizan las técnicas clásicas (métodos heurísticos y modelos estocásticos de predicción) y las que se usan más habitualmente en la actualidad como las técnicas neuronales y la lógica difusa. Posteriormente, en el *Capítulo 6. Técnicas neuronales aplicadas al cálculo de perfiles de consumo* se presentan los conceptos fundamentales de esta técnica y el diseño de las redes neuronales utilizadas en el método de cálculo de predicción del consumo diseñado en la presente tesis (Capítulo 8).

En el método de cálculo propuesto, se realizan las predicciones sobre los distintos usos finales en los que se descompone el consumo en una determinada instalación. Para poder analizar el consumo por usos finales, se consideran dos situaciones: Que se disponga de medidas de los consumos de cada uso final (caso de haber implantado el sistema propuesto en el Capítulo 4) o mediante el modelado de cada uso, realizar la simulación del consumo de cada uno de ellos. Uno de los usos finales más susceptible de implantar técnicas de control son los sistemas de climatización por lo que en el *Capítulo 7. Modelado de sistemas. Estudio del consumo por usos finales*, se presentan modelos de dichos sistemas y se realiza la validación de los mismos en instalaciones reales con equipos ya instalados.

En el *Capítulo 8. Nueva metodología para el cálculo de perfiles de consumo: Diseño y resultados* se presenta el nuevo método de cálculo para la predicción del consumo, aplicable a clientes con bajo nivel de agregación de cargas. La predicción del consumo total se realiza como suma de los consumos de cada uso final. Las predicciones se realizan utilizando las técnicas neuronales descritas y para el entrenamiento de las mismas se utilizan medidas de cada uso final o una simulación de los consumos obtenidos con la utilización de los modelos presentados.

Para finalizar, en el *Capítulo 9. Conclusiones* se indican las conclusiones más relevantes del presente trabajo, se resumen las principales aportaciones realizadas y se apuntan posibles líneas de investigación para futuros desarrollos.

CAPÍTULO 2

RESPUESTA DE LA DEMANDA

2.1 Introducción

El concepto de *respuesta de la demanda*, no debe entenderse como un concepto estático, más bien es un término que ha sufrido una gran evolución a lo largo del tiempo. Actualmente, la *participación activa de la demanda* o *respuesta de la demanda* puede entenderse como toda acción por parte del consumidor que conlleva una modificación en su forma de consumir y provoca su participación en los procesos de obtención de precios de la energía. Así, con sus acciones puede permitir la mejora de la eficiencia de los diferentes sistemas, tanto en el funcionamiento técnico del sistema eléctrico como también en los procesos del mercado. En cambio, tradicionalmente se había considerado que el sistema eléctrico debía satisfacer cualquier demanda que se produjera en cualquier momento, por lo que se consideraba al consumidor como un mero agente pasivo dentro del sistema y la implementación de cualquier programa de respuesta de la demanda llevaba como objetivo fundamental una modificación de su curva de demanda. En este capítulo se definen las principales modificaciones de la curva de carga que es posible conseguir a través de la implementación de dichos programas [6].

Considerando un enfoque más actual, con la participación de la demanda en los mecanismos de mercado, se consigue que la demanda del consumidor tenga un carácter elástico obteniendo así distintos beneficios en periodos de precios elevados, por lo que la participación activa de la demanda supone una defensa del propio mercado frente a la volatilidad de los precios.

Además, en este capítulo, se realiza un estudio de las importantes ventajas que se obtienen por la implantación de programas de respuesta de la demanda en un determinado sistema eléctrico y se presentan diversos ejemplos desarrollados en distintos países. Del análisis de estas experiencias, se destaca que hasta el momento no se han obtenido los resultados deseados y se analizan las causas o barreras que lo han motivado.

Por último, se analiza otro de los beneficios, actualmente muy importante, de la respuesta de la demanda que es la mejora de la eficiencia de energética en los sistemas eléctricos.

2.2 Objetivos de la gestión de la demanda. Enfoque tradicional

A principios de los años 70 comienzan a desarrollarse una gran cantidad de programas, sobre todo en Estados Unidos, destinados a la modificación de los patrones de consumo de los clientes. La explicación a este fenómeno es necesario buscarla en la inestabilidad que reinaba en el sector energético en esos años. La crisis del petróleo y la época de recesión habían generado gran incertidumbre sobre las curvas de crecimiento de la demanda, provocando aumentos de precio no deseados y recelos en las compañías para afrontar inversiones futuras en generación. En este escenario, los mecanismos para modificar las tendencias de consumo de los clientes emergieron como una posible vía para mejorar el aprovechamiento de los recursos y, al mismo tiempo, disminuir la dependencia de fuentes energéticas primarias pertenecientes a otros países. La mayoría de los esfuerzos que se realizaron en esta época para la incorporación y desarrollo de estos programas tenían su origen en presiones políticas sobre el sector eléctrico, que seguía desarrollándose en un entorno regulado.

Durante estos años emerge todo un glosario de términos con el fin de definir de forma clara las acciones que se estaban desarrollando. Así, el concepto *Gestión de Cargas* (Load Management) se definió como el control deliberado de las cargas de los clientes o la influencia sobre éstos, con el fin de desplazar en tiempo y cantidad el empleo de la energía eléctrica [7]. No obstante, es habitual encontrar entre las publicaciones de inicios de los años 80 aclaraciones en torno al significado con el que se introduce este concepto. Otros autores, definen explícitamente, con el fin de evitar confusiones, *Gestión de Cargas de la Empresa* (Utility Load Management) y *Gestión de Cargas del Cliente* (Customer Load Management) [8], según quién realice el control de cargas para el uso eficiente de sus propios recursos. Posteriormente, apareció el concepto de *Gestión de la Demanda* (Demand-Side Management, DSM) propiamente dicho, definido como la planificación e implementación de actividades de la empresa eléctrica dirigidas a influenciar en los patrones de consumo de los clientes, con el fin de aumentar su satisfacción y producir los cambios deseados en la forma de la curva de demanda del sistema [10]. Este concepto englobaba al anterior como una de sus posibles actividades. Como se ha comentado en la introducción del capítulo, el concepto de *respuesta de la demanda* puede tener implicaciones tanto desde un punto de vista estrictamente técnico como desde una visión económica.

Desde el punto de vista de la modificación de la curva de demanda, distintos pueden ser los objetivos que pueden perseguirse en cada situación, por lo que es necesario definir las posibles situaciones que se pueden plantear (Figura 2.1).

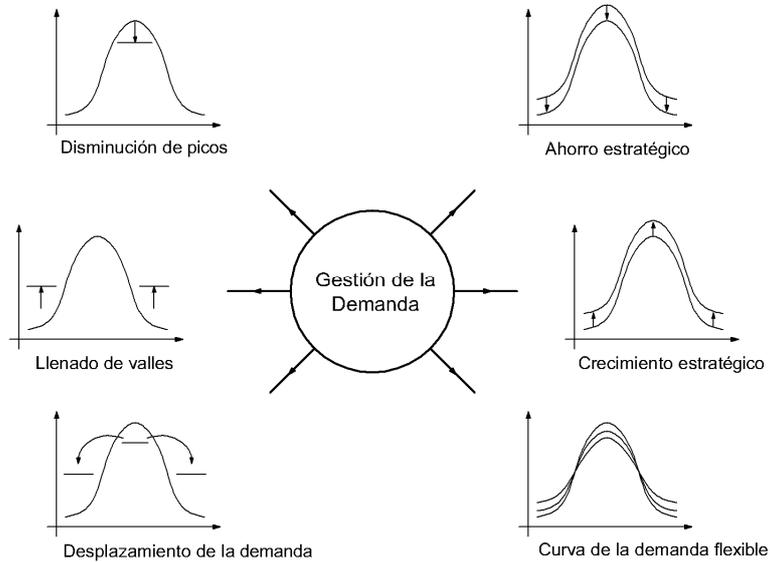


Figura 2.1 Modificación de la curva de demanda por gestión de la demanda

Debe tenerse en cuenta que una acción de gestión de la carga, puede producir en mayor o menor medida la verificación de varios de estos objetivos de forma simultánea.

En cualquier caso, la consecución de estos objetivos debe ser considerada por la empresa eléctrica como un requisito fundamental para el funcionamiento futuro, en un sector cada vez más competitivo y preocupado por el problema energético.

A continuación, se analizan con detalle las posibles modificaciones de la curva de demanda que pueden producirse por el desarrollo de programas de gestión de la demanda.

Disminución de los picos de demanda (Peak Clipping)

El objetivo buscado aquí, es la reducción de la demanda de potencia en las horas pico o de máximo consumo del sistema, permitiendo así reducir la utilización de plantas de punta de generación de fuel. Así, las acciones más adecuadas para la consecución de este objetivo es el control directo de cargas o tarifas de tiempo de uso.

Aumento del consumo en horas valle (Valley Filling)

Lo que se persigue en este caso es aumentar la demanda de potencia en los periodos de bajo consumo, en las que los costes marginales de generación son bajos. Hay que convencer al consumidor de que es posible obtener importantes ventajas al aprovechar esas horas de valle en las que se ofrece un precio de la energía reducido.

Para conseguir este objetivo se tienen distintas alternativas como puede ser el almacenamiento de frío/calor, tarifas de tiempo de uso, bombeos nocturnos, etc.

Desplazamiento de carga de pico a valle (Load Shifting)

Se trata de modificar el factor de carga¹ del sistema, por medio del cambio de la demanda de horas pico a horas de llano o valle. Este objetivo puede lograrse provocando cambios en los usos de las cargas, ya sea en sus tiempos de uso o bien en el tipo de carga utilizado (por ejemplo, utilización de sistemas de almacenamiento de energía en climatización). Para conseguir dicho objetivos, se puede utilizar control directo de cargas, tarifas de tiempo de uso, almacenamiento de frío/calor, etc.

Flexibilidad en la curva de carga (Flexible Load Shape)

Este objetivo de gestión, está relacionado con conceptos y aspectos de la seguridad del sistema más que con motivaciones económicas. Se persigue obtener un perfil en la curva de carga de forma que la compañía pueda implementar en ésta acciones para que la generación, transporte y distribución estén cerca de un óptimo para el sistema.

Hay un aspecto muy importante en la implantación y correcto desarrollo de cualquier política de gestión, que es la reacción del consumidor ante las consecuencias que produce la aplicación de la gestión de la demanda en su entorno. Lograr una reacción positiva del consumidor implica motivarlo para que acepte estos nuevos conceptos, haciéndole entender que obtiene ventajas con su participación. Para conseguir este objetivo se pueden valorar distintas alternativas como tarifas de fiabilidad variable y una oferta energética amplia.

Crecimiento estratégico (Strategic Load Growth)

Consiste en incrementar el uso de la energía eléctrica pero de una forma razonada y dirigida (por ejemplo, aumentando el grado de electrificación por el uso de nuevos servicios o por cambio en los ya existentes). Se intentará que el incremento de energía no sea constante, sino que sea mayor en periodos valle que en punta.

Por ejemplo, en el campo industrial, aparecen continuamente nuevos procesos, cuya base es la energía eléctrica y cuyo rendimiento son cada vez mayores, con lo que resulta rentable cambiar parte del suministro primario de energía no eléctrica hacia ella.

Las alternativas adecuadas para conseguir este objetivo pueden ser tarifas promocionales, subvención de equipos duales y otros.

¹ Relación entre la carga promedio y la carga pico en un sistema eléctrico durante un periodo en particular.

Ahorro estratégico (Strategic Conservation)

Este último objetivo se logra mediante una serie de programas dirigidos por la empresa al usuario final, que tienden a penalizar ciertas formas de uso de la energía no convenientes para ella (gran parte del efecto positivo o negativo lo provocan las tarifas, incentivos que pueda dar la empresa y una buena política de marketing). Así, alimentando a las mismas cargas, al tener mayor eficiencia se obtienen consumos menores.

Ejemplos de políticas que pueden conducir a este objetivo son la mejora de la eficiencia de las cargas (motores, electrodomésticos, etc.), fomento de la cogeneración, de la energía solar, eólica, etc.

2.3 Enfoque actual de la respuesta de la demanda. Respuesta a precios

Desde un punto de vista más actual, en un entorno en el que la mayoría de países disponen de sistemas eléctricos liberalizados, o menor regulación, el concepto *respuesta de la demanda*, adopta un nuevo enfoque en el que engloba cualquier acción que pretenda provocar cambios en el uso de la electricidad por parte del usuario final en respuesta a cambios en el precio de la misma [15].

Es importante este nuevo enfoque de la respuesta de la demanda pues, los sistemas eléctricos son dinámicos y las condiciones de la red eléctrica pueden cambiar drásticamente día a día, hora a hora, o incluso por instantes. Además, las inversiones en sistemas de generación y transmisión eléctrica tienen impactos de largo plazo, por lo que es necesario considerar las acciones a corto plazo como son las que se obtienen con la gestión de la demanda.

Al analizar la evolución del funcionamiento de los sistemas eléctricos a lo largo del tiempo, hay que tener en cuenta que el negocio del suministro eléctrico ha cambiado en los últimos años, la demanda ha crecido más rápido que la oferta, dando como resultado, entre otros, la reducción del servicio, volatilidad de los precios, reducción de la fiabilidad y sobrecarga del sistema de transmisión. El actual mercado de la energía es más complejo y competitivo que nunca y las compañías necesitan disponer de nuevas herramientas, entre otras razones, para:

- Reducir costes de operación.
- Mejorar la fiabilidad del sistema.
- Simplificar la planificación empresarial.
- Reducir el riesgo financiero.
- Integrar energías renovables.

La participación activa de la demanda permite la mejora de la eficiencia de los diferentes procesos de los mercados (tanto de energía como de servicios complementarios). Esta participación supone una defensa del propio mercado frente a la volatilidad de los precios y es uno de los pocos mecanismos disponible para paliar el poder de mercado del lado del suministro. En la Figura 2.2 pueden observarse los beneficios conseguidos por el mercado gracias a la flexibilidad de la demanda en un periodo de precios elevados. Así, si la demanda es inelástica (D) el precio del mercado se fija en $P1$, mientras que para la misma situación si la demanda fuera elástica (D') el precio se fijaría en $P2$, mucho menor.

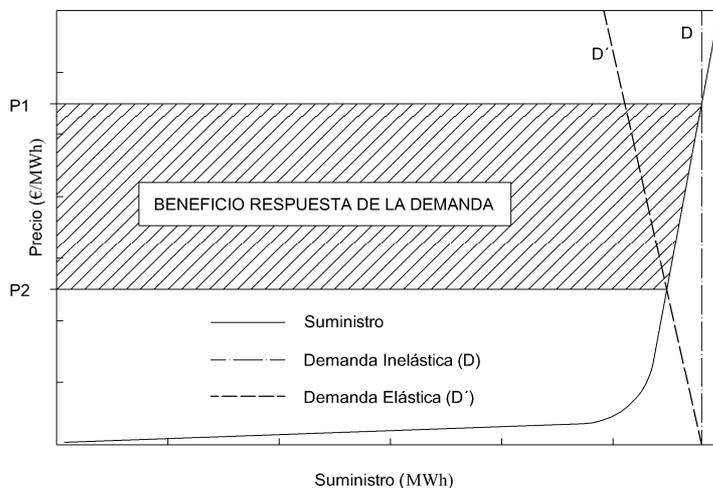


Figura 2.2 Beneficios de la RD por efecto de la flexibilidad de la demanda

Hasta la década de los setenta la elasticidad de la demanda eléctrica no se había tenido en cuenta en los escenarios de planificación energética, pero la crisis del petróleo puso de manifiesto que la demanda era capaz de reaccionar a precios elevados. Durante este período, los elevados precios produjeron una disminución en el crecimiento de la demanda que provocó que en Estados Unidos fuese difícil amortizar el exceso de plantas de generación que se habían construido como consecuencia de no considerar la flexibilidad de la demanda en la planificación [17].

A raíz de estos fenómenos, a finales de la década de los setenta se produjo un incremento del interés general de las compañías eléctricas en utilizar la flexibilidad de la demanda a través de modificaciones de la carga ([16] y [18]). Esta gestión se basó en incentivos regulados para reducir la necesidad de capacidad punta. Se entendía la gestión de la demanda como una herramienta de optimización del sistema, orientada al suministrador y utilizada en planificación. Con estos objetivos se diseñaron una serie de programas con dos enfoques diferentes:

- Por un lado se ofrecía a los clientes unas señales de precios para que éstos cambiasen sus hábitos de consumo. Se les cobraba el consumo dependiendo del

período horario en que se consumía. Los precios más elevados de los períodos punta favorecía que los clientes desplazasen sus consumos a períodos llano o valle. De esta manera estas tarifas por discriminación horaria inducían cambios permanentes en la curva. Pero el potencial de estas reducciones es limitado y se necesitan medidas adicionales para conseguir que la demanda reaccione a los precios no sólo de manera permanente (trasladando habitualmente los consumos posibles fuera de las horas punta) sino también a precios temporalmente elevados, producidos, por ejemplo, en situaciones de emergencia.

- Por otro lado, también se desarrollaron programas de control directo de cargas en los que las compañías eléctricas controlaban de manera remota las cargas del consumidor y las reducían según sus necesidades. Los consumidores que participan en este tipo de programas renuncian al control de sus propias cargas y pueden sufrir cortes de suministro un número máximo de veces fijado en el contrato. A cambio reciben recompensas por disponibilidad, habitualmente traducidas en tarifas más baratas de las habituales para todos los períodos horarios. Pero, pese a los elevados incentivos, muchos de los clientes se muestran insatisfechos pues las interrupciones pueden producirse en cualquier momento incluso en momentos críticos para ellos, lo que para algunos clientes supone un motivo de abandono del programa. Por otro lado, los programas resultan de un elevado coste para las compañías eléctricas y/o los administradores de los programas ya que los incentivos son más elevados que los precios de mercado y los recursos de demanda se pagan también cuando no se utilizan (por ejemplo, los clientes que participaban en los programas de interrumpibilidad reciben la tarifa reducida durante todo el año aunque no haya sido necesario interrumpirles en ningún momento). Este tipo de programas son los tradicionalmente llamados de *gestión de la demanda* o DSM (*Demand-Side Management*) e incluyen tarifas de interrumpibilidad, control cíclico de aires acondicionados, control de bombas, etc.

Con la liberalización de los mercados, la energía pasa a ser considerada por los reguladores como un bien de consumo en el que la flexibilidad de la demanda resulta imprescindible para el correcto funcionamiento del mercado. En este sentido los enfoques y estrategias utilizadas hasta el momento al respecto se hacen insuficientes, por lo que nace una nueva tendencia a favorecer la participación activa de la demanda que va más allá de la gestión tradicional.

La gestión de la demanda tradicional (como se venía aplicando hasta el momento) buscaba la optimización técnica del sistema pero se entendía como un subsidio por lo que a largo plazo no resulta económicamente rentable para el sistema. Por otra parte, el cliente no tenía capacidad de decidir si en un momento determinado prefería consumir pese a los elevados precios o penalizaciones que esto podía conllevar. Estaba pues orientada a la operación del sistema y su suministro. El nuevo concepto de participación de la demanda complementa la DSM con la voluntariedad para reaccionar en cualquier momento. Este enfoque consigue así ser orientado al consumidor que en todo momento puede decir cuándo reacciona, a qué precio y con qué carga lo hace.

Por otro lado, para que la participación de la demanda sea aceptada y resulte efectiva para el mercado, deben existir beneficios para todos los agentes implicados. En esto se incluye el propio mercado, por lo que no deben existir subsidios sino que debe tratarse como un mecanismo del propio mercado. Las reducciones en las facturas eléctricas de los consumidores y/o los pagos por reducciones de carga deben obtenerse como resultado de la utilización de los productos en los diferentes mercados por lo que se entiende que la respuesta de la demanda se debe autofinanciar gracias a la participación en el mercado sin necesidad de subsidios ajenos a éste.

De esta manera, los recursos de demanda deben utilizarse para hallar el óptimo del sistema y la mejora conseguida por éstos es la que debe financiar la respuesta de la demanda.

Así es como, llegados a este punto, se entiende por participación activa o *respuesta de la demanda* a todo lo que conlleve la participación de los consumidores en los procesos de obtención de precios de la energía. Los mecanismos de participación de la demanda están basados en la posibilidad y capacidad de consumir o no consumir según el precio en cada instante.

De entre las acciones que pueden realizar los consumidores, hay que destacar las reducciones de demanda durante un determinado periodo de tiempo, utilización de la generación distribuida, etc. La disponibilidad de generadores de emergencia supone un recurso utilizable para acudir al mercado. Igualmente la utilización de almacenamiento de energía también aumenta las posibilidades de participación para el consumidor. La combinación de los tres recursos (generación distribuida, almacenamiento y respuesta de la demanda) para la participación en los mercados se denomina *gestión de recursos distribuidos*. Así pues, la utilización de los recursos tanto de la demanda como de generación distribuida y almacenamiento energético permite la *participación activa o respuesta de la demanda* (RD) por parte del consumidor, en los mercados eléctricos [20]. Considerando las diferencias existentes entre ésta y la gestión de la demanda tradicional (DSM), se pueden resumir en que la participación de la demanda está basada en el mercado y pretende mejorar la eficiencia total de éste favoreciendo que los consumidores obtengan beneficios de su participación, mientras que la DSM permite a los consumidores reducir sus costes por su consumo eléctrico pero el mercado pierde eficiencia debido a los subsidios. Por otro lado, desde el punto de vista de la carga, DSM alcanza cambios a largo plazo en los hábitos de consumo consiguiendo modificaciones permanentes en la curva de carga, mientras que la participación activa de la demanda implica cambios a corto plazo en momentos concretos sin que los hábitos de consumo usuales se modifiquen.

Por supuesto, tecnológicamente, existen puntos en común entre ambas. Por ejemplo, los sistemas de monitorización y comunicación son comunes. En lo que se refiere al control, DSM requiere un control de cargas remoto por parte del gestor del programa mientras que la participación activa requiere un control de cargas por parte del propio consumidor, pero éste puede utilizar la misma tecnología aunque, por otro lado,

presenta la necesidad, para un correcto funcionamiento, de un espacio común de encuentro entre todos los participantes del programa para intercambiar información.

La Agencia Internacional de la Energía resumió estas diferencias y similitudes representándolas en la figura siguiente [21] y [22]:

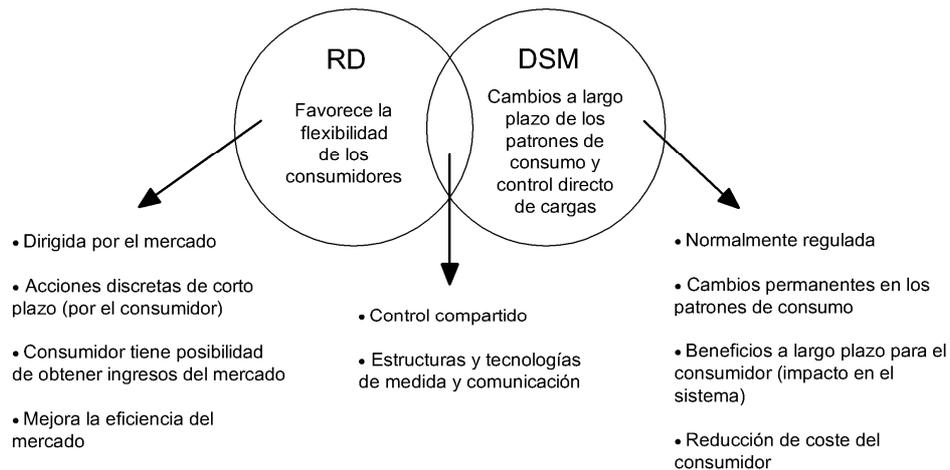


Figura 2.3 Relación entre respuesta de la demanda y DSM según la AIE

Aunque se han presentado los notables beneficios que aportan los programas de respuesta de la demanda, a la hora de realizar su implementación práctica, éstos se han encontrado con algunos inconvenientes para que esta respuesta sea efectiva. Las principales barreras a la hora de implantar dichos programas se analizan en los siguientes apartados. Es objeto de esta tesis diseñar e implementar herramientas que las disminuyan y faciliten la integración de estos programas en los sistemas de los distintos agentes implicados en los mismos.

Por otro lado, cabe destacar que no todo son ventajas, sino que existen ciertos riesgos de incorporar la respuesta de la demanda a la operación del sistema:

- Los sistemas son más complejos de controlar.
- Existe cierta dificultad en el diseño de los productos económicos a utilizar.
- Es escasa la potencia ofertada de consumidores operables.
- Puede existir una gran dispersión en la ubicación geográfica de los consumos.
- Presentan un alto coste económico inicial.
- La respuesta de consumidores individuales tienen un alto grado de variabilidad e incertidumbre.
- Son respuestas muy dispersas en la red de distribución por lo que aumenta la incertidumbre del servicio que finalmente percibe el sistema.

- Los consumidores difícilmente pueden ofrecer garantías de permanencia de su oferta de operación a medio y largo plazo.

2.3.1 Programas de respuesta de la demanda

Uno de los pilares de una participación efectiva de la respuesta de la demanda por parte de pequeños y medianos consumidores reside en la existencia de unos productos estructurados que favorezcan dicha respuesta. Este tipo de programas se han ido desarrollando tanto en Europa como en Estado Unidos durante la última década [27]-[31].

A continuación, se explican distintos tipos de programas, implementados en Estados Unidos, en los que se permite al consumidor tomar la decisión final de modificar su consumo, lo que servirá para analizar las distintas modalidades posibles y posteriormente identificar las dificultades encontradas a la hora de implementarlos.

Programas con opciones especiales de precios

Dentro de este tipo de programas puede distinguirse [27], por una parte, los *Basados en facturación en tiempo real*: Estos programas ofrecen información horaria del precio de mercado, lo que permite a los consumidores modificar su consumo según los precios. Algunas variantes ofrecen una tarificación por partes, incluyendo una parte fija a la tarifa estándar y una parte a precio real del mercado (para todo consumo superior a un límite especificado). Un ejemplo de este tipo de programas es el *Real Time Pricing* de Georgia Power. Por otra parte, existen otros programas basados en *Tarificación por periodos*, éstos son variaciones de las tarifas por tramos horarios tradicionales, donde existen tarifas fijas diferentes para periodos punta, llano y valle, pero en las que además se consideran unos días especiales (días de evento) en los que existen precios más elevados. El administrador del programa determina los días de evento, según sus previsiones y necesidades, y lo notifica a los consumidores con un día de antelación. Los precios durante los periodos punta de estos días son mucho más elevados que el resto de días.

Programas que ofrecen pagos por reducción de carga

Los administradores de estos programas, sean empresas suministradoras, agregadores, operadores de sistema, etc., utilizan estas reducciones para participar en los mercados de balances, de servicios complementarios o para resolver restricciones técnicas. Dentro de los programas de este tipo se pueden distinguir aquellos que presentan *reducciones voluntarias* en donde el administrador del programa notifica a los participantes el período en el que se solicitan las reducciones y el precio al que se retribuirán. El participante decide si le interesa o no reducir su consumo según el precio ofertado y comunica su decisión al operador. En este tipo de programas no se perciben pagos por capacidad y no se aplican penalizaciones por no participar en las

reducciones. También, existen aquellos en los que las *reducciones son obligatorias*. En éstos, una vez el administrador del programa ha notificado el período en el que se solicitan las reducciones, los consumidores participantes están obligados a reducir su carga en la cantidad acordada, si no la reducen son penalizados. Ejemplos de los primeros son el *Emergency Demand Response* (NYISO) [28] y el *Emergency Load Response* (PJM) [29]. Un ejemplo de los segundos puede ser el *Demand Response* (ISO-NE) [30].

Programas que ofrecen pagos por producción con generación distribuida

La generación distribuida en las instalaciones de los consumidores ofrece grandes posibilidades de participación en los mercados. Este tipo de programas retribuye la producción de estos generadores o la reducción total de carga debida al autoconsumo de la generación en determinados eventos, habitualmente notificados con varias horas de antelación.

Para este tipo de programas es habitual que se utilicen los generadores de emergencia disponibles en las instalaciones de los consumidores industriales o comerciales grandes. Un ejemplo de este tipo de programa es *Rolling Blackout Reduction de SDG&E* [31].

Programas que ofrecen la participación directa en el mercado

Estos programas actúan como intermediarios entre el mercado mayorista y los consumidores facilitando así su participación.

Los administradores del programa presentan las ofertas agregadas de los consumidores en los mercados. Estas ofertas incluyen habitualmente ofertas de reducción de energía en períodos de una o más horas a unos precios especificados normalmente en el contrato. Si las ofertas son aceptadas en el mercado, el administrador lo notifica a los participantes. Un ejemplo de este tipo de programa es el *Economic Load Response de PJM* [32].

2.3.2 Barreras en la implementación de programas de respuesta de la demanda

A la hora de realizar la implementación práctica de la participación de la demanda en un determinado sistema, a través de los distintos programas descritos en el apartado anterior, se han encontrado importantes dificultades que han impedido obtener los resultados deseados. Estas barreras han sido identificadas y estudiadas en varios proyectos internacionales y cabe destacar la labor realizada por la Agencia Internacional de la Energía en diversos proyectos de DSM [21] y [22]. Teniendo en cuenta estos estudios y la experiencia adquirida en otros proyectos [24] es posible clasificar los

principales factores que disminuyen la aceptación o la satisfacción de los resultados de los programas en [9]:

- Tecnológicos.
- Económicos.
- Regulatorios o de estructura de mercado.
- Culturales.

Algunas de estas barreras dependen del país que se pretenda analizar y otras son generales. De esta manera las barreras tecnológicas no dependen del país pues si la tecnología se ha desarrollado en algún lugar del mundo se supone que está disponible para cualquier país aunque sí varían los costes de esta misma tecnología de un lugar a otro. En cambio, la diferencia de precios de cada mercado, provoca que las barreras de coste sean características de cada país. Las barreras culturales también están influenciadas por la historia energética del país. En algunas regiones han existido anteriormente más opciones en el sector energético o se han soportado fuertes crisis energéticas que han provocado que los consumidores sufrieran los efectos de los elevados precios, o situaciones similares que hacen que los consumidores sean más proclives o menos a la participación de la demanda. Por último, la regulación y la estructura del mercado de cada país pueden suponer barreras que son específicas para cada región.

Barreras tecnológicas

Entre las barreras tecnológicas cabe distinguir las que hacen referencia a generación distribuida y almacenamiento (que aumentan las posibilidades de participación en la demanda) y las relativas a control y monitorización.

Considerando las relativas a la generación distribuida, la principal barrera es la dificultad de conseguir instalaciones de pequeña capacidad a un precio asequible. En el caso del sector industrial el problema es menor pues las capacidades son más elevadas y la generación de emergencia es habitual. Pero en el caso comercial, los generadores no son tan habituales (normalmente sólo existen en grandes consumidores comerciales pero no en pequeños y medianos) y menos aún en el caso residencial.

En relación al almacenamiento de energía, la industria ofrece almacenamientos de frío, calor radiante y almacenamiento solar, así como sistemas de alimentación interrumpida para equipos electrónicos. Por lo tanto, la tecnología está disponible, aunque el precio puede resultar elevado.

Por otro lado, la monitorización de las cargas supone una de las barreras más importantes, sobre todo en los sectores residencial y comercial. La participación de la demanda en los mercados requiere equipos de medida que sean como mínimo horarios. La mayoría de clientes industriales ya poseen estos medidores por lo que no precisarían de una inversión adicional. Pero estos equipos no se encuentran disponibles en la mayoría de consumidores comerciales y residenciales, por lo que sería necesario

instalarlos con su correspondiente coste. Además, estas medidas deben de poder transmitirse a un centro de control que gestione los diferentes integrantes del programa.

En el caso del control de las cargas, puede realizarse de manera remota o manualmente en respuesta a una señal. En este último caso, no es necesario el equipo de control pero sí un sistema de comunicación que permita recibir las señales (precios, mensajes de alerta, etc.). La expansión de Internet en comercios y hogares ha reducido considerablemente esta barrera, pero es necesario el desarrollo de un software adecuado que proporcione las funciones necesarias para realizar dicho control.

Esta tecnología de control puede utilizarse tanto externamente (por ejemplo, controlada por un agregador) como internamente (controlada por el mismo consumidor) y en el caso de consumidores residenciales puede incluir, por ejemplo, control cíclico de aire acondicionado y algoritmos de optimización de uso de electrodomésticos. En el sector industrial, el control remoto externo no es bien percibido por los consumidores por la preocupación de perder el control de su producción, por lo que es necesario que éstos dispongan de las herramientas necesarias para conocer en cualquier momento el estado de sus instalaciones y no presenten desconfianza en el programa [25].

En resumen, la tecnología necesaria para la participación de la demanda está disponible en el mercado aunque los precios pueden ser elevados. En este sentido la barrera tecnológica está fuertemente vinculada a los costes: una tecnología puede no resultar económica para los beneficios conseguidos en un determinado mercado pero sí en otro donde los precios sean mayores. Sin embargo, queda patente que aunque el hardware está disponible, deben desarrollarse las aplicaciones del mismo y desarrollar los programas software necesarios para poder implantar las funciones requeridas en los distintos programas en todos sus participantes.

Por todo ello, es necesario desarrollar, y es objeto de este trabajo, un sistema que permita a los consumidores conocer mejor sus instalaciones y que desde el punto de vista tecnológico facilite la respuesta de la demanda. Para ello, en el Capítulo 4, se propone un sistema, con protocolos definidos, que permite participar a los distintos agentes de un sistema eléctrico, integrar distintos consumidores, conocer sus cargas y establecer un lugar común de información para los administradores que dirigen los programas y los consumidores. En definitiva, un lugar en donde se pueda encontrar toda la información necesaria para la gestión de sus acciones por parte de los distintos participantes y además facilite el envío de acciones de control a las distintas instalaciones.

Barreras económicas

La rentabilidad de la participación de la demanda se presenta como el factor más relevante, sobre todo en el caso de los sectores comercial e industrial. En estos sectores si la participación no resulta rentable el consumidor no participará. El caso residencial es algo diferente. Los bajos costes que representa el consumo energético respecto al total del hogar junto a las posibles inclinaciones político-sociales hacen que

factores como la preocupación por el medioambiente, la apuesta por las nuevas tecnologías o simplemente el hecho seguir las últimas tendencias resulten de mayor peso en la decisión del consumidor.

Dejando de lado el sector residencial, los principales problemas respecto a los costes en la participación de la demanda son las inversiones adicionales que se requieren para la instalación de sistemas de medición, control y comunicación. El problema es más acuciante en los consumidores pequeños (tanto industriales como comerciales) pues no es habitual que existan sistemas ya instalados y los costes pueden superar los beneficios obtenidos. Los grandes consumidores tienen más oportunidades de participación con mayores volúmenes, lo que supone mayores beneficios. Por otra parte, los costes de instalación no son proporcionales al tamaño, siendo los costes mínimos bastante elevados y por lo tanto no rentables debido a los reducidos beneficios que aporta una instalación pequeña. Pero hay que tener en cuenta que estos beneficios dependen directamente de los precios de la electricidad y, por lo tanto, lo que puede no ser rentable en un determinado momento en un mercado concreto, puede llegar a serlo si los precios de la energía se incrementan.

Los costes energéticos y beneficios que pueda reportar la participación de la demanda dependerán en gran medida de la estructura del mercado y las posibilidades existentes para el consumidor. La convivencia en algunos países del libre mercado con la posibilidad de acogerse a tarifas que son menores a esos precios (como es el caso actual del mercado español) supone una barrera casi definitiva a la participación de la demanda. De la misma manera la proliferación de contratos de tarifa plana también supone una importante barrera (en estos momentos muchos de los comercializadores españoles ofrecen contratos de tarifa plana a sus grandes clientes).

Al analizar los beneficios de cada consumidor que participa en un determinado programa, es muy importante valorar si la participación de la demanda es rentable o no, por lo que es necesario cuantificar cuál ha sido la respuesta de un determinado consumidor, es decir, se debe conocer la reducción real de éste frente a una determinada señal de interrupción. Por tanto, debe ser posible establecer una retribución adecuada de la acción para el sistema (para el consumidor y para el gestor del programa). Así, será posible establecer la valoración de las acciones de los acuerdos pactados como fruto de los programas de demanda que se establezcan.

Por todo ello, es necesario establecer un mecanismo efectivo y aceptado tanto por consumidores como por los otros agentes del sistema eléctrico para valorar las respuestas de los primeros frente a una petición del administrador del programa. Así, para realizar un correcto cálculo de la reducción es necesario, en primer lugar, medir de forma adecuada y rentable el consumo real de cada consumidor y por otro lado poder calcular una estimación fiable del consumo habitual, aquel que se hubiera dado de no realizar ninguna acción de control por parte del consumidor como respuesta a una llamada del sistema, en un determinado periodo de tiempo, conocida como *baseline*. Es por tanto, objetivo de este trabajo desarrollar e implementar un método de cálculo de la predicción del perfil del consumo en un punto del sistema del que se obtengan

resultados fiables que sirvan como base en los mecanismos de retribución de los programas que se planteen.

Barreras estructurales y legales

Diferentes estructuras de mercado ofrecen diferentes posibilidades para la demanda o incluso pueden suponer restricciones a su participación.

Así, por ejemplo, la posibilidad legal de los consumidores de permanecer a tarifa con precios menores a los precios de mercado existente en España supone un obstáculo para la participación de la demanda.

Adicionalmente, los pequeños consumidores encuentran limitaciones para participar directamente en los mercados debido a que existen unos volúmenes mínimos requeridos para poder acceder. Para que se dé su participación se hace indispensable la intermediación de agregadores y para ello la estructura tanto del mercado como del sistema tecnológico debe permitirlo.

También, hay que considerar que la remuneración de las actividades reguladas puede afectar a la expansión de la respuesta de la demanda. Por ejemplo, una remuneración de la distribución que no incentive la mejora de la fiabilidad del sistema y que esté basada en la energía suministrada provocará que los distribuidores no estén interesados en la respuesta de la demanda [26].

En resumen, las reglas de mercado pueden favorecer o mitigar la participación de la demanda tanto directamente en el mercado como en la creación de productos de respuesta de demanda.

Barreras culturales

Pese a la liberación de los mercados, en la mayoría de los casos, el consumidor final sigue entendiendo el suministro eléctrico como un servicio público y no como un producto. Este hecho hace que considere como un derecho recibir todo el suministro que quiera de manera continua y a un bajo precio. La reacción a los precios es nula y la posibilidad de respuesta de la demanda ni siquiera es considerada por el consumidor. El sector industrial ha sido históricamente más entendido en el tema y muchos consumidores tratan el suministro eléctrico como el suministro de otras de sus materias primas, lo que les aporta la visión de producto necesaria. La participación histórica del sector industrial en tarifas interrumpibles crea precedentes que facilitan su evolución hacia el nuevo enfoque de la participación de los consumidores, aunque en muchas ocasiones simplemente lo ven como un coste proporcional a cantidad de energía que consumen y no a la forma de consumirlo.

Por otro lado, la respuesta de la demanda necesita un importante cambio en el enfoque de unos consumidores que normalmente oponen resistencia a cualquier tipo de cambio.

Por último, otro aspecto a considerar es que la participación supone facturas eléctricas más complejas que las correspondientes a tarifa y los consumidores tienden a no fiarse de facturas que les resultan difíciles de comprender.

Para superar estas barreras es necesario reeducar a los consumidores y para ello los proyectos de demostración resultan una herramienta eficaz. Igualmente, el asesoramiento y asistencia a los consumidores durante la participación es fundamental.

Así, en resumen, de las barreras presentadas en los párrafos anteriores, se deducen los objetivos de esta tesis. En este trabajo se diseñan nuevas herramientas que permitan reducir algunas de las barreras expuestas, haciendo especial énfasis, como se ha comentado, en las tecnológicas y las económicas:

- Para salvar las barreras tecnológicas, se diseña e implementa un sistema de gestión integral, que permita interaccionar a todos los agentes del sistema y facilitar las acciones de cada uno de ellos dentro de un determinado programa.
- En cuanto a las económicas, como base para facilitar la retribución de las acciones planteadas, es necesario realizar la predicción del perfil del consumo de un determinado cliente para un periodo dado, para lo que se diseña e implementa un método de cálculo de la *baseline* que aporte resultados satisfactorios y se pueda integrar fácilmente dentro del sistema desarrollado.

2.4 Otros beneficios de la respuesta de la demanda

Además, de los beneficios expuestos anteriormente, el sistema se puede beneficiar de la participación de la demanda en estos otros aspectos, que también pueden traducirse en señales de precios, como son:

- Mejora de la eficiencia energética.
- Proporcionar un mecanismo de garantía de suministro.
- Aumento de la capacidad en condiciones normales del sistema.
- Disponibilidad de capacidad en condiciones de emergencia.
- Reservas de operación.
- Regulación de tensión.
- Balance del flujo de carga.
- Reducción de pérdidas.

En este sentido, en los siguientes apartados se hace hincapié, por su importancia, en dos de ellos: la mejora de la eficiencia energética y la mejora de la garantía de suministro.

2.4.1 Mejora de la eficiencia energética

En primer lugar, hay que entender que la *eficiencia energética* pretende mantener niveles de servicio similares a los existentes reduciendo significativamente el uso de energía. De forma colateral, la *conservación energética* pretende un menor uso de recursos energéticos mediante cambios en el comportamiento de los usuarios.

Una mejora en la eficiencia energética se puede conseguir reduciendo el consumo de energía mediante equipos, edificaciones e instalaciones altamente eficientes y cambios en los patrones de consumo, aunque son muchas las medidas a adoptar para aumentar la eficiencia energética:

- Introducción de iluminación y electrodomésticos eficientes.
- Utilización de sistemas de climatización automáticos.
- Adquisición de motores eficientes.
- Proporcionar incentivos y financiamiento para tecnologías.
- Desarrollo de auditorías energéticas.
- Información y capacitación.
- Inversión en I+D+I.
- Introducción de las energías renovables.
- Implantación de estándares y normas para electrodomésticos y construcciones.
- Desarrollo de programas innovadores.
- Implementación de programas de nuevos incentivos para distribuidores.
- Aplicación de programas de promoción, capacitación y entrenamiento para usuarios finales y distribuidores.

Además, una de las fórmulas para aumentar la eficiencia energética de un determinado sistema eléctrico puede basarse claramente en acciones de respuesta de la demanda. Las relaciones que pueden establecerse entre la respuesta de la demanda, la conservación y la eficiencia energética son:

- A través de la eficiencia se puede reducir la demanda incluyendo horas pico.
- En busca de reducir demanda en horas pico se pueden identificar usos innecesarios o ineficientes de energía.
- Tecnologías adquiridas para disminuir demanda en horas pico pueden permitir ahorros permanentes.
- La Respuesta de la Demanda puede crear una conciencia en el consumidor sobre el uso de energía y oportunidades de ahorro.

- Usuarios comprometidos con la Respuesta de la Demanda (que cuenten con sistemas de monitorización y control) pueden tener una mayor disposición para participar en programas de Eficiencia Energética.

Aunque es evidente la relación entre la respuesta de la demanda y la eficiencia energética, siendo fácil la aparición de sinergias entre ellas, es posible que aparezcan ciertos conflictos, tales como:

- Confusión en conceptos, objetivos y estrategias.
- El mercado de reducciones con precios dependiendo de la línea base desincentiva programas de Eficiencia Energética permanentes.
- Programas de Respuesta de Demanda basados en precios pueden estimular un mayor uso en horas no pico.

2.4.2 La respuesta de la demanda como mecanismo de garantía de suministro

En el sistema eléctrico es necesario un mecanismo de garantía de suministro que contribuya eficazmente a estabilizar los precios de casación de los generadores marginales, segmento dónde se concentran los equipos nuevos del sistema, y a consolidar un margen de reserva suficiente, que en el caso ibérico implica unidades térmicas de baja utilización. Incentivar un comportamiento competitivo de los generadores es al final el mejor camino para garantizar el suministro de manera sostenida.

Es probable que los generadores principales del mercado español, dotados de una planificación de generación diversificada y con significativas proporciones de su oferta en franjas infra-marginales, propongan eliminar o desnaturalizar cualquier mecanismo de garantía que facilite la competencia y permita una trazabilidad de sus estrategias de oferta. Les será más rentable renunciar a ingresos provenientes de estos mecanismos para ganar en libertad de acción y gestionar el margen de reserva de forma que la utilización de sus centrales no se vea mermada.

Es claro que el sistema, necesita de un mecanismo de garantía de suministro que contribuya eficazmente a estabilizar los flujos económicos de los generadores marginales y a consolidar un margen de reserva suficiente.

En resumen, dado el limitado grado de interconexión de la península con otras redes y las especificidades de la oferta en cuanto a tecnologías disponibles y grado de concentración, parece necesario contar con un mecanismo de garantía de suministro que fomente la disponibilidad de la oferta y su puesta a disposición en el mercado diario, única referencia fiable de los precios horarios y, a la postre, para los mercados a plazo.

La teoría económica establece que en un mercado de competencia completa el precio de equilibrio se obtiene cuando las ofertas de los generadores se aproxima a sus

costes marginales, de manera que el mecanismo de garantía de suministro que se considera debe asegurar que las unidades marginales reciben una retribución suficiente sin entorpecer una formación de precios horarios competitivos.

El mecanismo de garantía debe, por un lado, estimular una participación competitiva de la oferta en el mercado diario, asegurando una retribución complementaria para las unidades que lo precisen, y por otro, facilitar la presencia en el mismo de demanda elástica.

Los reguladores, en principio, no se preocupan de los problemas relacionados con la falta de la elasticidad de la demanda y con los fallos competitivos del mercado de producción. Estos problemas pueden ser mitigados por un mecanismo de garantía de potencia apropiado.

Por otro lado, no hay que olvidar que los precios tope tienen la virtud de corregir algunas de las consecuencias derivadas de la falta de elasticidad de la demanda eléctrica.

La contratación a plazo no puede plantearse como la respuesta a la necesidad de una garantía de suministro. Sin menospreciar la utilidad que tiene para la oferta y la demanda la posibilidad de cerrar un precio por adelantado, la experiencia de los mercados europeos, dónde la mayor parte de los suministros se contratan a plazo, muestra que su propia existencia no aporta elementos explícitos de garantía al sistema, a la vez que plantean nuevos retos al funcionamiento y a la transparencia del mercado.

Algunos de los problemas que plantea la contratación a plazo de la electricidad en relación a la garantía de suministro son:

- La respuesta de la demanda se hace más insensible ante las situaciones de escasez. Los consumidores que tienen asegurado un precio no se sienten preocupados ante problemas en el suministro. El mercado diario, aún siendo el patrón de referencia de los contratos a plazo, al quedar relegado a una función de ajuste, refleja una mayor volatilidad, desconectada de las puntas del sistema (poco educativa, por tanto para los consumidores) y, mas bien, consecuencia de tensiones entre una oferta y una demanda residual, generalmente en manos de pocos operadores.
- En los mercados a plazo, los operadores tradicionales ocupan el grueso de las transacciones. Por un lado tienen la capacidad de regular la emisión de contratos nuevos y, por otro, pueden generar demanda sobre los existentes en circulación mediante compras y ventas sucesivas, mediante estrategias de orientación de los precios.
- Los agentes meramente financieros de los mercados a plazo, si bien aportan liquidez, crean una volatilidad excesiva, ajena muchas veces a las expectativas de escasez, pues sus operaciones están relacionadas con expectativas de revalorización o de arbitraje con otros mercados de combustibles y emisiones.
- En este contexto, la demanda final se ve poco favorecida, pues al no estar capacitada para comprar y vender de manera continua, sólo puede acudir al mercado a

plazo una sola vez (lo más que puede hacer es fraccionar sus compras en el tiempo), sin capacidad de influir en el precio.

También, hay que considerar que las centrales térmicas situadas en franjas infra-marginales (carbón o nuclear) no deben ser objeto de un mecanismo de garantía de suministro, ya que al estar interesadas a su vez en maximizar su disponibilidad en las horas de mayor retribución, en el caso de que sus actuaciones fueran dudosas sería necesario ser objeto de inspección por parte de las autoridades regulatorias o de competencia.

Con todo ello, la respuesta de la demanda, puede formar parte de un mecanismo de garantía eficaz para el sistema, ya que, con el control adecuado, es posible obtener respuestas rápidas y de potencia considerable, obteniendo así todos los beneficios de disponer de una demanda elástica.

Por último, respecto a la demanda, es necesario que el Operador del Sistema evalúe con suficiente antelación cuál es el volumen recomendable de demanda interrumpible y qué modalidades deben poder aplicarse. No debe de considerarse un servicio excepcional, pues el consumidor podría estar dispuesto a interrumpir en cualquier momento, siempre que se le diera la capacidad de decisión para hacerlo, valorando así el precio y el tiempo de las interrupciones.

2.5 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se ha analizado la evolución que ha sufrido a lo largo del tiempo el concepto de *respuesta de la demanda* (RD), tanto desde el punto de vista tradicional, en sus orígenes, como en la actualidad, con la liberalización de los mercados eléctricos. Así, hoy en día, se considera la participación activa o *respuesta de la demanda* a todo lo que conlleve la participación de los consumidores en los procesos de obtención de precios, mediante la utilización de mecanismos basados en la posibilidad y capacidad de consumir o no consumir según el precio de la energía. Además, se han presentado los indudables beneficios que, para el sistema en general y para cada uno de los agentes del sistema eléctrico, aporta.

Posteriormente, del análisis de distintos programas desarrollados en la actualidad, se han presentado los problemas detectados en su implantación que han motivado que los resultados obtenidos hasta el momento no hayan sido los esperados.

De entre las barreras detectadas en la implantación de los programas de demanda, por su importancia, esta tesis se centra en dos de ellas, las tecnológicas y las económicas. Para intentar mitigarlas, se propone el desarrollo de nuevas herramientas que faciliten dicha integración, como son:

- Diseño e implementación de un sistema de gestión integral, de forma que todos los agentes del sistema eléctrico puedan acceder a él y que facilite la integración de distintas acciones necesarias para realizar una gestión de la demanda dinámica y

efectiva. Se abordarán los aspectos técnicos, con la elección de la tecnología disponible adecuada y diseño de la arquitectura de control. Además, se hará especial hincapié en el desarrollo de aplicaciones software que aporten las funciones necesarias para que el sistema desarrollado sea una herramienta eficaz para la implantación de dichos programas de respuesta de la demanda.

- Desarrollo de las herramientas necesarias que permitan una retribución de las acciones de forma adecuada y clara, para lo que se diseñará un método de cálculo de la predicción del consumo eléctrico o *baseline* en un determinado punto de suministro de forma que permita valorar la bondad de la respuesta del consumidor frente un determinado evento. Así, junto con la medida del consumo real realizada por el sistema de gestión, será posible establecer la reducción real conseguida como respuesta del cliente a las señales del sistema.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE: SISTEMAS DE GESTIÓN Y CONTROL

3.1 Introducción

De entre las principales barreras detectadas para la implantación de programas de respuesta de la demanda están aquellas relacionadas con los aspectos tecnológicos para poder llevar a cabo las distintas acciones en los clientes y la gestión de las mismas. En este capítulo se estudia la situación actual de los sistemas de control existentes. Se describen tanto las características hardware de los sistemas de control comerciales que permiten actuar sobre las instalaciones de los clientes y tratar la información necesaria para la correcta gestión de las actuaciones, como las aplicaciones software disponibles en la actualidad en la mayoría de sistemas.

Se analizan las características de los sistemas de control existentes, arquitecturas, protocolos de comunicación más utilizados, etc., que servirán como punto de partida para definir, en el Capítulo 4, un sistema de gestión global que facilite la integración de todos los participantes (comercializadores, agregadores, empresas suministradoras, etc.) en los programas de respuesta de la demanda y que resuelva las barreras detectadas.

Una vez analizados los sistemas de gestión actuales, se identifican cuáles son las necesidades adicionales que debe aportar el nuevo sistema de gestión integral y se plantea su integración con los ya existentes en las distintas instalaciones.

3.2 Características de los sistemas de gestión actuales

Como se ha comentado en el capítulo anterior, una herramienta fundamental para facilitar la integración de los programas de respuesta de la demanda es el desarrollo de un sistema de gestión que integre las distintas necesidades de monitorización y control de dichos programas y, adicionalmente, aporte aquellas funciones necesarias para el desarrollo de éstos.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas de control instalados en los distintos tipos de clientes¹. Muchas son las empresas del sector como Siemens, Honeywell, Johnson&Control, etc., que desarrollan sistemas de gestión y control. El principal inconveniente que se presenta es que las aplicaciones desarrolladas se centran en el control de las instalaciones de un edificio, o conjunto de edificios localizados. Para la gestión de la respuesta de la demanda es necesario pensar en un sistema que integre gran cantidad de consumos, que pueden estar alejados entre sí.

Los sistemas actuales se centran en gestionar de forma integrada las instalaciones presentes en los edificios, lo que supone tenerlas todas ellas bajo la tutela de un único sistema que [35]:

- Permite la supervisión, la automatización y el control específicos de cada una de las instalaciones.
- Posibilita el intercambio de todo tipo de informaciones y actuaciones entre instalaciones, siempre aprovechando la infraestructura de comunicaciones propia del sistema.
- Tiene a su cargo los equipos e instalaciones de carácter electromecánico central tales como aire acondicionado, calefacción, ventilación, fontanería y saneamiento. También, gestiona los centros de transformación, cuadros eléctricos de distribución, cuadros de zonificación, integra las instalaciones de detección y extinción automática de incendios y actúa sobre la instalación de circuito cerrado de televisión.

Los distintos sistemas de gestión comerciales tienen muchos puntos en común. Generalmente, son una solución tecnológica basada en un conjunto de procesadores inteligentes distribuidos, cada uno de ellos con autonomía propia pero todos, en conjunto, intercambiándose la información que en cada momento necesitan.

En cada procesador distribuido residen los programas de aplicación, dedicados a cada equipo a controlar, para llevar a cabo las funciones de monitorización, de automatización, de regulación (control digital directo) y de gestión del consumo energético específicamente sobre los equipos encomendados.

Todos los datos, procedentes de todos los procesadores distribuidos, se encaminan – vía tarjetas de comunicaciones – a una base de datos común, en donde se procesan y preparan para su salida al mundo exterior. Esta base de datos es manipulada por una estación gráfica, al servicio de los operadores del sistema. En la central gráfica residen un conjunto de programas de enlace operador-sistema, encargados de hacer transparente, cómoda y sencilla la petición y el análisis de los datos e informes que facilita el sistema (procedentes de todos los subsistemas integrados).

¹ Es común que existan, tanto en los clientes industriales como en los comerciales de tamaño medio o grande, implantados sistemas de control de sus instalaciones. Además, en los últimos años, con el desarrollo de la domótica, es cada vez más frecuente que incluso los clientes residenciales dispongan también de un sistema de control en las suyas.

El operador, desde la estación gráfica, puede recabar información, actuar sobre cualquiera de los puntos integrados en el sistema de gestión, con las salvedades de acceso e intervención sobre ciertos subsistemas y puntos que se especifican cuando se definen los niveles de acceso y prioridades que se asignan a los varios operadores del sistema. La información puede referirse a lo que está ocurriendo, en tiempo real, en los diferentes subsistemas y también puede ser de tipo histórico, relativa a lo que sucedió en un período de tiempo seleccionado. Habitualmente, aunque necesariamente no tiene por qué ser así, todo el sistema puede funcionar aún sin estar disponible la estación gráfica, los controladores distribuidos pueden seguir comunicándose entre ellos y gestionando cada equipo según su programa. La estación gráfica se dedica, principalmente a funciones de monitorización, gestión de horarios, presentación de históricos, etc.

Suelen ser sistemas que tratan igualmente tanto a una unidad de tipo central como a un equipo terminal individual. Cada uno de los ambientes tratados con unidades terminales debe poder ser objeto de monitorización, automatización (adaptación a horarios) y control, desde las consolas de operador del sistema.

En el mercado existen distintas soluciones, con equipos que se comunican entre sí con distintos protocolos de comunicación. En algunos de ellos, es necesario realizar una instalación dedicada para ellos, con un cableado físico específico, aunque existen otros que utilizan ciertos estándares que permiten comunicar muchos equipos incluso de fabricantes distintos.

Los sistemas de gestión en general se diseñan para conseguir una mejor gestión en los sistemas que controlan, a través de [35]:

- Aumentar la productividad
- Disminuir los costes
- Disminuir el riesgo
- Mejorar la conformidad
- Aumentar la flexibilidad

Aumentar la productividad

Este objetivo se alcanza al integrar conjuntamente todos los sistemas del edificio, al crear procedimientos estándar para todas las instalaciones del edificio y usar el sistema de gestión para fortalecerla. También, se reduce el periodo de entrenamiento del operador al poder gestionar todos los sistemas a través de una única plataforma y minimizar todas las tareas de administración a un único sistema. Estos sistemas se diseñan desde el punto de vista del usuario para que sea fácilmente manejables, con potentes gráficos, distintas formas de controlar los parámetros, etc.

De las funciones más relevantes que disponen en general cabe destacar:

- Disponibilidad de creación de gráficos animados.

- Información de alarmas.
- Habitualmente es posible acceder al servidor central en una estación dedicada o a través de un explorador Web
- Se consigue disponer de información relevante de los sistemas como generación de históricos y tendencias, informes flexibles utilizando las plantillas existentes o diseñadas por el usuario, análisis de consumos, publicación de ciertos datos en Web para consulta del resto de la organización, históricos de los eventos que se producen en el sistema, etc.

Disminuir los costes

Los sistemas de gestión para reducir costes intentan ser sistemas abiertos que permitan la integración de distintos elementos hardware, provenientes de diversos fabricantes, lo que facilita la competencia entre ellos y no forzar el uso de un producto en exclusiva que pueda ejercer una posición de fuerza.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es la integración de toda la organización en un mismo sistema, favoreciendo así las interrelaciones entre ellos y las sinergias que puedan surgir.

Otro punto a considerar para la reducción de costes es el mejor uso de la energía a través de la identificación de los perfiles de uso que se puede lograr con el análisis de tendencias. Así, es posible el uso de los distintos equipamientos de forma eficiente, indicando correctos periodos de uso, gestión de tiempos de mantenimiento de forma automática, etc.

Disminuir el riesgo

A través de un sistema de gestión es posible implementar una solución de seguridad en las distintas instalaciones, capaz de integrarse con el sistema de seguridad del edificio para proporcionar notificaciones automáticas de cualquier problema en el sistema y facilitar distintas funciones como pueden ser el apagado de una parte del proceso, permitir el control y monitorización remota de las instalaciones, gestionar el acceso del personal a los edificios por medio de asignación de permisos, realizar el control de accesos, localización de movimiento en determinadas zonas restringidas, etc. Reduce la exposición al riesgo al integrar todo los aspectos juntos de un edificio, proporciona alarmas para ayudar al operador del edificio y aporta históricos para analizar y prepararse para la resolución de problemas.

Con el uso de los sistemas de gestión es habitual que las alarmas se pueden manejar de forma eficiente y ordenada generando históricos, con posibilidad de priorizar las alarmas, fácilmente manejables, que pueden mandarse por vías alternativas como por teléfono, SMS y e-mail. Al producirse una alarma puede realizar un registro de unas variables que se definan, provocar una determinada acción, etc.

Mejorar la conformidad

Son sistemas que mejoran la conformidad en los sistemas por medio de distintas funciones como proveer distintos informes de datos históricos, la automatización de procedimientos de operaciones estándar, proporcionar privacidad personal y firmas electrónicas, revisar todas las acciones de control con las firmas del usuario que las ha realizado, etc. Es por tanto muy útil para entornos altamente regularizados, en los que se consigue evitar duplicidad de datos, se minimizan los errores de información y actualizan todos los datos simultáneamente a toda la organización.

Aumentar la flexibilidad

Estos sistemas intentan estar diseñados de forma que sean fácilmente escalables, es decir, permiten el crecimiento progresivo del sistema desde un simple servidor con una pequeña aplicación hasta sistemas realmente complejos, con múltiples servidores y múltiples aplicaciones. Posibilitan la unión de todas las aplicaciones para crear un único sistema, establecer una red de comunicaciones como columna vertebral y facilitar la conexión con otros sistemas. Además, permiten el aumento progresivo del número de equipos conectados, por lo que facilita el crecimiento del sistema según las necesidades con una arquitectura distribuida, lo que facilita la integración de distintas redes proporcionando un alto nivel de fiabilidad con el uso de servidores redundantes.

Como punto de partida para el desarrollo de un sistema de gestión integral que facilite la respuesta de la demanda, se deben estudiar y tener en cuenta las características de los sistemas de gestión existentes en la actualidad, ya que muchas de las funciones serán comunes en dichos sistemas.

Según se ha comentado, muchos son los fabricantes disponibles en el mercado que ofertan distintos productos. Debido a la alta competencia en el sector de la automatización, todos ellos presentan características muy similares para ofrecer a sus clientes todas las prestaciones que la tecnología del momento permite.

Por todo ello, en los próximos apartados se presentan las características principales de un sistema de gestión tipo, comunes en la mayoría de sistemas existentes en el mercado. Como sistema a estudiar en profundidad, se elige el sistema disponible por la firma comercial Honeywell, por contar con una importante experiencia en dichos sistemas por parte del autor.

3.3 Arquitectura de un sistema de gestión

Como se ha comentado, existen distintas arquitecturas disponibles en el mercado, en general todas ellas presentan características comunes ya que todas las firmas comerciales intentan aprovechar al máximo las posibilidades de la tecnología

disponible. Por tanto, en este apartado se presenta en detalle la arquitectura genérica de un sistema de gestión y control (SGC).

El SGC presenta una arquitectura Servidor/Clientes. Es una arquitectura modular que se acomoda a distinto tipo de configuraciones: Desde casos donde haya un solo servidor hasta situaciones donde se necesiten varios servidores y puestos de trabajo interconectados a través de LANs¹ ó WANs².

En el Servidor residen los paquetes de aplicación encargados de comunicar con los procesadores de campo y de actualizar las bases de datos de tiempo real y relacional. El servidor del SGC actúa también como servidor de ficheros donde residen las pantallas, los gráficos y las imágenes. Los puestos de trabajo constituyen el enlace de tipo gráfico, entre el operador y el servidor.

Un operador utiliza el puesto de trabajo para realizar tareas tales como:

- Ver y responder a las alarmas.
- Planificar el funcionamiento de los equipos.
- Configurar los puntos hardware y software de la base de datos del SGC correspondientes a los procesadores conectados.
- Ver, manipular y analizar los datos registrados procedentes de los distintos procesadores.

Según las aplicaciones específicas, puede diseñarse diferentes arquitecturas, redundante, con servidores distribuidos, etc.

Arquitectura Redundante

En los casos que requieran una tolerancia alta al fallo, el SGC puede configurarse para operar de manera redundante en arquitectura de alta disponibilidad, con respaldo en caliente. Para conseguir este alto nivel de fiabilidad se montan dos servidores: uno para trabajar como principal y el segundo como respaldo del primero.

Si en el principal se encuentra un problema, el de respaldo y sin perder ningún dato, asume automáticamente el control en un corto periodo de tiempo (habitualmente menor a 1 minuto). El SGC también puede soportar comunicaciones totalmente duplicadas con los puestos de trabajo y con otros equipos compatibles.

¹ LAN: Local Area Network (Red de área local).

² WAN: Wide Area Network (Red de área extensa). Es una red de ordenadores de gran tamaño, generalmente dispersa en una gran área, a lo largo de un país o incluso a nivel planetario. La más grande y conocida red WAN es Internet.

Arquitectura con servidores distribuidos

Pueden interconectarse varios servidores para constituir una arquitectura de servidores distribuidos. Con esta arquitectura, las aplicaciones muy grandes o con edificios geográficamente dispersos, pueden operarse como si se tratara de un sistema único. Esta arquitectura permite, así mismo, que varios servidores se pasen entre sí informaciones de alarmas, datos de los procesos, etc.

Una arquitectura con servidores distribuidos permite que diferentes edificios se puedan operar de manera eficiente y consistente, a lo largo de una organización, sin sacrificar la independencia de cada sitio individual.

Arquitectura de sistemas abiertos

Para integrar otros sistemas o subsistemas, el SGC, a parte estar basado en un gran número de tecnologías abiertas, soporta diversos estándares de sistemas abiertos (Figura 3.1), como:

- TCP-IP: Es un protocolo de red que soporta gran variedad de hardware y sistemas operativos. Dispone de gran velocidad de transmisión de datos, bajo distintos medios físicos que permiten conseguir grandes distancias entre los distintos componentes. Usualmente constituyen la columna vertebral del SGC, permitiendo la comunicación entre el servidor y el resto de elementos del sistema (Apartado 3.3.1).
- LonWorks: Es una red que permite operar aparatos de fabricantes diversos adheridos al estándar LonMark [37]. El SGC soporta cualquier dispositivo con tal de que tengan la homologación del estándar LonMark. Este enlace permite leer y escribir tanto las Variables de Red como las Propiedades de Configuración. La conexión entre el SGC y la red LON puede ser directa, vía puerto serie ó vía red utilizando un router de Ethernet a Echelon (Apartado 3.3.1). Habitualmente constituye la red entre los distintos elementos de campo.
- MODBUS: El Modbus es de hecho un protocolo de comunicaciones estándar utilizado para integrar en el SGC diferentes tipos de controladores. El enlace Modbus del sistema es de tipo 'Master' y emplea el protocolo Modbus RTU [42].
- BACnet: Soporta el estándar 135-95 de ASHRAE (Protocolo BACnet) para implantar las funciones BACnet Servidor y BACnet Cliente.
- OPC: Soporta OLE para Control de Procesos (OPC). Este enlace permite que el cliente OPC del sistema pueda leer y escribir en un servidor OPC. El cliente puede integrar equipos y sistemas de terceros que dispongan de un OPC tipo servidor.
- ODBC: Es un estándar para acceder a las bases de datos. El SGC soporta el estándar ODBC con función lectura para acceder a la base de datos en tiempo real y a la base de datos relacional.

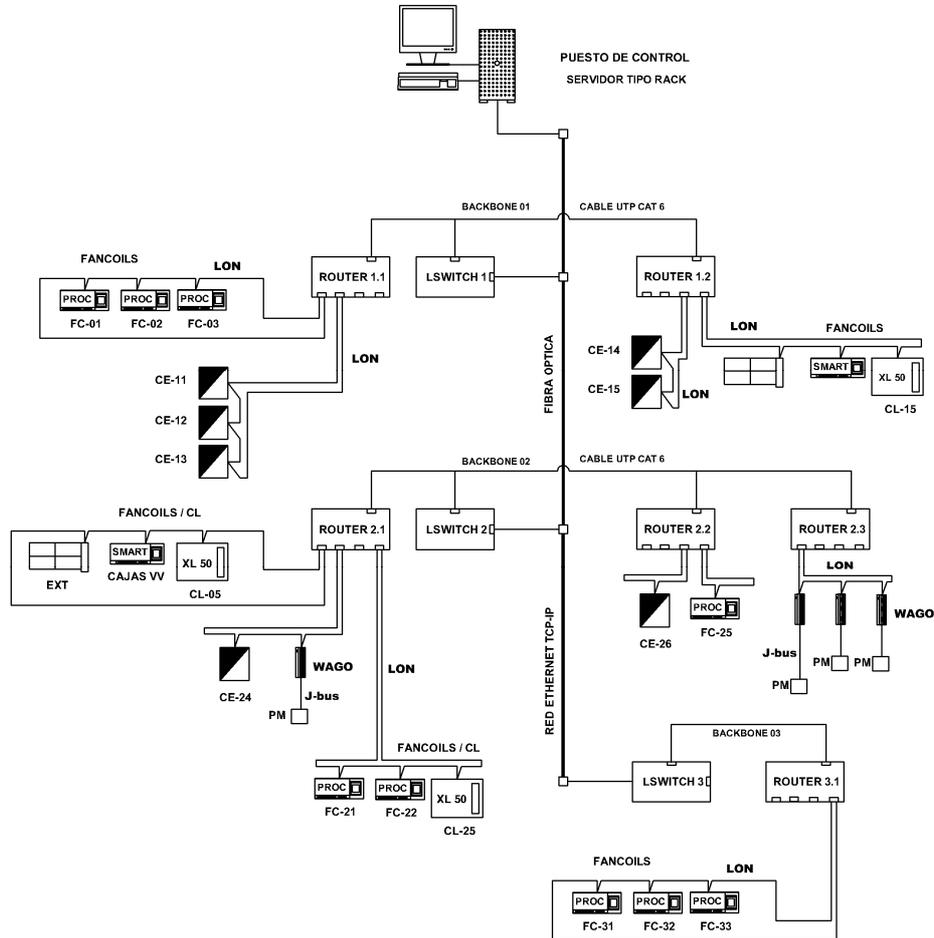


Figura 3.1 Arquitectura de un sistema de gestión y control

3.3.1 Protocolos de comunicación más utilizados

Es sabido que los sistemas de gestión integran habitualmente los de calefacción, acondicionamiento de aire, iluminación, seguridad y las telecomunicaciones en un solo sistema centralmente controlado y automatizado. Para que esto sea posible, se necesita que diferentes sistemas puedan comunicarse e interactuar entre ellos.

La industria de la automatización de edificios ha utilizado a lo largo del tiempo muchos tipos de protocolos de comunicación. La principal razón para ello está relacionada con el crecimiento de la misma ante la revolución de los computadores. En los inicios, la tecnología disponible en el momento requería que los fabricantes construyeran soluciones altamente particulares. No había soluciones de red estándar o

estándares enfocados al software. De hecho, las soluciones particulares que se crearon solían ser la ventaja competitiva de una compañía (habían creado una solución donde no existía ninguna competencia). Actualmente, la naturaleza particular de estos sistemas se ha convertido en una carga para todos, el integrador del sistema, el contratista y, lo más importante, el usuario final. Los fabricantes invierten la mayoría del dinero de investigación y desarrollo en construir infraestructura de comunicaciones, una y otra vez para cada nueva línea de productos que desarrollan, y tratan de mantener al mismo tiempo una compatibilidad limitada con sus antiguos sistemas. Esto obliga a los usuarios a aceptar una solución de automatización de edificios con características y funcionalidad limitada y restrictiva.

Unas décadas atrás, solía suceder que los sistemas de control de edificios realmente integrados eran extremadamente difíciles de crear. Los dispositivos hechos por diferentes fabricantes no podían comunicarse entre ellos, y mucho menos permitían a los usuarios tener acceso e integrar los datos que suministraban. La tendencia en la industria de control de edificios ha sido solucionar el problema de integración a través del uso de protocolos de comunicación *abiertos* que permitieran a los usuarios integrar los sistemas sin importar el fabricante. Ejemplos de éstos son los sistemas basados en TCP-IP, LonWorks, MODBUS, BACnet, OPC, etc. Indicar, por último, que como tendencia actual se están imponiendo los protocolos TCP-IP y LonWorks.

Como se ha comentado, un aspecto fundamental en un sistema de gestión son las comunicaciones, ya que definen la forma de acceder del servidor central a cada uno de los equipos dedicados para poder realizar el control remoto de las instalaciones o el intercambio de información entre ellos.

A continuación se detallan las características de los protocolos más utilizados actualmente que forman parte de los sistemas de gestión. Cada uno de ellos presenta ventajas e inconvenientes, la elección de uno específico depende de la aplicación que se vaya a implementar.

Protocolo TCP-IP

A principios de los años 60, varios investigadores intentaban encontrar una forma de compartir recursos informáticos de una forma más eficiente. En 1961, Leonard Klienrock introduce el concepto de *conmutación de paquetes* (Packet Switching). La idea era que la comunicación entre ordenadores fuese dividida en paquetes. Cada paquete debía contener la dirección de destino y podía encontrar su propio camino a través de la red.

En 1969 la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada (Defense Advanced Research Projects Agency o DARPA) del Ejército de los EEUU desarrolla la ARPAnet. La finalidad principal de esta red era la capacidad de resistir un ataque nuclear de la URSS para lo que se pensó en una administración descentralizada. De este modo, si algunos ordenadores eran destruidos, la red seguiría funcionando. Aunque dicha red funcionaba bien, estaba sujeta a algunas caídas periódicas del sistema. De este modo,

la expansión a largo plazo de esta red podría resultar difícil y costosa. Se inició entonces una búsqueda de un conjunto de protocolos más fiables para la misma. Dicha búsqueda finalizó, a mediados de los 70, con el desarrollo de TCP/IP.

El protocolo TCP/IP tenía, y tiene, ventajas significativas respecto a otros, por ejemplo menor consumo de recursos de red. Además, podía ser implementado a un coste mucho menor que otras opciones disponibles en el momento. Gracias a estos aspectos, TCP/IP comenzó a hacerse popular. En 1983, TCP/IP se integró en la versión 4.2 del sistema operativo UNIX de Berkeley, la integración en versiones comerciales de UNIX se dio en poco tiempo y así, finalmente, el protocolo TCP/IP se convirtió en el estándar de Internet.

En la actualidad, TCP/IP se usa para muchos propósitos, no solo en Internet. Por ejemplo, a menudo se diseñan intranets usando TCP/IP. En tales entornos, TCP/IP ofrece ventajas significativas sobre otros protocolos de red. Una de ellas es que trabaja sobre una gran variedad de hardware y sistemas operativos. De este modo puede crearse fácilmente una red heterogénea usando este protocolo. Dicha red puede contener estaciones Mac, PC compatibles, estaciones Sun, servidores Novell, autómatas de distintos fabricantes, etc. Todos estos elementos pueden comunicarse usando la misma suite de protocolos TCP/IP.

Internet es un conglomerado muy amplio y extenso en el que se encuentran ordenadores con sistemas operativos incompatibles, redes más pequeñas y distintos servicios con su propio conjunto de protocolos para la comunicación. Ante tanta diversidad resulta necesario establecer un conjunto de reglas comunes para la comunicación entre estos diferentes elementos y que además optimice la utilización de recursos tan diferentes. Este papel lo tiene el protocolo TCP/IP, que también puede usarse como protocolo de comunicación en las redes privadas intranet y extranet.

Las siglas TCP/IP se refieren a dos protocolos de red, que son *Transmission Control Protocol* (Protocolo de Control de Transmisión) e *Internet Protocol* (Protocolo de Internet) respectivamente. Estos protocolos pertenecen a un conjunto mayor de protocolos, denominado suite TCP/IP.

Los diferentes protocolos de la suite TCP/IP trabajan conjuntamente para proporcionar el transporte de datos dentro de Internet (o intranet). En otras palabras, hacen posible el acceso a los distintos servicios de la red, como son: transmisión de correo electrónico, transferencia de ficheros, grupos de noticias, acceso a la World Wide Web, etc.

Hay dos clases de protocolos dentro de la suite TCP/IP que son: protocolos a nivel de red y protocolos a nivel de aplicación.

Los *Protocolos a Nivel de Red* son protocolos que se encargan de controlar los mecanismos de transferencia de datos. Normalmente son invisibles para el usuario y operan por debajo de la superficie del sistema. Dentro de estos protocolos se tiene:

- *Protocolo TCP*: Controla la división de la información en unidades individuales de datos (llamadas paquetes) para que estos paquetes sean encaminados de la forma más eficiente hacia su punto de destino. En dicho punto, TCP se encarga de reensamblar dichos paquetes para reconstruir el fichero o mensaje que se envió. Por ejemplo, cuando se envía un fichero HTML desde un servidor Web, el protocolo de control de transmisión en ese servidor divide el fichero en uno o más paquetes, numera dichos paquetes y se los pasa al protocolo IP. Aunque cada paquete tenga la misma dirección IP de destino, puede seguir una ruta diferente a través de la red. Del otro lado, en el programa cliente en el ordenador destino, TCP reconstruye los paquetes individuales y espera hasta que hayan llegado todos para presentarlos como un solo fichero.

- *Protocolo IP*: Se encarga de repartir los paquetes de información enviados entre el ordenador local y los ordenadores remotos. Esto lo hace etiquetando los paquetes con una serie de información, entre la que cabe destacar las direcciones IP de los dos ordenadores. Basándose en esta información, IP garantiza que los datos se encaminarán al destino correcto. Los paquetes recorren la red hasta su destino (que puede estar en el otro extremo del planeta) por el camino más corto posible gracias a unos dispositivos denominados encaminadores o routers.

Por otra parte están los protocolos a *nivel de aplicación*. Aquí se tienen los protocolos asociados a los distintos servicios de Internet, como FTP, Telnet, Gopher, HTTP, etc. Estos protocolos son visibles para el usuario en alguna medida como, por ejemplo, en el protocolo FTP (File Transfer Protocol) en el que el usuario solicita una conexión a otro ordenador para transferir un fichero, la conexión se establece, y comienza la transferencia. Durante dicha transferencia, es visible parte del intercambio entre la máquina del usuario y la máquina remota, por ejemplo mensajes de error y de estado de la transferencia, número de bytes del fichero que se ha transferido en un momento dado, etc.

El protocolo TCP/IP opera a través del uso de una *pila*. Dicha pila es la suma total de todos los protocolos necesarios para completar una transferencia de datos entre dos máquinas (así como el camino que siguen los datos para dejar una máquina o entrar en la otra). La pila está dividida en capas:

- *Capa de Aplicaciones*: Cuando un usuario inicia una transferencia de datos, esta capa pasa la solicitud a la Capa de Transporte.
- *Capa de Transporte*: La Capa de Transporte añade una cabecera y pasa los datos a la Capa de Red.
- *Capa de Red*: En esta capa, se añaden las direcciones IP de origen y destino para el enrutamiento de datos.
- *Capa de Enlace de Datos*: Ejecuta un control de errores sobre el flujo de datos entre los protocolos anteriores y la Capa Física

- *Capa Física*: Ingresa o sirve los datos a través del medio físico, que puede ser Ethernet vía coaxial, vía módem, etc.

Después de que los datos hayan pasado a través del proceso anterior, viajan a su destino en otra máquina de la red. Allí, el proceso se ejecuta al revés (los datos entran por la capa física y recorren la pila hacia arriba). Cada capa de la pila puede enviar y recibir datos desde la capa adyacente y cada una de ellas está también asociada con múltiples protocolos que trabajan sobre los datos.

Finalmente, hay que destacar que la gran mayoría de clientes disponen de conexión a una red con protocolo TCP-IP, como es Ethernet, por lo que si se utiliza este protocolo no es necesario realizar un cableado específico para acceder a cada cliente, como en el caso del sistema propuesto que es necesario el acceso a un gran número de clientes muy alejados entre sí.

Protocolo LON

LonWorks es un estándar propietario desarrollado por la empresa Echelon. El estándar fue ratificado por la organización ANSI como oficial en Octubre de 1999 (ANSI/EIA 709.1-A-1999). LonWorks se basa en el esquema propuesto por LON (Local Operating Network) que consiste en un conjunto de dispositivos inteligentes o nodos, que se conectan mediante uno o más medios físicos y que se comunican utilizando un protocolo común. Por inteligente se entiende que cada nodo es *autónomo y proactivo*, de forma que puede ser programado para enviar mensajes a cualquier otro nodo como resultado de cumplirse ciertas condiciones, o llevar a cabo ciertas acciones en respuesta a los mensajes recibidos.

Un nodo LON se puede ver como un objeto que responde a varias entradas y que produce unas salidas. El funcionamiento completo de la red surge de las distintas interconexiones entre cada uno de los nodos. Mientras que la función desarrollada por uno de los nodos puede ser muy simple, la interacción entre todos puede dar lugar a implementar aplicaciones complejas. Uno de los beneficios inmediatos de LON es que un pequeño número de nodos pueden realizar un gran número de funciones distintas dependiendo de cómo estén interconectados.

LonWorks utiliza para el intercambio de información (ya sea de control o de estado) el protocolo LonTalk, que tiene que ser soportado por todos los nodos de la red. Por ser un protocolo abierto toda la información del protocolo está disponible para cualquier fabricante.

LonTalk ha sido creado dentro del marco del control industrial por lo que se enfoca a funciones de monitorización y control de dispositivos. Dentro de este marco se han potenciado una serie de características como la *fiabilidad*: El protocolo soporta acuso de recibo, extremo a extremo con reintentos automáticos, *variedad* de medios de comunicación: Tanto cableado como radio, entre los que están soportados el par trenzado, red eléctrica, radio frecuencia, cable coaxial y fibra óptica, *tiempo de respuesta*: Se utiliza un algoritmo propietario para predicción de colisiones que consigue

evitar la degradación de prestaciones que se produce por tener un medio de acceso compartido, y *bajo coste* de los productos: Muchos de los nodos LON son simples dispositivos como interruptores o sensores, donde el protocolo ha sido diseñado para poder ser implementado en un único chip de bajo coste.

Para simplificar el enrutamiento de mensajes, el protocolo define una jerarquía de direccionamiento que incluye dirección de dominio, subred y nodo. Cada *nodo* está conectado físicamente a un canal. Un *dominio* es una colección lógica de nodos que pertenecen a uno o más canales. Una *subred* es una colección lógica de hasta 127 nodos dentro de un dominio. Se pueden definir hasta 255 subredes dentro de un único dominio. Todos los nodos de una subred deben pertenecer al mismo canal, o los canales tienen que estar conectados por puentes. Cada nodo tiene un identificador de 48-bits único, asignado durante la fabricación, que se usa como dirección de red durante la instalación y configuración

La comunicación entre nodos se completa con las *variables de red*. Cada nodo define una serie de variables de red que pueden ser compartidas por los demás nodos. Éstas pueden ser variables de entrada y de salida, definidas por el desarrollador.

Siempre que el programa que se ejecuta en un nodo escribe un nuevo valor en una de sus variables de salida, éste se propaga a través de la red a todos los nodos cuyas variables de entrada estén conectadas a esta variable de salida. Todas estas acciones están implementadas dentro del protocolo. Sólo se podrán ligar variables de red que sean del mismo tipo.

Para guardar la interoperabilidad entre productos de distintos fabricantes, se definen las variables a partir de una definición de tipos estándar (Standard Network Variable Types, SNVT). Echelon mantiene una lista de unos 100 tipos accesible a cualquier fabricante [37].

Ejemplos de tipos SNVT son temperatura (grados), humedad (porcentaje), estado de interruptores (boolean), resistencia (ohms), etc.

En los componentes de una red LonWorks se pueden distinguir dos partes:

Transmisor LonWorks: Estos dispositivos sirven de interfase entre el chip Neuron y el medio físico. Dependiendo del medio físico la velocidad de transmisión y topología es distinta

Circuito Integrado Neuron: Es el corazón de la tecnología LonWorks. Contiene toda implementación del protocolo LonTalk. Cada circuito integrado Neuron tiene tres procesadores de 8-bit, dos dedicados al protocolo y un tercero a la aplicación del nodo.

Protocolo Modbus

El protocolo Modbus es un protocolo público de fácil implementación, muy extendido en la industria. Cada dispositivo de la red Modbus posee una dirección única. Así, cualquier dispositivo puede enviar órdenes Modbus, aunque lo habitual es permitirlo sólo a un dispositivo maestro, y el resto de dispositivos (slaves) responden a dichas

peticiones. Cada comando Modbus contiene la dirección del dispositivo destinatario de la orden. Todos los dispositivos reciben la trama pero sólo el destinatario la ejecuta. Además, cada uno de los mensajes incluye información redundante que asegura su integridad en la recepción. Es un protocolo serie que puede implementarse con conductor trenzado a dos o a cuatro hilos. Los comandos básicos Modbus permiten controlar un dispositivo para modificar el valor de alguno de sus registros o bien solicitar el contenido de dichos registros.

3.4 Funciones de los sistemas de gestión

En los próximos apartados se presentan las funcionalidades más comunes del SGC, comunes a la mayoría de sistemas de gestión y control existentes en la actualidad [35]. Así, el sistema de control es capaz de integrar distintos sistemas e instalaciones, disponen de un entorno amigable de enlace con el operador del sistema, cuentan con distintas funciones de seguridad integradas, una potente base de datos en tiempo real, aplicaciones de gestión, etc.

3.4.1 Integración de sistemas

El SGC presenta una arquitectura abierta que combina: Procesadores, equipos estándar y enlaces de comunicación y los integra en un único sistema central para optimizar el funcionamiento de los edificios.

El SGC puede integrar los siguientes subsistemas [45]:

- Supervisión y control de equipos de aire acondicionado.
- Control del alumbrado.
- Monitorización del consumo de energía.
- Procesadores de accesos y lectoras de credenciales.
- Monitorización de seguridad.
- Supervisión y control de instalaciones contra incendios.
- Circuito cerrado de televisión (CCTV) de tipo analógico.
- Gestión de vídeo digital sobre redes LAN/WAN.
- Control de procesos industriales.
- Sistemas de gestión empresarial (por ejemplo SAP).
- Control de presencia y horario flexible.
- Gestión de mantenimiento.
- Páginas de Internet e intranet y servidor Web.

3.4.2 Enlace con el operador

En situaciones críticas, es importante facilitar a los usuarios los datos en un formato claro y conciso. El enlace con el operador del sistema, la *estación*, visualiza gráficos en colores y con alta resolución, que se confeccionan a la medida de los requerimientos de cada edificio en particular. Se hace uso de menús estilo Web, de barras de herramientas y de iconos para facilitar una navegación de tipo intuitivo.

El enlace de operador permite al usuario ejecutar diferentes funciones:

- Ver y controlar equipos de campo.
- Reconocer las alarmas por prioridad.
- Ver estados de puntos e información de tipo histórico.
- Ver información de poseedores de credenciales.
- Definir y variar las planificaciones en función del calendario.
- Iniciar la impresión de informes.
- Ver, archivar y retomar registros de eventos.
- Monitorizar los canales de comunicación de datos.
- Configurar los parámetros del sistema.
- Seleccionar y controlar cámaras de CCTV.
- Generar las bases de datos.
- Crear pantallas gráficas.
- Visualizar información procedente de Internet e intranet.
- Visualizar documentos ActiveX.
- Grabar y reproducir vídeo digital.

Las estaciones de operador también visualizan información del estado de diferentes elementos:

- Todos los puntos de un cierto tipo en un estado particular.
- Los puntos en alarma pendientes de reconocimiento.
- Los puntos en alarma que han sido reconocidos.
- Los fallos de comunicaciones.
- Las estaciones e impresoras que están fuera de servicio.
- Los puntos de detección de incendios.

Se pueden crear pantallas a medida. Los gráficos se componen de una combinación de fondo estático y de datos dinámicos representativos de la condición de

estado y de alarma de todos los aparatos representados en la pantalla. Así mismo, se pueden vincular objetos gráficos con ejecución de tareas y llamadas a otras pantallas e informes

Es posible también, integrar documentos ActiveX, por ejemplo, situar documentos Word ó Excel en las pantallas.

El acceso puede estar controlado, de modo que esté limitado el acceso de los operadores a los sitios que se determine.

Los operadores pueden estar visualizando información de la Web sin perder ninguna de las actividades del sistema.

3.4.3 Funcionalidades de seguridad

Las distintas funciones de seguridad integradas afecta a distintos aspectos tales como seguridad en los operadores, en el acceso al sistema y en los tipos de usuarios, definiendo a cada uno las funciones que pueden realizar.

Cada operador, para definir su perfil de seguridad, tiene una identificación y contraseña únicas. La contraseña se compone de una serie alfanumérica que no puede coincidir con las usadas durante los tres meses anteriores. Todas las contraseñas se encriptan al almacenarlas y transferirlas. Si un operador trata repetidamente de entrar en una estación sin usar la adecuada contraseña, queda imposibilitado para entrar en el sistema durante el tiempo que se haya configurado.

A los operadores se les puede restringir la operación en una determinada estación y durante ciertos días y horas. Éstos pueden catalogarse como usuario simple ó multi-usuario con capacidad para operar en varias estaciones.

Es posible restringir y controlar las actividades que los operadores pueden llevar a cabo asignándoles diferentes niveles de seguridad. Sólo los operadores con el nivel adecuado de control pueden ejecutar desde el teclado comandos manuales sobre tales puntos. Incluso es posible restringir el tipo de comando que un determinado operador puede ejecutar sobre determinados tipos de puntos, por ejemplo, permitir abrir una puerta pero no cerrarla.

Está dispone una opción de *temporizador deadman*. Con esta opción se monitoriza la actividad de los operadores. Esta función de salvaguarda de los operadores, consiste en monitorizar la permanencia activa del operador en su puesto y que se están reconociendo con rapidez todas las alarmas. Si no se detecta actividad por parte del operador durante el tiempo preconfigurado, el sistema produce su salida automática. No obstante, antes de esto envía un mensaje de aviso al operador, si el operador no entra de nuevo en el sistema, el sistema envía automáticamente un comando de alerta. Esta función se puede usar para comprobar si se han reconocido las alarmas y para alertar a otros si las alarmas no han sido atendidas con presteza.

Permite tener la seguridad de que los operadores están en sus puestos y realizan las tareas que tienen encomendadas.

3.4.4 Base de datos en tiempo real

El SGC se comunica con procesadores que poseen inteligencia distribuida. El procesador local elabora las decisiones normales como las estrategias de control de equipos de aire acondicionado, control de accesos, etc., con total independencia del servidor. Si el nexo de comunicación entre un procesador y el servidor falla, las funciones normales siguen y el procesador almacena las diferentes transacciones que se vayan produciendo. Al reanudarse la comunicación, las informaciones almacenadas se transfieren al servidor, consiguiendo que los cambios producidos en la base de datos se transfieran a todos los procesadores del sistema.

El sistema dispone de funciones de planificación para controlar los puntos de forma periódica o de una sola vez.

Entre los diferentes tipos de planificación están: de ejecución única (y una vez ejecutada se anula), de ejecución diaria, de ejecución de lunes a viernes incluido, de ejecución los fines de semana, de ejecución en los días festivos y de ejecución en días preseleccionados. Además, el SGC es capaz de gestionar planificaciones de tipo global, aplicables a muchos y diferentes procesadores.

Es posible agrupar puntos por criterios tales como, de entrada de alarma, de salida, por controlador, por área, de puertas, de ascensores, etc. Así el operador puede controlar ó monitorizar el grupo de puntos de un golpe. En una pantalla se visualiza el resumen de los grupos de puntos con información del número de puntos en cada uno y con el número de ellos que están en los diferentes posibles estados.

3.4.5 Gestor de mantenimiento

El sistema posibilita el uso de un gestor integrado de mantenimiento a partir de los datos que, sobre los equipos de campo, están en el SGC. Primero, determina la necesidad de mantenimiento y acto seguido, si se cumplen las condiciones de necesidad de mantenimiento predeterminadas, genera automáticamente las órdenes de trabajo pertinentes.

Se permite configurar distintos tipos de eventos como número de ciclos, horas de funcionamiento, valores límites, etc.

Al gestor se puede acceder desde cualquier puesto de trabajo del sistema ó vía Web browser resultando muy fácil suministrar información de mantenimiento a quienes en la organización la necesiten.

Se pueden generar informes de mantenimiento estándar ó crearlos a la medida de las necesidades del edificio incluyendo informaciones tales como órdenes de trabajo pasadas y futuras, listas de equipos e informes históricos.

3.4.6 Otras funciones del sistema de gestión

Gestión de alarmas

La gestión de alarmas del SGC garantiza a los operadores la recepción inmediata de cualquier intento de violación de la seguridad o de cualquier anomalía que se produzca en el edificio. Los operadores pueden responder a las alarmas y encontrar información relevante simplemente usando teclas funcionales dedicadas. Distintas funciones están disponibles para gestionar las alarmas:

- *Reconocimiento.* Selección del punto en alarma, se pulsa la tecla de reconocimiento y así la alarma queda reconocida. El sistema registra automáticamente esta acción en su fichero de eventos y también en la impresora de alarmas.
- *Resumen de Alarmas.* Los mensajes de alarma se codifican por el color, donde hay uno distinto para cada prioridad. Desde el resumen de alarmas se pueden reconocer las alarmas y acceder a una pantalla asociada a cada punto.
- *Pantalla asociada.* Al seleccionar la pantalla asociada se pasa inmediatamente al gráfico que muestra el esquema ó el sitio en donde se ha producido la alarma.

Las alarmas se enuncian del siguiente modo:

- Tono sonoro. Este tono está en un fichero .wav que existe en la estación de operador.
- Línea de Alarmas. En todas las pantallas aparece una línea dedicada a las alarmas que visualiza siempre la más reciente, de prioridad más alta y que aún no haya sido reconocida.
- Indicador de Alarmas. En todas las pantallas aparece siempre un indicador de alarmas que destella en rojo cuando en el sistema hay alguna alarma no reconocida.
- Pantalla Resumen de Alarmas. En esta página aparecen todas las alarmas existentes en el sistema con sus respectivos colores indicadores del grado de prioridad y de severidad.
- Salida a Impresora de Alarmas Los mensajes de alarma se recogen en la impresora de alarmas.

Las alarmas se anuncian a los operadores de las estaciones incluso cuando no hay operadores acreditados en ellas o cuando el icono estación esta minimizado.

Las alarmas pueden asociarse a diferentes estados en caso de puntos digitales o a especiales condiciones en el caso de puntos analógicos como valores alto y bajo, velocidad de variación, etc.

A cada alarma se le asigna una prioridad que puede ser rutinaria, baja, alta o urgente y a cada prioridad de alarma se le pueden asignar diferentes sub-prioridades.

Es posible elevar de forma automática una alarma a la prioridad siguiente en caso de que un operador no la reconozca en un cierto tiempo. Así, se asegura que las alarmas se gestionan con rapidez.

Con la función gestión avanzada de alarmas, se puede facilitar información adicional a los operadores. Cuando un operador reconoce una alarma, pasa a una pantalla de instrucciones que detalla los procedimientos adecuados a seguir. Después de seguir estos procedimientos, el operador puede entrar una respuesta con las acciones tomadas para corregir la situación o puede seleccionar en una lista de respuestas preconfiguradas la que sea apropiada. Esto asegura que los operadores tienen a mano la información que necesitan para responder totalmente y con eficacia a las alarmas. Las respuestas de los operadores quedan registradas en el fichero de eventos para un posterior análisis.

Se dispone de una opción adicional, que permite encaminar las alarmas hacia teléfonos móviles. Es muy útil en los casos en los que los operadores tienen que moverse por el edificio pero desean recibir las alarmas críticas inmediatamente. Es posible nominar una serie de puntos y ciertas alarmas para que sean accesibles desde cualquier lugar.

También, está disponible la gestión de eventos, que incluyen las alarmas, los cambios de estado, los movimientos de los poseedores de credenciales, los cambios de estado del sistema y todas las acciones de los operadores. A medida que ocurren eventos en el sistema, se crea un diario de eventos en un fichero de eventos. Las entradas en el diario de eventos incluyen la hora de ocurrencia, una descripción la condición, un mensaje y el operador responsable.

En el fichero de eventos del sistema se almacenan los datos de los eventos en un buffer on-line. Se pueden almacenar los eventos que sean precisos. La limitación reside en el espacio disponible en el disco duro del PC del servidor.

Históricos, tendencias e informes

Para obtener la historia del comportamiento de los puntos en el sistema a lo largo del tiempo, el SGC toma muestras y almacena los valores y estados de los puntos como datos históricos. El sistema puede recolectar los datos históricos de diferentes formas. Para ver lo que ha pasado en el sistema en un momento o en un periodo de tiempo determinados se pueden tomar valores instantáneos o valores promediados. Estos datos históricos pueden verse como conjuntos de tendencias, evolución de los detalles de un punto, pantallas históricas numéricas, etc.

Los datos históricos se pueden utilizar también en informes, en programas de aplicación o archivados en medios externos.

Es posible consultar distintos formatos de tendencias como gráficos de barras, gráficos de líneas multipunto, gráficos en la forma $Y = F(x)$ y otros. Para cada caso se puede configurar el número de muestras y los intervalos de tiempo entre ellas.

Los puntos configurados en las tendencias se pueden cambiar on-line. Los diferentes gráficos disponen de distintas funcionalidades como zoom en las tendencias para una inspección más cercana, etc. Un operador incluso puede copiar y pegar directamente los datos de la tendencia en una hoja de cálculo Excel.

Es posible utilizar una amplia gama de resúmenes estándar y posibilidades para confeccionar informes a medida, para exportar e importar información y para usar otros sistemas de creación de informes con diferentes datos del sistema, como por ejemplo:

- Todos los puntos en alarma a lo largo de un tiempo.
- Todas las actividades hechas por un determinado operador.
- Todas las actividades relacionadas con un grupo de puntos.
- Los movimientos de los poseedores por ciertas puertas.

El SGC facilita acceso a su base de datos ODBC utilizando una herramienta que sea también ODBC. Esto permite crear, a partir de datos del servidor, informes propios usando una herramienta tal como la Microsoft Access ó Crystal Reports [47].

Los informes se pueden generar de forma periódica, por ejemplo una vez al día ó a instancia de un evento

API por red

Para extraer información de los puntos desde el sistema y usarla en otra aplicación. Es posible usar el API de red para leer y escribir datos de puntos en el sistema.

Microsoft Excel Data Exchange

Se emplea para vincular el SGC con la hoja de cálculo Excel. Los valores de esos puntos pueden a continuación utilizarse en las hojas de cálculo y proceder a su automática actualización.

Herramientas de configuración

El SGC cuenta con herramientas para la configuración de los puntos, controladores, estaciones de operadores, etc., es decir, aplicaciones para la gestión del sistema.

3.5 Necesidades adicionales en los SGC para la implantación de programas de RD

En los apartados anteriores se ha descrito la arquitectura y funcionalidades típicas de los sistemas de control existentes actualmente. Queda demostrada tanto la potencia de éstos para la integración de las distintas instalaciones y tecnologías, como la gran diversidad de funcionalidades que presentan. Ahora bien, todo ello se ha desarrollado a partir de unas necesidades del mercado que son la integración y control de las distintas instalaciones en un determinado edificio, dando a los sistemas de control todas aquellas funcionalidades necesarias para alcanzar dicho objetivo.

Así, debido a los avances en las telecomunicaciones desarrollados en las últimas décadas, actualmente se dispone del hardware necesario para implementar un sistema de control complejo, además de un potente software con capacidad para gestionarlo. Adicionalmente, como se ha comentado, existen gestores de bases de datos muy avanzados, capaces de almacenar y tratar multitud de datos. Sin embargo, se detecta la necesidad de definición y desarrollo de *aplicaciones* flexibles y útiles que utilicen los distintos sistemas y extraigan de ellos todo el potencial, que lo tienen, concretamente en la gestión de los programas de respuesta de la demanda.

Se detecta que para facilitar el desarrollo de estos programas, los sistemas de control existentes presentan ciertas carencias lo que permite plantear la necesidad de diseñar un nuevo sistema de gestión integral (SGI) desarrollado con este nuevo objetivo. Las distintas necesidades que salvará, con las nuevas funcionalidades que este nuevo sistema debe aportar son:

- Debe integrar a todos los agentes que puedan participar en un programa de respuesta de la demanda como pueden ser el administrador, los agregadores, comercializadores, operadores de red y, lo más importante, los clientes participantes. La interacción con los usuarios del sistema será a través de una plataforma Web, lo que evitará la necesidad de instalar software dedicado en cada uno de los equipos de los integrantes del sistema. Además, desde su diseño se desarrollará para permitir el acceso de distintos tipos de usuarios.
- La arquitectura del sistema se desarrollará utilizando el protocolo TCP-IP por lo que no será necesario realizar un cableado específico para implantar dicho sistema.
- Se le dotará de distintas funcionalidades adicionales que cubren más específicamente las nuevas necesidades que se plantean. Una de ellas es el desarrollo de una zona de comunicación entre los distintos agentes (consumidores, suministradores, generadores, operadores de red, etc.) lo que facilitará la interacción entre ellos y por tanto aumentará la confianza entre los participantes, aspecto fundamental a la hora de realizar la implantación de programas de respuesta de la demanda, de forma que se puedan intercambiar productos y servicios energéticos de forma totalmente dinámica.

- Los distintos participantes podrán interactuar frente a señales externas como precio de la energía, del gas, restricciones en las redes de suministro, disponibilidad de energías renovables, etc.

- Debe ser un sistema que presente gran flexibilidad para permitir el desarrollo de aplicaciones específicas para cada participante en función de sus necesidades.

- Permitirá realizar la medida y registro de magnitudes eléctricas en los distintos clientes. El nuevo SGI dispondrá de una aplicación específica para ello. Se desarrollará un software que permita realizar la adquisición de los datos, generación de una base de datos manejable y ampliable, etc. Además, el software contemplará situaciones anómalas como la falta de comunicación con los equipos de medida, haciendo un posterior tratamiento de los datos disponibles.

- Se desarrollarán informes específicos de los consumos diarios, consumos por periodos tarifarios vigentes, etc.

- Debe ser independiente de la dispersión geográfica de los distintos usuarios, ya que permitirá gestionar a todos los participantes de un programa desde un mismo centro de control.

- Al desarrollar un nuevo SGI, desde la arquitectura hasta las aplicaciones, se dispondrá de una gran flexibilidad en el sistema, por lo que se facilitará el mantenimiento y actualización del sistema al contar con el control del desarrollo del mismo. Los sistemas de control disponibles en el mercado disponen de unas aplicaciones concretas desarrolladas por las marcas comerciales que no permiten ampliarse o adaptarse a las necesidades específicas de un determinado programa. Con el desarrollo integral del sistema se dispone de la posibilidad de implementación de cualquier necesidad actual o futura.

- Razones económicas también influyen en la necesidad del desarrollo de un nuevo SGI. Los sistemas de control comerciales se adquieren por número de puntos a controlar y por aplicaciones disponibles, por lo que cabe la posibilidad de que en programas de demanda con muchos participantes se tuviera que adquirir una nueva licencia por superar el número de puntos disponibles.

En resumen, un nuevo sistema de gestión desarrollado íntegramente con el objetivo de servir de instrumento a la implantación de programas de respuesta presenta grandes mejoras respecto los existentes, tanto por la flexibilidad como por las funcionalidades que puede aportar.

3.6 Integración del nuevo sistema de gestión integral

Una vez analizados los sistemas de gestión existentes, detectadas las deficiencias que éstos presentan y planteado el nuevo sistema. Se analiza la forma en la que deben interactuar dichos sistemas:

- El sistema de gestión existente en las instalaciones debe mantenerse con el propósito para el que fue diseñado. Así, controlará las distintas instalaciones y servirá para realizar la explotación del edificio.
- El nuevo sistema de gestión que se plantea en el presente trabajo debe interactuar con éste de forma que se aporten las funciones adicionales para el desarrollo de las acciones de control necesarias para el desarrollo de los programas de gestión de la demanda que se diseñen. No debe ser sustituto de los anteriores sino complementario y debe ser capaz de interactuar con ellos.
- La interacción se realizará en uno o varios controladores en concreto donde las acciones emitidas por el SGI serán interpretadas por el SGC existente. En el caso de que desde el nuevo sistema de gestión no se especifique ninguna acción el sistema existente en el edificio debe funcionar de la forma habitual.

3.7 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se ha presentado el estado de la técnica que rige los sistemas de control que actualmente se están implantando en los distintos clientes. Se analizan las características, arquitectura y funcionalidades más comunes en dichos sistemas que, principalmente, están destinados al control y uso de las instalaciones. Es, por tanto, lógico que no estén directamente preparados para implantar las funciones necesarias en la integración de programas de respuesta de la demanda. Estos sistemas se caracterizan por ser sistemas más o menos rígidos tanto en la arquitectura hardware como en el software de control que disponen, aunque las mayores limitaciones las presentan en el aspecto software, las funciones del sistema son, para el cliente, totalmente rígidas y vienen dadas a través de un software patentado y desarrollado por la empresa que comercializa el sistema de control.

Además, por otra parte, se han identificado las nuevas necesidades que se demandan a estos sistemas para poder implantar programas de respuesta de la demanda.

Para salvar las barreras tecnológicas que presentan los sistemas de control actuales y disponer una gran capacidad de desarrollo y flexibilidad se propone el diseño e implantación de un sistema de control integral (Capítulo 4), como nueva herramienta para facilitar acciones de respuesta de la demanda. Este sistema debe presentar tres características fundamentales:

- Ser un sistema con capacidad de integrar a todos los agentes del sistema eléctrico y constituya un espacio común donde éstos participen activamente.
- Es necesario que sea flexible en la arquitectura de comunicaciones, que presente la seguridad requerida, pero que sea capaz de permitir el uso del sistema desde puntos alejados entre sí.

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

- Debe tener la posibilidad de desarrollo y actualización de software dedicado a cada una de las necesidades que se presenten en los distintos programas a implantar.

El sistema de gestión propuesto no pretende sustituir los sistemas de control existentes en una instalación sino interaccionar con ellos y aportar las funciones específicas necesarias para que se favorezca en los consumidores, y en el resto de agentes del sistema, la implantación de dichos programas.

CAPÍTULO 4

NUEVO SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN

4.1 Introducción

Tal y como se ha expuesto en el Capítulo 2, unas de las principales barreras que se presentan para implantar en un sistema eléctrico programas de respuesta de la demanda efectivos son las tecnológicas. En el mercado existen muchos suministradores de sistemas de control que se basan en distintas tecnologías todas ellas válidas. El principal problema que se detecta es que dichos sistemas no se han desarrollado para aplicarlos en programas de respuesta de la demanda. Los sistemas de control existentes tienen como objetivo fundamental servir como sistema de control de la instalación de climatización de edificios y como funciones secundarias, o adicionales, se utilizan para operar, de forma remota, otras instalaciones como los circuitos de alumbrado, integrar la instalación de protección contra incendios y de intrusión, monitorizar equipos de bombeo, salas de máquinas, etc. Por lo tanto, hoy en día existen distintas tecnologías válidas para comunicarse de forma remota con distintos equipos, sistemas de bases de datos para almacenar y tratar los mismos, etc., pero sin embargo no se han desarrollado las aplicaciones, tanto configuración hardware como aplicaciones software, necesarias para facilitar e integrar los programas de respuesta de la demanda en las instalaciones de los consumidores.

En los próximos apartados se proponen las características que debe disponer un nuevo sistema de gestión integral (SGI) en el que sean fácilmente integrables las distintas funciones necesarias para implementar dichos programas.

Posteriormente, se plantea una arquitectura del sistema basada en la tecnología disponible actualmente. En el diseño de la misma se considera, en todo momento, que debe ser fácilmente ampliable y adaptable a las necesidades que puedan surgir según el programa que se quiera desarrollar

El sistema diseñado está corroborado por la implementación práctica del mismo que se está desarrollando en el Instituto de Ingeniería Energética. Por tanto, el diseño del sistema que se presenta ya incluye las mejoras y cambios aportados por la implementación y validación derivados del desarrollo de un sistema real.

El objetivo general a cumplir por el sistema se considera que debe de proporcionar las técnicas necesarias que permitan y/o faciliten la interacción compleja entre los suministradores y consumidores de energía, así como generar los mecanismos de difusión de información necesarios entre ellos que permitan, por tanto, una respuesta de la demanda efectiva para todos los agentes del sistema eléctrico.

En el sistema se dispone de una plataforma basada en Internet que permite implantarlo a distintos usuarios finales, pudiendo ofrecer, adicionalmente, servicios de gestión y asesoría de sus recursos energéticos. Para ello, aborda y resuelve los siguientes aspectos:

- Posibilidad de adquisición de datos de consumo de un cliente o usuario, con la particularidad de que éste pueda estar situado en cualquier lugar, alejado físicamente del servidor Web. Por tanto, una vez adquiridos los datos de consumo del usuario final, éstos se transmiten a través de Ethernet de forma segura, hasta el servidor.
- Realizar acciones de control en el cliente. Así, desde las aplicaciones del servidor Web se pueden ejecutar acciones en el usuario final, tales como la conexión o desconexión de líneas en el cliente previamente pactadas, envío de mensajes, etc.
- Gestión de una base de datos donde se almacenen los datos adquiridos y acciones realizadas.
- Desarrollo de las aplicaciones software de tratamiento de dichos datos. Conocida la curva de consumo de un determinado cliente, se desarrollan aplicaciones para una mejor gestión de sus recursos energéticos.
- Disponibilidad de un portal Web en el que se presentan los datos adquiridos para cada cliente, páginas de gestión propia de sus recursos, páginas de control de la demanda, etc. Así, es posible acceder a la información desde cualquier punto, siempre que se tengan los permisos necesarios.

4.2 Funcionalidades del sistema

El sistema de gestión integral (SGI) en su desarrollo final dispondrá de un portal Web en el que pueden interaccionar todos los componentes del mercado eléctrico, facilitando así el intercambio de información entre ellos y permitiendo realizar una gestión de la respuesta de la demanda y asesoría a los distintos clientes finales.

Más específicamente, el portal debe informar e interrelacionar a los agentes interesados en ofrecer o utilizar *recursos energéticos distribuidos* (DER) de generación, almacenamiento o demanda que estén disponibles en cada momento. El objetivo de esta interacción entre agentes es conseguir un funcionamiento más eficiente de los recursos energéticos disponibles (Figura 4.1).

En este nuevo espacio, los consumidores podrán influir en el precio y cantidad de la energía generada. Se establecerá un espacio en el que los consumidores tendrán una

participación activa, pues serán ellos los que ofrezcan energía, no generándola, sino dejando de consumirla.

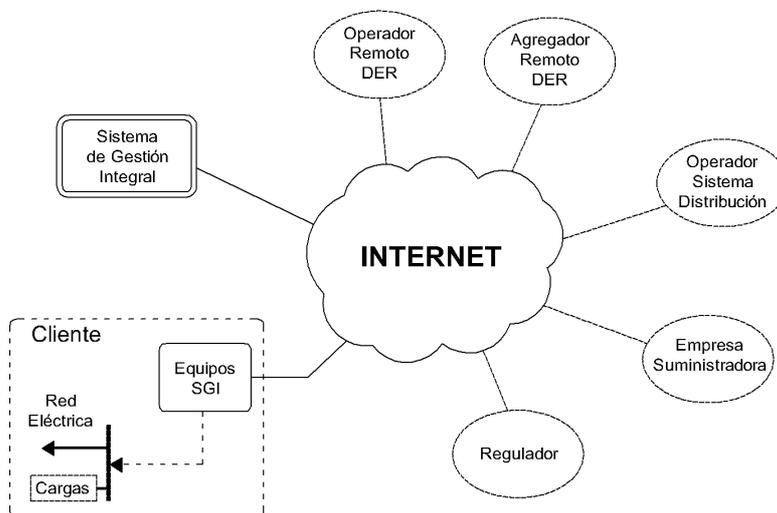


Figura 4.1 Integración del SGI en un sistema eléctrico

Las decisiones que tomen los agentes se materializarán en acciones que serán, bien ejercidas por ellos mismos (decisión de conectar o desconectar determinadas cargas) o ejercidas de forma automática por las aplicaciones informáticas, de acuerdo a unos objetivos y reglas previamente acordados.

También, se ofrecen aplicaciones para dar servicios de asesoría a los distintos consumidores finales, facilitando así una mejor gestión de sus recursos energéticos, ya sea ésta directamente realizada por ellos o asesorados a través del portal.

Por tanto, en este portal se dispondrá de la información necesaria sobre los recursos energéticos disponibles (incluyendo información sobre los consumos) de los agentes que así lo estimen, a través de sistemas de probada seguridad y confidencialidad que garanticen que los datos se reciben de una forma fiable y que no son utilizados para otras aplicaciones que las estrictamente permitidas.

Las características generales que debe presentar el sistema propuesto, una vez analizados los sistemas de control existentes en el mercado (Capítulo 3) y detectadas las funciones específicas que debe disponer para poder integrar aquellas necesarias en la implantación de programas de gestión de la demanda son:

- Debe ser abierto, en el que se puedan integrar distintas tecnologías.
- Modulable, para poder crecer de forma ordenada tanto en número de usuarios, acciones, etc.
- Seguro, tanto en el tratamiento de la información como en el almacenamiento de los datos.

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

- Desde un único punto donde se dispone de toda la información del sistema, se debe poder acceder a clientes muy alejados entre sí.
- Debe facilitar la comunicación entre todos los participantes, creando un espacio común de comunicación, donde quede almacenada toda la información necesaria, tanto para el funcionamiento como para el posterior análisis.
- Disponibilidad de multi-acceso, por lo que varios agentes a la vez puedan de forma concurrente acceder a los mismos datos.
- Fiable, frente a fallos de suministro, problemas en las redes de comunicaciones, etc.
- Posibilidad de desarrollo de aplicaciones específicas para un programa en concreto, o para una aplicación de un cliente determinado.

Para desarrollar dicho sistema de intercomunicación entre los distintos participantes, las aplicaciones disponibles deberán proporcionar a los distintos tipos de clientes los siguientes servicios específicos (Figura 4.2):

Los **operadores de redes eléctricas** (transporte o distribución) demandarán para gestionar los recursos distribuidos del sistema:

- Indicar condiciones generales del sistema.
- Enviar comunicaciones entre agentes.
- Seguimiento de la repuesta de los clientes.
- Generar Históricos de las notificaciones.
- Visualizar los recursos de respuesta de la demanda en un sistema, por regiones, compañías suministradoras, etc.
- Monitorización de los resultados de la respuesta de los consumidores en tiempo real.
- Controlar recursos distribuidos y su uso como una herramienta de la gestión de la red. El objetivo será reducir la carga eléctrica cuando el mercado esté con valores altos.
- Proporcionar datos, tanto en tiempo real como históricos.
- Proporcionar señales del precio de la energía.

Los **comercializadores** o **agregadores** que estén proporcionando Recursos Energéticos Distribuidos (DER), adicionalmente a los servicios anteriormente citados, requerirán:

- Planes de actuación para conseguir los consumos a lo largo del tiempo que se fijen como objetivo, mediante la interacción con los consumidores que estén ofreciendo recursos energéticos distribuidos.
- Mediciones en las instalaciones.

- Tratamiento y análisis de los históricos de los datos obtenidos.
- Evaluación de las retribuciones resultantes de la aplicación de cada 'evento'.
- Diseño del programa de Gestión de Recursos Distribuidos y plan de venta del consumidor.

Por último, a los **consumidores**, deberá ofrecer adicionalmente:

- Información sobre precios en los diferentes mercados, lo que proporcionará distintas posibilidades de contratación.
- Generación de ofertas de energía.
- Evaluación de riesgos en la carpeta de compra de energía.
- Optimización de la operación de recursos DER.
- Mejora en la gestión de sus instalaciones
- Mayor conocimiento de los consumos de cada uno de los procesos.

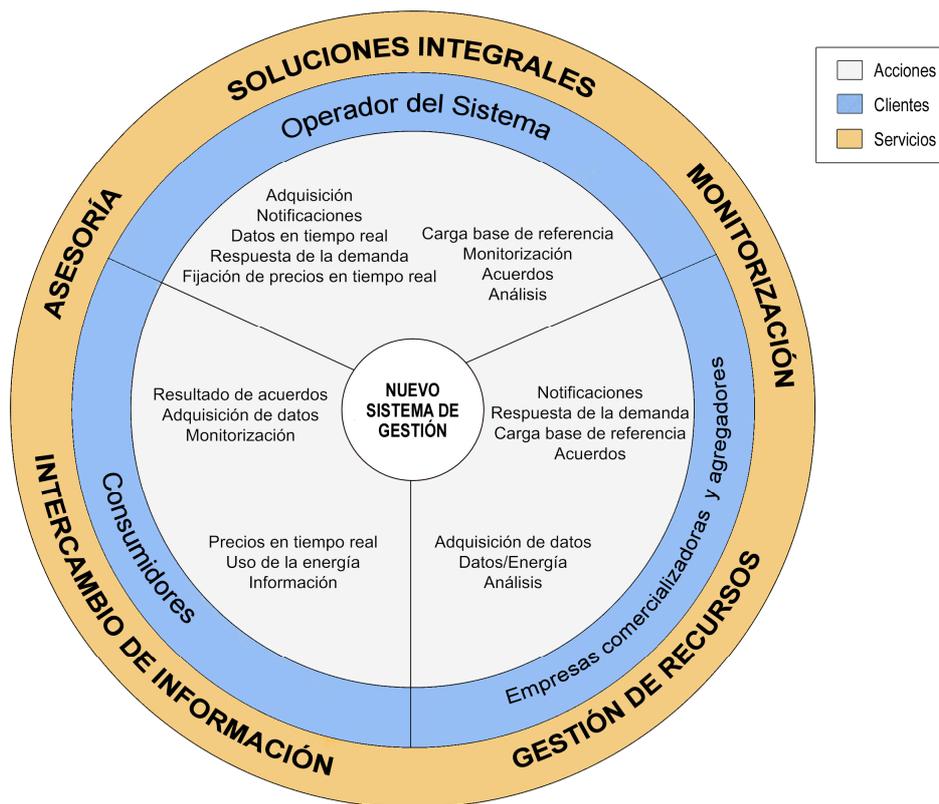


Figura 4.2 Servicios del sistema propuesto proporcionados a los componentes de un sistema eléctrico

4.3 Componentes hardware del sistema

Una de las características fundamentales que determina la arquitectura del sistema propuesto es que debe poder comunicarse con distintos consumidores muy alejados entre sí, desde un punto donde se concentra toda la información del sistema. Para ello, se utiliza la comunicación TCP-IP a través de Ethernet que, sin cableado específico, permite acceder a cualquier lugar con fiabilidad y gran velocidad de transmisión de datos.

Los elementos del sistema deben estar ubicados en dos espacios claramente diferenciados: Uno en el *usuario*, donde se toman las medidas de potencia, intensidad, se realizan las acciones de control, etc. El otro en el *centro de control*, donde se dispone del servidor de adquisición, las aplicaciones software, el almacenamiento de datos, el servidor Web y las aplicaciones de tratamiento y presentación de los datos obtenidos (Figura 4.3).

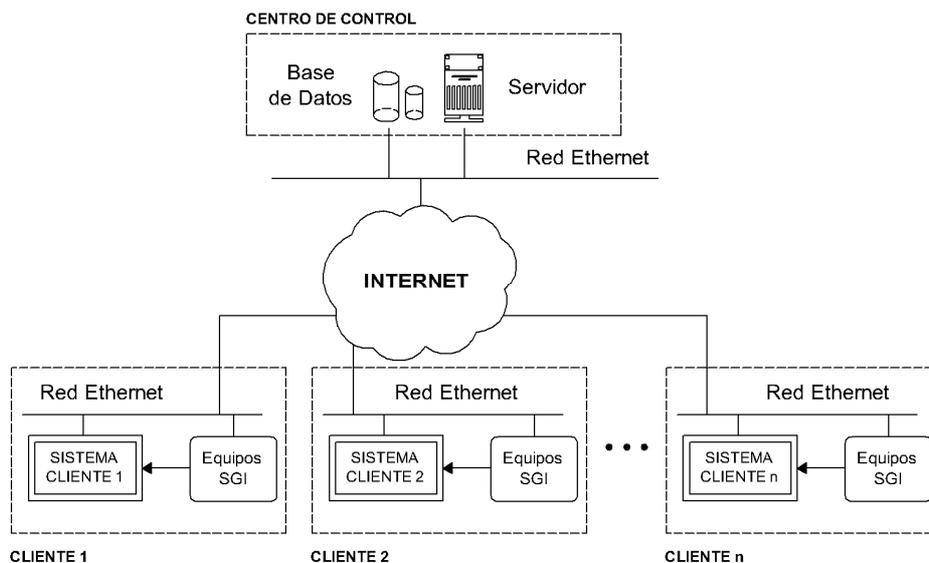


Figura 4.3 Arquitectura del SGI propuesto

Los equipos del SGI a instalar en el cliente son:

- Pasarela Ethernet ETG100 de Telemecanique: Proporciona conexión a Ethernet de los distintos equipos a instalar en el cliente.
- Autómata Twido de Telemecanique: Permite realizar acciones de control de forma remota.
- Unidad de adquisición de datos Power Meter 710 de Merlin Gerin: Central de medida para adquisición de los parámetros eléctricos de la instalación.

Los principales elementos del sistema en el centro de control son:

- Servidor central: Gestiona toda la información del sistema y sirve la información a los usuarios a través de la publicación de un portal Web.
- Motor de base de datos SQL: Genera y gestiona la base de datos del sistema.

4.3.1 Componentes del sistema en el cliente

En el usuario, para obtener las medidas necesarias y actuar en las instalaciones, se deben instalar los siguientes equipos:

- *Equipo de comunicación* con el servidor. Establece la comunicación entre el servidor y los distintos elementos de medida y control. El protocolo a utilizar entre dicho equipo y el servidor es TCP-IP cliente-servidor. Este dispositivo es capaz de discriminar entre los equipos que tienen permiso para acceder a los datos de otros no habilitados. El equipo comercial elegido es la pasarela Ethernet ETG100 de Telemecanique.

- *Unidad central de adquisición* de datos. Permite obtener medidas de las magnitudes eléctricas más relevantes como potencias, intensidades y tensiones en el sistema a controlar, y otras referentes a calidad de onda¹ como THD de tensiones e intensidades, etc. El equipo comercial elegido es el Power Meter 710 de Merlin Gerin. Para la medida de las intensidades será necesario disponer, además, de los transformadores de intensidad adecuados para el punto en concreto en el que se realice la medida (I₁ A / 5 A).

- *Equipo de actuación* en los usuarios. Es necesario tener la posibilidad de actuar en el usuario con acciones tanto digitales como analógicas. Además, debe disponerse de un equipo que permita tomar decisiones de forma local a partir de los datos del servidor pero de forma independiente a éste. El equipo comercial elegido es el autómatas programable Twido de Telemecanique. Generará las señales de entrada, para verificación y control del sistema, y las señales de salida para ejecutar las acciones de control en el usuario.

- En los cuadros eléctricos es necesario instalar *dispositivos de mando*, como interruptores, relés, telerruptores, etc., que adapten las señales de entrada y salida del autómatas a los circuitos de potencia del sistema a controlar. Los relés y contactores instalados expresamente para el sistema se elegirán del tipo *normalmente cerrado* para asegurar que frente a una falta de suministro de tensión en el cuadro de control no se interfiera en las instalaciones del cliente.

Con esta configuración, el usuario puede encontrarse en cualquier ubicación, con el único requerimiento de disponer de una conexión vía Ethernet para poder

¹ Concepto que hace referencia a la degradación de algunos parámetros de la onda de tensión o intensidad en un determinado punto de la instalación eléctrica.

comunicarse con el centro de control. Por tanto, no es necesario realizar ningún cableado adicional entre éste y el usuario.

El SGI propuesto debe integrarse en las instalaciones del cliente, así, en los edificios de gran tamaño en los que existe, habitualmente, un sistema de control centralizado, no debe ser sustituto del existente sino que debe interactuar con él para realizar las funciones específicas de respuesta de la demanda. En aquellos edificios en los que no exista sistema de gestión, el nuevo sistema proporcionará la automatización necesaria para conseguir un control remoto de los equipos seleccionados.

Son diversos los aspectos considerados a la hora de elegir los distintos elementos:

- Fiabilidad. Se eligen componentes del grupo Schneider Electric, fabricante de reconocido prestigio con presencia en todo el mundo.
- Soporte técnico. Se dispone de una gran red comercial para la adquisición de los equipos.
- Actualización. Tanto en el software como en el hardware seleccionado se dispone de actualizaciones continuas por parte de los fabricantes.
- Aspecto económico. Se eligen equipos de gama industrial pero económicos, ya que debe diseñarse un sistema lo más reproducible posible para que sea susceptible de instalarse en cualquier instalación de cliente, ya que el número de clientes a gestionar depende del diseño del programa de respuesta de la demanda a implantar.

Se especifican con detalle las características de los equipos presentados:

Equipo de comunicación: Pasarela Ethernet ETG100

El objetivo principal es poder acceder a través de Ethernet a los distintos dispositivos instalados en los clientes para poder, por un lado, tomar la medida de los consumos en distintos puntos y, por otro, poder realizar acciones de control en sus instalaciones. Al utilizar Ethernet se evita realizar un cableado específico desde el servidor central a cada uno de los clientes, ya que en la actualidad se dispone de conexión en la mayoría de ellos. Además, se dispone de la fiabilidad y velocidad de transmisión de datos demostrada en este protocolo (Capítulo 3).

La pasarela ETG100 es un dispositivo de comunicación que ofrece conectividad entre Ethernet (Modbus TCP/IP) y dispositivos en línea en serie, permitiendo que los clientes Modbus TCP/IP accedan a la información desde dispositivos esclavos en serie. El protocolo Modbus TCP/IP es una combinación del protocolo Modbus, que proporciona comunicación maestro-esclavo entre dispositivos y TCP/IP, que proporciona comunicación a través de una conexión Ethernet. Se utiliza Modbus TCP/IP para intercambiar datos entre la ETG y otros dispositivos compatibles con Modbus TCP/IP por medio del puerto TCP 502. Por tanto la comunicación de la pasarela con la red Ethernet existente en el edificio se realiza a través de cable UTP categoría 6, eligiendo como punto de conexión el Switch más cercano a la ubicación de la pasarela, lo que

permite comunicar el autómata y la unidad de adquisición de datos a la red, ya que crea una red Modbus para comunicar los distintos equipos con la red Ethernet. Para comunicar la pasarela con el autómata se utiliza el cable para comunicación Modbus TWDXCAFD010. Para comunicar la pasarela con la PM710 se puede utilizar cualquier cable apantallado 3x1mm² (Figura 4.4).

La alimentación de la pasarela es de 24V DC por lo que debe utilizarse una fuente de alimentación adecuada, cuya referencia comercial elegida es ABL7CEM24006, que es una fuente de 24V DC de 15W.

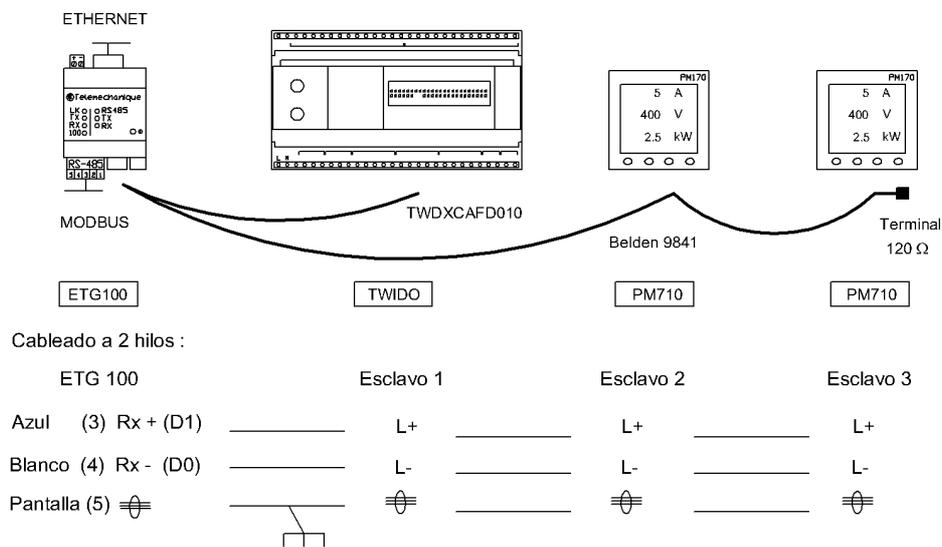


Figura 4.4 Conexión de la pasarela Ethernet ETG100

Para la configuración de la pasarela ETG100, se dispone de una página Web donde se definen los distintos parámetros de funcionamiento [42]. En cada pasarela se especificará una dirección IP para poder acceder a ella de forma remota. Dentro de las funciones que proporciona la pasarela, se dispone del Filtrado de Modbus TCP/IP. Esta función permite especificar los dispositivos clientes Modbus TCP/IP que tienen o no acceso a los dispositivos esclavos en serie conectados a la ETG100. Por lo que sólo se responderán peticiones de datos a aquellas direcciones IP que hayan sido dadas de alta para comunicarse con los equipos conectados a la pasarela (autómata, PM, etc.). Esta función es muy importante para garantizar la seguridad de los datos de los clientes, ya que se dispondrá de un control total de los equipos que acceden a los datos.

Así, la seguridad establecida en la pasarela se basa en tres puntos. En primer lugar, hay que considerar la contraseña necesaria para poder acceder a la página de configuración. En segundo lugar, se ha establecido una contraseña que es necesaria cada vez que se quiera realizar cualquier cambio en la configuración de la misma. Por último, se restringe el acceso al acoplador mediante el filtrado de la dirección IP de la máquina remota que realiza la petición. Tras recibir una petición de conexión de un equipo remoto, se verifica la dirección IP de la máquina remota. La verificación consiste

en controlar si esta dirección se encuentra en una lista de máquinas remotas autorizadas a conectarse. De ser así, se acepta la conexión, en caso contrario se cierra.

Unidad de adquisición: Central de medida PM710

La *central de medida PM710* de Powerlogic es un equipo de altas prestaciones para la supervisión de una instalación eléctrica. Este equipo permite obtener los distintos parámetros eléctricos en un determinado punto de consumo de una instalación eléctrica.

Dispone de un visualizador donde pueden consultarse distintos parámetros como intensidades, tensiones potencias y energías consumidas. También dispone de distintos menús para la configuración y consulta de otros parámetros.

La central PM710 incorpora un puerto de comunicación RS-485 que permite consultar los datos de forma remota a través de protocolo Modbus. Para comunicar la pasarela con la PM710, como se ha comentado, se puede utilizar cualquier cable apantallado 3x1mm².

Para realizar la conexión de la central de medida en un sistema trifásico a 4 hilos, se necesita conectar las cuatro tensiones (3 de fase y la de neutro) y las intensidades medidas en cada fase a través de transformadores de intensidad. Las especificaciones del equipo para la tensión de entrada son de 10 a 480V CA de línea y de 10mA a 5A en las entradas de intensidad (Figura 4.5).

Conexión trifásica en estrella a 4 hilos con 3 TI y 3 TT

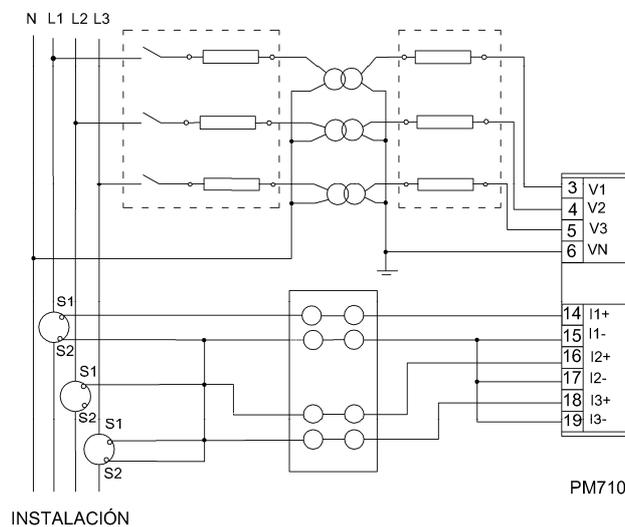


Figura 4.5 Conexión de la central de medida PM710

De entre los parámetros que es capaz de proporcionar [40], cabe destacar valores instantáneos de intensidad por fase, tensión, frecuencia, potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia, energía activa, reactiva y aparente, valores

máximos y mínimos de intensidad, tensión, potencia activa, reactiva y aparente, etc. En la Tabla 4.1 se indican los datos más importantes que proporciona este equipo.

| REGISTRO | UNIDADES | F. ESC ¹ | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------------|----------|---------------------|--|
| 4000 a 4001 ² | kWh | 4108 | Consumo de energía activa |
| 4002 a 4003 | kVAh | 4108 | Consumo de energía aparente |
| 4004 a 4005 | kVARh | 4108 | Consumo de energía reactiva |
| 4006 ³ | kW | 4107 | Potencia activa total |
| 4007 | kVA | 4107 | Potencia aparente total |
| 4008 | kVAR | 4107 | Potencia reactiva total |
| 4009 | - | 0,0001 | Factor de potencia total |
| 4010 | Voltio | 4106 | Tensión, L-L, media de las tres fases |
| 4011 | Voltio | 4106 | Tensión, L-N, media de las tres fases |
| 4012 | Amperio | 4105 | Intensidad, media de las tres fases |
| 4013 | Hz | 0,01 | Frecuencia |
| 4014 | kW | 4107 | Demanda de potencia activa actual total |
| 4020 | Amperio | 4105 | Intensidad instantánea de la Fase 1 |
| 4030 | Voltio | 4106 | Tensión de Línea 1-2 |
| 4045 | % | 0,1 | THD, Intensidad Fase 1 |
| 4049 | % | 0,1 | THD, Tensión Fase 1-N |
| 4105 ⁴ | - | - | Factor de escala Intensidad: -4=0,0001, -3=0,001, -2=0,01, -1=0,1, 0=1,0, 1=10, 2=100, 3=1.000, 4=10.000 |
| 4106 | - | - | Factor de escala Tensión: -4=0,0001, -3=0,001, -2=0,01, -1=0,1, 0=1,0, 1=10, 2=100, 3=1.000, 4=10.000 |
| 4107 | - | - | Factor de escala Potencia: -4=0,0001, -3=0,001, -2=0,01, -1=0,1, 0=1,0, 1=10, 2=100, 3=1.000, 4=10.000 |
| 4108 | - | - | Factor de escala Energía: -4=0,0001, -3=0,001, -2=0,01, -1=0,1, 0=1,0, 1=10, 2=100, 3=1.000, 4=10.000 |

Tabla 4.1 Listado de registros de la central de medida PM710

¹ Es el Factor de Escala a aplicar en cada dato, almacenado en el registro que se indica.

² Los registros 4000-4005, son valores enteros largos sin signo (4 bytes).

³ Los registros 4006-4104, son valores enteros sin signo (2 bytes).

⁴ Los registros 4105-4108, son valores enteros con signo (2 bytes).

Para consultar la totalidad de los mismos están disponibles en el manual del equipo [40].

Equipo de actuación: Autómata Twido

El controlador propuesto para instalar en el cliente es un *controlador Twido* de Telemecanique. Existen diversos modelos, aunque el que más se ajusta a las necesidades es el TWDLCAA40DRF [41], que es un modelo compacto de 24 entradas y 16 salidas (Figura 4.6).

Es posible añadir varias opciones adicionales, de entre las que se destaca:

- Hasta 15 módulos de ampliación de las E/S digitales o tipo relé y 8 módulos de entradas analógicas.
- Cartucho de memoria para ampliar la disponible en el controlador de serie.
- Cartucho de reloj en tiempo real (RTC).
- Módulos de ampliación de comunicaciones. En concreto el módulo de interfase Ethernet, que permite la conexión directamente con protocolo TCP-IP Modbus. En la arquitectura se ha decidido no utilizar esta opción, por no disponer de un filtrado de equipos, por lo que cualquier servidor podría realizar peticiones al autómata. Por ello, se decide la utilización de la pasarela ETG100 que sí proporciona esta función.
- Módulo de monitor de operación.
- Soporte de batería externa (cuya referencia es TSXPLP01), para mantener el programa del autómata aún cuando no hay suministro eléctrico.

Los controladores Twido disponen de un puerto serie, o de un segundo puerto opcional (cuya referencia comercial es TWDNAC485D010), que se utiliza para servicios en tiempo real o de administración de sistema. Los servicios en tiempo real proporcionan funciones de distribución de datos para intercambiar datos con dispositivos de E/S, así como funciones de administración para comunicarse con dispositivos externos. Los servicios de administración de sistemas controlan y configuran el controlador por medio del software de programación TwidoSoft¹ [39]. Cada puerto serie se utiliza para cualquiera de estos servicios, pero sólo el puerto serie 1 es válido para comunicarse con TwidoSoft. Para poder utilizar estos servicios, existen tres protocolos disponibles en cada controlador: Conexión remota, Modbus y ASCII. En la arquitectura presentada, el segundo puerto se utiliza para comunicar la pasarela ETG100 con el autómata y permitir la comunicación entre éste y el servidor.

Así, por tanto, en el autómata se pueden ejecutar órdenes que lleguen en tiempo real desde el servidor central o ejecutar distintos programas de forma local. Las aplicaciones en local desarrolladas son:

¹ Aplicación informática de la marca comercial Schneider para configuración y programación de la serie de autómatas Twido.

- Adquisición de los datos de energía activa y reactiva cada 15 min., de forma que al producirse una falta de datos, por no disponer de comunicación del servidor con algún equipo al tomar la medida, pueda posteriormente recuperar al menos dichos datos desde el autómata.
- Establecer horarios para alguna de las salidas del autómata. Así, el estado de una salida se puede modificar según un horario aún sin disponer de comunicación con el servidor central.

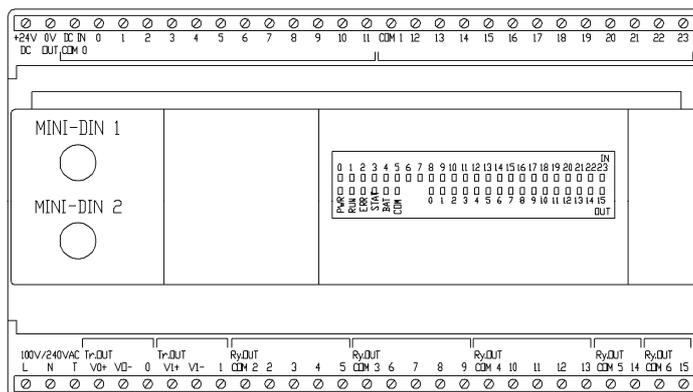


Figura 4.6 Equipo de actuación Autómata Twido

Entradas y salidas digitales. Circuitos de protección

Las acciones más habituales a realizar por el sistema serán de tipo digital, es decir, se necesitará cambiar el estado de un equipo de mando (relé, contactor, etc.) de valor ON a OFF o viceversa.

La conexión desde las salidas digitales del autómata hasta cada uno de los equipos a controlar puede realizarse con cualquier cableado que cumpla la normativa para el edificio a instalar. En concreto, es posible, utilizar conductor de cobre RV 0,6/1kV de 3x1,5mm² instalado por bandejas existentes o bajo tubo.

Dependiendo de la carga, en ocasiones es necesario un circuito de protección para la salida de relé en los controladores y en determinados módulos. Se dispone de distintos circuitos de protección en función de la fuente de alimentación. Este circuito debe conectarse inmediatamente después del controlador o módulo de salida.

- *Circuito de protección A:* Este circuito de protección se puede utilizar, en una carga inductiva, cuando la impedancia de carga sea inferior a la impedancia RC¹. Donde C representa un valor comprendido entre 0,1 y 1 µF y R representa una resistencia que tiene aproximadamente el mismo valor de resistencia que la carga (Figura 4.7).

¹ AC: Altern Current. Circuito alimentado por una fuente de tensión alterna.

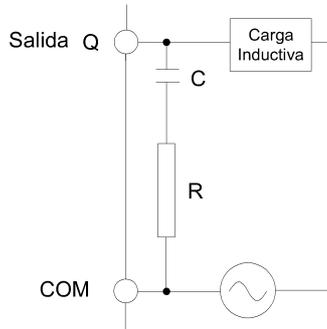


Figura 4.7 Circuito de protección para salidas relés tipo A

- *Circuito de protección B:* Este circuito de protección se puede utilizar para circuitos de alimentación de cargas de AC y DC¹ (Figura 4.8).

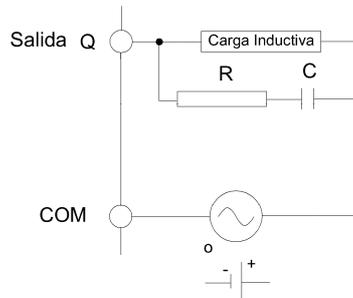


Figura 4.8 Circuito de protección para salidas relés tipo B

- *Circuito de protección C:* Este circuito de protección se puede utilizar para circuitos de alimentación de cargas de DC. El diodo a utilizar debe tener una tensión inversa no disruptiva (tensión de alimentación del circuito de carga x 10) y corriente de carga superior a la corriente de carga (Figura 4.9).

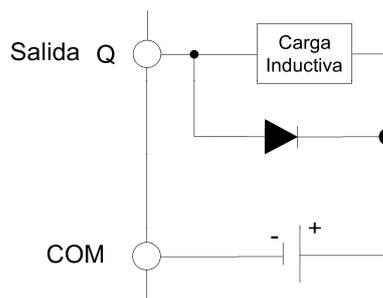


Figura 4.9 Circuito de protección para salidas relés tipo C

¹ DC: Direct Current. Circuito alimentado por una fuente de tensión continua.

- *Circuito de protección D*: Este circuito de protección se puede utilizar para circuitos de alimentación de cargas de AC y DC (Figura 4.10).

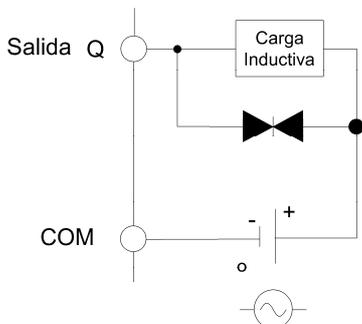


Figura 4.10 Circuito de protección para salidas relés tipo D

Al realizar la conexión de señales digitales en el controlador es habitual realizar la conexión de entradas de común negativo y salidas de común positivo (Figura 4.11).

El terminal COM de las salidas se conecta a una fuente de alimentación de +24V y el COM de las entradas al terminal de 0V de la fuente de alimentación.

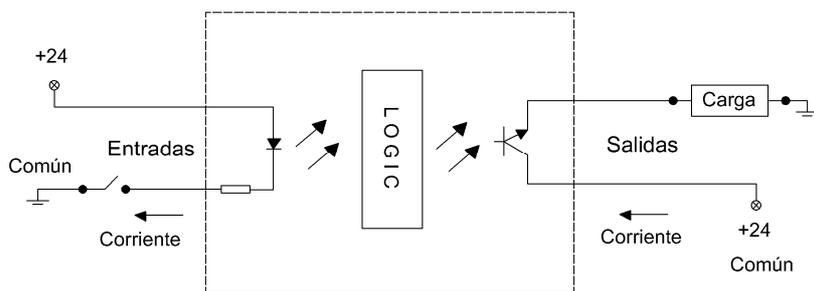


Figura 4.11 Conexión de señales digitales en el controlador

Al conectar una salida del automático con el equipo a controlar hay que asegurarse de que todos los equipos conectados, relés, salidas del automático, etc., tienen la capacidad de corte necesaria para ello.

La instalación de todos los equipos en los clientes es preferible realizarla en cuadros específicos para tal efecto, aunque es posible, en ocasiones, utilizar los cuadros eléctricos existentes si hay espacio disponible. En general, el automático Twido encargado de realizar las distintas acciones se debe instalar en un cuadro específico. Dicho cuadro debe disponer de un pulsador de emergencia que anula físicamente las órdenes del automático permitiendo así al cliente tener siempre la posibilidad de anular alguna de las acciones que se estén intentando llevar a cabo y no sean compatibles con el funcionamiento de su sistema en ese momento.

Algunos de los equipos habitualmente controlables para llevar acciones de respuesta de la demanda, integrados en la implementación práctica desarrollada, son:

- Equipos de climatización splits. Para controlar estos equipos debe de intercalarse un relé de control en un punto de la máquina en el que fuerce el apagado del equipo pero que no corte una intensidad superior a 2A (capacidad de corte del relé). Existen distintas posibilidades según el modelo, cortar en la alimentación del termostato, en el cable de alimentación de la unidad interior para que fuerce el apagado de la exterior, en la alimentación de la placa de control de la unidad interior, etc.

- Cuando en el cliente a controlar hay un sistema de control centralizado (SGC) instalado, como se ha comentado, el SGI propuesto no pretende sustituir al existente sino complementarse con él, por lo que las órdenes se indican directamente a estos equipos de control, siendo éstos los que las interpretan. El propio software de control del edificio indica a los elementos de control todas las instrucciones necesarias para realizar las acciones de control solicitadas. Así, por ejemplo, al activar una salida del automatismo Twido, ésta es recibida por el sistema de control existente a través de una entrada y es interpretada a través su aplicación software realizando las distintas acciones de control necesarias para llevar a cabo la acción deseada (Figura 4.12).

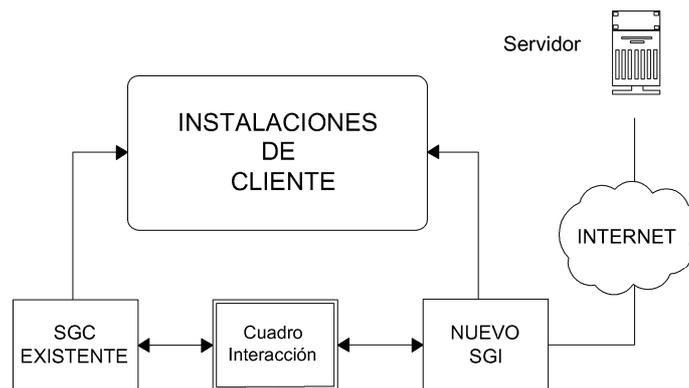


Figura 4.12 Interacción entre el sistema de control propuesto y uno existente

Adquisición de variables relevantes para el sistema

Con la arquitectura del SGI presentada, también es posible adquirir el valor de ciertas variables importantes para el sistema que se especifiquen, como por ejemplo:

- *Temperatura exterior.* Se puede adquirir la temperatura exterior en un determinado punto. Para ello es necesario instalar una sonda de temperatura exterior y ampliar el automatismo con un módulo de entradas analógicas, en concreto el módulo de ampliación elegido es TWD-AMI8HT¹ [45]. La sonda de temperatura comercial elegida es el modelo TTA-250/F [44].

¹ Módulo de 8 entradas analógicas de 0-10V ó 4-20 mA.

- *Iluminación exterior.* Para adquirir esta variable se debe instalar un sensor de luz y realizar la conexión al módulo de entradas analógicas indicado. El sensor comercial elegido es el ELV 471 [43].

- *Alarmas:* Pueden definirse posiciones de memoria de los autómatas como señales de alarma del sistema. Así, por ejemplo si una posición de memoria pasa a valor 1, indica que se ha presionado un pulsador de emergencia, lo que provoca físicamente el apagado de todas las acciones de control y por software la activación de la alarma.

Para utilizar los equipos indicados anteriormente que constituyen los componentes hardware del SGI es necesario el uso de distintas herramientas de programación que se presentan a continuación:

Software de programación de autómatas: TwidoSoft

La aplicación *TwidoSoft* [39] es un entorno de desarrollo gráfico para crear, configurar y gestionar aplicaciones para los autómatas programables Twido. Es un programa basado en Windows de 32 bits para un ordenador personal que se ejecute con sistema operativo Windows XP o inferior de Microsoft.

El software dispone de las funciones típicas de barras de herramientas, ventanas flotantes, organización de menús, ayuda en línea, etc. Las principales funciones de programación y configuración que presenta son:

- Programación en diagrama Ladder¹, de lenguaje de la lista de instrucciones², etc. Son reversibles por lo que un programa desarrollado en uno de ellos puede ser modificado o editado con otro lenguaje.
- Programación online y offline.
- Animación de programas y datos.
- Editores para las principales funciones de programación y configuración.
- Funciones de edición estándar.
- Referencias cruzadas.
- Permite la carga y descarga de programas del autómata.
- Supervisión de los programas.

Para realizar la conexión de un PC a un controlador Twido, se necesita un cable de comunicación TSXPCX3030 que convierte las señales entre los dispositivos RS-485 y USB. El puerto 1 de todos los controladores es un puerto RS-485 integrado que debe utilizarse para comunicarse con el software de programación. Cuando se conecta el

¹ Programación simbólica en la que se utilizan diagramas de contactos.

² Programación por lenguaje de programación con instrucciones definidas.

cable al puerto, el protocolo se establece automáticamente para las comunicaciones con TwidoSoft (Figura 4.13).

| Cable | RS485 | RS232 |
|------------|---------|--------|
| 1 negro | D1(A+) | RTS |
| 2 marrón | D0(B-) | DTR |
| 3 rojo | NC | TXD |
| 4 naranja | /DE | RXD |
| 5 amarillo | /DPT | DSR |
| 6 verde | NC | COM |
| 7 azul | COM | COM |
| 8 blanco | 5 Volts | NC |
| shell | Shield | Shield |

Cable TSXPCX3030 con conector miniDIN:



Conexión Modbus RS-485

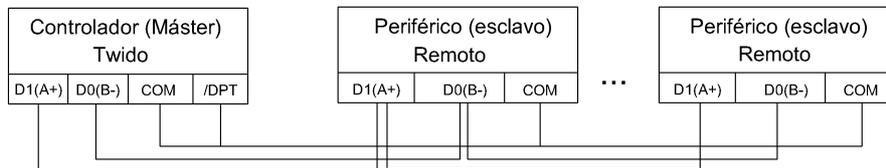


Figura 4.13 Conexionado del cable de comunicaciones TSXPCX3030

Es posible editar tablas de animación, que permitan enumerar distintas variables de datos utilizadas en el programa principal, consultar el valor actual y modificarlo, asociar símbolos a las variables, etc.

Como se ha indicado, se pueden utilizar distintos lenguajes de programación:

- Lenguaje Ladder o Diagrama de Contactos.
- Lenguaje de listas o instrucciones.
- Lenguaje con funciones de definición de macros.

Habitualmente, y en este trabajo también, se utiliza el Lenguaje de Diagrama de Contactos o *Ladder*. Un programa escrito en lenguaje Ladder está formado por redes de elementos gráficos unidos que se organizan en escalones que el controlador ejecuta de forma secuencial. Un diagrama Ladder es una representación gráfica de un diagrama lógico de relés. Cada escalón está formado por una red de elementos gráficos unidos que se organizan en un reticulado de programación que comienza con una barra potencial a la izquierda y finaliza con otra a la derecha (Figura 4.14).

En cada escalón se puede incluir una cabecera con la descripción del mismo y en el reticulado de programación indicar los elementos gráficos, en dos áreas diferenciadas:

- *Área de prueba*: Contiene las condiciones que se han de probar a fin de realizar acciones. Está formada por las columnas 1 a 10 y contiene contactos, bloques de función y bloques de comparación.

- *Área de actividad*: Contiene la salida y operación que será realizada según sean los resultados de las pruebas llevadas a cabo en el área de prueba. Está formada por las columnas de 9 a 11 y contiene bobinas y bloques de operación.

- La unión de unos con otros se realiza con conectores, que simplemente dejan pasar el valor del potencial.

Con TwidoSoft es posible supervisar los autómatas, realizar ejecuciones paso a paso y consultar el estado de cualquier variable en el autómata.

La definición de los programas se realiza principalmente con la inserción de contactos (estado de entradas o variables) y bobinas (salidas del autómata). También, pueden utilizarse bloques función contador o temporizador, llamadas a una subrutina o salto, bloques de comparación, bloques de operación, etc. Para mayor detalle consultar el manual de programación [39].

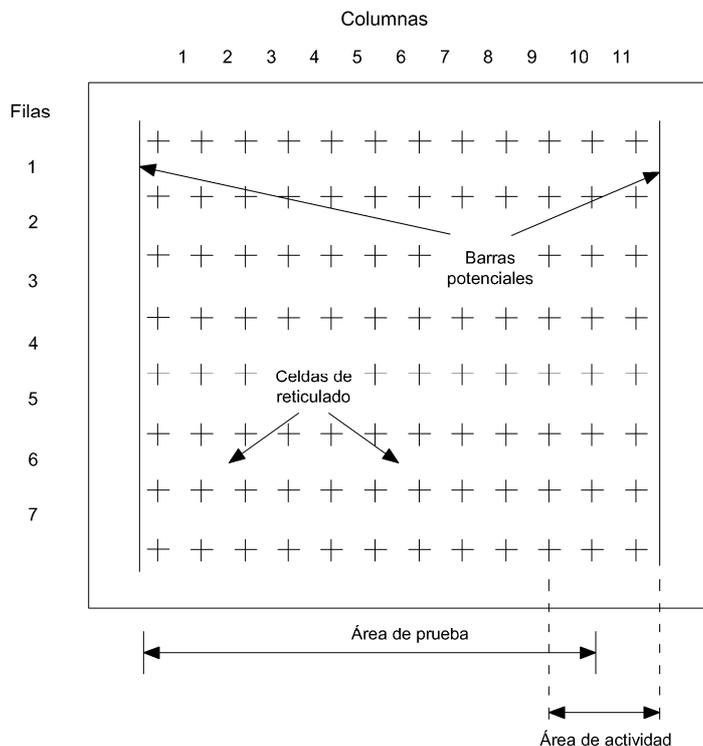


Figura 4.14 Área de programación de TwidoSoft

Funciones de comunicación del servidor central con la pasarela ETG100

La comunicación del servidor central con los equipos remotos se realiza a través de Ethernet, como se ha comentado en la descripción de la arquitectura del sistema (Apartado 4.3). Para poder lograr dicha comunicación es necesario el uso de un ActiveX

Cliente Modbus TCP-IP. Este componente se instala en el proyecto de Visual Basic¹ [50] y con una instancia del mismo proporciona una serie de funciones de comunicación con los equipos tanto de lectura como de escritura.

La función de *lectura* presenta la siguiente sintaxis:

function Read (IPLocal, IPRemote: String; Port_IP:Long; N_Slave, Function_: Integer; Start, Quantity, TimeOutConnection, TimeOut: Long; Values: OleVariant): Long

Esta función permite realizar una orden de lectura a un cliente determinado en cualquier instante de tiempo. Como función Modbus, una vez ejecutada la función el programa espera hasta recibir los datos de respuesta del cliente.

Los distintos parámetros que definen esta función son:

- *IPLocal*: Dirección IP de la subred de la estación de la que se realiza la lectura de datos.
- *IPRemote*: Dirección IP pública de la estación de la que se realiza la lectura de datos.
- *Port_IP*: Puerto IP de la estación.
- *N_Slave*: Dirección Modbus de la estación.
- *Function_*: Código de la función Modbus².
- *Start*: Palabra inicial en la que se realiza la lectura
- *Quantity*: Número de palabras a leer.
- *TimeOutConnection*: Tiempo en mseg. de espera para establecer la conexión.
- *TimeOut*: Tiempo en mseg. de espera para recibir la respuesta.
- *Values*: Array en el que se guardan los datos leídos de la estación cliente. Los valores se formatean según el tipo de datos del array.

Otra función fundamental en el servidor para realizar el intercambio de datos con los distintos clientes es la de *escritura* en cualquier posición de memoria del autómata en el cliente. Ésta presenta la siguiente sintaxis:

function Write (IPLocal, IPRemote: String; Port_IP:Long; N_Slave, Function_: Integer; Start, Quantity, TimeOutConnection, TimeOut: Long; Values: OleVariant): Long

Esta función permite realizar una orden de escritura a un cliente determinado en cualquier instante de tiempo. Al igual que el caso anterior, una vez ejecutada la función el programa espera hasta recibir la confirmación de escritura.

¹ Software de desarrollo de aplicaciones utilizado en la implementación del sistema.

² Las funciones Modbus están codificadas, por ejemplo la lectura corresponde a la función de valor 3 y la de escritura al valor 16.

Los distintos parámetros de configuración son idénticos a los de la función de lectura.

En el caso de realizar alguna acción de lectura o escritura y presentarse algún problema en la comunicación el componente ActiveX, proporciona como resultado de la función un código con el error encontrado [54].

4.3.2 Componentes del sistema en el centro de control

Como se ha indicado anteriormente, todos los equipos instalados en los distintos clientes serán controlados desde un punto común que es el *centro de control*. Dicho centro está formado por [38]:

- *Servidor principal*: Este servidor funciona como servidor de base de datos y aplicaciones. En él se almacenan todos los datos adquiridos en los usuarios y los programas que analizan estos datos y realizan las distintas acciones en los usuarios, tanto de control como de gestión de cargas. Además, funciona como servidor Web, y por tanto, publica el portal de Internet disponiendo los elementos necesarios para conseguir que el flujo de datos se realice de forma segura. El equipo comercial elegido en la implementación del sistema, es un Intel Server System Xeon SR2520SAXR2U con 4Gb de memoria DDR2 de 667MHz, con 2 microprocesadores Intel Xeon Quadcore 5405 de 2,0GHz, 3 discos duros de 320Gb Serial ATA y 1 DVD. Los discos duros están en configuración de *backup en espejo*¹. Se cuenta con uno de los aspectos fundamentales en este tipo de sistemas que es disponer de un equipo de alimentación interrumpida (UPS) para el servidor principal de forma que el sistema sea inmune a un posible corte del suministro eléctrico. Se elige un UPS de alimentación en línea con la carga y ampliable, por lo que se tendrá la posibilidad de aumentar el número de baterías disponibles y por tanto el tiempo de respaldo. Así, el modelo comercial instalado es el Smart UPS 2200VA de APC. La línea eléctrica de alimentación de este equipo debe estar alimentada a través del suministro de socorro del edificio. Con esta configuración se dispone de una protección eficaz frente a una falta de suministro de red del sistema.

- *Servidor auxiliar*: Se utiliza como servidor de desarrollo en donde se prueban todas las versiones de las aplicaciones y servidor de archivos para el grupo de trabajo. Su principal misión es centralizar la información de todas las partes del grupo de trabajo, y de esta forma aportar al mismo la seguridad que reporta tener todos los documentos referentes al proyecto concentrados en un único punto. Además, se encarga de albergar copias de seguridad de todas las estaciones de trabajo. También está preparado para, en caso de fallo del servidor principal, funcionar como equipo

¹ En esta configuración se realiza una copia exacta de un disco duro en otro de forma automática por hardware, no es necesario ejecutar ninguna aplicación. Al realizar una operación de escritura realmente se realiza en los dos simultáneamente.

redundante, pues se dispone de una copia de la última versión de la base de datos del sistema, de todas las aplicaciones y de la página Web.

- *Estaciones de trabajo*: Dedicadas a la implementación del software que posteriormente se integrará en los servidores y desarrollo de la ingeniería necesaria para la realización de las distintas instalaciones.

4.4 Componentes software del sistema

Las distintas aplicaciones se ejecutan en el servidor principal, siendo éste el responsable de todo el control del sistema.

El software a desarrollar puede ser específico para cada uno de los programas de respuesta de la demanda, aunque hay funcionalidades comunes para todos ellos como pueden ser la toma de medidas de consumo, posibilidad de realizar acciones de control en los usuarios, definición de horarios, etc. Por tanto, según se indicó en el Apartado 4.2 donde se definen las funcionalidades del SGI, de forma genérica, el sistema debe permitir en tiempo real:

- Registrar la potencia consumida en cada uno de los usuarios considerados.
- Guardar los registros en una base de datos.
- Establecer una conexión segura y en tiempo real entre el servidor remoto donde se ubicará la página Web y el autómata situado en un usuario.
- Servir un Portal Web, donde se visualicen las medidas y acciones realizadas.
- Ofrecer aplicaciones que permitan al usuario una autogestión de sus recursos energéticos.
- Generar históricos de potencias consumidas y actuaciones realizadas por el sistema.

Para el desarrollo de dichas aplicaciones se debe disponer de un software de desarrollo potente que permita la implementación de aplicaciones de ventana y aplicaciones Web. El software elegido es el Visual Studio 2005 de Microsoft y el lenguaje de programación es el Visual Basic .NET [51].

Para la generación y gestión de la base de datos se utiliza Microsoft SQL Server 2005 [48], que es una plataforma que permite la administración de datos con herramientas de análisis, con reporte y notificación integradas. Provee de gran escalabilidad, disponibilidad y seguridad al tiempo que simplifica la creación, implementación y gestión de distintas aplicaciones.

El servidor central también será el responsable de servir la Web de interacción con el usuario. El Internet Information Services (IIS) de Microsoft [52] es el programa empleado para servir la Web y en su desarrollo se utiliza Flash Player 9.0 de Adobe [53].

En los próximos apartados se especifica la implementación realizada de las distintas funcionalidades, o aplicaciones genéricas, desarrolladas necesarias para la implementación de cualquier programa de respuesta de la demanda.

Al intentar implantar un programa concreto es posible que surja la necesidad de nuevas aplicaciones, que al igual que las presentadas pueden desarrollarse teniendo en cuenta la experiencia adquirida.

4.4.1 Aplicación de adquisición de datos del cliente ***Adquisition***

En el sistema propuesto, se desarrolla una aplicación específica para la adquisición de los datos de los distintos clientes, *Adquisition*. Dicho programa se ejecuta en el servidor y a través de la red Ethernet llega hasta la pasarela ETG100, que responde a una petición de lectura, ya que el servidor tiene permisos para ello (Apartado 4.3.1). Desde la pasarela a través de Modbus se accede a la PM710 que devuelve los datos del punto de consumo.

Como el servidor debe poder realizar medidas a muchos puntos de medida simultáneamente, las peticiones se realizan por procesos independientes (Threads¹) con lo que se consigue que se manden al mismo tiempo todas las peticiones de lectura a la vez y es cada pasarela independientemente la que va respondiendo a cada solicitud. El intervalo de lectura de datos es programable de 1 minuto hasta 60 minutos.

Al recibir los datos, éstos son almacenados en una de las tablas de la base de datos del sistema (Apartado 4.4.2). Para el almacenamiento de los datos se ha tenido en cuenta las siguientes características:

- La base de datos del sistema se implementa en SQL Server que aporta una gran funcionalidad y no presenta restricciones técnicas importantes al sistema.
- Cada hora se realiza una comprobación para todos los puntos de medida que tengan todos los datos correspondientes según el intervalo de medida. Si se produce alguna pérdida de alguna medida el sistema manda un aviso.
- Se tiene en cuenta el crecimiento de las tablas, por lo que se realiza un particionado automático de las mismas al producirse el cambio de año.
- Se consideran los días especiales de cambio de horario de primavera, con una hora menos, y de otoño con una hora más.
- Es posible integrar distintos equipos de medida en las mismas tablas, simplemente es necesario hacer un preprocesado de los datos indicando el tipo de equipo a medir. En concreto, además de las medidas de la PM710, se toman medidas

¹ Un Thread, o hilo, es una unidad básica de programa que se ejecuta de forma independiente a la aplicación principal que lo ha generado, lo que permite realizar varias tareas concurrentemente.

de un contador comercial instalado en el centro de entrega de la universidad. El equipo instalado es el contador multifunción de alta precisión 5CTE-E1A-211400UB de ZIV, propiedad del cliente. Este equipo dispone de salidas auxiliares programables, que se han configurado en el modo de impulsos de acumulación de energía. Así, se configura una salida en la que se genera un impulso por cada 10kWh de energía activa medida, otra salida genera un impulso cada 5kVARh de energía reactiva inductiva, otra para cada 5kVARh de energía capacitiva y una última salida que genera un pulso en cada fin del periodo del maxímetro (cada 15 minutos). Estos pulsos son contabilizados en un autómatas Twido y a través de una pasarela ETG100 el servidor es capaz de realizar la consulta de los registros con los valores a almacenar.

- El programa Adquisition al realizar una consulta de lectura a uno de los puntos de medida puede ser que no reciba respuesta. Se realizan dos intentos por defecto, para asegurar que el equipo no está disponible, si aún así no hay respuesta se almacena el error realizando un histórico.

- Al terminar una lectura el programa se duerme hasta el siguiente instante de lectura considerando el tiempo que falta según el reloj del servidor por lo que la hora está siempre actualizada (al disponer de conexión Ethernet).

- Es posible también realizar el histórico de una combinación de puntos de medida, por ejemplo un punto de medida como suma de otros dos disponibles, para utilizarlas posteriormente de forma conjunta.

- Cada lectura, para cada punto de medida, se guarda en la base de datos con un campo de fecha, otro de hora seguido de los datos a almacenar. En el caso de que aparezca un problema en la adquisición de los datos, se inserta un registro sólo con la fecha y la hora. En la primera medida en la que se reestablece la comunicación, se reparte uniformemente la energía activa consumida durante el periodo sin conexión entre todas las que no tienen dato, creando así una columna adicional con el consumo de energía estimada en estos periodos. El mismo procedimiento se sigue para la energía reactiva y con éstos dos valores se calcula la energía aparente.

- Este programa, de la misma forma, adquiere los valores de las variables relevantes para el sistema, generando un histórico de los mismos, como por ejemplo la temperatura exterior, luminosidad ambiente, etc.

4.4.2 Base de datos SQL *Customers*

La base de datos *Customers* implementada, necesaria para almacenar y gestionar toda la información del sistema, utiliza SQL Server 2005 que es una solución de administración y análisis de datos de última generación que ofrece gran seguridad, escalabilidad y disponibilidad a las aplicaciones de datos, a la vez que las hace más fáciles de crear y administrar.

SQL Server 2005 ofrece una solución integrada de administración y análisis de datos que ayuda a:

- Crear, desplegar y administrar aplicaciones seguras, escalables y confiables.
- Maximizar la productividad mediante la reducción de la complejidad y el soporte de aplicaciones de bases de datos.
- Compartir datos en múltiples plataformas, aplicaciones y dispositivos para facilitar la conexión de sistemas internos y externos.
- Controlar los costes sin sacrificar el rendimiento, la disponibilidad, la escalabilidad o la seguridad.

La plataforma de datos SQL Server 2005 incluye las siguientes herramientas:

- *Base de datos relacional*. Dispone de un motor de base de datos relacional segura, confiable, altamente disponible con gran rendimiento y compatible para datos estructurados y sin estructura (XML).
- *Servicios de réplica*. Cuenta con réplica de datos para aplicaciones de procesamiento de datos distribuidos o móviles, alta disponibilidad de los sistemas, concurrencia escalable con almacenes de datos secundarios para soluciones de información complejas e integración con sistemas heterogéneos, incluidas las bases de datos Oracle existentes.
- *Notification Services*. Tiene capacidades avanzadas de notificación para el desarrollo y el despliegue de aplicaciones escalables que pueden entregar actualizaciones de información personalizadas y oportunas a una diversidad de dispositivos conectados y móviles.
- *Integration Services*. Dispone de capacidades de extracción, transformación y carga de datos para almacenamiento e integración de datos.
- *Analysis Services*. Tiene capacidades de procesamiento analítico en línea para el análisis rápido y sofisticado de conjuntos de datos grandes y complejos, utilizando almacenamiento multidimensional.
- *Reporting Services*. Es una solución global para crear, administrar y proporcionar tanto informes tradicionales orientados al papel como informes interactivos basados en la Web.
- *Herramientas de administración*. SQL Server incluye herramientas integradas de administración para gestión y optimización avanzadas de bases de datos, así como también integración directa con herramientas tales como Microsoft Operations Manager (MOM) y Microsoft Systems Management Server (SMS). Los protocolos de acceso de datos estándar reducen drásticamente el tiempo de acceso.
- *Herramientas de desarrollo*. Ofrece herramientas integradas de desarrollo para el motor de base de datos e informes que están directamente integrados con Microsoft Visual Studio para ofrecer capacidades de desarrollo de aplicación.

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

La aplicación desarrollada que maneja una instancia de la base de datos implementada en el desarrollo del sistema que está formada por 56 tablas, en las que se establecen distintas *restricciones en cascada*¹. Se definen distintos usuarios que disponen de permisos para acceder a determinadas tablas. Así, se pueden definir usuarios de SQL Server que tienen permisos, por ejemplo, de lectura de determinadas tablas, otros de lectura y escritura, etc. También, es posible definir permisos a los distintos usuarios de Windows para editar o modificar las tablas.

A continuación se presentan las tablas más relevantes y sus campos desarrollados en la implementación del sistema:

| TABLA | FUNCIÓN | CAMPOS |
|------------------|--|--|
| Usuarios | Definición de los usuarios que pueden acceder a la página Web | Usuario, Password, email, Nombre, Apellidos, fechapassword, PáginaInicio, Subpagina, logo, PreciokWh, GraficaNumDias, GraficaDiaTipo, TipoUsuario, FechaAlta, PermisosPorDefecto |
| Meters | Definición de los puntos de medida de los que se almacenarán datos | Id_meter, id_compañía, id_padre1, id_padre2, id_padre3, id_padre4, id_padre5, idMeterA, idMeterB, CodMeter, emplazamiento, IPLocal, IPRemote, PortIP, N_Slave, Function, Read_Start, Read_Quantity, Group, Intervalo, Time_out_Connection, TimeOut, Activado, DiasBaseline, FEmplazamiento, FUbicacion, ubicacion, id_mach, tipo_meter, EUnifilar, Operación, limite, Clasificacion, ahorro, tipo_limite, ControlConsumo, MAC, CTRatio |
| Lineas | Definición de las líneas de control del sistema | Id_linea, id_meter, id_lpadre, CodLinea, nombre, activada, pos_memoria, descripción, FUbicacion, FEmplazamiento, EUnifilar, DiaBloqueo, CapacidadCorte, TiempoApagado, TiempoRecuperacion, TiempoAcumuladoCPP, NVecesApagada, NSeguridad Tipo, IPLocalL, IPRemoteL, PortIPL, N_SlaveL, Time_out_ConnectionL, TimeOutL, ControlLActivado, umbral, BloqueoLuz |
| Datos | Tabla de almacenamiento datos adquiridos | Fecha, Anyo, [0], [1], [2], ... , [108] |
| Permisos | Indica los permisos de cada usuario | Usuario, id_Tipo, Tipo, Lectura, Modificacion, Escritura |
| Aplicaciones | Gestión de las aplicaciones disponibles en la Web | Id_aplicacion, Nombre, Descripcion, Version, Clasificacion, Activada, Pagina, Web, Inicio, Fecha, Aviso |
| Historico Lineas | Tabla datos histórico líneas | Id_hslinea, id_linea, Usuario, Fecha, Accion, OrigenError, IPUsuario, Eliminado |

Tabla 4.2 Tablas y campos asociados de la base de datos Customers

¹ Son aquellas que provocan que al eliminar un elemento en una tabla se eliminen todos los elementos de otras tablas asociados a éste.

En cuanto a los requerimientos de espacio de disco duro indicar que el tamaño actual de la base de datos con 125 puntos de medida y 790 líneas, con medidas, históricos, informes, etc. de un año y medio de datos es de 21GB. Con 87 puntos de medida el tamaño de sólo las medidas cuarto-horarias de un año es de 2,4GB. Por lo que se pone de manifiesto que el sistema puede crecer sin restricciones para la capacidad de almacenamiento disponible en la actualidad.

Hay que resaltar la importancia que tiene para el sistema disponer de una potente base de datos, ya que se pretende almacenar gran cantidad de información de muchos clientes. Adicionalmente, hay que considerar que para el cálculo de la previsión del consumo, que constituye otra herramienta fundamental para la respuesta activa de clientes, planteada en el Capítulo 8 del presente trabajo, es imprescindible disponer de un histórico de datos importante en el que se basen las previsiones a realizar, hecho que está disponible en la base de datos presentada.

4.4.3 Funciones de seguridad

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en el sistema es la confidencialidad y seguridad en los datos. Es importante tanto proteger los datos almacenados y transmitidos por el sistema como impedir que de forma incontrolada se produzca alguna orden a cualquier cliente ajena al sistema.

Las distintas medidas de seguridad de las que se dispone son:

- El acceso al servidor se realiza sólo por usuarios dados de alta con contraseña válida.
- Protección de la base de datos con contraseña.
- Seguridad en la pasarela ETG100 (Apartado 4.3.1), con acceso controlado por filtrado de IP's.
- Acceso restringido a una parte de la página Web, sólo accesible para los usuarios dados de alta. Cada usuario registrado tiene *login* y *password* de acceso a la página que son comprobados en la base de datos. Las contraseñas tienen un periodo de validez que debe ir renovándose.
- Utilización de *variables session* en las páginas Web. Las variables session son variables del servidor para almacenar valores y leerlos desde las páginas '.asp', de forma que se puedan pasar datos de unas páginas a otras. Hay que tener en cuenta que, puesto que se trata de variables del servidor, se almacenarán en la memoria de éste por lo que no es conveniente abusar de ellas para no ocupar recursos innecesarios. Los valores de estas variables se mantienen mientras dura la sesión, cuando ésta caduca, los valores se eliminan y ya no son accesibles. Por defecto la duración de la sesión es de 20 minutos, configurable por el administrador del sistema. Cada vez que se carga una página del servidor se renueva la sesión. El uso del objeto *session* requiere que el navegador del usuario tenga habilitadas las cookies, pues el

servidor envía una cookie al principio de la sesión que es la que identifica al usuario durante el resto de la sesión. En la página Web, cada vez que se carga una página se comprueba si la session ha expirado, en caso de haber terminado, se redirecciona al usuario a una página de fin de sesión fuera de la parte privada de la Web.

- Cada usuario sólo se puede acceder a los puntos de medida, líneas y aplicaciones para las que tiene permisos. En lugar de utilizar el clásico sistema de permisos basados en roles, se ha utilizado un sistema de permisos individuales por usuarios debido a los requisitos que plantea el sistema. De esta forma, es posible especificar para cada usuario qué puntos de medida, líneas o aplicaciones dispone de permisos para consultar y realizar operaciones.

- Se utiliza el almacenamiento de los passwords de los usuarios cifrados [46]. En ASP.NET la confidencialidad de los datos suele lograrse mediante el *cifrado*. Los algoritmos de cifrado, que emplean claves de cifrado, se utilizan para convertir texto normal en texto cifrado y el algoritmo de descifrado equivalente se utiliza para convertir el texto cifrado de nuevo a texto normal. Los algoritmos de *cifrado simétricos* utilizan la misma clave para cifrar y descifrar, mientras que los *algoritmos asimétricos* utilizan un par de claves: pública y privada para garantizar la protección de los datos frente a modificaciones accidentales o deliberadas. La integridad suelen proporcionarla los códigos de autenticación de mensajes o *valores hash*. Un *valor hash* es un valor numérico de longitud fija derivado de una secuencia de datos. Éstos se utilizan para comprobar la integridad de los datos que se envían a través de canales no seguros. Se compara el valor hash de los datos recibidos con el valor hash de los datos que se enviaron para determinar si se alteraron los datos durante la transmisión. Existen diversas clases de algoritmos hash disponibles en .NET las más utilizadas son SHA1 y MD5. Para cifrar las contraseñas de los usuarios se ha utilizado el algoritmo hash SHA1.

- Utilización de un *Certificado Digital* en la Web [46]. Con el uso del Certificado digital lo que se consigue por parte del cliente es verificar, a través de una entidad emisora de certificados, que el servidor que le está sirviendo una página segura en un determinado momento es realmente quién dice ser y no ha sido suplantado por otro. El certificado digital utiliza el cifrado asimétrico, con las claves pública y privada. Los datos cifrados con la clave privada pueden descifrarse únicamente con la clave pública correspondiente y viceversa. Las claves públicas (tal y como sugiere su nombre) están disponibles para todo el mundo. Por el contrario, la clave privada se limita a una persona en concreto. El mecanismo de distribución por el que las claves públicas se transportan a los usuarios es el certificado.

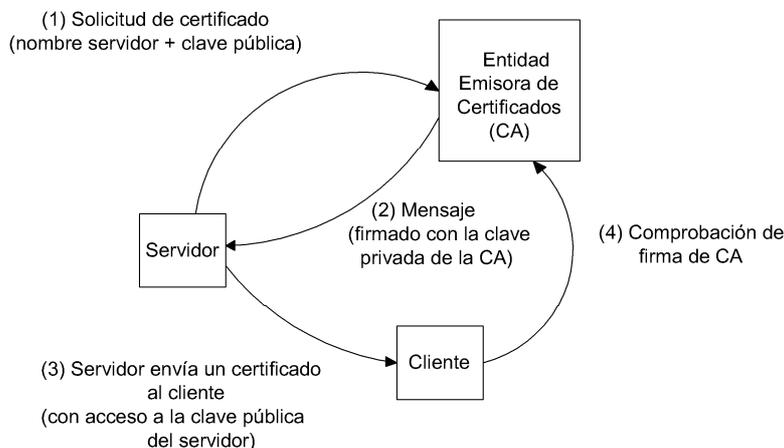


Figura 4.15 Proceso de certificación digital

Los certificados son firmados por una entidad emisora de certificados (CA) para confirmar que la clave pública procede del sujeto que declara haberla enviado. La CA es una entidad de confianza mutua. Para establecer el certificado digital en la Web es necesario seguir la secuencia de eventos que se muestra en la Figura 4.15. En primer lugar el servidor envía a una entidad emisora de certificados una solicitud de certificado firmado que contiene nombre de la Web, su clave pública y alguna información adicional (1). A continuación, la entidad emisora de certificados crea un mensaje a partir de dicha solicitud y firma el mensaje con su clave privada, creando de este modo una firma independiente. A continuación, devuelve el mensaje y la firma (2). En conjunto, el mensaje y la firma forman el certificado de la Web. A partir de este momento el servidor, para cualquier petición de una de sus páginas, envía el certificado a cualquier cliente para darle acceso a su clave pública (3). Por último, el cliente puede comprobar la firma del certificado mediante la clave pública de la entidad emisora de certificados. Si la firma resulta válida, acepta la clave pública del certificado como clave pública del servidor (4). Adicionalmente, al instalar el certificado la página Web trabaja con SSL (Secure Sockets Layer), que es un protocolo diseñado por la empresa Netscape para proveer comunicaciones encriptadas en Internet. SSL da privacidad para datos y mensajes, además permite autenticar los datos enviados. La principal ventaja de SSL radica en que se crea una conexión segura entre el cliente y el servidor Web, en esa conexión se pueden enviar cualquier cantidad de datos de forma segura.

4.5 Interfaz gráfica en un entorno Web

La World Wide Web puede entenderse como una evolución de distintos avances tecnológicos. Uno de ellos son las computadoras de *tiempo compartido interactivo* en las que el tiempo de computadora se compartían entre los usuarios interactivos y una o más tareas estaban todas activas al mismo tiempo. El siguiente gran avance fue la

conectividad en red, es decir, conectar un conjunto de computadoras personales de modo que pudieran comunicarse entre sí. Existían varias maneras de hacerlo. Una configuración importante es la red *cliente-servidor*. Aquí los clientes, se conectan a una computadora central, el servidor, que es una computadora con gran capacidad de disco.

Una ventaja de una red cliente-servidor es que promueve el uso compartido tanto de los programas como de los datos. Es decir, todos los usuarios pueden ejecutar los mismos programas en sus computadoras personales y pueden utilizar los datos almacenados en el servidor por cualquier otro usuario. Sin embargo, no siempre es fácil lograr que una computadora (un cliente) se comunique con otra computadora (el servidor). Se requiere un *middleware*, es decir, el software que promueve la interoperabilidad de las dos computadoras. La interoperabilidad se define como la cooperación mutua del código compilado por diferentes proveedores, implementado en distintos idiomas y habilitado para ejecutarse en varias plataformas.

Si se amplía la arquitectura cliente servidor a cientos de miles de servidores y cientos de millones de clientes considerando, por una parte, que existe una gran variedad de tipos de servidor y de clientes diferentes y, por otra, los enlaces que los conectan incluyendo las líneas de teléfono, las líneas troncales (líneas de gran volumen a larga distancia), los enlaces inalámbricos, los cables submarinos y los enlaces satelitales, entonces se tiene la World Wide Web.

Una característica del Web es que es sumamente *heterogénea*; es decir, los programas se ejecutan en una variedad ilimitada de hardware y sistemas operativos distintos. Por consiguiente la portabilidad es un requisito no negociable de todos los sistemas de información basados en la Web. Por ello, cada computadora está equipada con un explorador como Internet Explorer o Netscape Communicator. Hay estándares estrictos en vigor con respecto al formato de los archivos que se transmiten a través de la Web. Si un elemento cumple con ellos, entonces puede ser manejado por un explorador Web. Por lo tanto, la portabilidad en la Web es fácil de especificar e igualmente fácil de lograr. Por ejemplo, si una página se implementa en HTML (lenguaje para marcación de hipertexto) o en XML (lenguaje de marcación extensible, una extensión del HTML), puede ser leída por un explorador. Por lo tanto, la simple afirmación de que el sistema de información debe cumplir con los estándares de la Web, implica que la portabilidad está garantizada.

Al igual que con la red cliente-servidor simple, la World Wide Web puede utilizarse de varias maneras distintas. La forma más simple de un explorador Web es como un lector de páginas. Es decir, las páginas Web se descargan desde un servidor a una computadora cliente que tiene un explorador activo. El usuario utiliza el explorador para leer las páginas Web. Cuando un explorador funciona de esta manera, el cliente funciona apenas como una terminal tonta. Otra forma, más interesante, es que la Web funcione como una computadora distribuida. Los usuarios descargan programas desde el servidor a sus propias computadoras y ejecutan los programas ahí. Así, los programas portados se llaman *applets*. Esta es la forma en la que se plantea el uso de la Web en el SGI desarrollado. Es la forma en la que el usuario interactúa con el

sistema y se presentan todos los resultados. Una de las mayores ventajas del uso de una Web de interfaz entre el sistema y el usuario reside en no tener que instalar ningún software adicional en los equipos del cliente para acceder al sistema. Por lo que se dispone de acceso desde cualquier punto y de forma concurrente.

La World Wide Web se ha convertido en el sistema de comunicación e información por excelencia. Gracias a su desarrollo y su gran expansión de los últimos años se puede tener acceso a ella en prácticamente cualquier lugar, lo que la convierte en el medio ideal para convertirla en la base del presente proyecto. Se buscaba crear un sistema que no necesite ampliar las infraestructuras para realizar las comunicaciones, y que además permita una comunicación en los dos sentidos, para no solo obtener información, sino poder dar órdenes al sistema cuando sean necesarias.

4.5.1 Diseño e implementación de la plataforma Web

Como se ha comentado, una forma de presentar los datos, que permita a cualquier cliente interaccionar con el sistema, pueda ver sus datos, que de forma simultánea permita ver los mismos datos u otros a clientes distintos y compartir un mismo espacio común de comunicación es a través de una página Web. Así, es posible consultar datos desde cualquier ordenador con conexión a Ethernet sin necesidad previa de instalación de ningún software y de forma concurrente. De esta forma, cualquier participante de un determinado programa de respuesta de la demanda, por ejemplo un agregador, puede mandar mensajes a sus clientes a través de este entorno. Además, un cliente puede consultar datos de los mismos, realizar avisos, etc., por lo que se dispone de un espacio común de interacción que facilita las comunicaciones y aumenta la confianza entre ellos, ya que permite conocer datos en tiempo real de todos de forma simultánea. En este apartado se presenta el diseño e implementación llevada a cabo en la presente tesis. La Web se ha implementado siguiendo las directrices aquí expuestas y está disponible en la dirección www.derd.upv.es.

La página Web del sistema dispone de dos partes totalmente diferenciadas. Una *parte pública*, con acceso libre, y una *parte privada*, sólo accesible para los usuarios autorizados. La parte pública dispone de toda la información referente al sistema, con las noticias de interés y todos aquellos anuncios que cualquier componente del sistema necesite realizar de forma general. Estas páginas se desarrollan con Flash Player de Adobe [53].

La zona privada es realmente donde se presenta la información relevante de una instalación en concreto, por lo que las características que dispone la Web, y en especial, esta zona son:

- *Manejabilidad*. El diseño de la página es fácil de entender y cercano al usuario. Las funciones están accesibles desde distintos puntos, se remarca la información más importante, etc.

- *Navegabilidad*. Las páginas tienen una secuencia lógica entre ellas, agrupadas por tipo de aplicación, por funciones, etc. Presentan facilidad de transición de unas a otras sin tener que solicitar la misma información al usuario cada vez que se cambie de una a otra.

- *Configurable* para cada usuario. Cada cliente, según sus permisos, puede acceder a una serie de funciones dentro de la página. Según el tipo de usuario, puede personalizarse las vistas de las tablas, la página de inicio, los precios de la energía en cada periodo, etc. Así, según los permisos de cada usuario se puede acceder a distintos servicios.

- Es muy importante el *aspecto visual*. Cuenta con un entorno amigable y cercano para los usuarios, ya que a ella pueden acceder todo tipo de participantes del programa, por lo que pueden acceder usuarios con distintos conocimientos previos. También, se dispone de aleatoriedad en alguna de las imágenes que aparecen en la Web para aumentar el dinamismo de la misma, al igual que se presenta la fecha y la hora actual.

- La programación de las páginas Web se realiza con ASP.NET. Las páginas, que sirve el servidor principal del sistema, consultan datos de la base de datos SQL del sistema y las presenta en pantalla, por lo que es posible *acceder concurrentemente* a distintos datos.

- Esta plataforma sirve de *espacio común* entre los distintos agentes ya que pueden dejarse anuncios que puedan leer los distintos participantes, mandar e-mails a cualquier componente del sistema, enviar SMS, incluso el administrador de un programa puede contactar con cada cliente por cualquiera de las tres vías indicadas anteriormente. El e-mail de recepción de los mensajes del administrador de la página es derd@iie.upv.es.

- En las acciones de introducción de datos por el usuario, las lecturas a los autómatas, las consultas a las bases de datos, etc., se controla la correcta ejecución, por lo que si se produce algún problema se indica en la página en forma de *mensajes al usuario*. Este tipo de mensajes también se producen para confirmar acciones del usuario o al producirse algún error en la modificación de parámetros.

- Es posible consultar cualquier *informe* o histórico de datos que se necesite. Así, por ejemplo es posible consultar los consumos mensuales, diarios (Figura 4.20), por periodos de un determinado punto de medida, etc. También, está accesible la consulta de cualquier cambio en una línea de control, *históricos* de alarmas producidas, de avisos generados, etc. Para realizar una impresión correcta de los mismos se dispone de la generación de informes definidos por el usuario. Los informes se han programado con Crystal Reports [47], que permite la generación de los mismos en distintos formatos .pdf, .doc, .HTML, etc.

- Tal y como se ha indicado, cada usuario debe registrarse con su login y password y toda la información se sirve de forma *segura* (ver Apartado 4.4.3). Adicionalmente, en la página Web se controla el tiempo de conexión del usuario, por lo

que si hay una sesión abierta durante más de 20 minutos sin cambiar de página o no se realiza ninguna modificación en una de ellas ésta caduca y es necesario volver a registrarse.

- Se dispone de un *manual de usuario* explicativo de cada uno de los apartados de la página Web, la forma de introducir los parámetros requeridos, etc. y, también, en cada página hay un enlace a una página de ayuda.

Además, de las características generales indicadas, la Web debe contener toda la información necesaria del sistema para cada uno de los usuarios y las instalaciones controladas.

Las dos funciones básicas que proporciona la Web en la interacción entre el sistema y el usuario son: consulta de las lecturas de datos en un punto de medida y la posibilidad de realizar acciones de control sobre el proceso.

Las características para un *punto de medida* almacenadas en la base de datos (Tabla 4.2) y disponibles en la Web son (Figura 4.17):

- Identificadores: *id_meter* (identificador del punto de medida). *id_compania* (identificador de compañía). *id_padre* (identificador de un punto de medida que incluye el consumo medido por éste). *codMeter* (código del meter, por ejemplo m0561). *idMeterA*, *idMeterB* (identificador de puntos de medida de los que es combinación, si procede).

- Datos: *emplazamiento*. *Activado*. *FEmplazamiento* (figura con emplazamiento). *FUbicación* (figura con la ubicación). *ubicación*. *tipo_meter* (indica que tipo de hardware está compuesto el punto de medida). *EUnifilar* (Esquema unifilar). *Operación* (cuando es un punto de medida combinado, operación de combinación de los dos puntos de medida). *Clasificación* (tipo de cargas que alimenta: aire acondicionado, general, etc.).

Cada una de las acciones de control en las instalaciones del consumidor se define como una *línea*. Por ejemplo, una acción puede ser el control de una máquina de aire acondicionado, control de un circuito de alumbrado, pero pueden ser acciones de control más generales como apagado de toda la climatización central de un edificio. Las características principales de éstas que se dispone en la base de datos (Tabla 4.2), indicadas en la página Web, son (Figura 4.17):

- Identificadores: *id_linea* (identificador de la línea). *id_meter* (identificador del punto de medida que se ve afectado directamente por la línea). *CodLinea* (código de la línea, por ejemplo I7C010). *id_padre* (identificador de una línea cuya acción incluye la acción de ésta). Las líneas se presentan en la Web en forma de árbol indicándose así cuáles dependen unas de otras.

- Datos: *emplazamiento*, *nombre*, descripción, *activada*, *FEmplazamiento* (figura con emplazamiento), *EUnifilar* (esquema unifilar). Otros datos específicos de aplicaciones desarrolladas, como por ejemplo líneas que se desactivan si el nivel de luminosidad exterior es superior a un umbral: *ControlActivado*, *umbral*, *BloqueoLuz*.

Tal y como se ha puesto de manifiesto en el presente apartado se han implementado en un portal Web todas las funcionalidades necesarias para constituir un entorno apto para que todos los agentes de un programa de respuesta de la demanda interactúen entre sí de forma concurrente y segura. Todas las funciones se han desarrollado íntegramente en el grupo de trabajo del IIE, por lo que queda demostrada la posibilidad de integrar en dicho sistema cualquier aplicación que se defina para facilitar la integración de los clientes en el sistema, mejorar el conocimiento de sus instalaciones e integrar aquellas funciones necesarias para llevar a cabo cualquier programa de respuesta de la demanda. Por lo que constituye una aportación importante del presente trabajo la solución tecnológica propuesta que franquea las barreras tanto tecnológicas como de información que se presentan a la hora de aplicar cualquier programa.

4.5.2 Aplicaciones básicas desarrolladas

En el SGI desarrollado, se han implementado distintas aplicaciones básicas. Algunas de ellas permiten una mejor gestión de la demanda por parte del cliente directamente y otras enfocadas a mejorar su eficiencia energética, o una mejor gestión de sus consumos. Estas aplicaciones serán necesarias en cualquier programa de respuesta de la demanda que se desee implantar y permiten entre otras funciones medida del consumo eléctrico, planificación de distintas acciones de control en el proceso, control de la potencia máxima demandada en un determinado punto, vigilancia y control del consumo energético, cálculo de la predicción del consumo, etc. De entre las aplicaciones desarrolladas se destacan las siguientes:

- *Planificación*: Permite planificar el horario de funcionamiento de los distintos equipos controlados. Se pueden conectar o desconectar equipos de climatización, encendido/apagado de la iluminación, extractores, etc.
- *Vigilancia*: Esta aplicación envía un aviso cuando en un punto de medida se supera un umbral de consumo previamente definido por el usuario.
- *Control Potencia Pico (CPP)*: Permite controlar la potencia máxima consumida, evitando así, por ejemplo, las penalizaciones de la compañía eléctrica por consumos superiores a la potencia contratada.
- *Control Consumo*: Representa el consumo en un punto de medida frente a un límite de consumo de energía preestablecido.
- *Cálculo de la Baseline*: Cálculo de la predicción del consumo en un determinado punto de medida.
- *Mantenimiento*: Realiza todas las operaciones necesarias para mantener en un correcto estado el sistema, por lo que de forma periódica revisa el estado de las líneas, comunicación con los distintos puntos de medida, cálculos auxiliares, etc.

Aplicación Planificación

Esta aplicación permite establecer un horario de encendido y apagado de cada línea de control del sistema (Figura 4.18). Al organizar las líneas por punto de medida, cualquier acción de encendido o apagado que se tome en una de ellas, puede verse reflejada en dicho punto de medida de donde cuelga directamente dicha línea.

En esta aplicación existe la posibilidad de definir dos tipos de planificaciones:

- *Planificación semanal*: Se asignan horarios de funcionamiento para los distintos días de la semana. Así, es posible especificar 7 horarios distintos, uno para cada día, por lo que este horario se repite para la siguiente semana.
- *Planificación específica*: Se define para una fecha específica un funcionamiento especial, por ejemplo para un día festivo, vacaciones, etc.

Para definir una planificación semanal se deben definir los siguientes parámetros:

- *Nombre*: Nombre de la planificación con el que poder identificarla.
- *Activada*: Permite activar o desactivar la planificación.
- *Descripción*: Breve descripción de la línea o planificación.
- *Fecha Inicio – Fecha Fin*: Periodo de tiempo para el debe existir esta planificación. Cuando finaliza el periodo, la planificación queda desactivada automáticamente y la línea pasa automáticamente al estado ON. Si no se indica fecha fin, la planificación no caduca nunca.
- *Horarios*: Se indican los tramos horarios de ON y OFF para la línea.

Para definir una planificación específica, al igual que para las semanales, deben definirse los campos:

- *Nombre*: Nombre de la planificación con el que poder identificarla.
- *Activada*: Para activar o desactivar la planificación.
- *Descripción*: Breve descripción de la planificación.
- *Tipo de Planificación*: Existen 3 tipos de planificación para los días específicos. *Mensual*: la planificación es para el día seleccionado y se repite todos los meses para ese mismo día. *Anual*: la planificación es para el día seleccionado, repitiéndose la misma planificación para el día y el mes seleccionados, todos los años. En otro caso, la planificación es exclusivamente para el día seleccionado.
- *Horarios*: Se indican los tramos horarios de ON y OFF.

Aplicación Vigilancia

Esta aplicación o servicio permite vigilar el consumo de cualquier punto de medida y avisa cuando se sobrepasa un umbral de consumo definido (Figura 4.19). Se

comparan para cada hora de un día la energía consumida (kWh) con un límite establecido o umbral.

Al igual que en la aplicación *Planificación*, hay dos tipos de vigilancia:

- *Vigilancia semanal*: Es una vigilancia general para todas las semanas.
- *Vigilancias específicas*: Se realiza la vigilancia de un día del año en el cual la instalación se puede comportar de manera distinta.

Los parámetros a definir al dar de alta una vigilancia son:

- *Nombre*: Nombre de la vigilancia.
- *Activada*: Indica si se desea que la alarma esté activada o desactivada.
- *Límite de Energía*: Es el exceso máximo de energía que se permite durante un día. Así, si el exceso de energía acumulada, entre el consumo real y el umbral de energía durante un día, es mayor que este valor salta la alarma. Permite detectar las situaciones con un consumo de energía muy superior al límite durante un periodo de tiempo corto.
- *Descripción*: Breve comentario de la vigilancia.
- *Fecha Inicio - Fecha Fin*: Periodo de tiempo para el que se desea activa la vigilancia. Al no indicar fecha fin, se considera que la vigilancia no caduca.
- *Número de horas consecutivas*: Saltará la alarma si el consumo supera el umbral durante este número de horas consecutivas, así se evita el salto de la alarma por picos de consumo puntuales.
- *Número de veces*: Para que salte la alarma la energía debe exceder el umbral durante el número de horas consecutivas que se hayan especificado y además, esta situación se debe repetir el número de veces que se defina.

Deben darse las dos condiciones últimas para que salte la alarma: Número de horas consecutivas y Número de veces.

Por defecto la alarma se notifica al usuario que ha dado de alta la vigilancia, pero también se pueden añadir direcciones de correo electrónico alternativas para que la vigilancia sea supervisada por más usuarios.

La aplicación propone automáticamente un umbral para cada hora al dar de alta una vigilancia, por lo que se introduce un *Coefficiente Umbral*. Este coeficiente es el factor que multiplica el consumo energético de cada día de la semana anterior, que se toma como base, para el cálculo de los umbrales.

En una vigilancia específica, adicionalmente, hay que definir:

- *Tipo vigilancia*: Existen 3 tipos de vigilancia para los días específicos. *Mensual*: la vigilancia es para el día seleccionado y se repite todos los meses para ese mismo día. *Anual*: la vigilancia es para el día seleccionado, repitiéndose la misma vigilancia

para el día y el mes seleccionados todos los años. En otro caso, la vigilancia será exclusivamente para el día indicado en el calendario.

Aplicación Control Potencia Pico (CPP)

Esta aplicación permite controlar la potencia pico consumida en un determinado punto de medida. Así, el cliente es capaz que controlar las penalizaciones en la factura eléctrica producidas por excesos de potencia, además de gestionar mejor sus contratos por conocer mejor la potencia a contratar.

La gestión de la potencia máxima se realiza mediante el control de ciertas líneas a las que se han dado permisos. Las líneas se caracterizan por un código que define el tipo de cargas que alimentan (Tabla 4.3).

| CÓDIGO | NOMBRE | NIVEL DE SEGURIDAD ¹ |
|--------|-----------------------|---------------------------------|
| 0 | Alumbrado | 10 |
| 1 | Alumbrado exterior | 10 |
| 2 | Alumbrado transito | 10 |
| 3 | Alumbrado parking | 10 |
| 4 | AA maquina partida | 5 |
| 5 | AA general | 10 |
| 6 | AA FC/CL ² | 5 |
| 7 | AA producción | 0 |
| 8 | AA parámetro | 10 |
| 9 | Extracción | 5 |

Tabla 4.3 Tipo de líneas en la aplicación CPP

Los parámetros, que deben definirse para cada línea controlada, necesarios en la aplicación Control Potencia Pico (CCP) son:

- *Capacidad de Corte*: Potencia que corta el sistema al apagar una línea activa, siempre que los equipos estén en funcionamiento.
- *Tiempo de apagado*: Periodo que se mantiene la línea apagada de forma continuada en una acción de apagado de la aplicación. Al pasar este tiempo la línea pasa a estado ON de forma automática.
- *Tiempo de recuperación*: Periodo en el cual no es posible volver a seleccionar la línea, después de una acción de apagado por la aplicación. Una vez pasado este tiempo, la línea vuelve a estar disponible para ser desconectada por la misma.

El *nivel de seguridad* se clasifica según la Tabla 4.4 y se usa por la aplicación con la siguiente clasificación:

¹ Indica una clasificación de prioridades de las líneas para ser seleccionada por la aplicación CPP.

² La línea alimenta a equipos del sistema de aire acondicionado de tipo fancoil o climatizador.

- Nivel de seguridad 0-4: Las líneas con nivel de seguridad comprendido entre estos valores forman el primer grupo de líneas de entre las que la aplicación seleccionará para apagar en caso de superar el límite de potencia definido. Cualquier línea en este nivel puede ser apagada.
- Nivel de seguridad 5-9: Las líneas con nivel de seguridad comprendido entre estos valores forman el segundo grupo de líneas a considerar. Sólo se apagarán líneas de este grupo cuando no queden más líneas por apagar del primer grupo.
- Nivel de seguridad 10: Es el tercer grupo y son líneas que no se pueden apagar. Por tanto, no son gestionadas por la aplicación CPP para conseguir una reducción de la potencia consumida en un determinado instante.

| NIVEL DE SEGURIDAD | ACCIÓN LÍNEA |
|--------------------|---------------|
| 0-4 | Primer Grupo |
| 5-9 | Segundo Grupo |
| 10 | No apaga |

Tabla 4.4 Niveles de seguridad en la aplicación CPP

La aplicación debe estimar en tiempo real cuál será el consumo de energía activa durante los instantes siguientes para no superar el valor máximo contratado, dentro de cada cuarto de hora, para lo que se definen dos *Modos de funcionamiento*:

- *Pesimista*: En este modo la aplicación empieza los cortes en las líneas antes de alcanzar el límite de energía pico definido.

$$E_{LIM} = E_{CONT} - D \cdot E_{CONT}$$

donde:

E_{LIM} : Es la energía límite en la que se inician las actuaciones en las líneas.

E_{CONT} : Es la energía máxima a consumir en un instante dado según la potencia contratada. Este valor se calcula cada minuto y se reinicia cada 15 minutos.

D : Es el parámetro de *desviación*, que indica el porcentaje de energía que se suma o resta dependiendo del modo que se haya elegido.

- *Optimista*: Este modo hace que la aplicación comience los cortes en las líneas después de alcanzar el límite de potencia pico definido, por lo que se espera que en los siguientes instantes el consumo disminuya.

$$E_{LIM} = E_{CONT} + D \cdot E_{CONT}$$

Es posible indicar distintas potencias según el periodo tarifario: PC1, PC2, PC3, PC4, PC5 y PC6.

En la Figura 4.16 se muestra un diagrama de flujo que sigue la aplicación de control de potencia pico.

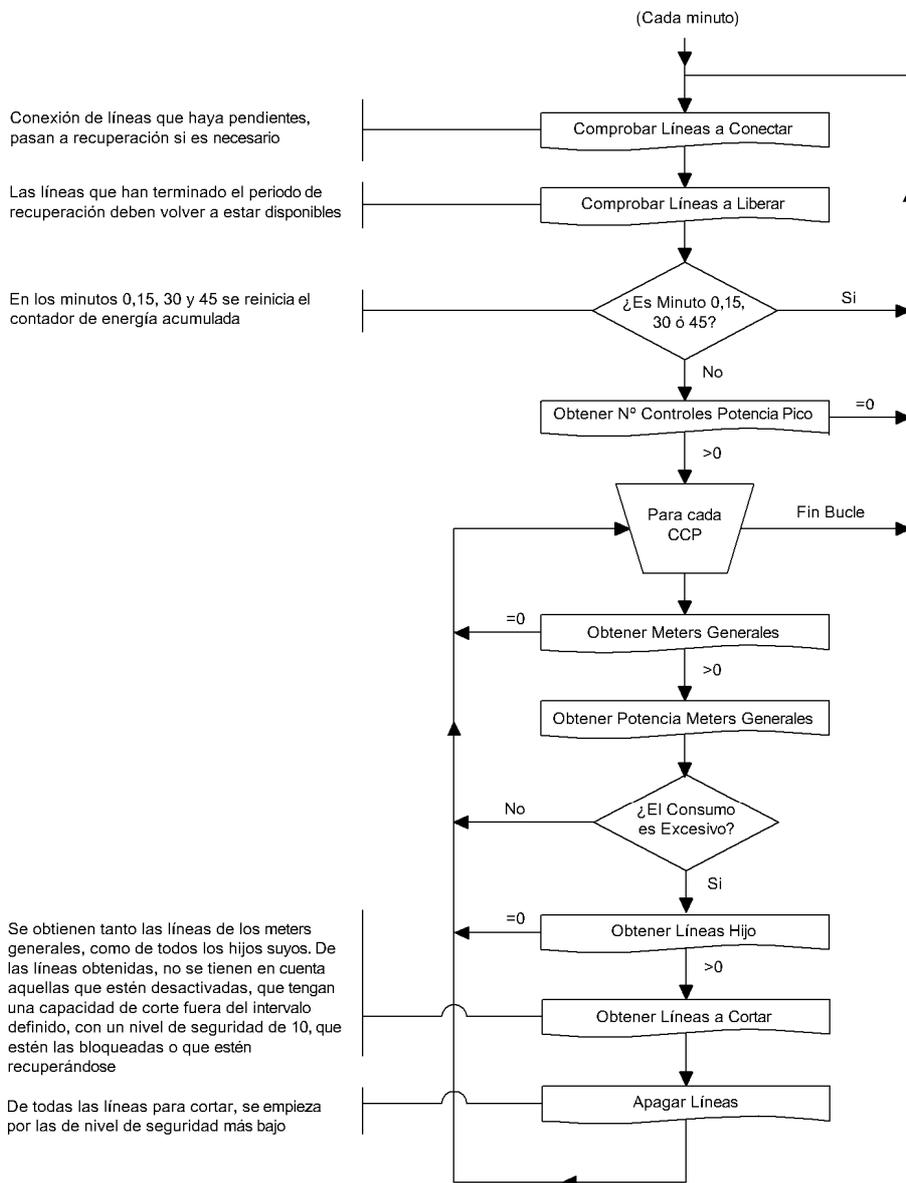


Figura 4.16 Diagrama de flujo de la aplicación CPP

Además, se puede, forzar la elección de las líneas por capacidad de corte. Así, existen dos límites de potencia, inferior y superior, los cuales definen las líneas que se

cortarán para disminuir la potencia de pico, ya que deberán tener capacidades de corte comprendidas entre ambos límites.

En las páginas de gestión de la aplicación se detallan dos tablas, en una se representa el listado de las líneas que son susceptibles de ser desconectadas por la aplicación, ya que cumplen todos los requisitos, y en la segunda se indican las líneas que están siendo cortadas por la aplicación.

Aplicación *Control Consumo*

La aplicación *Control Consumo* permite realizar el control del consumo mensual de energía activa en un determinado punto de medida. Para ello, se genera un gráfico en el que se representa el consumo incurrido (kWh) y un límite de consumo propuesto por el sistema, para el mes y el año seleccionados. Además, se indican los siguientes datos:

- *Datos disponibles*: Porcentaje de los datos que se tienen del mes seleccionado.
- *Días transcurridos*: Porcentaje de días del mes transcurridos.
- *Energía consumida*: Porcentaje de energía consumida frente al límite establecido.
- *Beneficio energético*: Porcentaje de energía ahorrada comparándola con el límite establecido.
- *Beneficio económico*: Ahorro obtenido con los datos disponibles en ese mes con referencia al límite establecido.

En esta aplicación, por un lado es necesario realizar correctamente las medidas en los distintos puntos a controlar, funcionalidad integrada en el sistema, y por otro lado establecer el límite de energía para cada mes.

El cálculo del límite se realiza de forma automática por la aplicación, existiendo tres posibilidades para configurarlo:

- Indicar un valor fijo del límite de energía para el mes considerado. Útil en los casos en los que el usuario conoce previamente el consumo que se va a producir y además éste estable.
- Cálculo automático: La aplicación fija como límite el consumo que se produjo en el año anterior en ese mismo mes. En caso de no tener datos del año anterior, el límite estará definido por un perfil dependiendo del tipo del punto de medida (COD, en la Tabla 4.5). Los distintos perfiles se muestran en la siguiente tabla.

| COD ¹ | EN | FE | MA | AB | MA | JU | JL | AG | SE | OC | NO | DI |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 2,10 | 2,00 | 1,90 | 1,00 | 1,00 | 2,30 | 3,50 | 2,10 | 2,30 | 1,00 | 0,90 | 1,20 |
| 1 | 1,25 | 1,10 | 1,10 | 0,90 | 1,00 | 1,12 | 1,35 | 0,70 | 0,97 | 0,80 | 0,78 | 1,00 |
| 2 | 1,25 | 1,05 | 1,16 | 0,90 | 1,00 | 1,16 | 1,40 | 0,80 | 1,25 | 0,90 | 0,60 | 1,00 |
| 3 | 1,00 | 1,05 | 1,22 | 0,75 | 1,00 | 0,90 | 0,85 | 0,25 | 0,90 | 1,03 | 1,01 | 1,00 |
| 4 | 1,20 | 1,05 | 1,10 | 0,95 | 1,00 | 1,10 | 1,30 | 0,70 | 1,20 | 0,90 | 0,70 | 1,00 |

Tabla 4.5 Perfiles de consumo en función del tipo de punto de medida

Para el cálculo de los perfiles se ha tomado como mes de referencia el mes de mayo, por lo que el resto de meses se considerará consumo como una proporción con respecto a éste. Por ejemplo, en un sistema de climatización centralizado (COD=2), en el mes de enero, el límite de consumo es 1,25 veces el límite de consumo del mes de mayo. Los porcentajes se han elegido a partir de históricos de datos disponibles en los distintos tipos de punto de medida.

- Introducir un valor porcentual de ahorro respecto el valor del límite establecido por la aplicación.

Aplicación Cálculo de la Baseline

Cada día a las 00:00, para cada punto de medida se realiza el cálculo de la baseline, considerando las medidas de los días anteriores. Actualmente en el sistema está implementado un método heurístico en el que se consideran los datos de dos semanas anteriores. Se propone implementar en el sistema el método descrito en el Capítulo 8, desarrollado en el presente trabajo. Es idóneo integrar dicho método en el SGI, pues se dispone ya de una base de datos con las medidas históricas de los distintos puntos de medida, se tiene gran potencia de cálculo y, al estar conectado a Ethernet, se pueden obtener de forma automática las previsiones de temperatura, humedad, etc. del día a predecir, ya que existen servidores que facilitan dichos datos.

Aplicación Mantenimiento

Realiza todas las operaciones necesarias para mantener en un correcto estado el sistema. Así, cada hora vigila que todas las aplicaciones estén activas en el servidor, cada 10 minutos revisa el estado de las líneas, realiza cálculos auxiliares necesarios para las distintas aplicaciones, realiza el mantenimiento de los permisos de los usuarios, etc.

¹ Representa el tipo de sistema de climatización que se alimenta desde el punto de medida. 0: AA con equipos partidos, 1: General y AA con equipos partidos, 2 Aire centralizado, 3: General sin Aire y 4: General y Aire centralizado.

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores



Figura 4.17 Página principal de Punto de Medida

Derd

Introducción | Gestión DERM | Informes | Aplicaciones | Mi zona DERM | Configuración | E-mail | AVISOS: 3 | USUARIO: guieses

DATOS DE PLANIFICACIÓN DE LA LÍNEA L1E-1H000 - [SALIR](#)

Aplicaciones >> Planificación >> Planificación de línea >> Planificación Semanal 11:29 13 Octubre 2008

Gestión de los horarios de la planificación seleccionada. Se debe establecer los datos de la planificación y definir un horario de permisos de utilización para cada día de la semana.

METER: M0181

Nombre: Activada: Descripción:

Línea: I1E-1H000 Fecha Inicio: Fecha Fin:

HORARIOS

LUNES

MARTES

MIERCOLES

JUEVES

VIERNES

SÁBADO

DOMINGO

Día: Hora Inicio: Hora Fin: Estado: OFF ON [ACEPTAR](#)

[ELIMINAR PLANIFICACIÓN](#) [GUARDAR PLANIFICACIÓN](#)

PUEDA COPIAR LA CONFIGURACIÓN DE UN HORARIO DE UN DÍA A OTRO:

Copiar el horario del

a los días: L M MI J V S D [COPIAR HORARIO](#)

[COPIAR PLANIFICACIÓN](#)

Copyright DERM 2007-2008

Figura 4.18 Página de definición de la aplicación Planificación

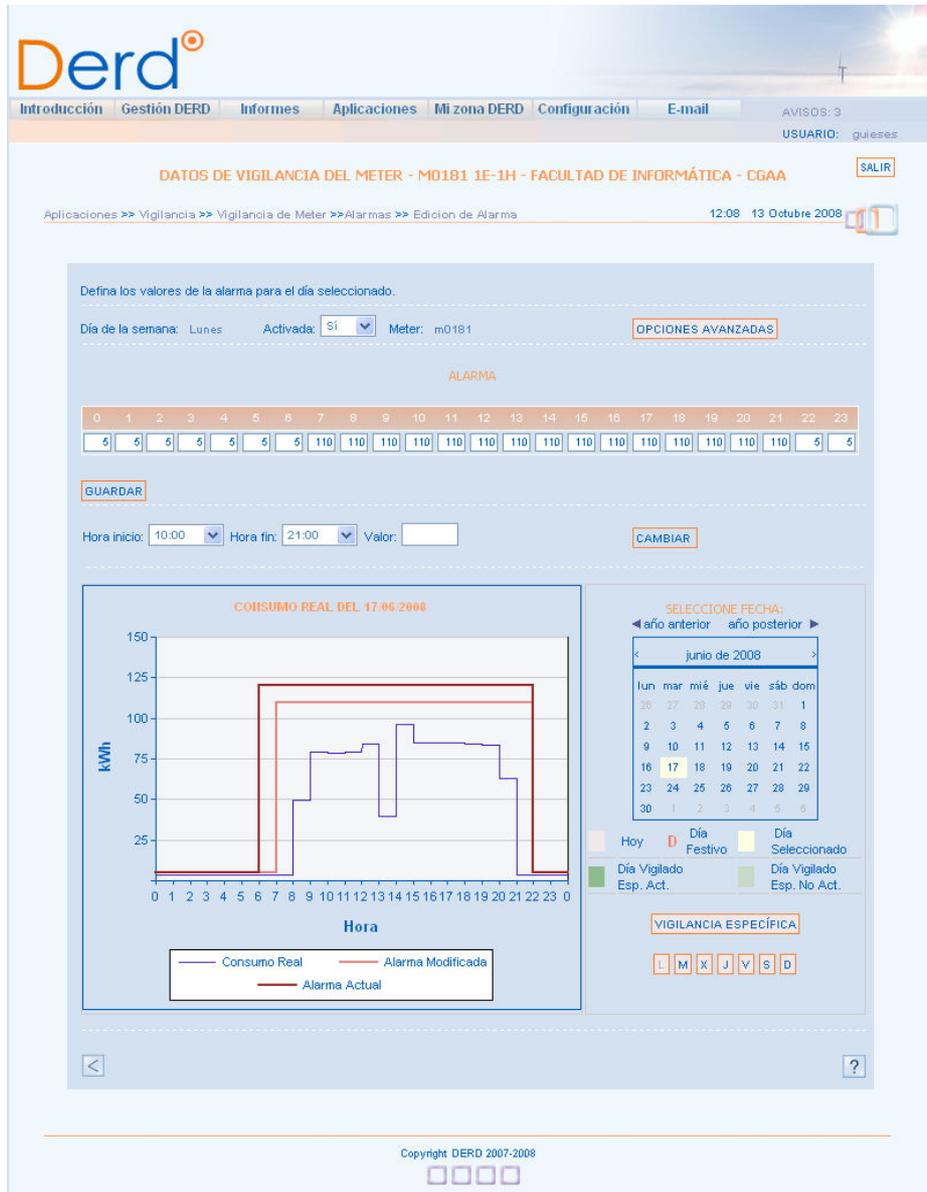


Figura 4.19 Página de edición de la aplicación Vigilancia



Figura 4.20 Página de informe de Consumos Diarios

Se han presentado las distintas aplicaciones básicas que se disponen en el sistema. Se entiende que estas funciones constituyen la funcionalidad básica del SGI y que sirven para la implantación de cualquier programa de respuesta de la demanda, como son la obtención de medidas de consumo en un determinado punto de suministro, posibilidad de realizar directamente o planificar acciones de control en los sistemas de los clientes, tratamiento de la información, presentación de informes, etc. Además, se pone de relieve la capacidad del sistema para integrar cualquier aplicación específica que se necesite para la implantación de cualquier programa en concreto.

4.6 Implementación del sistema en la UPV

Como se ha indicado, para realizar la implantación del sistema en el cliente es necesario realizar diversas acciones en éstos, ya que hay que acceder a sus instalaciones, tanto para realizar medidas como acciones de control (Apartado 4.3.1). En este apartado se presentan las etapas a desarrollar en la implementación práctica llevada a cabo en la UPV [56], comunes en la gran mayoría de clientes. En este caso, el sistema implantado se centra, además de facilitar la respuesta de la demanda, en la mejora de eficiencia de las instalaciones del cliente por lo que algunas de las etapas que se indican son específicas para dicha aplicación. Así, las distintas etapas a desarrollar por edificio son:

- Recogida de información y documentación de las instalaciones. Principalmente aire acondicionado, electricidad y cualquier instalación singular que exista en el edificio. Se debe intentar disponer de información en soporte papel y electrónico.
- Registro de los consumos existentes antes de la instalación del sistema.
- Estudio y verificación de la instalación eléctrica: Unifilares, cuadros de ubicación, etc.
- Verificación de planos de planta de climatización. Modificación de los planos con los errores detectados y representación simbólica de las máquinas instaladas.
- Identificación de puntos de conexionado en los equipos de aire acondicionado para poder realizar su control.
- Visita al edificio. Definición de la ubicación del cuadro de control, cuadros eléctricos donde realizar la medida (CGBT¹, CGAA²), acciones en aseos, zonas de circulación pasillo con iluminación exterior, máquinas de aire acondicionado, sistemas de control del aire existentes, extractores instalados, iluminación en dependencias de uso común, iluminación exterior, etc. Además, se realizarán fotografías del edificio para identificarlo.

¹ Cuadro general de baja tensión.

² Cuadro general de aire acondicionado.

- Entrevista con personal de mantenimiento del edificio e identificación de sus necesidades.
- Planteamiento de las acciones a realizar en la implantación del sistema. Como resultado se debe redactar una ficha del edificio resumen de las mismas.
- Realización de documentación gráfica de las instalaciones a ejecutar con la ubicación de cuadros, nuevas instalaciones a implantar, ubicación de puntos de medida, etc.
- Petición de presupuesto y recepción de ofertas.
- Aprobación del presupuesto seleccionado.
- Definición del punto de conexión a la red TCP-IP.
- Dirección de obra de las instalaciones en el edificio en el momento de ejecutar los trabajos.
- Información a los usuarios del edificio de las medidas que se van a implantar.
- Ejecución y revisión de los trabajos.
- Puesta en marcha de pasarela ETG100 para incluirla en la red TCP-IP existente.
- Comprobación de todas las instalaciones.
- Desarrollo del programa en el autómata Twido.
- Introducción de toda la información en la Web como los puntos de medida, con la ubicación, emplazamiento y esquema unifilar, y las líneas, con los planos de emplazamiento, esquema unifilar y definición de alarmas.
- Comprobación en el gráfico de medidas que las acciones realizadas reducen el consumo e identificación de la capacidad de corte de cada línea.
- Definición de las planificaciones y vigilancias necesarias.
- Activación del punto de medida en la aplicación control consumo.
- Información a los usuarios de las instalaciones ejecutadas y mejora en los hábitos de consumo.
- Mantenimiento y vigilancia de las instalaciones ejecutadas, evitando los cambios que se pueden producir con el uso diario.
- Análisis y valoración económica de los ahorros obtenidos con un seguimiento de las acciones.
- Propuesta y gestión de incentivos para fomentar el ahorro energético en cada una de las instalaciones.

4.6.1 Acciones realizadas y beneficios de la instalación del sistema

Según los apartados anteriores, al integrar las instalaciones de un cliente en el SGI, se facilita de forma notable la participación del cliente en programas de respuesta de la demanda, ya que se disponen de las funciones básicas de medida de consumos y posibilidad de realización de acciones de control en los procesos. Para poder llevar a cabo un programa de respuesta de la demanda concreto es posible contar con dichas aplicaciones y desarrollar todas aquellas necesarias para una gestión y control del programa por parte del administrador.

En la implementación práctica desarrollada en la UPV además, de facilitar la respuesta de la demanda, se consigue una mejora en la eficiencia energética, aplicación relacionada con la anterior según se comentó en el Capítulo 3. Desde el punto de vista de la mejora de la eficiencia en la UPV se han realizado diversas acciones en las distintas instalaciones como la iluminación, los sistemas de aire acondicionado, garajes, etc. A continuación se detallan las acciones más relevantes en cada uno de ellas [55].

Instalación de alumbrado

- En zonas donde existe iluminación exterior, se independiza el encendido de dichas luminarias instalando un interruptor local para conseguir un mejor uso por parte de los usuarios del edificio. Además, dichos circuitos estarán controlados desde el servidor, por lo que se consigue el apagado de los circuitos durante las horas diurnas.
- En zonas de uso común sin iluminación exterior que por uso permanecen encendidas durante el día, se instala un interruptor local y control desde el servidor para conseguir apagado en periodos nocturnos y festivos.
- Control del alumbrado exterior mediante relés evitando la conexión de los circuitos en horario diurno.
- Instalación de detectores de presencia en zonas de uso común como salas de café, fotocopiadoras, etc.
- En escaleras con iluminación artificial se realiza el control para conseguir el apagado de dichos circuitos en horario nocturno.
- Modificación de circuitos para adecuarlas a las necesidades de uso. En salas grandes propuesta de varias zonas de iluminación según el uso, independizar la iluminación en la entrada a un edificio de la iluminación exterior, etc.
- En almacenes, se instala un temporizador en el circuito para conseguir que no permanezca la luz encendida cuando no se está usando.
- En aseos, sustitución de los interruptores existentes por temporizados para evitar que permanezcan las luces encendidas. Si no hay interruptor se instalan detectores de presencia. Según la disposición del aseo, es posible unificar circuitos.

- En los vestuarios se colocan dos detectores de presencia. Uno a la entrada y otro en la zona de la ducha para que mantenga el encendido mientras haya uso de la estancia.
- Control del uso de las pistas de squash con detectores de presencia.
- En salas de espera se utilizan dos circuitos. Uno controlado por un interruptor que mantiene una iluminación mínima y otro gobernado por un detector de presencia que se activa al ser utilizada la estancia por los usuarios.
- En los garajes sin iluminación exterior, se permite un alumbrado de seguridad durante todo el día y por medio de detectores de presencia se activa el alumbrado completo.

Instalación de aire acondicionado

- Apagado de toda la climatización en domingos y festivos.
- Mejora de horarios de uso diario de la climatización, evitando que permanezcan encendidos los equipos de aire durante periodos nocturnos.
- Modificación de consignas de funcionamiento para conseguir un menor consumo, tales como temperatura en colectores, señal de rotación de bombas, etc.
- Control de encendido de los extractores, normalmente permanecen encendidos permanentemente.
- Según los usos de los edificios, en periodo de vacaciones es posible el apagado completo de la instalación de climatización.
- Es posible, con una señal de apagado, conseguir el apagado de las máquinas partidas durante mediodía y con la ventaja de que algunas de ellas no se reinicien.
- Apagado de las máquinas partidas en periodos nocturnos y festivos.
- Interacción con los sistemas de aire acondicionado existentes en los edificios, no se actúa directamente sino que éstos interpretan las órdenes del SGI.

Otros beneficios obtenidos

- Medida de los consumos en los puntos de control. Habitualmente se realiza la medida en el interruptor general de red, en el general de grupo y en el general de aire acondicionado.
- Modificación de instalaciones de mando que no funcionan correctamente.
- Modificación de la conexión de las bombas del circuito primario temporizándolas en los casos en los que hay un funcionamiento incorrecto.
- Indicaciones al personal técnico del edificio de temperatura de consigna óptimas en las salas. Se tiene especial atención a salas con gran afluencia de usuarios,

como salas de ordenadores, etc., en las que debe establecerse un punto de consigna ligeramente inferior al resto, por el gran aporte de calor latente.

- Vigilancia continua de las instalaciones para que permanezcan según se especifica al finalizar la auditoría.
- Se evita el uso de los relojes habituales en los cuadros eléctricos, ya que necesitan de un mantenimiento, pues en los cortes de suministro eléctrico pierden la hora.
- Gestión centralizada de todos los edificios. Se parte de instalaciones diferentes realizadas por distintas empresas de control y se unifica el uso de las mismas.
- Actualización de instalaciones obsoletas que están sin ningún mantenimiento.
- Se subsanan defectos iniciales de entrega de los edificios no detectados hasta el momento.
- Se facilita el correcto uso de las instalaciones al independizar circuitos, instalar nuevos elementos de mando, etc.

4.7 Conclusiones del capítulo

Al intentar implantar cualquier programa de respuesta de la demanda es necesario disponer de un soporte tecnológico que proporcione las distintas funcionalidades requeridas. Una vez analizadas, en el capítulo anterior, las carencias de los sistemas de control existentes e identificadas las nuevas necesidades, se diseña y desarrolla un sistema de gestión integral (SGI) en el que puede participar cualquier agente del sistema eléctrico e integre dichas funcionalidades. En este capítulo se presentan las características básicas que debe presentar este sistema de gestión para facilitar la integración de los consumidores en dichos programas.

El nuevo SGI pretende ser un espacio común para los distintos agentes implicados, consumidores, agregadores, suministradores y administradores de los programas. Así, el sistema permite medir el consumo en las instalaciones del cliente de forma correcta, realizar acciones de control programadas como respuesta a una señal, almacenar los datos históricos, envío de mensajes automático, etc. En este capítulo se presentan las características básicas del sistema propuesto en el que un aspecto fundamental es su arquitectura, basada en la comunicación TCP-IP a través de Ethernet, para poder comunicar el centro de control con los distintos consumidores sin tener que realizar un cableado específico. El sistema se compone, por un lado, de elementos hardware en dos espacios claramente diferenciados, en el centro de control, donde se gestiona y centraliza toda la información y en los usuarios, de donde se adquieren los datos. Por otro lado, el sistema está constituido por componentes software, formados por distintas aplicaciones que aportan distintas funcionalidades al sistema como la adquisición de datos de los clientes, realización de acciones de control, gestión de las bases de datos, protección de la información, etc.

Además de la implementación física del sistema, es necesario el desarrollo de distintas aplicaciones software necesarias para la gestión de los programas. Por tanto, se presentan distintas aplicaciones básicas desarrolladas que servirán de base para cualquier otra específica que un determinado programa de demanda a implantar requiera.

La interfaz de comunicación entre el centro de control y los distintos usuarios del sistema se diseña a través de una página Web. Así, desde un punto con comunicación Ethernet, cualquier usuario con los permisos necesarios puede acceder al sistema sin necesidad de realizar una instalación específica en sus estaciones de trabajo.

El SGI propuesto no pretende sustituir a los instalados en los diferentes edificios, sino que es complementario a éstos de forma que aporte aquellas funciones adicionales que permitan a los clientes un mejor conocimiento de sus instalaciones y por tanto faciliten la respuesta de éstos frente a señales del administrador de un determinado programa.

Por tanto, en este trabajo, se presenta el desarrollo básico del sistema de gestión, implantado en la UPV, entendiendo que debe servir como base para que, en un futuro, se desarrollen las aplicaciones necesarias que se requieran para cualquier programa específico.

CAPÍTULO 5

ESTADO DEL ARTE: MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE PERFILES DE CONSUMO

5.1 Introducción

Históricamente la energía eléctrica se ha considerado un bien indispensable y de gran interés estratégico para la economía de los países avanzados. Además, las compañías eléctricas deben adecuar la producción a la demanda para garantizar a sus clientes la calidad de servicio contratada a un precio competitivo. Para conseguir este objetivo es necesario predecir la demanda de energía con la antelación suficiente para poder planificar la producción. Una predicción inferior al consumo provoca que el proveedor deba comprar energía en el mercado nacional intra-diario o que deba generar la energía no prevista por medios más caros de los que se hubieran utilizado con una predicción correcta. Esto supone pérdidas económicas tanto para la empresa como para sus clientes. Por otro lado, sobreestimar la demanda implica que es necesario vender la energía sobrante en el mercado intra-diario a un precio inferior al deseado perdiendo, así, dinero.

Por tanto, la predicción de la demanda de energía con el menor error posible ha sido de gran interés por múltiples motivos como la mejora del funcionamiento de los mercados, para mejorar el servicio proporcionado por las empresas eléctricas a sus clientes, facilitar la gestión del sistema eléctrico, etc. Sin embargo, el consumo de energía depende de muchos factores como la temperatura, el día de la semana, el tipo de día, etc., lo que implica que su predicción sea un problema complejo que requiere el uso de técnicas sofisticadas.

Como se indica en el Capítulo 2, desde el punto de vista de la respuesta de la demanda es muy importante, y actualmente constituye una barrera en la implantación de los distintos programas, saber cual es la predicción del consumo de un cliente para un determinado día, de forma que al modificar su consumo como respuesta a una señal del administrador del programa, con el uso de ésta, sea posible evaluar la acción tomada y sirva de base para realizar una correcta y justa retribución. En general, los programas de respuesta de la demanda basan sus incentivos en la reducción de carga llevada a cabo por consumidores en un periodo de tiempo con respeto a un valor de referencia previsto, llamado usualmente *baseline*.

A la hora de realizar la predicción del consumo eléctrico pueden plantearse varias opciones:

- Predicción del consumo eléctrico de un determinado punto del sistema con un periodo de tiempo de antelación, por ejemplo, un día, una semana, etc. El cálculo de del consumo con un día de antelación es el planteamiento desarrollado en el presente trabajo, ya que lo que se persigue es conocer cuál es el consumo de un determinado cliente en condiciones habituales, sin respuesta a una determinada señal del sistema.
- Predicción del consumo por franjas horarias, por lo que se realiza la predicción de cada hora, modificándola en cada caso con los datos de la hora anterior.

En los próximos apartados se hace una revisión de las técnicas de predicción más conocidas, presentado las bases fundamentales de cada una de ellas, lo que permite la selección de aquellas que se utilizan en el método de predicción propuesto en el presente trabajo (Capítulo 8).

5.2 Estado actual de los métodos de predicción

En los próximos apartados se describen las técnicas más populares utilizadas para la predicción de perfiles de consumo. Se distinguen dos grandes grupos. En primer lugar, se indican las técnicas clásicas, muy utilizadas en la literatura desde hace décadas, en las que en general plantean un modelo y mediante la utilización de distintos algoritmos se intenta ajustar al comportamiento de los datos de partida. En segundo lugar, se presentan otras técnicas más modernas utilizadas para abordar distintos problemas de predicción, en las que se plantean nuevos acercamientos a los mismos, en general, utilizando la potencia de cálculo disponible actualmente (Tabla 5.1).

| | METODOLOGÍAS | ALGORITMOS |
|-------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| TÉCNICAS CLÁSICAS | Modelos de regresion | Mínimos cuadrados |
| | Modelos heurísticos | |
| | Modelo alisado exponencial | |
| | Modelo de Holt y Winters | |
| | Modelo estocásticos | Preprocesado |
| | Box-Jenkins | Modelo AR Modelo MA Modelo ARMA |
| | Espacios de estado | Filtro de Kalman |
| TÉCNICAS MODERNAS | Inteligencia artificial | Sistemas Expertos |
| | Redes neuronales | |
| | Lógica borrosa | Algoritmos genéticos |
| | Modelos mixtos | |

Tabla 5.1 Métodos más populares utilizados para el cálculo de perfiles de consumo

5.3 Técnicas estadísticas clásicas de predicción

El problema de predicción de demanda eléctrica ha tenido tradicionalmente gran importancia para las empresas del sector eléctrico debido a sus implicaciones económicas. Por esta razón, el problema ha sido profusamente estudiado en la literatura existiendo una gran variedad de técnicas.

El objetivo de este apartado es analizar algunas de las técnicas que han sido tradicionalmente empleadas en los problemas de predicción. El análisis trata de identificar los puntos fuertes y débiles de cada una de ellas, cuando se aplican a la predicción de la demanda eléctrica.

Así, se presentan algunos métodos heurísticos empleados todavía en la actualidad y otras técnicas más potentes propuestas bajo una sólida base estadística.

5.3.1 Modelos de regresión

Los modelos de regresión consideran que la demanda eléctrica es función de un conjunto de variables independientes. Esta relación se calcula con ayuda del *análisis de regresión*. Este término lo sugirió la observación de Galton de que en promedio los hijos de los padres altos no son tan altos como sus padres, y que los hijos de padres bajos no son tan bajos como sus padres, así que existe una tendencia a regresar hacia la media. El término *correlación* fue también propuesto por Galton. Las variables independientes se pueden seleccionar a partir de los resultados del *análisis de correlación* de la serie temporal con cada una de las variables que son candidatas a emplearse en el modelo.

Existen distintos métodos para llevar a cabo el análisis de regresión y estimar así los parámetros de este modelo. El más común de ellos es el método de los *mínimos cuadrados ponderados* en el que se escogen los parámetros de forma que minimicen el error cuadrático ponderado J :

$$J = \sum_{t=1}^N W(t) [\hat{L}_t - L_t]^2$$

de un conjunto de N muestras. Donde \hat{L}_t es la demanda estimada en el instante t y L_t es la demanda real en t . Los términos $W(t)$ ponderan cada uno de los errores siguiendo algún criterio.

Los modelos de regresión se encuentran entre las primeras herramientas matemáticas que se emplearon para la previsión de la demanda eléctrica y que todavía hoy se siguen aplicando. Entre las ventajas que se consiguen con estos modelos cabe destacar que:

- Tienen en cuenta de forma natural la influencia de múltiples entradas.

- Facilidad de implementación del modelo y rapidez en el cálculo de la predicción.

Su principal desventaja es la dependencia del modelo respecto del sistema eléctrico donde se modela la demanda, es decir, el modelo no es exportable. Esto es así porque los parámetros del modelo se obtienen a partir de los datos históricos obtenidos en el punto de la red en donde se modela la demanda y es muy probable que con los datos históricos pertenecientes a otro punto se obtenga un modelo distinto.

5.3.2 Modelos heurísticos

Estos métodos pueden parecer muy simples, pero algunas empresas eléctricas españolas siguen basando sus predicciones en dichas reglas convenientemente modificadas por expertos humanos.

Sea L_t la demanda de energía en t , donde t puede referirse a un día completo de la semana o a una franja horaria de tiempo. El consumo en t se puede predecir utilizando la siguiente regla:

$$\hat{L}_t(1) = L_{t-6}$$

donde $\hat{L}_t(1)$ es la predicción realizada en el período t , con horizonte temporal de una unidad. Así, la predicción se realiza con el consumo obtenido para la misma franja horaria de una semana antes. Ello coincide con la percepción de los expertos que consideran que, frecuentemente, los consumos en semanas consecutivas no difieren significativamente.

El estimador anterior puede presentar excesiva varianza debido a que utiliza sólo el valor de consumo de la semana precedente para realizar la estimación. Además, dicha regla no resulta válida cuando se desean hacer predicciones a medio plazo, por ejemplo 15 días. Un método alternativo a este, para el caso en que se quiera predecir los valores de consumo del año 2.008 conociendo los consumos de dos años anteriores, se expresa a través de la regla [57]:

$$\hat{L}_{07}(1) = \frac{1}{2}(L_{07-k_1} + L_{06-k_2})$$

donde las constantes k_1 y k_2 corresponden a las translaciones aplicadas sobre la variable t para que coincidan los días festivos de los años 2.007 y 2.006 con los del 2.008.

Un modelo que considera la variación del consumo en el instante anterior es:

$$\hat{L}_t(1) = L_t + (L_t - L_{t-1})$$

Otro modelo es el de las *Medias Móviles*, en el que se utiliza como predicción el promedio de los valores considerados. Así, si se disponen de datos mensuales correspondientes a un año, se define:

$$\hat{L}_t(1) = \frac{L_t + L_{t-1} + \dots + L_{t-11}}{12}$$

y con datos trimestrales,

$$\hat{L}_t(1) = \frac{L_t + L_{t-1} + L_{t-2} + L_{t-3}}{4}$$

Dichas fórmulas se aplican a series temporales que no presenten tendencia. En general, estos métodos son menos atractivos que los de alisado exponencial, que se exponen a continuación, ya que exigen más cálculos y más observaciones, sin ser necesariamente mejores que aquellos. Los modelos de medias móviles deben usarse cuando la aleatoriedad en los datos sea alta y la autocorrelación de la serie muy baja.

A pesar de que estas técnicas heurísticas no producen malos resultados experimentales, presentan importantes puntos débiles que al utilizarlas incrementan significativamente los errores de predicción. Los más importantes son:

- Son *técnicas lineales*. La serie de valores de consumo eléctrico son fuertemente no lineales.
- No utilizan mucha de la información disponible y necesaria para realizar una predicción correcta. No consideran el efecto de distintas variables importantes como la temperatura o tipo de día, muy influyentes en la demanda de energía eléctrica.
- No son *válidos para festivos* que cambian de fecha de un año a otro. Así, por ejemplo en los festivos de Semana Santa no se obtienen buenos resultados.
- Carecen de una *base teórica sólida*. No es posible calcular el grado de confianza para la predicción realizada ni tampoco obtener intervalos de confianza para la salida, etc.

5.3.3 Modelo simple de alisado exponencial

Es un modelo de predicción muy sencillo, mediante el cual se obtienen mecánicamente predicciones de una serie temporal en función de las observaciones pasadas. Cada predicción se forma promediando los valores observados de la variable según la expresión:

$$\hat{L}_t(1) = \delta L_t + \delta(1-\delta)L_{t-1} + \delta(1-\delta)^2 L_{t-2} + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \delta(1-\delta)^i L_{t-i}$$

Siendo δ el *parámetro de alisamiento*, que cumple $0 < \delta < 1$. Las ponderaciones van decreciendo, según una progresión geométrica de razón $1 - \delta$, a medida que se aleja en el pasado, lo que significa que los valores de L más alejados del último periodo muestral ponderan menos en la fórmula de predicción.

Se puede afirmar que el promedio utilizado es una media ponderada, por ser la suma de las ponderaciones igual a la unidad, ya que

$$\sum_{i=0}^{\infty} \delta(1-\delta)^i = 1$$

Este procedimiento produce, efectivamente, un *alisado* de la serie L_t , ya que la nueva serie alisada, $\hat{L}_t(1)$, al estar constituida por promedios (medias ponderadas) de valores de la serie primaria, presentará fluctuaciones más amortiguadas que ésta.

Para aplicar dicho método, se fija arbitrariamente el valor de δ . Una regla empírica que puede utilizarse es que valores más pequeños de este parámetro alisan más los datos.

Es posible llegar a obtener el valor más adecuado de δ por un procedimiento exploratorio. Para ello, se prueba con diversos valores de δ y se calcula en cada caso el error cometido (Apartado 5.6) de las predicciones realizadas para el período muestral. Como valor definitivo de δ se toma aquél que haga mínimo el error. Cuando el valor de δ así estimado es próximo a la unidad, es muy posible que los datos presenten tendencias o estacionalidad. En tal caso, éste no sería el método de predicción más adecuado.

Así, para obtener las predicciones se puede escribir:

$$\hat{L}_t(1) = \delta L_t + (1 - \delta) \hat{L}_{t-1}(1)$$

que es una expresión muy fácil de utilizar en las aplicaciones prácticas. Para iniciar el proceso iterativo, se admite que $\hat{L}_1(1) = L_1$. Indicar que si el parámetro de alisamiento, δ , está próximo a cero, el valor inicial fijado influye en los resultados durante muchos períodos de tiempo. Por el contrario, con valores de δ próximos a la unidad, desaparece rápidamente la influencia del valor inicial adoptado.

Como evaluación de la técnica, indicar que es muy fácil de aplicar en la práctica pero presenta inconvenientes similares a la anterior.

5.3.4 Modelo de Holt y Winters

El método de Holt y Winters sirve para realizar predicciones bajo el supuesto de tendencia lineal, con el uso de dos parámetros de alisado δ_1 y δ_2 . La fórmula de predicción, en este caso es:

$$\hat{L}_t(l) = S_t + lb_t$$

donde

$$S_t = \delta_1 L_t + (1 - \delta_1)(S_{t-1} + b_{t-1}), \text{ con } 0 < \delta_1 < 1 \text{ y } S_t = \sum_{i=0}^{\infty} \delta_1 (1 - \delta_1)^i L_{t-i}$$

$$b_t = \delta_2 (S_t - S_{t-1}) + (1 - \delta_2) b_{t-1}, \text{ con } 0 < \delta_2 < 1$$

En la expresión de S_t , se propone que para proporcionar una estimación alisada de L_t mediante S_t , se corrija el factor S_{t-1} mediante la adición de un término de tendencia, b_{t-1} , cuyo subíndice hace referencia a que este coeficiente es el que corresponde a la estimación realizada con la información disponible hasta el periodo $t-1$.

Así, $\hat{L}_t(l)$ obtiene la predicción a un horizonte temporal l sumando a la estimación alisada del valor actual de L , S_t , el término lb_t , representativo del incremento provocado por la tendencia lineal.

Este modelo al disponer de dos parámetros, δ_1 y δ_2 , es más flexible que el anterior. Cambiando estos parámetros se puede ponderar más la aleatoriedad de los datos con δ_1 o la tendencia con δ_2 , según el comportamiento de la serie con la que se trabaje. Habitualmente los valores más adecuados para δ_1 y δ_2 oscilan entre 0,1 y 0,3.

La principal ventaja de este método es su robustez y la sencillez de utilización al no ser necesario fijar parámetros heurísticamente.

Los puntos débiles de este método son muy similares al los del alisado exponencial:

- Es una técnica lineal.
- No permite utilizar variables ambientales como la temperatura.
- Es un método global. Sin embargo las características de la serie de demanda varía según el segmento considerado. Así, ciertos segmentos de la serie pueden ser lineales y otros no lineales. Por tanto, sería mejor ajustar modelos localmente previa segmentación de la serie.

Finalmente indicar que cuando los datos son estacionarios (Apartado 5.3.5), de los métodos presentados hasta ahora los más adecuados son los de medias móviles y alisado exponencial simple. Si las observaciones muestran algún tipo de tendencia, con variaciones estacionales, se puede aplicar el método de Holt-Winters.

5.3.5 Modelos estocásticos

Estos modelos son más complejos que los presentados en los apartados anteriores y su aplicación requiere series temporales más largas.

Un *proceso estocástico*, $\{X_t\}$, para $t = 1, 2, 3, \dots$, se define como una colección de variables aleatorias, X_t , ordenadas de acuerdo con el parámetro discreto t . Los modelos estocásticos de series temporales conciben una serie temporal dada, X_t , como una colección de observaciones muestrales, cada una correspondiente a un valor de la variable del proceso.

En las aplicaciones prácticas con este tipo de técnica, en las que se dispone de ciertas observaciones, X_t ($t = 1, 2, \dots, T$), es común caracterizar al proceso estocástico, que se supone estacionario¹, con la *media* del proceso:

$$\bar{X} = E(X_t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_t$$

y las funciones de *autocorrelación simple* (f.a.) y *parcial* (f.a.p.) obtenidas a partir de la representación gráfica de los *coeficientes de autocorrelación* muestral:

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^T (X_t - \bar{X})(X_{t-k} - \bar{X})}{\sum_t (X_t - \bar{X})^2} \text{ para } k = 1, 2, \dots$$

Un proceso estacionario sencillo, de gran interés, es el denominado proceso *puramente aleatorio*, ε_t , o *ruido blanco*, que se define por las siguientes condiciones:

- $E(X_t) = 0$
- $\text{var}(X_t) = E(X_t^2) = \sigma^2$
- $\text{cov}(X_t, X_{t+k}) = E(X_t, X_{t+k}) = 0$, para $k = 1, 2, \dots$

¹ Una serie es estacionaria si la media y desviación estándar son constantes con t .

Se puede observar en el correlograma que en este proceso no existe dependencia estadística ninguna entre los valores desfasados en el tiempo.

Muy pocas series temporales reales de consumos son estacionarias. Los motivos de la falta de estacionariedad suelen ser que presentan una tendencia, la varianza no es constante o que hay variaciones estacionales. Afortunadamente, es posible transformar muchas series de consumos reales no estacionarias en otras aproximadamente estacionarias, sometiéndolas a operaciones algebraicas adecuadas. Este hecho permite, en definitiva, utilizar con series no estacionarias los procedimientos de análisis diseñados para las estacionarias. Para ello una técnica muy utilizada es el *preprocesado de datos* [62].

Es posible calcular $Z_t = X_t - X_{t-1}$, en donde Z_t es ya estacionaria. Si mediante la aplicación de un modelo se obtiene en el período T la predicción $\hat{Z}_T(1)$ correspondiente al periodo $T+1$, la correspondiente predicción de X_{T+1} se obtiene teniendo en cuenta que $X_t = Z_t + X_{t-1}$, por lo que $\hat{X}_T(1) = \hat{Z}_T(1) + X_T$.

Así, si X_t presenta una tendencia lineal, la primera diferencia de la serie, Z_t , es posible que ya no incorpore tendencia. En tal caso, se dice que X_t es una serie temporal homogénea de *primer orden*. En ocasiones es necesario realizar el procedimiento de diferenciación más de una vez por lo que, en general, si un proceso no estacionario se convierte en estacionario después de h operaciones de diferencia se denomina homogéneo de orden h o *integrado de orden h* .

Hay que indicar que, en la práctica, es difícil determinar si se ha realizado el número de diferencias adecuado para transformar la serie en estacionaria. Es posible quedarse corto o, por el contrario, llegar a una *sobrediferenciación* de la serie.

El instrumento que suele utilizarse para detectar el número adecuado de diferencias es simplemente la inspección visual del gráfico de la serie y de su correlograma.

Así, una vez transformadas las series temporales en estacionarias, para realizar las predicciones será preciso deshacer el cambio realizado.

Otro tipo de técnicas que se suelen aplicar cuando en la serie aparecen tendencias son los filtros lineales como el *promedio móvil* [62]. Este filtro transforma la serie original X_t en Z_t mediante la operación:

$$Z_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{r=-q}^{r=q} X_{t+r}$$

La transformación anterior permite eliminar fluctuaciones estacionales locales especificando adecuadamente el valor de q . De esta forma se pueden *alisar* ciertas

series que presenten oscilaciones. Sin embargo, no puede ser calculada para los extremos de la serie temporal, en particular para valores actuales, por lo que en su lugar se utilizan frecuentemente filtros asimétricos que consideran sólo los valores pasados y presentes de X_t , como el *suavizado exponencial* ya presentado (Apartado 5.3.3).

Se pueden aplicar a la serie otras transformaciones no lineales para convertirla en aproximadamente lineal, permitiendo así aplicar técnicas lineales para resolver un problema no lineal. Estas transformaciones pueden ser:

Logaritmo: $Z_t = \ln X_t$

Raíz cuadrada: $Z_t = \sqrt{X_t}$

Sigmoide: $Z_t = \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-X_t^2}{\sigma_t^2}\right)}$

La principal dificultad radica en que no existe ningún método para elegir la transformación o conjunto de transformaciones apropiadas para las distintas series de demanda eléctrica que pueden encontrarse.

Una vez se dispone de una serie estacionaria, se realiza el modelado de la misma que consiste en proponer un modelo que se ajusta al proceso estacionario en estudio, para lo que se proponen distintos modelos. Los más utilizados se presentan a continuación [62] y [67].

Modelo autorregresivo AR(p)

Un *modelo autorregresivo de orden p*, AR(p), se define mediante la expresión:

$$X_t = \delta + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t,$$

en donde los parámetros ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, p$) y δ son constantes y $\{\varepsilon_t\}$ es un proceso puramente aleatorio tal que cada ε_t está incorrelacionada con todas las X_{t-i} , para todo i positivo, y recibe el nombre de *innovación*, por tratarse de una parte de la serie que no puede predecirse a partir de su propio pasado.

Así, haciendo uso del operador B definido por

$$BT_t = T_{t-1} \text{ y en general}$$

$$B^s T_t = T_{t-s}, \text{ para } s > 0$$

se puede escribir

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) X_t = \delta + \varepsilon_t$$

Definiendo $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ se tiene

$$\phi(B) X_t = \delta + \varepsilon_t$$

Modelo de medias móviles MA(q)

El *modelo de medias móviles de orden q* se define mediante la expresión:

$$X_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

en donde las ε tienen análogo significado al del modelo AR(q), μ y θ_i ($i = 1, 2, \dots, p$) son parámetros constantes. El coeficiente θ_0 se considera igual a la unidad, sin que ello suponga pérdida de generalidad, ya que se puede adoptar la escala adecuada para que así ocurra y, al igual que en el caso anterior, es un proceso estacionario.

Modelo mixto ARMA(p,q)

El *modelo mixto autorregresivo de medias móviles* ARMA constituye un modelo más general que incluye a los procesos AR y MA como caso particular. Estos modelos resuelven algunos de los puntos débiles de los procesos AR y permiten, por ejemplo, considerar términos estacionales, eliminar tendencias en la media, etc. Es por ello que han sido considerados una referencia dentro de los modelos de predicción de demanda eléctrica lineales [64]-[66].

El modelo ARMA(p,q) se define mediante la ecuación:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

Así, haciendo uso del operador B

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \text{ y}$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$$

Entonces se puede escribir $\phi(B) X_t = \theta(B) \varepsilon_t$ y por tanto:

$$X_t = \phi(B)^{-1} \theta(B) \varepsilon_t$$

Por lo que el proceso ARMA(p, q) es equivalente a un proceso de medias móviles de infinitos términos, con $p + q$ coeficientes independientes.

Además, como se ha indicado, muchas series se convierten en aproximadamente estacionarias después de aplicar diferencias en una o más etapas. Si la serie original X_t , es homogénea de orden d , entonces si

$$\Delta^d X_t = Z_t, (t = 1, 2, \dots, T)$$

se tiene que $X_t = \Delta^{-d} \phi^{-1}(B)\theta(B)\varepsilon_t$, y se dice que X_t es un proceso ARIMA (p, d, q) (autorregresivo integrado de media móvil).

Los modelos presentados anteriormente constituyen la base de la *metodología Box-Jenkins* para la predicción de series temporales. Esta metodología consta de cuatro etapas: Identificación, estimación, validación y predicción (Figura 5.1).

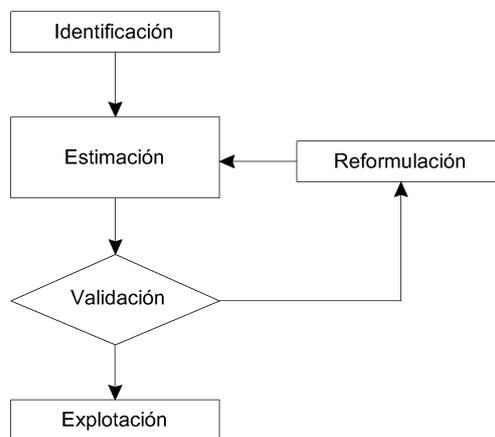


Figura 5.1 Etapas de la metodología Box-Jenkins

1. Identificación

La primera etapa consiste en la *identificación* del modelo para conocer, por ejemplo en el modelo ARIMA, los valores de p , d , q . En esta etapa se suelen proponer varios modelos candidatos. Identificar una serie temporal consiste en inducir, a partir de los datos, utilizando las f.a. y f.a.p. muestrales, qué modelo o modelos de los que aparecen en los apartados anteriores se adaptan mejor a las características de la serie. Cada modelo presenta unas f.a. y f.a.p. peculiares, cuyas formas vienen en última instancia influidas no sólo por la clase o familia de modelos (por ejemplo, los autorregresivos presentan f.a.p. con un número finito de valores distintos de cero), sino también por el grado de parametrización (así, los modelos autorregresivos de segundo orden presentan f.a.p. en que únicamente los dos primeros valores son distintos de cero). No obstante en la práctica no suele ser una tarea simple identificar modelos que describan aceptablemente comportamientos de consumos reales, debido entre otras razones a la aparición de los errores de muestreo.

2. Estimación

Como se ha indicado, las series reales generalmente no suelen ser estacionarias, así que ante todo hay que transformar la serie dada en otra estacionaria. En tal caso indicar que si, para tal fin, hay que realizar d operaciones de diferenciación, se pierden otras tantas observaciones.

En consecuencia, si el número de observaciones es $T + d$, después de la identificación del proceso que genera los datos, se plantea el problema de estimar, por ejemplo, los parámetros de un proceso ARMA(p, q) a partir de un conjunto de T observaciones.

La etapa de *estimación* de los parámetros del modelo consiste en definir el valor de los coeficientes de los polinomios que constituyen dicho modelo, identificado en la etapa anterior.

3. Validación

Se realiza la *validación* del modelo para conocer hasta qué punto la serie temporal bajo estudio puede haber sido generada por el proceso estocástico modelado en el proceso de estimación. En caso negativo o de duda se vuelve al punto 2 empleando otro de los modelos propuestos en la etapa 1.

Una vez estimado el modelo, conviene analizar los resultados y someterlos a algunos tests antes de hacer uso del mismo para la predicción. Este proceso es el que se denomina validación o comprobación del diagnóstico.

Conviene tener presente, sin embargo, que la validación última de cualquier modelo de predicción es la que proporciona la comparación de valores observados con predicciones posteriores.

Para que el modelado ajustado sea aceptable, debe cumplir algunos requisitos que implícita o explícitamente van incorporados a su especificación. Así, por ejemplo, de los coeficientes de procesos ARMA(p, q) se espera que cumplan las condiciones de estacionariedad y de invertibilidad. Además de estas comprobaciones, en la práctica suelen hacerse otros dos tipos de análisis. Por un lado, el sobreajuste, donde se realiza la inclusión de parámetros adicionales por si el modelo está infra-dimensionado, se pasa de un ARMA(p, q) a otro modelo ARMA($p + 1, q$) y la supresión de parámetros por si el modelo está sobre-dimensionado.

4. Explotación

La etapa *explotación* del modelo, consiste en la obtención de previsiones de valores, habitualmente futuros, de la serie estudiada. Una vez el modelo ha sido estimado y sometido a las diversas comprobaciones para su validación, se convierte en un instrumento útil para obtener las predicciones.

Así, si los modelos utilizados representan series temporales de consumos eléctricos, manteniendo la notación introducida hasta ahora, sustituyendo en los modelos $\hat{X}_T(l)$ por $\hat{L}_T(l)$ que denota la predicción de consumo de origen T a horizonte l , se dispondrá de expresiones para obtener predicciones del consumo en un determinado sistema.

Aún suponiendo que los coeficientes de ϕ y θ se conocieran exactamente, caso ideal que no se da en la práctica, la predicción de una variable aleatoria, como es L_t , conlleva siempre una incertidumbre y, por lo tanto, un *error de predicción*, que cuantifica la diferencia entre la predicción de consumo obtenida para un determinado instante $\hat{L}_t(l)$ y el valor real observado $L_t(l)$ (Apartado 5.6).

Aunque los modelos ARMA son bastante generales presentan ciertos puntos débiles que se señalan a continuación:

- La *elección del modelo* es muy *compleja*. La determinación del orden de los términos estacionales, las tendencias y el estudio de los residuos para determinar la idoneidad del modelo es una tarea que requiere mucha experiencia con las técnicas y para cada sistema a estudiar se necesita la intervención del operador.
- Son modelos bastante *sensibles* a días *atípicos*.

En cambio, estos modelos presentan como ventajas que tienen una base estadística sólida y es posible incorporar variables ambientales como la temperatura.

5.4 Representación en el espacio de los estados

El análisis de problemas relacionados con la teoría de sistemas y de control, proporcionó una forma de representación de los fenómenos dinámicos, denominada representación de Markov o en el *espacio de los estados*, mediante la que se describe el comportamiento de uno o más *outputs* o salidas del sistema en función de varias variables internas de éste, generalmente inobservables, llamadas *variables de estado*, y de un conjunto de *inputs* o entradas al sistema. En la Figura 5.2 aparece un esquema de esta representación, cuya idea básica es que el comportamiento del sistema queda determinado, recursivamente en dos fases, a partir de las entradas. En la primera fase, las entradas determinan las variables de estado del sistema y, en la segunda, las variables de estado generan el comportamiento del sistema.

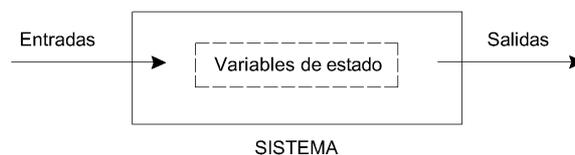


Figura 5.2 Esquema de representación en el espacio de los estados

Las variables de estado se derivan internamente en el sistema, período a período, en función de la señal exterior. En los sistemas deterministas, las variables de estado generan de forma única la salida del sistema. En cada caso concreto las variables de estado se deben especificar de acuerdo con la naturaleza del problema, con el fin último de que contengan toda la información necesaria y suficiente para determinar el comportamiento del sistema, con el número mínimo de parámetros.

Formalmente, la representación en el espacio de los estados consta de dos ecuaciones. La primera, que determina las variables de estado en función de las entradas, se denomina *ecuación de transición* o *ecuación de evolución*. Existen varias versiones, según se considere el comportamiento del término de error, una de las cuales es la siguiente:

$$[s_t] = [C_t][s_{t-1}] + [R_t][v_t]$$

en donde:

$[C_t]$: Es una matriz conocida, $r \times r$, denominada *matriz de transición*.

$[s_t]$: Es un vector, $r \times 1$, de variables de estado.

$[v_t]$: Es un vector de *entradas* o *innovaciones*, $r \times 1$, tal que $[v_t] \sim NI(0, [V_t])$, con $[V_t]$ conocida.

$[R_t]$: Es una matriz conocida, $r \times r$.

La segunda ecuación, denominada *ecuación de medida*, determina las salidas en función de las variables de estado y de un término de *error de medida*. En el caso univariante (una única salida, Y_t , en cada período) esta ecuación puede expresarse, en general, como sigue

$$Y_t = [z_t][s_t] + [u_t]$$

en donde:

$[z_t]$: Es un vector conocido, $r \times 1$.

$[u_t]$: Es el término de error, 1×1 .

Además, se exige que no exista correlación entre $[u_t]$ y $[v_t]$.

Por tanto, contemplando las ecuaciones en su conjunto, el comportamiento de Y_t ($t = 1, 2, \dots$), queda determinado linealmente cuando se conoce el estado inicial

$[s_0]$, las entradas ($[v_1], [v_2], \dots$) y los errores de medida ($[u_1], [u_2], \dots$).

Esta representación puede englobar como caso particulares a los modelos de regresión lineal, así como a todos los modelos de series temporales estudiados en apartados anteriores, pero con notación distinta.

5.4.1 Filtro de Kalman

La ventaja fundamental de especificar un modelo en el espacio de los estados es que se pueden utilizar diversos algoritmos para la estimación de sus parámetros, obtención de predicciones, etc. Un potente algoritmo es el *filtro de Kalman*, que consiste básicamente en un procedimiento que permite obtener estimaciones óptimas del vector de estado, $[s_t]$, para cada t con la información disponible hasta el momento. Esta operación se suele denominar *filtrado*. Conocer $[s_t]$, para $t = 1, 2, \dots, T$, puede tener interés en sí mismo si las variables de estado tienen un significado de alguna variable a conocer, pero es también un medio para resolver otros problemas tales como la estimación de los parámetros que determinan las matrices del sistema y la predicción de la salida.

A continuación, se indican el conjunto de ecuaciones que constituyen el filtro de Kalman con referencia al caso univariante [75].

Sean:

$[a_{t-1}]$ el estimador óptimo de $[s_{t-1}]$ basado en todas las observaciones disponibles hasta $t-1$.

$[P_{t-1}]$ la matriz de varianzas y covarianzas del error de estimación:

$$[P_{t-1}] = E\{([S_{t-1}] - [a_{t-1}])([S_{t-1}] - [a_{t-1}])'\}$$

Designando $[a_{t|t-1}]$ al estimador óptimo de $[s_t]$ dada la información disponible hasta $t-1$, se tiene que $[a_{t|t-1}] = [C_t][a_{t-1}]$.

La matriz de varianzas y covarianzas del error de la estimación es:

$$[P_{t|t-1}] = [C_t][P_{t-1}][C_t]' + [R_t][V_t][R_t]'$$

El problema ahora es actualizar la estimación de $[s_t]$, $[a_{t|t-1}]$, cuando se dispone de una nueva observación Y_t . Sea $f_t = [z_t]'[P_{t|t-1}][z_t] + \sigma_t^2$, donde $\text{var}([u_t]) = \sigma_t^2$, las ecuaciones de actualización, que constituyen el filtro de Kalman, son:

$$[a_t] = [a_{t-1}] + f_t^{-1} (Y_t - [z_t]' [a_{t-1}]) [P_{t-1}] [z_t]$$

$$[P_t] = [P_{t-1}] - f_t^{-1} [P_{t-1}] [z_t] [z_t]' [P_{t-1}]$$

A partir de estas ecuaciones se puede obtener el siguiente sistema recursivo de ecuaciones que permiten hacer el cálculo de $[a_{t+1|t}]$ partiendo de $[a_{t|t-1}]$:

$$[a_{t+1|t}] = ([C_{t+1}] - [k_t] [z_t]') [a_{t|t-1}] + [y_t] [k_t]$$

en donde el vector $[k_t]$, $(r \times 1)$, denominado vector de ganancia viene dado por la expresión $[k_t] = f^{-1} [C_{t+1}] [P_{t|t-1}] [z_t]$ para $t = 1, 2, \dots, T$.

Entonces, la ecuación para la matriz de varianzas y covarianzas de los errores es:

$$P_{t+1|t} = [C_{t+1}] ([P_{t|t-1}] - f^{-1} [P_{t|t-1}] [z_t] [z_t]' [P_{t|t-1}]) [C_{t+1}]' + [R_{t+1}] [V_{t+1}] [R_{t+1}]'$$

que se conoce como *ecuación de Riccati*.

Para operar recursivamente es preciso disponer de los valores iniciales de $[a_0]$ y $[P_0]$. A partir de ellos, el filtro de Kalman proporciona estimadores óptimos de las variables de estado, en cada período, a medida que se va añadiendo cada vez una nueva observación Y_t ($t = 1, 2, \dots, T$). Los autores combinan el algoritmo de mínimos cuadrados con el filtro adaptativo de Kalman para obtener los parámetros del modelo y estimar el estado, resultando un modelo que se adapta a los cambios estacionales. Comparado con un modelo de series temporales, habitualmente, resulta ser menos preciso aunque emplea menos parámetros, especialmente cuando se trabaja con grandes sistemas.

Una importante ventaja de este modelo, aplicado al problema de predicción del consumo, es que permite conocer la demanda eléctrica en puntos de la red en los que no se están realizando medidas, pero en cambio presenta como principales inconvenientes que no es exportable de un sistema a otro y la dificultad de identificar las variables de entrada relevantes de cada sistema.

5.5 Técnicas modernas de predicción

Como alternativa a las técnicas clásicas de predicción, hacia 1960 aparece el término *Inteligencia Artificial* (IA), con el objetivo de definir métodos algorítmicos capaces de no sólo emplear la capacidad de cálculo de los ordenadores sino tratar de hacerlos 'pensar' [68].

El rápido progreso de la IA culminó en los años setenta con la introducción de los *Sistemas Expertos*, complejos programas de computador en los que se codifica el conocimiento de expertos en una materia muy concreta en forma de reglas de decisión. No obstante, casi medio siglo más tarde los ordenadores son miles de veces más rápidos y sin embargo no resultan mucho más inteligentes. El problema radia en que el binomio lógica booleana-máquina de Von Neumann, sobre el que se asienta la IA, presenta problemas a la hora de abordar ciertas tareas, como aquellas denominadas del mundo real, donde la información que se presenta es masiva, imprecisa y distorsionada. Para abordar este tipo de tareas, en la década de los ochenta, se desarrollan una serie de paradigmas de cómputo alternativos, como las redes neuronales, los sistemas borrosos y los algoritmos genéticos, de los cuales los dos primeros quizás sean los más relevantes y empleados.

Indicar que en la actualidad también existen trabajos, en los que se intentan combinar varias de estas técnicas a la vez con *modelos mixtos*, donde se combinan las técnicas de redes neuronales y los sistemas borrosos, u otras [69].

En los siguientes apartados se detallan las características más relevantes de cada una de estas nuevas técnicas.

5.5.1 Redes neuronales

El éxito de las redes neuronales, también denominadas sistemas neuronales artificiales o ANS (Artificial Neural Systems), radica en su capacidad para *aprender* relaciones no lineales entre sus entradas, en el caso de predicción del consumo como la temperatura, tipo de día, consumos anteriores, etc., y sus salidas, demanda prevista, y en su tolerancia a la presencia de una componente aleatoria en los datos. Además, los ANS son muy flexibles en cuanto a la cantidad y tipo de entradas que puede aceptar, pudiendo tomar tanto valores continuos (temperatura) como discretos (día de la semana).

Las redes neuronales se plantean como aptas para resolver aquellas tareas que resuelve el cerebro eficientemente, en donde es interesante copiar su estructura hardware, creando un sistema compuesto por múltiples neuronas ampliamente interconectadas y estudiar si a partir de su autoorganización pueden reproducirse sus capacidades.

Los modelos de demanda basados en *redes neuronales artificiales*, se han hecho populares en fechas relativamente recientes. A partir de 1991 empiezan a publicarse numerosos artículos que muestran los buenos resultados obtenidos con estos modelos, incluso cuando se comparan con otras metodologías más tradicionales [59].

En la actualidad, las redes neuronales constituyen un activo campo multidisciplinar, en el que confluyen investigadores de distintas áreas. Este método de cálculo es el que se utiliza en la presente tesis para realizar el cálculo de la predicción

del consumo. En el Capítulo 6 se presentan con detalle las bases teóricas de dicha técnica y los modelos neuronales utilizados en el nuevo método de predicción propuesto.

5.5.2 Lógica borrosa y algoritmos genéticos

La denominada *lógica borrosa* (Fuzzy Logic) pretende dar un paso adelante sobre la lógica booleana o digital. En ésta una sentencia solamente puede ser verdadera o falsa (1 ó 0), una cualidad está presente o no lo está, mientras que en el mundo real las cosas no son sólo verdaderas o falsas. Los sistemas borrosos pueden describirse como un tipo de lógica multivaluada, que permite manejar los conceptos borrosos o difusos típicos del mundo real, que emula el tipo de razonamiento que los seres humanos realizan. Se puede decir que mientras las redes neuronales artificiales emulan el hardware del cerebro, los sistemas borrosos se ocupan del lado más software. Así, los *sistemas borrosos* permiten tratar información imprecisa, como temperatura baja, alta, media, en términos de conjuntos borrosos o difusos (imprecisos). Estos conjuntos borrosos es posible combinarlos en reglas para definir acciones como, por ejemplo, 'si la temperatura es alta entonces enfría mucho'.

Por ello, los sistemas borrosos permiten modelar cualquier proceso no lineal, y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje [75].

Bases de la lógica borrosa

Sea U un conjunto de objetos, por ejemplo, $U = R^n$, que se denomina universo de discurso. Un *conjunto borroso* F en U queda caracterizado por una *función de inclusión* μ_F que toma valores en el rango $[0, 1]$, donde $\mu_F(u)$ representa el grado en el que $u \in U$ pertenece al conjunto borroso F . Esta definición representa la generalización del concepto clásico de conjunto, en el que la función de pertenencia toma solamente los valores 0 o 1, por el contrario, para uno borroso, la función puede tomar también valores intermedios.

Dado un cierto conjunto borroso F , se definen los siguientes términos (Figura 5.3). El *conjunto soportado* es el conjunto (clásico) de todos los valores de U para los que $\mu_F(u) > 0$. Los *puntos de cruce* son aquellos valores para los que $\mu_F(u) = 0,5$. Se dice que un conjunto borroso es de tipo *singleton* si su conjunto soportado es de un solo valor.

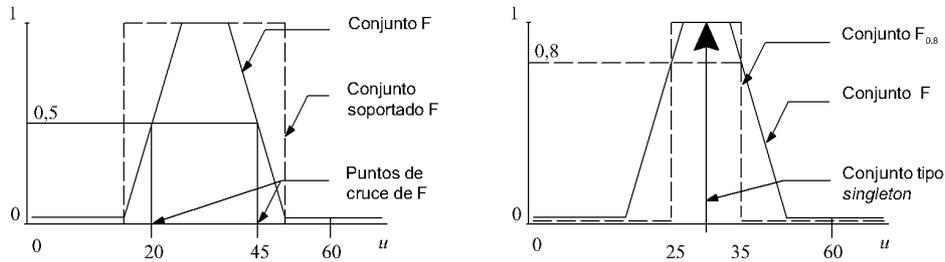


Figura 5.3 Términos relativos a los conjuntos borrosos

Asimismo, se denomina *conjunto α -corte* F_α de un conjunto borroso F , al conjunto clásico de todos los puntos u de U para los que se cumple $\mu_F(u) > \alpha$. Por otro lado, se dice que un conjunto borroso está *normalizado* si el máximo de su función de inclusión es 1.

La *función de inclusión* o pertenencia (membership function) de un conjunto borroso consiste en un conjunto de pares ordenados $F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in U\}$ si la variable es discreta, o en una función continua si no lo es. Como ya se ha comentado el valor de $\mu_F(u)$ indica el grado en que el valor u de la variable U está incluida en el concepto representado por la etiqueta F . Las más frecuentes son la función de tipo trapezoidal, triangular, S y tipo π (Figura 5.4).

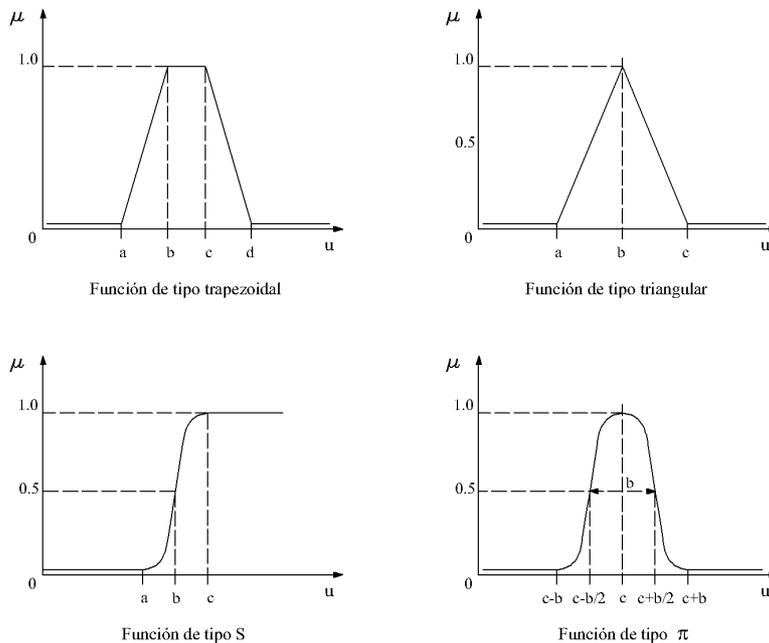


Figura 5.4 Funciones de inclusión tipo

Se denomina *variable lingüística* a aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural como mucho, poco, positivo, negativo, etc. En términos formales, una variable lingüística se define por la tupla $(A, T(A), U)$, donde A es el nombre de la variable, $T(A)$ es el conjunto de términos que nombran los valores x que puede tomar A . Así, por ejemplo, la *Temperatura* puede considerarse como una variable lingüística, de modo que $A=Temperatura$. $T(Temperatura)$ es el conjunto de todos los términos que pueden hacer referencia a la temperatura, como baja, media y alta. El universo de discurso U de esta variable va en general desde el cero absoluto al infinito.

Dada una variable A , definida en un rango entre u_1 y u_2 , es posible establecer en ella diversas particiones. Se conoce por *partición* a un subconjunto de los conjuntos borrosos que se han definido para la variable A . Una partición de A es uno de los subconjuntos que pueden formarse con los elementos de $T(A)$. Así, para la variable *Temperatura*, una posible partición sería con tres subconjuntos borrosos, cada uno identificado por una etiqueta, {baja, media, alta}, y una función de inclusión o pertenencia, $\{\mu_{baja}(t), \mu_{media}(t), \mu_{alta}(t)\}$.

También, como en el caso de la lógica clásica, la borrosa se ocupa del razonamiento formal con proposiciones, pero a diferencia de ésta, los valores de las proposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso.

Para dos universos de discurso U y V , una *relación borrosa* se define como un conjunto borroso R en el espacio $U \times V$, cuya función de inclusión se denota como $\mu_R(u, v)$, con $u \in U$ y $v \in V$.

Las *reglas borrosas* combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada, llamados antecedentes o premisas y les asocian un conjunto borroso de salida, llamado consecuente o consecuencia. Una regla típica, de tipo IF-THEN, para un sistema de control puede ser 'si el error es positivo pequeño y la derivada del error es negativo pequeño entonces la acción es positiva pequeña'.

El conjunto de reglas que expresan las relaciones conocidas entre antecedentes y consecuentes se conoce como una *base de reglas*. Ésta se suele representar bien como una tabla de las reglas que la forman, o bien como una *memoria asociativa borrosa* o FAM (Fuzzy Associative Memory). Formalmente, una base de reglas borrosas es una colección de reglas $R^{(l)}$ con el formato:

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ es } F_1^l \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } F_n^l \text{ THEN } y \text{ es } G^l$$

donde F_i^l y G^l son conjuntos borrosos. Este tipo de reglas se conoce como borroso puro o de *tipo Mamdani*.

Por otra parte, el *borrosificador* establece una relación entre puntos de entrada no borrosos al sistema $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$, y sus correspondientes conjuntos borrosos

A en U (las variables procedentes del exterior serán, en general, valores no borrosos, y hay que borrosificarlas previamente). El *borrosificador singleton* es el método más utilizado, principalmente en sistemas de control, y consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos borrosos. Así, para cada valor de entrada \mathbf{x} se define un conjunto A' que lo soporta, con función de pertenencia $\mu_{A'}(\mathbf{x}')$, de modo que $\mu_{A'}(\mathbf{x}') = 1$ si $\mathbf{x}' = \mathbf{x}$ y $\mu_{A'}(\mathbf{x}') = 0$ para todos los $\mathbf{x}' \neq \mathbf{x}$.

El *desborrosificador* es la función que transforma un conjunto borroso V, normalmente salida de un dispositivo de inferencia borrosa, en un valor no borroso $y \in V$. Una opción muy utilizada es un desborrosificador por media de centros, definido como:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l (\mu_{B^l}(\bar{y}^l))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B^l}(\bar{y}^l))}$$

donde \bar{y}^l representa el centro del conjunto borroso G^l (definido como el punto de V en el que $\mu_{B^l}(\bar{y}^l)$ alcanza su valor máximo).

Una opción para el diseño de sistemas borrosos muy utilizada en la literatura es un sistema de lógica borrosa con desborrosificador por media de centros, implicación borrosa por la regla del mínimo y borrosificador singleton, que produce la *función de salida*

$$f(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l [\min(\mu_{F_1^l}(x_1), \dots, \mu_{F_n^l}(x_n))]}{\sum_{l=1}^M [\min(\mu_{F_1^l}(x_1), \dots, \mu_{F_n^l}(x_n))]}$$

Los sistemas borrosos de control o FLC (Fuzzy Logic Controllers), no son entes estáticos, sino que pueden entrenarse para optimizar su funcionamiento. Así, los FLC son aproximadores funcionales genéricos, es decir, dado un cierto nivel de error, se puede encontrar un FLC que aproxime cualquier función con un error menor que el fijado y, para ello, pueden hacer uso de diversas técnicas como los métodos estadísticos, las redes neuronales o los algoritmos genéticos. Existen numerosos algoritmos de aprendizaje o entrenamiento aplicables al caso de los sistemas borrosos, de los que destacan algoritmos de retropropagación, similar al aplicable en las redes neuronales (Apartado 6.5.4) y los algoritmos genéticos.

Con la utilización de esta técnica, en la actualidad, se desarrollan algoritmos que mediante el uso de reglas borrosas, a partir de unas variables de entrada, proporcionan la predicción del consumo eléctrico para una determinada instalación. Como ventajas de esta técnica destacar que permiten considerar la influencia en el consumo de distintas

variables como la temperatura, tipo de día, etc. y son aptos para calcular días atípicos. El principal inconveniente radica en la dificultad de definición de las reglas borrosas adecuadas para un determinado sistema.

Algoritmos genéticos

Los *algoritmos genéticos* o *GA* (*Genetic Algorithms*) están inspirados en los métodos de resolución de problemas que ha utilizado la naturaleza para hacer evolucionar a los seres vivos, adaptándolos a los diferentes entornos o hábitats. La técnica empleada por la naturaleza consiste principalmente en la codificación de las características de los seres vivos en el genoma, y su evolución a través de la reproducción sexual y las mutaciones. La estructura de estos algoritmos puede verse en la Figura 5.5. Así, en el caso de aplicar los GA para realizar la previsión de la demanda en un punto determinado, el proceso de optimización comienza con la *inicialización*, consistente en la generación de una población de individuos. Donde se entiende por población a un conjunto de individuos, donde cada individuo es un modelo del consumo completo. Durante la fase de inicialización se puede generar una población, bien de forma aleatoria, bien partiendo de un modelo ya existente.

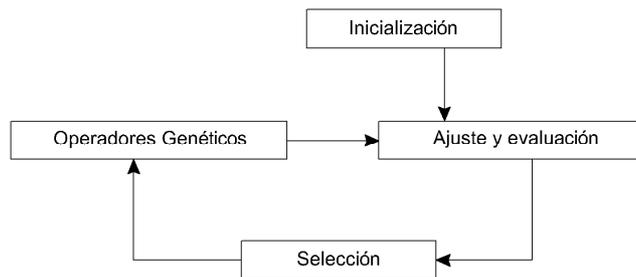


Figura 5.5 Estructura genérica y funcionamiento de un algoritmo genético

La fase siguiente del proceso es la *evaluación*, en la que se deja que cada uno de los modelos que forman la población genere una salida mediante simulación, siendo evaluados mediante una función de eficiencia o idoneidad (*fitness*). Ésta es normalmente la etapa que más tiempo requiere, pues se han de simular cada uno de los modelos del consumo que constituyen la población durante el tiempo necesario para evaluar su eficiencia y en un número de situaciones suficientes. La definición de esta función de eficiencia es fundamental en el éxito del uso de los GA para la resolución de un problema dado. A partir de ella, el diseñador decide qué comportamientos no se han de potenciar, cuáles sí, y en qué medida.

La fase siguiente es la de *selección*, en la cual se simula el proceso de selección natural de los individuos en cada generación. En este sentido, se deben seleccionar qué modelos, individuos, han de transmitir los parámetros que los definen a la generación siguiente. Dada una población de M individuos, son posibles diversas alternativas.

- Sólo el mejor se selecciona. De toda la población se elige al individuo que tienen una mejor evaluación.
- Sólo los mejores se seleccionan. De toda la población se eligen los n individuos que tienen una mejor evaluación.
- Todos pueden seleccionarse. Cada individuo de la población se selecciona con una probabilidad, mayor cuanto mejor sea su evaluación

A la fase de selección le sigue la aplicación de una secuencia de *operadores genéticos*, que simulan el proceso de reproducción sexual de los seres vivos. Aplicando estos operadores sobre los parámetros que definen el modelo seleccionado, se obtienen otros para la siguiente generación. Esta fase queda definida por la secuencia de operadores seleccionada, la cual sirve además para identificar el algoritmo genético utilizado [79] y [80]. El proceso es iterativo hasta llegar a un modelo lo suficientemente satisfactorio.

Indicar que en la actualidad se desarrollan trabajos con métodos de predicción que combinan las redes neuronales y la lógica borrosa, denominados *modelos mixtos*, con el objetivo de obtener los puntos fuertes de ambas metodologías, por un lado, la capacidad de auto-aprendizaje de las redes y, por otro, la mayor heterogeneidad en los valores de las distintas variables introducidas por los conjuntos borrosos.

5.6 Valoración de la capacidad predictiva de los modelos

Una forma de llevar a cabo la valoración de la capacidad predictiva de los modelos es a través de la comparación entre las predicciones y los valores de consumo reales. Dado que los métodos de estimación suelen minimizar sumas de cuadrados de los residuos dentro de los períodos muestrales, la valoración de los modelos debe hacerse con datos diferentes a los utilizados para estimar. Una práctica frecuente consiste en dividir los datos muestrales en dos subconjuntos. El primero se utiliza para estimar y el segundo para comparar las predicciones del modelo con las observaciones.

Una de las técnicas utilizadas es la obtención de los parámetros de la *recta de regresión* de \hat{L}_t respecto a L_t ,

$$\hat{L}_t = \alpha + \beta L_t + e_t; \quad t = 1, 2, \dots, T.$$

En el caso ideal de que la predicción fuera perfecta, la recta de regresión debería coincidir con la bisectriz del primer cuadrante del *Diagrama de predicciones-realizaciones* (Figura 5.6). En este caso, los valores de los parámetros son:

$$\alpha = 0, \quad \beta = 1$$

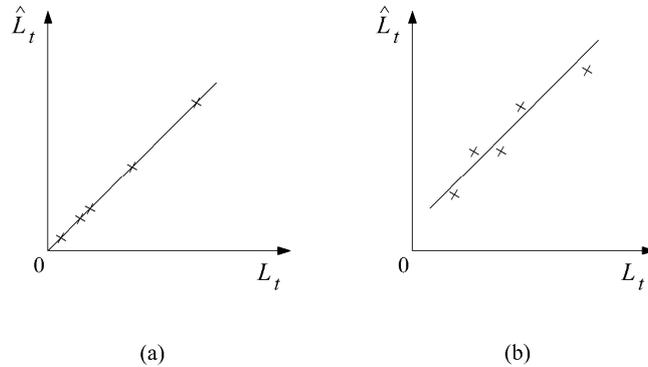


Figura 5.6 Diagrama de predicciones-realizaciones

Mucho más común, en la literatura, es el cálculo de un parámetro que cuantifica la diferencia entre el consumo estimado y el real. Existen gran cantidad de índices, de entre los que se destacan:

Error absoluto medio (EAM)

El error absoluto medio de las predicciones se define como:

$$EAM = \frac{\sum_{t=1}^N |\hat{L}_t - L_t|}{N}$$

donde N es el número de datos estimados, \hat{L}_t es el consumo estimado para el instante t y L_t es el consumo real para dicho instante.

Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM)

El error cuadrático medio de las predicciones se define como la media aritmética de los cuadrados de los errores de predicción. El error estándar de las predicciones es la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM):

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (\hat{L}_t - L_t)^2}{N}}$$

Estos dos índices son muy utilizados, aunque presentan un inconveniente y es que vienen expresados en las mismas unidades de medida que L_t , lo que implica que sus valores dependen en cada caso de la unidad de medida adoptada y no sirven para llevar a cabo comparaciones entre distintos métodos si se han tomado unidades distintas.

Este defecto puede subsanarse sin dificultad, por ejemplo, dividiendo el índice por la media o por la desviación estándar.

Coefficiente de desigualdad de Theil

Se define como:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=2}^N (P_t - R_t)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=2}^N R_t^2}}$$

donde:

$$P_t = \frac{\hat{L}_t - L_{t-1}}{L_{t-1}} \times 100, \text{ porcentaje del cambio predicho}$$

$$R_t = \frac{L_t - L_{t-1}}{L_{t-1}} \times 100, \text{ porcentaje del cambio real}$$

Si las predicciones son perfectas, entonces $U^2 = 0$. En la práctica, U^2 debe estar comprendido entre 0 y 1. Así, por comparación entre el valor obtenido y estos límites se tiene una idea de la capacidad predictiva del modelo.

Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Este error es el más utilizado en las diferentes publicaciones actuales, por lo que se utiliza en la presente tesis, y es el *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), que se define como:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|\hat{L}_t - L_t|}{L_t} \times 100$$

que al ser un índice relativo, no presenta unidades, y permite comparar resultados de distintos modelos, incluso aplicados a distintos puntos de consumo.

Error medio de Energía (EME)

En el caso de que L_t represente el consumo de energía en un determinado periodo de tiempo, como en el método de predicción propuesto (Capítulo 8), es posible definir, el *Error Medio de Energía* (EME), cuya expresión es:

$$EME = \sum_{t=1}^N \frac{|\hat{L}_t - L_t|}{\sum_{t=1}^N L_t} \times 100$$

muy similar al anterior, utilizado también en el presente trabajo, ya que es menos sensible que el MAPE en aquellos casos en los que el valor real del consumo es inferior a la unidad.

5.7 Cálculo de la predicción en niveles de agregación elevados

Una de las empresas, en el sistema eléctrico español, que presenta una mayor necesidad de precisión en el cálculo de la predicción en el consumo es Red Eléctrica de España (REE) que desde su creación, en el 1985, se ha hecho cargo de la gestión de la red de transporte y de la operación del sistema eléctrico español.

Como operador del sistema, REE garantiza el equilibrio entre la producción y el consumo de energía, asegurando la calidad del suministro eléctrico en cada lugar y en todo momento, aportando al sistema de mercado la seguridad y la liquidez que necesita. Además, facilita el acceso de los agentes al mercado de electricidad.

Para su funcionamiento necesita gestionar toda la energía eléctrica que se produce y se consume, prever la demanda y gestionar el transporte de la producción necesaria para satisfacer la demanda en tiempo real.

Así, REE dispone de una herramienta de cálculo de predicción de la demanda basada, entre otras, en las técnicas heurísticas, presentadas anteriormente, combinadas con el uso de diferentes parámetros que caracterizan el consumo. Utiliza una metodología donde se recalcula la previsión del consumo en un determinado momento para las siguientes horas, basándose en los datos de los instantes anteriores y la casación en los mercados.

REE publica una curva de demanda diaria (Figura 5.7) que informa a los usuarios, en cada momento, sobre el consumo de energía eléctrica que se está produciendo en el sistema eléctrico peninsular. El gráfico publicado en Internet se refresca automáticamente, generando cada tres minutos una actualización. En dicha gráfica se representa la curva de la *Demanda Real* que representa valor instantáneo medido de la demanda de energía eléctrica. También, se indica una curva escalonada de la *Programación Horaria Operativa*, que es la producción programada para los grupos de generación a los que se haya adjudicado el suministro de energía en la casación de los mercados diario e intra-diarios, así como en los mercados de gestión de desvíos y regulación terciaria. Finalmente, y más importante, aparece otra curva de la *Previsión de demanda Actual*, calculada con los modelos descritos.

En el gráfico se presenta un intervalo de 29 horas, desde las 20:00 del día anterior a las 1:00 del día siguiente. En cuanto a la curva de previsión, se observa que para un día en concreto, se recalcula cada tres minutos con el uso de los últimos datos disponibles. Indicar que en el primer gráfico después de las 00:00, se publica la curva prevista para las siguientes 24 horas, considerando que la previsión será la misma que la del día anterior. En el siguiente gráfico la curva se actualiza con la previsión para todo el día considerado hasta las 23:59, gráfica que se va ajustando, como se ha indicado a intervalos de tres minutos, hasta el final del día [71].

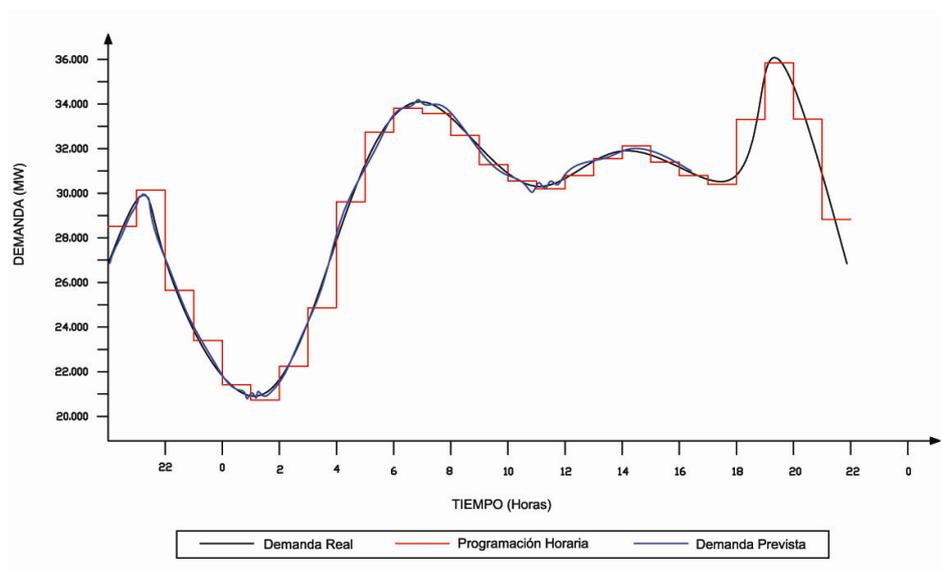


Figura 5.7 Gráfico de la demanda de energía eléctrica de REE

5.7.1 El parámetro de *Laboralidad*

En el cálculo de la previsión del consumo eléctrico diario de un determinado sistema es posible observar que depende, en gran medida, de la actividad que haya en dicho sistema. Así, según la fecha para la que se realiza el cálculo de la estimación se debe disponer de un parámetro que indique la actividad prevista en el mismo. En la metodología utilizada por REE se establecen unos criterios para asignar dicho parámetro, llamado *laboralidad*, que son:

- El factor toma valores de 0,6429 hasta 1,0000.
- El día 1 de enero presenta el valor más bajo del año.
- El valor para los sábados dentro de un mismo mes es el mismo. Lo mismo se cumple para los domingos.

- Los martes, miércoles y jueves, que no sean festivos, habitualmente presentan un valor máximo.
- En los días festivos los valores para cada año cambian según el día de la semana.
- En un determinado día que sea festivo en una comunidad entonces el parámetro adquiere un valor inferior al de un día habitual.
- En los meses de julio y agosto no existen días con valor igual a 1,0000.
- Todos los años tienen los mismos valores con las modificaciones particulares de los festivos según el día de la semana.

En el presente trabajo se utiliza también el parámetro de *Laboralidad* basado en los aspectos presentados. Así, en el Capítulo 8 se explica con detalle el uso del mismo en el nuevo método de cálculo propuesto.

5.8 Conclusiones del capítulo

En el Capítulo 2 se detectan distintas barreras en la implantación de programas de respuesta de la demanda. Por un lado, para salvar las barreras tecnológicas, en el capítulo anterior, se presenta el desarrollo de un sistema de gestión integral que aporta las funcionalidades adicionales necesarias. Por otro lado, para salvar las barreras económicas detectadas, es necesario el diseño de un sistema de retribución adecuado, ya que para cuantificar la respuesta de un consumidor frente a una señal del administrador del programa, es necesario disponer de una predicción del consumo fiable que permita compararlo con el consumo real producido.

Por ello, en el presente capítulo se estudian las distintas técnicas de predicción habitualmente utilizadas en la literatura. La clasificación realizada agrupa las distintas técnicas clásicas, que generalmente están basadas en un modelo que se ajusta a las series de datos disponibles, y las técnicas modernas, desarrolladas en las últimas décadas, presentando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

De las técnicas más tradicionales se destaca que pueden ser técnicas simples de aplicar pero, generalmente, debe plantearse un modelo específico para cada punto de consumo del que se quiera realizar la predicción. Indicar que en la actualidad son utilizadas con éxito en ciertas aplicaciones.

En cuanto a las técnicas modernas se indican las que actualmente están siendo más utilizadas por los distintos grupos de trabajo de entre las que se destacan las redes neuronales, la lógica difusa y los algoritmos genéticos. Se eligen las *redes neuronales* como la técnica a emplear en el nuevo método de predicción desarrollado en el presente trabajo para poder realizar predicciones en consumos con bajo nivel de agregación, por los buenos resultados que ofrecen para aprender relaciones no lineales entre sus entradas y las salidas. Además, son fácilmente adaptables a distintos puntos de suministro y se pueden implementar en el sistema de gestión integral propuesto.

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

Se presenta, también, con detalle las características fundamentales de la lógica difusa, ya que pueden combinarse con las redes neuronales para intentar mejorar los resultados.

Para finalizar, se presentan distintos índices empleados en la literatura, de entre los que se eligen los utilizados en el presente trabajo para valorar la capacidad predictiva de los diferentes modelos.

CAPÍTULO 6

TÉCNICAS NEURONALES APLICADAS AL CÁLCULO DE PERFILES DE CONSUMO

6.1 Introducción

El cálculo de la predicción del consumo en un determinado punto de suministro es muy importante para la implantación satisfactoria de cualquier programa de respuesta de la demanda, ya que constituye una herramienta fundamental para poder establecer una correcta retribución de las acciones tomadas por los consumidores, pues para poder cuantificarlas es necesario comparar el consumo real que se ha producido en la instalación con el que se habría incurrido de consumir de forma habitual, sin responder a una señal del administrador del programa. Así, uno de los servicios fundamentales que debe aportar el sistema descrito en el Capítulo 4, es el cálculo del perfil del consumo en cada punto de medida integrado en el sistema.

En el presente trabajo, como herramienta para facilitar la respuesta de la demanda, se plantea un nuevo método de cálculo de la predicción del consumo, que utiliza todo el potencial aportado por el sistema, como la disponibilidad de datos históricos de distintos puntos de medida, facilidad de obtener la previsión de temperaturas para el día siguiente por estar conectado a Ethernet, posibilidad de representación de resultados, generación de informes e históricos, etc.

En el planteamiento de dicho método, un aspecto fundamental es la elección de la técnica de previsión a utilizar, ya que una vez se disponen los distintos datos históricos de consumo, los valores de factores ambientales como temperatura y humedad, datos geográficos, etc., es necesario, con todos los datos disponibles, realizar una correcta previsión con el uso de una técnica potente. Una vez realizado el análisis de las distintas técnicas en el capítulo anterior, se elige el uso de *redes neuronales artificiales* ANS (Artificial Neural Systems) para la predicción del consumo eléctrico por muchas razones, entre las que se destaca que es una técnica moderna, con una fuerte base teórica y con resultados contrastados en la literatura.

Así, en el presente capítulo se describen las características fundamentales de las redes neuronales, su estructura, los parámetros a controlar en los modelos, algoritmos de entrenamiento, etc. Finalmente, se analizan las variables que influyen en el consumo

de una determinada instalación y se presentan las redes neuronales a utilizar en el nuevo método planteado para la previsión del consumo eléctrico desarrollado en el Capítulo 8.

6.2 Estructura de un sistema neuronal artificial

La base de los ANS (Artificial Neural Systems) imita la estructura hardware del sistema nervioso, con la intención de construir sistemas de procesamiento de información paralelos, distribuidos y adaptativos, que puedan presentar un cierto comportamiento *inteligente*. En un sistema neuronal biológico, los elementos básicos son las neuronas, que se agrupan en conjuntos compuestos por millones de ellas organizadas en capas, constituyendo un sistema con funcionalidad propia. Un conjunto de esos subsistemas da lugar a un sistema global, el sistema nervioso. En la realización de un sistema neuronal artificial, puede establecerse una estructura jerárquica similar. El elemento esencial de partida es la neurona artificial, que se organiza en capas, varias capas constituyen una red neuronal y, por último, una red neuronal junto con las interfaces de entrada y salida, más los módulos algorítmicos adicionales necesarios, conforman el sistema global de proceso (Figura 6.1).

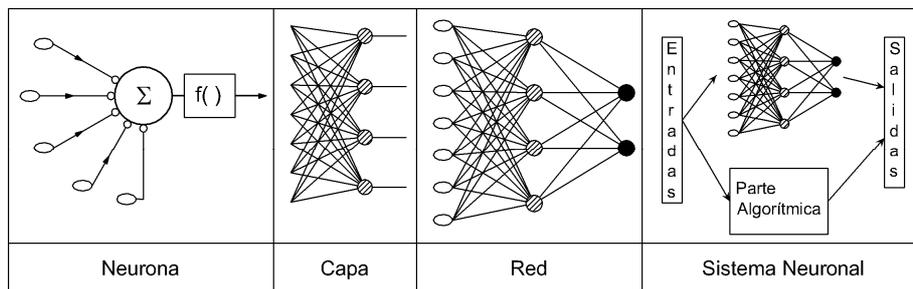


Figura 6.1 Estructura jerárquica de un sistema basado en ANS

6.2.1 Modelo general de neurona artificial

En este apartado se describe la estructura genérica de neurona artificial [85] y [86]. Se denomina *procesador elemental* o *neurona* a un dispositivo simple de cálculo que a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una única respuesta o salida. Los elementos que constituyen la neurona i son los siguientes (Figura 6.2):

- Conjunto de *entradas*, $x_j(t)$.
- *Pesos sinápticos* de la neurona i , w_{ij} que representan la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica j y la neurona postsináptica i .

- *Regla de propagación* $\sigma(w_{ij}, x_j(t))$, que proporciona el valor del potencial postsináptico $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ de la neurona i en función de sus pesos y entradas.

- *Función de activación* $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$, que indica el estado de activación actual $a_i(t) = f_i(a_i(t-1), h_i(t))$ de la neurona i , en función de su estado anterior $a_i(t-1)$ y de su potencial postsináptico actual.

- *Función de salida* $F_i(a_i(t))$, que proporciona la salida actual $y_i(t) = F_i(a_i(t))$ de la neurona i en función de su estado de activación.

De este modo, la operación de la neurona i puede expresarse como

$$y_i(t) = F_i(f_i[a_i(t-1), \sigma_i(w_{ij}, x_j(t))])$$

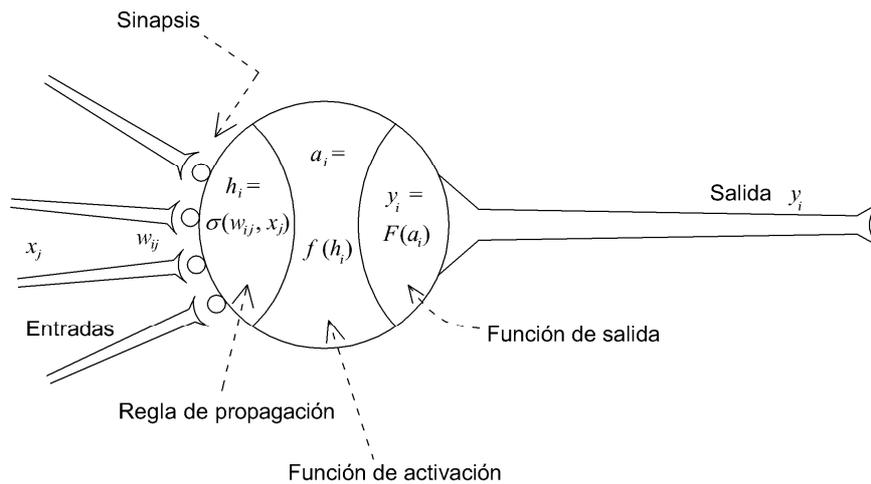


Figura 6.2 Modelo genérico de neurona artificial

A continuación, se definen las características de cada uno de los elementos descritos que constituyen una neurona.

Entradas y salidas

Las *variables de entrada y salida* pueden ser *binarias* (digitales) o *continuas* (analogías), dependiendo del modelo y aplicación. Dependiendo del tipo de salida, las neuronas suelen recibir nombres específicos [87]. Así, las neuronas estándar cuya salida sólo puede tomar los valores 0 ó 1 se suelen denominar genéricamente neuronas tipo *McCulloch-Pitts*, mientras que aquellas que únicamente pueden tener por salidas -1 ó +1 se suelen denominar neuronas tipo *Ising*. Si puede adoptar diversos valores

discretos en la salida (por ejemplo, -2, -1, 0, 1, 2), se dice que se trata de una neurona de tipo *Potts*. Por otro lado, en el caso de las analógicas puede ocurrir que una neurona de salida continua, que puede proporcionar valores cualquiera, se limite a un intervalo definido, por ejemplo, [0, +1] ó [-1, +1].

Regla de propagación

La *regla de propagación* permite obtener, a partir de las entradas y los pesos, el valor del potencial postsináptico h_i de la neurona

$$h_i(t) = \sigma_i(w_{ij}, x_j(t))$$

La función más habitual es de tipo lineal y se basa en la *suma ponderada* de las entradas con los pesos sinápticos

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j$$

que formalmente también puede interpretarse como el producto escalar de los vectores de entrada y pesos

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j = \mathbf{w}_i^T \cdot \mathbf{x}$$

El peso sináptico w_{ij} define, en este caso, la intensidad de interacción entre la neurona presináptica j y la postsináptica i . Dada una entrada positiva, si el peso es positivo tenderá a excitar a la neurona, si el peso es negativo tenderá a inhibirla.

Otras reglas de tipo no lineal, también son utilizadas en la literatura, al igual que otras basadas en las distancia entre vectores, por ejemplo la denominada *distancia euclidiana*.

Función de activación o función de transferencia

La *función de activación* o *de transferencia* proporciona el estado de activación actual $a_i(t)$ a partir del potencial postsináptico $h_i(t)$ y del propio estado de activación anterior $a_i(t-1)$

$$a_i(t) = f_i(a_i(t-1), h_i(t))$$

También, existen muchos modelos de ANS donde el estado actual de la neurona no depende de su estado anterior, sino únicamente del actual.

La función de activación $f(\cdot)$ se suele considerar determinista, y en la mayor parte de los modelos es monótona creciente y continua. Las formas de las funciones de activación más empleadas en los ANS se muestran en la Figura 6.3, donde se ha

denotado con x al potencial postsináptico y con y al estado de activación. La más simple de todas es la función *identidad*. Otro caso también muy simple es la función escalón, empleada en el *perceptrón simple* (Apartado 6.5.2).

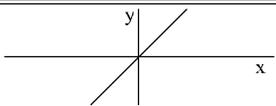
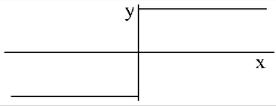
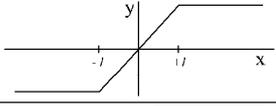
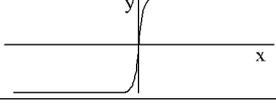
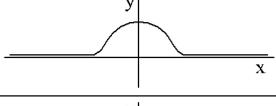
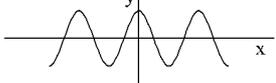
| | Función | Rango | Gráfica |
|-----------------|---|-------------------------|--|
| Identidad | $y=x$ | $[-\infty, +\infty]$ |  |
| Escalón | $y = \text{signo}(x)$ $y = H(x)$ | $[-1, +1]$ $[0, +1]$ |  |
| Lineal a tramos | $y = \begin{cases} -1, & \text{si } x < -1 \\ x, & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1, & \text{si } x > 1 \end{cases}$ | $[-1, +1]$ |  |
| Sigmoidea | $y = \text{tgh}(x)$ | $[0, +1]$ $[-1, +1]$ |  |
| Gaussiana | $y = Ae^{-Bx^2}$ | $[0, +1]$ |  |
| Sinusoidal | $y = A \text{sen}(wx + \varphi)$ | $[-1, +1]$ |  |

Figura 6.3 Funciones de activación habituales

Función de salida

Esta función proporciona la salida global de la neurona $y_i(t)$ en función de su estado de activación actual $a_i(t)$. Muy frecuentemente, la función de salida es simplemente la identidad $F(x) = x$, de modo que el estado de activación de la neurona se considera como la propia salida

$$y_i(t) = F_i(a_i(t)) = a_i(t)$$

6.2.2 Modelo estándar de neurona

El modelo concreto que se usa en la práctica, y en este trabajo, es uno más simple, que se denomina *neurona estándar*, que constituye un caso particular de todos los posibles indicados anteriormente.

En este modelo se considera la regla de propagación como la suma ponderada y la función de salida la identidad. De esta forma, la neurona estándar consiste en (Figura 6.4):

- Un conjunto de entradas $x_j(t)$ y pesos sinápticos w_{ij} .
- Una regla de propagación $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$, donde $h_i(t) = \sum w_{ij}x_j$.
- Una función de activación $y_i(t) = f_i(h_i(t))$, que representa la salida de la neurona y su estado de activación.

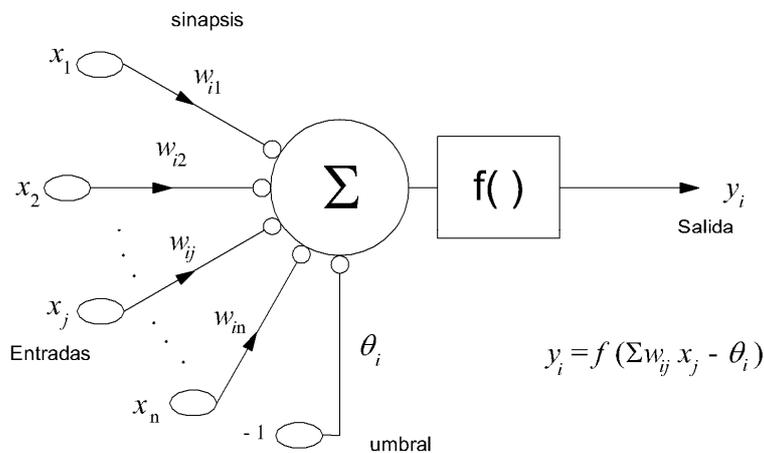


Figura 6.4 Modelo de neurona estándar

Con frecuencia se añade al conjunto de pesos de la neurona un parámetro adicional θ_i , que se denomina *umbral*, que se resta del potencial postsináptico. En el caso de nodos de respuesta todo-nada este parámetro representa el umbral de disparo de la neurona, es decir, el nivel mínimo que debe alcanzar el potencial postsináptico para que la neurona se dispare o active. Así, el modelo de neurona estándar queda

$$y_i(t) = f_i(\sum_j w_{ij}x_j - \theta_i)$$

Además, si se hace que los índices i y j comiencen en 0, se puede definir $w_{i0} = \theta_i$ y $x_0 = -1$, con lo que el potencial postsináptico se obtienen realizando la suma desde $j = 0$

$$y_i(t) = f_i(\sum_0^n w_{ij}x_j)$$

En dicho modelo de neurona, sólo falta establecer la función de activación para determinarla por completo (Apartado 6.5).

6.3 Arquitectura de las redes neuronales

Se denomina *arquitectura* a la topología, estructura o patrón de conexionado de una red neuronal. En un ANS los nodos se conectan por medio de sinapsis, esta estructura de conexiones sinápticas determina el comportamiento de la red. Las conexiones sinápticas son direccionales, es decir, la información solamente puede propagarse en un único sentido (habitualmente desde la neurona presináptica a la postsináptica (Figura 6.5). Las neuronas se agrupan en unidades estructurales denominadas *capas*. El conjunto de una o más capas constituye la *red neuronal*.

Se distinguen tres tipos de capas: de entrada, de salida y ocultas. Una *capa de entrada* o sensorial está compuesta por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno. Una *capa de salida* es aquella cuyas neuronas proporcionan la respuesta de la red neuronal. Una *capa oculta* no tiene ninguna conexión directa con el entorno, es decir, que no se conecta directamente ni a órganos sensores ni a efectores. Este tipo de capa proporciona a la red neuronal grados de libertad adicionales.

Las conexiones entre las neuronas pueden ser excitatorias o inhibitorias: un peso sináptico negativo define una conexión inhibitoria, mientras que uno positivo determina una conexión excitatoria. Habitualmente, no se suele definir una conexión como de un tipo o de otro, sino que por medio del proceso de aprendizaje se obtiene un valor para el peso, que incluye signo y magnitud.

Por otra parte, se puede distinguir entre conexiones intra-capa e inter-capa. Las conexiones *intra-capa*, también denominadas laterales, tienen lugar entre las neuronas pertenecientes a una misma capa, mientras que las conexiones *inter-capa* se producen entre las neuronas de diferentes capas. Existen además conexiones *realimentadas*, que tienen sentido contrario al de entrada-salida.

Así, en relación a su estructura en capas, se puede hablar de redes monocapa y de redes multicapa. Las *redes monocapa* son aquellas compuestas por una única capa de neuronas. Las *redes multicapa* son aquellas cuyas neuronas se organizan en varias capas.

Asimismo, atendiendo al flujo de datos en la red neuronal, es posible hablar de redes unidireccionales (*feedforward*) y redes recurrentes (*feedback*). En las *redes unidireccionales*, la información circula en un único sentido, desde las neuronas de entrada hacia las de salida (Figura 6.5). En las *redes recurrentes* o realimentadas la información puede circular entre las capas en cualquier sentido, incluido el de salida-entrada.

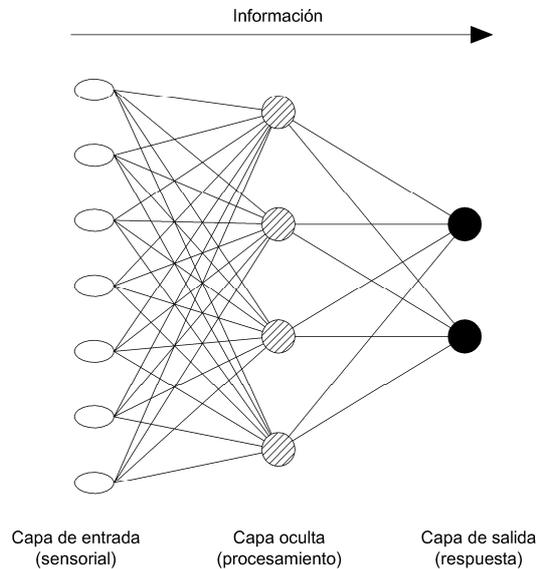


Figura 6.5 Arquitectura unidireccional de tres capas

6.4 Modos de operación: Aprendizaje y recuerdo

Se distinguen claramente dos modos de operación en los sistemas neuronales: El *modo aprendizaje o entrenamiento* y el *modo recuerdo o ejecución*. El primero, es de particular interés, pues una característica fundamental de los ANS es que se trata de sistemas entrenables, capaces de realizar un determinado tipo de procesamiento o cómputo aprendiéndolo a partir de un conjunto de patrones de aprendizaje o ejemplos.

En el contexto de las redes neuronales puede definirse el *aprendizaje* como el proceso por el que se produce el ajuste de los parámetros libres de la red a partir de un proceso de estimulación por el entorno que rodea a la red. El tipo de aprendizaje vendrá determinado por la forma en la que dichos parámetros son adaptados. En la mayor parte de las ocasiones el aprendizaje consiste simplemente en determinar un conjunto de pesos sinápticos que permita a la red realizar correctamente el tipo de procesamiento deseado.

Para que una red resulte operativa es necesario entrenarla, lo que constituye el *modo aprendizaje*. El modelado de la red consiste en modificar los pesos sinápticos siguiendo una cierta regla de error o coste, que mide la eficacia actual de la operación de la red. Si se denomina $w_{ij}(t)$ al peso que conecta la neurona presináptica j con la postsináptica i en la iteración t , el algoritmo de aprendizaje, en función de las señales que en el instante t llegan procedentes del entorno, proporcionará el valor $\Delta w_{ij}(t)$ que

da la modificación que se debe incorporar en dicho peso, el cual quedará actualizado de la forma:

$$\Delta w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t)$$

El proceso de aprendizaje es usualmente *iterativo*, actualizándose los pesos de la manera anterior, hasta que la red neuronal alcanza el rendimiento deseado.

Generalmente, una vez que el sistema ha sido entrenado, el aprendizaje se da por finalizado, por lo que los pesos y la estructura quedan fijos, estando la red neuronal ya dispuesta para procesar datos. Este modo de operación se denomina *modo recuerdo o de ejecución*. En esta fase se introducen los valores de las variables de entrada para el día a estimar y con los pesos obtenidos de la fase de entrenamiento se obtiene una previsión para las entradas específicas.

En las redes unidireccionales, ante un patrón de entrada, las neuronas responden proporcionando directamente la salida del sistema. Al no existir bucles de realimentación no existe ningún problema con su estabilidad.

Finalmente indicar que los problemas que requieren un extenso algoritmo o que precisan almacenar un gran número de datos, aprovechan mejor la estructura de una red neuronal que aquellos otros que requieren algoritmos cortos. Por lo que un ANS resuelve muy bien problemas que traten grandes bases de datos con mucha información, como sucede en el caso de la previsión del consumo eléctrico [88].

6.5 Redes neuronales supervisadas

Uno de los modelos de redes neuronales más populares son las redes *neuronales supervisadas*. En este tipo de redes, con aprendizaje supervisado, se presenta a la red un conjunto de patrones, junto con la salida deseada u objetivo, e iterativamente, ésta ajusta sus pesos hasta que su salida tiende a ser la deseada, utilizando para ello información detallada del error que se comete en cada paso. De este modo, la red es capaz de estimar relaciones entrada-salida sin necesidad de proponer una cierta forma funcional de partida.

Así, dentro de este grupo de redes, denominadas redes unidireccionales organizadas en capas con aprendizaje supervisado, se puede hablar del *asociador lineal*, *perceptrón simple*, *adalina* y *perceptrón multicapa*. En este último tipo, habitualmente se aplica un algoritmo de aprendizaje denominado *back-propagation* (retropropagación) o BP que es el utilizado en este trabajo y muy extendido en la literatura [89].

Cada uno de ellos es una evolución del anterior, por lo que se presentan con detalle en los próximos apartados.

6.5.1 El asociador lineal

El *asociador lineal* consta únicamente de una capa de neuronas lineales, cuyas entradas se denotan por el vector \mathbf{x} y sus salidas por el vector \mathbf{y} , que constituye además la respuesta de la red neuronal (Figura 6.6). Asimismo, se denota $\mathbf{W} = \{w_{ij}\}$ a la matriz de pesos sinápticos, donde cada fila de \mathbf{W} contiene los pesos de una neurona. Así,

$$\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2 \quad \dots \quad \mathbf{w}_m)^T$$

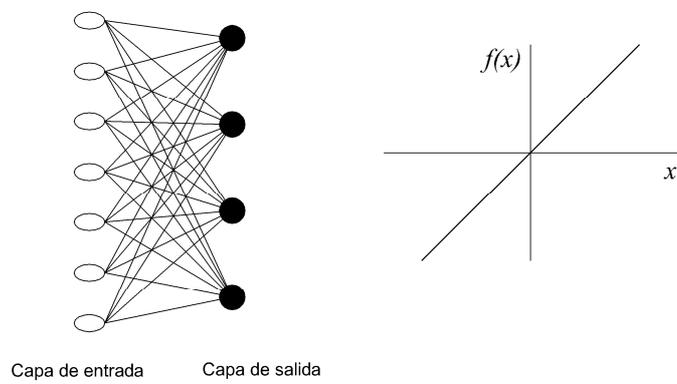


Figura 6.6 Asociador lineal. Función de activación identidad

La operación del asociador lineal es simplemente

$$\mathbf{y} = \mathbf{W} \mathbf{x}$$

o bien

$$y_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j$$

Por lo tanto, cada neurona i del asociador lineal lleva a cabo la suma ponderada de las entradas con sus pesos sinápticos.

El asociador lineal debe aprender a asociar p pares entrada-salida, $\{(\mathbf{x}^\mu, \mathbf{t}^\mu) \mid 1 \leq \mu \leq p\}$, ajustando sus pesos \mathbf{W} de modo que ante un cierto patrón de entrada \mathbf{x}^μ responda con \mathbf{t}^μ , y que ante entradas similares, $(\mathbf{x}^\mu + \varepsilon)$, responda con salidas también próximas $(\mathbf{t}^\mu + \delta)$, siendo ε y δ cantidades pequeñas. El problema se centra en encontrar la matriz de pesos \mathbf{W} óptima en el sentido descrito. Para ello, se dispone de diversos tipos de reglas de aprendizaje, que a partir de las entradas y las salidas deseadas, proporcionan el conjunto óptimo de pesos \mathbf{W} .

6.5.2 El perceptrón simple

Este modelo neuronal fue introducido por Rosenblatt a finales de los años cincuenta [90].

El *perceptrón simple* es un modelo unidireccional, al igual que el asociador lineal, compuesto por dos capas de neuronas, una sensorial o de entradas y otra de salida (Figura 6.7), en el que la operación de una red con n neuronas de entrada y m de salida, se puede expresar como

$$y_i(t) = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \theta_i\right), \forall i, 1 \leq i \leq m$$

donde θ_i se denomina *umbral de disparo*.

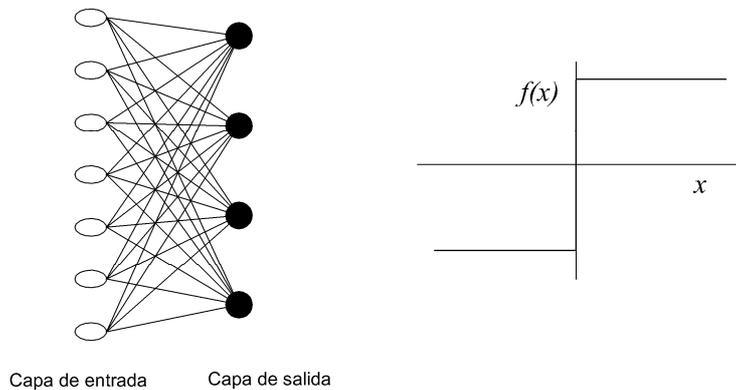


Figura 6.7 Perceptrón simple y función de transferencia de su neurona

En este caso, la función de activación de las neuronas de la capa de salida es del tipo escalón. Así, la operación del perceptrón simple puede escribirse

$$y_i(t) = H\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \theta_i\right), \forall i, 1 \leq i \leq m$$

con H la función de Heaviside o escalón.

Este modelo presenta ciertas limitaciones pues sólo puede representar funciones linealmente separables [91]. Una solución a dichas limitaciones del perceptrón simple puede consistir en incluir más capas en la arquitectura, con lo que se tiene un *perceptrón multicapa*.

Es importante indicar que toda función booleana puede ser representada por una red neuronal unidireccional con una única capa oculta [91].

Algoritmo de aprendizaje del perceptrón

La importancia del perceptrón radica en su carácter de dispositivo entrenable pues el algoritmo de aprendizaje, ajusta los pesos en proporción a la diferencia existente entre la salida actual de la red y la salida deseada, con el objetivo de minimizar el error actual de la red [90].

Sea un conjunto de p patrones \mathbf{x}^μ , $\mu = 1, \dots, p$, con sus salidas deseadas \mathbf{t}^μ , en el que tanto las entradas como las salidas solamente puedan tomar los valores -1 ó 1, donde se tiene una arquitectura de perceptrón simple, con pesos iniciales aleatorios. Entonces, se actuará del siguiente modo, ante la presentación del patrón μ -ésimo, si la respuesta que proporciona el perceptrón es correcta, no se actualizarán los pesos; si es incorrecta, se modificarán según la *regla de Hebb*.

De forma general, se denomina *aprendizaje hebbiano* a aquellas formas de aprendizaje que involucran una modificación en los pesos Δw_{ij} proporcional al producto de una entrada j por la salida i de la neurona:

$$\Delta w_{ij} = \varepsilon y_i x_j$$

en el que ε es una cantidad entre 0 y 1. Por tanto,

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}^\mu(t)$$

donde se tiene que:

$$\Delta w_{ij}^\mu(t) = \begin{cases} 2\varepsilon t_i^\mu x_j^\mu, & \text{si } y_i^\mu \neq t_i^\mu \\ 0, & \text{si } y_i^\mu = t_i^\mu \end{cases}$$

que se puede reescribir del siguiente modo:

$$\Delta w_{ij}^\mu(t) = \varepsilon (t_i^\mu - y_i^\mu) x_j^\mu$$

que es la forma habitual de expresar la *regla del perceptrón*.

En la utilización práctica, se debe llegar a un compromiso para el valor del parámetro de *aprendizaje* ε , puesto que un valor pequeño implica un aprendizaje lento, mientras que uno excesivamente grande puede conducir a oscilaciones en el entrenamiento, al introducir variaciones en los pesos excesivamente amplias.

6.5.3 Modelo Adalina

Otro de los modelos clásicos es la *Adalina*, introducida por Widrow en 1959 [92], cuyo nombre proviene de *ADAPtative Linear Neuron*.

Este modelo utiliza una neurona similar a la del perceptrón, pero de respuesta lineal (Figura 6.8), cuyas entradas pueden ser continuas.

Por otra parte, a diferencia del modelo del asociador lineal, la Adalina incorpora un parámetro adicional denominado *bias*, que puede traducirse como umbral, aunque debe tenerse en cuenta que no se trata de un umbral de disparo como el del perceptrón sino de un parámetro que proporciona un grado de libertad adicional.

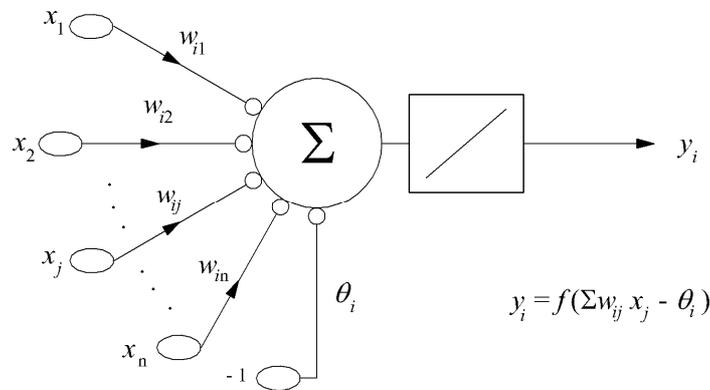


Figura 6.8 Neurona lineal de la Adalina

De este modo la ecuación de la Adalina queda

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \theta_i, \quad \forall i, 1 \leq i \leq m$$

Ante patrones no separables linealmente, los resultados que proporciona son, en promedio, mejores que los del perceptrón, pues la adalina siempre opera reduciendo el error cuadrático medio al mínimo posible [93].

No obstante, la diferencia más importante con el perceptrón y con el asociador lineal reside en la regla de aprendizaje que implementa. En la adalina se utiliza la *regla de Widrow-Hoff*, también conocida como *regla LMS* (Least Mean Squares) o de mínimos cuadrados, que conduce a actualizaciones de tipo continuo, siendo la actualización de los pesos proporcional al error que la neurona comete. Así como la *regla de Hebb* es capaz de almacenar sin errores pares de patrones cuyos vectores de entrada sean ortogonales, la regla LMS conduce a asociaciones perfectas cuando sean linealmente independientes, proporcionando cuando no lo sean una matriz de pesos óptima desde el punto de vista de los mínimos cuadrados.

A continuación, se presenta una metodología que permite derivar de forma sistemática reglas de aprendizaje para arquitecturas concretas. El método consiste en proponer una función error o coste que mida el rendimiento actual de la red, función que dependerá de los pesos sinápticos. Dada esta función error, se introduce un procedimiento general de optimización que sea capaz de proporcionar una configuración de pesos que correspondan a un punto extremo (en general mínimo) de la función propuesta. El método de optimización aplicado a la función coste proporciona una regla de actualización de pesos, que en función de los patrones de aprendizaje modifica iterativamente los pesos hasta alcanzar el punto óptimo de la red neuronal.

El método de optimización, minimización, empleado es el denominado *descenso por gradiente*. Para ello, se comienza definiendo una función coste $E(.)$ que proporciona el error actual que comete la red neuronal, que es función de los pesos sinápticos w , $E = E(w)$, $E : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^n$. De esta manera, es posible imaginarse la representación gráfica de esta función, como una hipersuperficie, en la que la posición ocupada por un valle se corresponde con una configuración de pesos w^* localmente óptima, al tratarse de un mínimo local de la función error.

El objetivo del aprendizaje es encontrar la configuración de pesos que corresponde al mínimo global de la función error, aunque con frecuencia en una red genérica se acepta como solución válida cuando se encuentra un mínimo local suficientemente bueno.

Para encontrar la configuración de pesos óptima mediante descenso por gradiente se opera del siguiente modo. Se parte en $t = 0$ de una cierta configuración $w(0)$, y se calcula el sentido de la máxima variación de la función $E(w)$ en $w(0)$, que vendrá dado por su gradiente en $w(0)$. El sentido de la máxima variación apuntará hacia una colina de la hipersuperficie de $E(.)$. A continuación, se modifican los parámetros de W siguiendo el sentido contrario al indicado por el gradiente de la función error. De este modo se lleva a cabo un descenso por la hipersuperficie del error, aproximándose en una cierta cantidad al valle, un mínimo local (Figura 6.9) y el proceso se va iterando hasta alcanzarlo. Matemáticamente se expresa del siguiente modo.

$$w(t+1) = w(t) - \varepsilon \cdot \nabla E(w)$$

donde ε indica el tamaño del paso tomado en cada iteración, que idealmente debe ser infinitesimal. Como una elección de este tipo conduciría a un proceso de entrenamiento extremadamente lento se toma un tamaño lo suficientemente grande como para que cumpla el compromiso de rápida actualización sin llegar a oscilaciones.

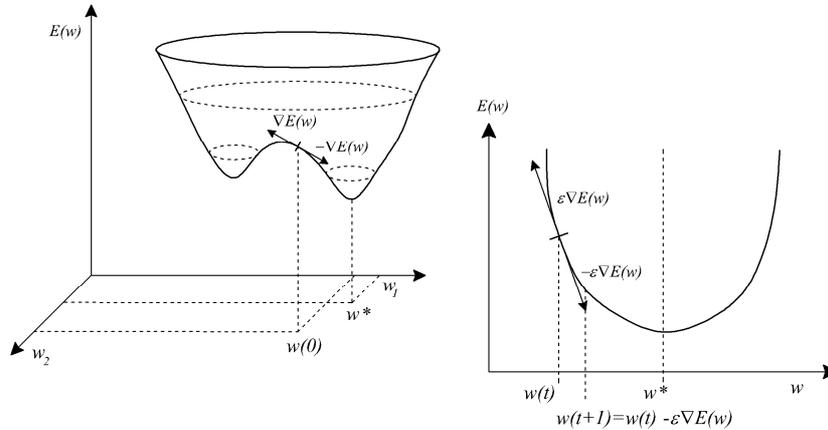


Figura 6.9 Superficie de error $E(w)$ en el espacio de pesos w

Es fácil comprobar matemáticamente que una actualización de este tipo conduce a un mínimo del funcional de error $E(w)$. Supóngase una matriz de pesos $w = \{w_{ij}\}$, al calcular la variación que en $E(w)$ se produce en la iteración t

$$\delta(E(w_{ij})) = \sum_{ij} \frac{\delta E(w_{ij})}{\delta w_{ij}} \delta w_{ij}$$

siendo la variación en los pesos $-\varepsilon$ multiplicado por el gradiente, por lo que

$$\delta(E(w_{ij})) = \sum_{ij} \frac{\delta E(w_{ij})}{\delta w_{ij}} \left(-\varepsilon \frac{\delta E(w_{ij})}{\delta w_{ij}} \right) = -\varepsilon \sum_{ij} \left(\frac{\delta E(w_{ij})}{\delta w_{ij}} \right)^2 \leq 0$$

luego la variación en la función error es siempre menor que cero, por lo que siempre disminuye. Así, mediante este procedimiento se asegura alcanzar un mínimo local de la función, aunque puede no coincidir, en general, con el mínimo global (en el caso de la Adalina si se cumple este hecho, tal y como se presenta en las próximas líneas).

Así, aplicando este método a la Adalina, para una muestra finita se plantea la siguiente función error u objetivo

$$E[w_{ij}] = \frac{1}{2} \sum_{\mu=1}^p \sum_{i=1}^n (t_i^\mu - y_i^\mu)^2$$

Mediante esta función se obtiene el error cuadrático medio correspondiente a las salidas actuales de la red respecto de los objetivos utilizando el proceso de optimización del gradiente, se calcula

$$\frac{\delta E[w_{ij}]}{\delta w_{ij}} = -\frac{1}{2} 2 \sum_{\mu=1}^p (t_i^{\mu} - y_i^{\mu}) \frac{dy_i^{\mu}}{dw_{ij}} = -\sum_{\mu=1}^p (t_i^{\mu} - y_i^{\mu}) x_j^{\mu}$$

y el incremento en los pesos queda

$$\Delta w_{ij} = -\varepsilon \frac{\delta E[w_{ij}]}{\delta w_{ij}} = \varepsilon \sum_{\mu=1}^p (t_i^{\mu} - y_i^{\mu}) x_j^{\mu}$$

expresión de la regla LMS. Es importante destacar que mientras que en la regla del perceptrón se llevan a cabo actualizaciones discretas en los pesos, en la Adalina la regla LMS produce actualizaciones de tipo continuo, de modo que a un mayor error se tiene una actualización mayor. También, hay que remarcar que ante patrones no linealmente separables este modelo proporciona mejores resultados que el perceptrón [93], pues realiza un ajuste óptimo en el sentido de los mínimos cuadrados, mientras que el perceptrón no alcanzará ninguna solución.

Debido a la linealidad de la neurona de la Adalina, la función error $E[w_{ij}]$ es cuadrática en los pesos, por lo que define una superficie en forma de paraboloide [94]. Un paraboloide, como la parábola en el plano, usualmente posee un único mínimo, aunque en ocasiones puede presentar una forma degenerada, con uno o más *canales*, pero todos de la misma profundidad. En cualquiera de los dos casos la función $E[w_{ij}]$ es mínima en ese punto en cualquiera de los canales, y la regla LMS lleva directamente a él, puesto que siempre desciende por la superficie del error. Por ello, *la regla LMS alcanza siempre el mínimo global*, sin importar la configuración de pesos de partida.

6.5.4 El perceptrón multicapa con aprendizaje por retropropagación (BP)

Al añadir capas intermedias (ocultas) a un perceptrón simple, se obtiene un perceptrón multicapa o MLP (*Multi-Layer Perceptron*). Esta arquitectura suele entrenarse mediante el algoritmo denominado de retropropagación de errores o BP. Así, el conjunto arquitectura MLP + aprendizaje BP suele denominarse *red de retropropagación*, o simplemente *BP*.

Se denota x_i a las entradas de la red, y_i a las salidas de la capa oculta, z_k a las de la capa final y t_k a las salidas objetivo, además, sean w_{ij} son los pesos de la capa oculta y θ_j sus umbrales, w'_{kj} los pesos de la capa de salida y θ'_k sus umbrales. La operación de un MLP con una capa oculta y neuronas de salida lineal se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$z_k = \sum_j w'_{kj} y_j - \theta'_k = \sum_j w'_{kj} f\left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j\right) - \theta'_k$$

siendo $f(\cdot)$ de tipo sigmoideo, cuya expresión puede utilizarse, por ejemplo:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad \text{ó} \quad f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \tanh(x)$$

Además, se demuestra que un MLP convencional, de una única capa oculta, constituye un aproximador universal de funciones [95].

Como se ha comentado, para entrenar los nodos de las capas ocultas de estas arquitecturas multicapas se utiliza algoritmo de retropropagación de errores BP (*Back-Propagation*) [84] y [85] que se presenta a continuación.

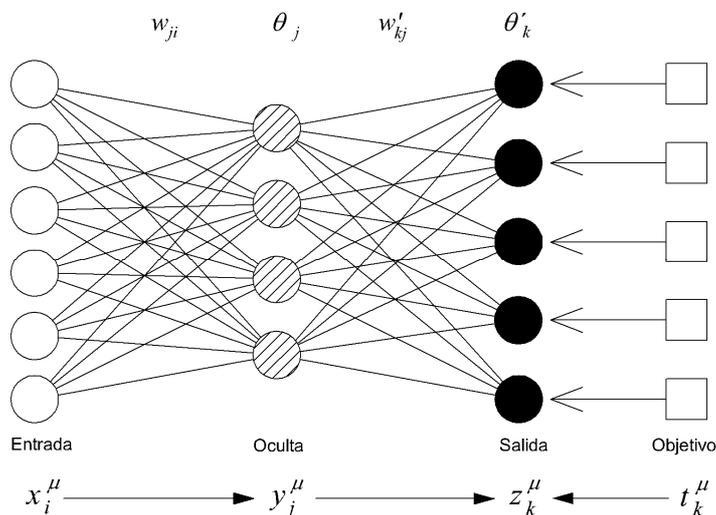


Figura 6.10 Arquitectura del MLP por Back-Propagation

Sea un MLP de tres capas, cuya arquitectura se presenta en la Figura 6.10, con las entradas, salidas, pesos y umbrales de las neuronas representadas. Dado un patrón de entrada \mathbf{x}^μ , $\mu = 1, \dots, p$, la operación global de arquitectura se expresa de la siguiente forma:

$$z_k^\mu = g\left(\sum_j w'_{kj} y_j^\mu - \theta'_k\right) = g\left(\sum_j w'_{kj} f\left(\sum_i w_{ji} x_i^\mu - \theta_j\right) - \theta'_k\right)$$

donde $g(\cdot)$ es la función de activación de las neuronas de salida y $f(\cdot)$ la de las ocultas. Ambas pueden ser sigmoideas, aunque a menudo la función de las neuronas de salida $g(\cdot)$ se considera la identidad. Al igual que en la regla LMS la función coste, partiendo del error cuadrático medio, es:

$$E(w_{ji}, \theta_j, w'_{kj}, \theta'_k) = \frac{1}{2} \sum_{\mu} \sum_k \left[t_k^{\mu} - g \left(\sum_j w'_{kj} y_j^{\mu} - \theta'_k \right) \right]^2$$

cuya minimización se lleva a cabo mediante descenso por el gradiente. En esta ocasión hay un gradiente respecto de los pesos de la capa de salida (w'_{kj}) y otro respecto de los de la oculta (w_{ji}):

$$\delta w'_{kj} = -\varepsilon \frac{\delta E}{\delta w'_{kj}} \quad \delta w_{ji} = -\varepsilon \frac{\delta E}{\delta w_{ji}}$$

Las expresiones de actualización de los pesos que se obtienen son

$$\delta w'_{kj} = \varepsilon \sum_{\mu} \Delta_k^{\mu} y_j^{\mu}, \text{ con } \Delta_k^{\mu} = [t_k^{\mu} - g(h_k^{\mu})] \frac{\delta g(h_k^{\mu})}{\delta h_k^{\mu}} \text{ y } h_k^{\mu} = \sum_j w'_{kj} y_j^{\mu} - \theta'_k$$

$$\delta w_{ji} = \varepsilon \sum_{\mu} \Delta_j^{\mu} x_i^{\mu}, \text{ con } \Delta_j^{\mu} = \sum_k \Delta_k^{\mu} w'_{kj} \frac{\delta f(h_j^{\mu})}{\delta h_j^{\mu}} \text{ y } h_j^{\mu} = \sum_i w_{ji} x_i^{\mu} - \theta_j$$

donde h_k^{μ} y h_j^{μ} son los potenciales postsinápticos (o locales). La actualización de los *bias* (o umbrales) se realiza haciendo uso de las expresiones anteriores, considerando que el *bias* es un caso particular de peso sináptico, cuya entrada es una constante igual a -1, como se indicó en el caso de la Adalina.

En estas expresiones está implícito el concepto de propagación hacia atrás de los errores (*backpropagation*) que da nombre al algoritmo. En primer lugar, se calcula la expresión Δ_k^{μ} , que se denomina *señal de error*, por ser proporcional al error de la salida actual de la red, con el que se calcula la actualización $\delta w'_{kj}$ de los pesos de la capa de salida. A continuación, se propagan hacia atrás los errores Δ_k^{μ} a través de la sinopsis, proporcionando así las señales de error Δ_j^{μ} , correspondientes a las sinapsis de la capa oculta y con éstas se calcula la actualización δw_{ji} de las sinapsis ocultas.

En resumen, el procedimiento a seguir para entrenar mediante BP una arquitectura MLP dada es:

1. Establecer aleatoriamente los pesos y umbrales iniciales ($t=0$).
2. Para cada patrón μ del conjunto de aprendizaje:
 - 2.1. Se lleva a cabo una fase de ejecución para obtener la respuesta de la red ante el patrón μ -ésimo.

- 2.2. Cálculo de las señales de error asociadas Δ_k^μ y Δ_j^μ .
- 2.3. Cálculo del incremento parcial de los pesos y umbrales debidos a cada patrón μ .
3. Actualización de pesos y umbrales.
4. Cálculo del error actual, $t = t + 1$ y vuelta al punto 2 si todavía no es satisfactorio.

Se debe comenzar siempre con pesos iniciales aleatorios (normalmente números pequeños, positivos y negativos), ya que si se parte de pesos y umbrales iniciales nulos el aprendizaje no progresará, puesto que las salidas de las neuronas y el incremento en los pesos serán siempre nulos.

En el esquema presentado, que surge de forma natural del proceso de descenso por el gradiente, se lleva a cabo una fase de ejecución para todos y cada uno de los patrones del conjunto de entrenamiento, se calcula la variación en los pesos debida a cada patrón, se acumulan, y solamente entonces se procede a la actualización de los pesos. Este esquema se denomina *aprendizaje por lotes* (batch). Otra posibilidad consiste en actualizar los pesos sinápticos tras la presentación de cada patrón μ (en vez de presentarlos todos y luego actualizar), esquema denominado *aprendizaje en serie*.

Es importante considerar que en el aprendizaje en serie el orden en la presentación de los patrones debe ser aleatorio, puesto que si siempre se siguiese un mismo orden el entrenamiento estaría viciado a favor del último patrón del conjunto de entrenamiento, cuya actualización, por ser la última, siempre predominaría sobre las anteriores. Además, esta aleatoriedad presenta una importante ventaja, puesto que en ocasiones permite escapar de mínimos locales alcanzándose mínimos del error más profundos [96].

El algoritmo BP constituye un método de gran generalidad, lo que presenta ventajas e inconvenientes. Su ventaja principal es que se puede aplicar a multitud de problemas, proporcionando con frecuencia buenas soluciones. Un inconveniente del BP es su lentitud de convergencia y otro problema es que puede incurrir en el denominado *sobreaprendizaje* (Apartado 6.5.5). También, debe tenerse en cuenta que el algoritmo BP no garantiza alcanzar el mínimo global de la función error, tan sólo un mínimo local, por lo que el proceso de aprendizaje puede estancarse en uno de estos mínimos locales.

6.5.5 Capacidad de generalización de la red

Uno de los aspectos fundamentales de los ANS es su capacidad de generalización a partir de ejemplos. Por *generalización* se entiende la capacidad de la

red de dar una respuesta correcta ante patrones que no han sido empleados en su entrenamiento, al operar la red en *modo recuerdo*.

En un proceso de entrenamiento se debe considerar, por una parte, un *error de aprendizaje*, que se suele calcular como el error cuadrático medio de los resultados proporcionados por la red para el conjunto de patrones de aprendizaje. Por otra parte, existe un *error de generalización*, que se puede medir empleando un conjunto representativo de patrones diferentes a los utilizados en el entrenamiento. De esta manera, se entrena la red neuronal haciendo uso de un conjunto de aprendizaje, y comprobar su eficiencia real, o error de generalización, mediante un *conjunto test*.

Experimentalmente se observa que si se entrena una red hasta alcanzar un error muy pequeño en aprendizaje, la eficacia real del sistema o generalización (error de test) se degrada. Si se representa a la vez el error en aprendizaje y el error en test durante el transcurso del aprendizaje, se obtiene una gráfica como la representada en la parte izquierda de la Figura 6.11. Tras una fase inicial, en la que pueden aparecer oscilaciones en el valor del error, el de aprendizaje tiende a disminuir monótonamente, mientras que el error de generalización a partir de cierto punto comienza a incrementarse, lo que indica una degradación progresiva del aprendizaje.

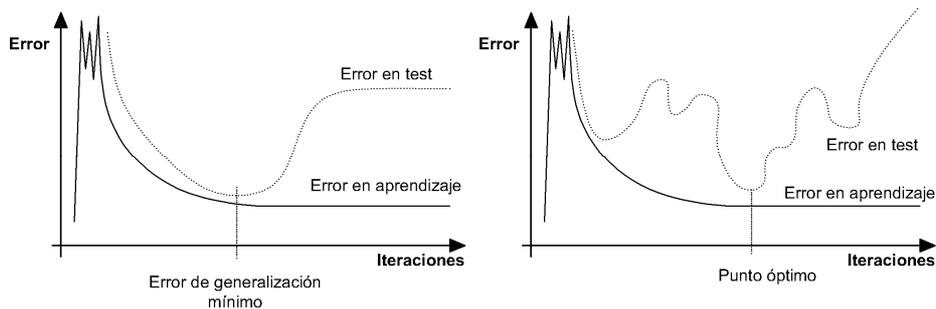


Figura 6.11 Evolución del error de aprendizaje y del error de generalización

La explicación de este fenómeno es la siguiente. Al principio la red se adapta progresivamente al conjunto de aprendizaje, acomodándose al problema y mejorando la generalización. Sin embargo, en un momento dado el sistema se ajusta demasiado a las particularidades de los patrones empleados en el entrenamiento, aprendiendo incluso el ruido en ellos presente, por lo que crece el error que comete ante patrones diferentes a los empleados en el entrenamiento. En este momento la red no ajusta correctamente el *mapping*, sino que simplemente está memorizando los patrones del conjunto de aprendizaje, lo que técnicamente se denomina *sobreaprendizaje*. El procedimiento consistente en entrenar y validar a la vez para detenerse en el punto óptimo se denomina *validación cruzada*, ampliamente utilizado en fase de desarrollo de redes neuronales supervisadas.

No obstante, la situación descrita ha sido en cierta medida idealizada; una situación más realista es la de la parte derecha de la Figura 6.11. En la práctica, pueden

presentarse varios mínimos para el conjunto de test, debiendo detener el aprendizaje en el punto óptimo de mínimo error de generalización y no quedarse en el primer mínimo que aparezca. Muchas veces basta con dejar que el aprendizaje discorra hasta una cota razonable de error (0,5%, 0,1%, etc.).

Como ejemplo, considérese el caso en la Figura 6.12, en el que se trata de ajustar un conjunto de medidas a un polinomio mediante el método de mínimos cuadrados [97]. Si se trata de ajustarlas a un polinomio de grado 1 (*caso a*), el error que se comete es alto, y el valor que este polinomio proporciona para valores diferentes de los empleados se aparta de la realidad. Si se lleva a cabo un ajuste con un polinomio de grado 3 (*caso b*), los resultados que se obtienen son mucho mejores. Si se ajusta con un polinomio de grado excesivo, por ejemplo superior a 10 (*caso c*), la representación que se obtiene también se aparta de la correcta. En el *caso a* se ajusta con muy pocos parámetros, por lo que el modelo que se obtiene no corresponde con la realidad, en el *caso b* el número de parámetros es adecuado y el polinomio ajusta bien los datos. Finalmente, en el *caso c* el polinomio tiene demasiados parámetros y el resultado que se obtiene se aparta de la realidad, no se captura la tendencia del problema (una forma casi senoidal) sino que se está interpolando los datos, ajustando también el ruido en ellos presente.

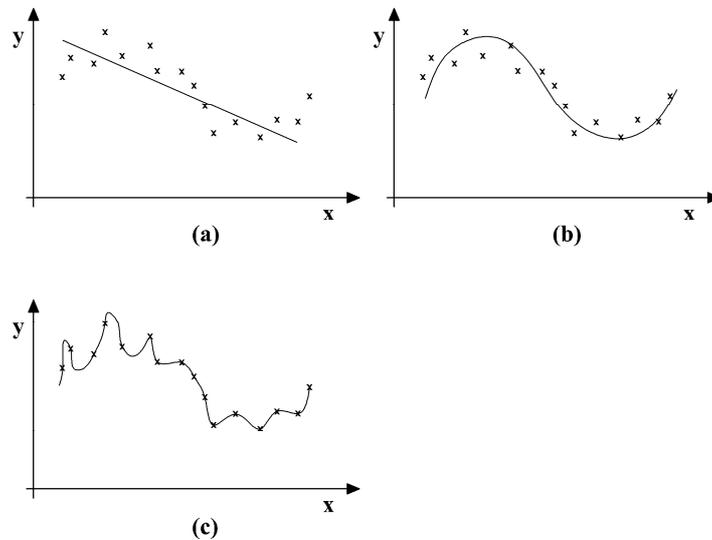


Figura 6.12 Ajuste al ruido de los patrones en el aprendizaje de una red neuronal

En una red neuronal sucede algo similar, aunque los parámetros de ajuste no son los coeficientes del polinomio, sino los pesos y el bias. En general, si el problema es sencillo, bastarán pocos parámetros para su ajuste, por lo que deberá usarse una red pequeña. Si el problema es complejo, se necesitarán más parámetros de ajuste, por lo que deberá diseñarse una red más compleja.

En definitiva, la capacidad de generalización de la red la determinan en buena medida las siguientes tres circunstancias:

- La arquitectura de la red.
- El número de ejemplos de entrenamiento.
- La complejidad del problema.

En general los tres puntos están muy relacionados, cuanto más complejo sea el problema a modelar, más grande deberá ser la red (con más parámetros para ajustar) y, por lo tanto, más ejemplos se necesitarán para entrenarla (ejemplos que deberán cubrir todo el espacio de entrada, contemplando todas la situaciones posibles).

Según [98] y [99] se considera que una red de n entradas y h neuronas ocultas, con un total de w pesos, requiere un número de patrones de aprendizaje del orden de $p = w/\varepsilon$ para proporcionar un error de generalización del orden de ε . Lo que generalmente lleva a un número bastante elevado de patrones necesarios para alcanzar un error razonable.

Además, hay que tener presente también, que el número de datos necesarios para especificar un *mapping*, en general crece exponencialmente con la dimensión del número de entradas, lo que agrava los problemas de dimensión de entrada elevada el disponer de un número de patrones para el aprendizaje escaso. Una forma de reducirlo consiste en limitar el número de las entradas de la red. Así, minimizando la cantidad de variables de entrada, el número de pesos se reduce con lo que se necesitan muchos menos patrones de aprendizaje.

En el presente trabajo, se diseñan redes de reducido tamaño, 4-6 neuronas de entrada y 3-4 neuronas en la capa oculta (Apartado 6.6), para poder realizar el entrenamiento con un número reducido de días, ya que como los consumos a predecir presentan un nivel de agregación reducido, existe una gran aleatoriedad en los datos, hecho que se ve agravado al aumentar el número de días de entrenamiento. Así, se plantea seleccionar pocos días pero lo más similares posibles al de predicción.

Para finalizar, indicar algunas de las ventajas que ofrecen las técnicas neuronales frente otras técnicas de predicción:

- No es necesario conocer previamente la relación entre las entradas y las salidas.
- Tienen gran tolerancia a ruidos y son tolerantes a fallos en las medidas.
- Son técnicas no lineales por lo que pueden modelar complejas relaciones entre las variables.

Entre las desventajas considerar que:

- Hay que identificar de forma correcta la arquitectura de la red.
- No se tiene información clara de las relaciones entre las variables.

6.6 Modelo de red neuronal propuesta

En este apartado se detallan las características de las redes neuronales a utilizar en el método planteado para la predicción del consumo, calculado como 96 valores de energía activa cuarto-horaria correspondientes a un día completo, en el presente trabajo (Capítulo 8). La herramienta desarrollada para el uso de las redes neuronales propuestas, se ha implementado en Microsoft Office Excel 2003, y las macros necesarias se han programado en Visual Basic for Applications, de fácil integración en el nuevo SGI desarrollado. Dicha aplicación, permite definir distintas topologías de la red, los valores de los parámetros de entrenamiento, etc. Se entiende, tras considerar distintas configuraciones, que la topología que mejores resultados proporciona, para los edificios en los que se realizan las predicciones, es la que se describe en las siguientes líneas.

El objetivo que se persigue es construir un modelo neuronal que sea capaz de ajustar una curva de carga de una determinada instalación para, posteriormente, emplear dicho modelo en la predicción del consumo eléctrico para otros días posteriores.

La primera fase, y de gran dificultad en la construcción de un modelo de red neuronal, es la relacionada con la selección y recogida de la información que alimentará a las redes en la fase de entrenamiento. Se comentan brevemente las variables que se han seleccionado como posibles factores explicativos de la curva de carga:

- *Condiciones meteorológicas:* En éstas se engloban variables como la velocidad del viento, la nubosidad, la pluviosidad, la temperatura, etc. Se considera que algunas de ellas no afectan a la demanda eléctrica por ser típicamente aleatorias y otras aparecen interrelacionadas. Entre todos los factores, la temperatura es la más relevante, dado que influye de forma directa sobre múltiples fuentes de consumo eléctrico como sistemas de aire acondicionado, calefacción, etc. Esta relación entre demanda eléctrica y la temperatura es de carácter no lineal. En el modelo se consideran cuatro variables para caracterizar dichas condiciones meteorológicas que son la temperatura máxima (T_{MAX}), mínima (T_{MIN}) y media (T_{MED}) del día a predecir, y la temperatura media del día anterior (T_{MED-1}), para considerar la inercia del sistema. Adicionalmente, se presenta un modelo neuronal extendido donde se considera la humedad como variable climática a considerar (Apartado 6.6.1).
- *Calendario:* Es obvio que la curva de carga depende del día y la hora para los que se realiza la previsión. En el método que se plantea se ajusta la red neuronal para cada cuarto de hora del día, por lo que se obtienen 96 predicciones de demanda cuarto-horaria para realizar la previsión diaria de la curva de carga de una determinada instalación. Se considera que el consumo de un día depende del consumo de los días inmediatamente anteriores, por lo que se eligen para entrenar las redes los días más próximos al de predicción, que cumplan ciertas condiciones (Capítulo 8).
- *Tipo de día:* Es evidente que el consumo de un lunes laborable no es el mismo que el de un lunes festivo por lo que es necesario considerar el tipo de día. Para ello se

utiliza un parámetro denominado *Laboralidad*, que permite parametrizar el tipo de día. Dicho parámetro no se considera como variable de entrada de las redes, sino que se tiene en cuenta en la selección de los días de entrenamiento. Las redes neuronales se entrenan sólo con datos de días que tengan la misma laboralidad que el día a predecir.

- *Factores no predecibles*: Se debe considerar la existencia de una serie de factores que, siendo puramente aleatorios, puedan afectar sensiblemente a la demanda de energía eléctrica como fallo en un equipo de producción del sistema de climatización, paro de una línea de producción importante, huelgas, etc. Por lo que ese día puede considerarse como un dato atípico, siendo por tanto necesario realizar un filtrado de los datos de entrada.

De las variables identificadas, por simplicidad del modelo, se consideran solamente las temperaturas como variables de entrada de la red neuronal, el resto de variables se tienen en cuenta en otras fases de la metodología propuesta. Así, en la Figura 6.13 se presenta la arquitectura de la red elegida.

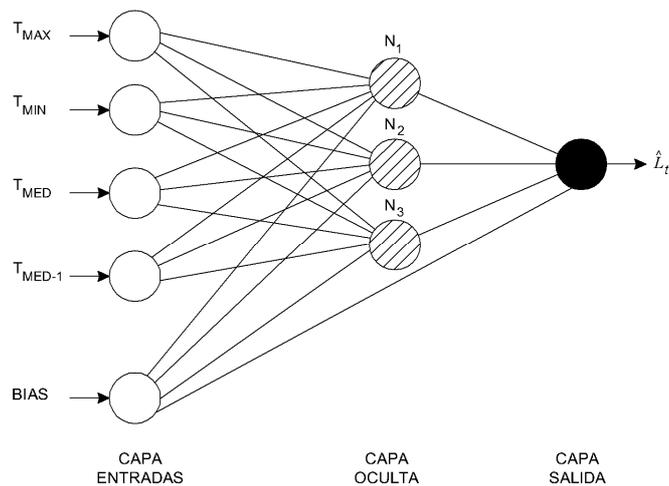


Figura 6.13 Red neuronal utilizada para la predicción del consumo

La red propuesta está compuesta por tres capas, una de entrada, una oculta y una de salida. Como se ha comentado en los apartados anteriores, con una única capa oculta es posible representar funciones con cualquier forma, por ello se ha optado por una única capa oculta, ya que añadir más capas supondría asumir un mayor coste computacional sin obtener a cambio mejoras razonables en la capacidad de predicción.

En la capa de entrada se consideran 4 neuronas: Temperatura máxima del día (T_{MAX}), temperatura mínima (T_{MIN}), temperatura media (T_{MED}) y temperatura media del día anterior (T_{MED-1}). Se destaca la importancia de ésta última pues introduce la influencia de la inercia térmica de los sistemas en el consumo de una determinada instalación.

La salida de la red neuronal sólo cuenta con una neurona, que indica el consumo de la instalación, como energía activa cuarto-horaria para un determinado instante, asociado al vector de entrada presentado en la red.

En la capa oculta, considerando el número de entradas, se han elegido 3 neuronas.

La aplicación desarrollada permite especificar distintas variables del modelo neuronal:

- Número de variables de entrada: Puede elegirse de 1 hasta 50.
- Número de variables de salida: Puede elegirse desde 1 hasta 10.
- Número de neuronas de la capa oculta: De 1 hasta 15.
- Parámetro de aprendizaje: Configurable de 0 a 1.
- Valor inicial de los pesos: Configurable de 0 a 1.
- Parámetro *Momentum*: Configurable de 0 a 1.
- Número de ciclos de entrenamiento: Hasta 500 ciclos.
- Modo de entrenamiento: Puede elegirse *Batch*, tal y como se ha comentado, se realizan todos los cambios en los pesos de todos los conjuntos de datos al final de cada ciclo de entrenamiento. Con el modo *Sequential*, cambia los pesos en cada conjunto de datos de entrada.

Los valores óptimos para los parámetros de entrenamiento, en los que en general se obtienen resultados satisfactorios en las instalaciones estudiadas tras distintos ensayos de prueba y error, son los que se presentan en la Tabla 6.1. El parámetro de aprendizaje se considera de 0,3. El parámetro momento se elige igual a 0,1. Como valor inicial para los pesos se elige de 0,5 para todos ellos. El número de iteraciones máximo para el cálculo de cada red neuronal se ha considerado de 200, de entre las que se elige aquella iteración que da menor error. Para cuantificar el error se utiliza el MSE (Mean Square Error).

| PARÁMETROS | VALOR |
|------------------|-------|
| Iteraciones | 200 |
| Neuronas ocultas | 3 |
| Aprendizaje | 0,3 |
| Momento | 0,1 |

Tabla 6.1 Valores elegidos de los parámetros de entrenamiento

La obtención de las series de datos referidas a la carga eléctrica para poder entrenar las redes ha sido una tarea especialmente laboriosa. Para ello, hay que indicar la especial importancia del uso del SGI diseñado en la obtención de medidas reales de consumo de las distintas instalaciones, con la ventaja de controlar el proceso de

obtención de los datos y de conocer perfectamente las características de las instalaciones de las que se adquieren los mismos.

Para la obtención de los valores de temperatura ha sido de gran ayuda el uso de datos disponibles en bases de datos públicas, que presentan un histórico de distintas ciudades y en concreto de Valencia [81].

Por tanto, en el entrenamiento de las redes se utiliza, para cada día, una serie de datos con la temperatura máxima, la mínima, la medida, la media del día anterior y los 96 valores de energía activa cuarto-horaria que se ha producido para dicha fecha. Con los datos de entrada se realiza un filtrado de los mismos en el que se han encontrado datos atípicos, concretamente valores perdidos, tanto en las series de demanda eléctrica como en las series climáticas, muchos de ellos pueden ser por fallos en el suministro eléctrico o en los instrumentos de medida. En el Capítulo 8 se presentan en detalle los resultados de las predicciones en distintas instalaciones utilizando las redes propuestas.

6.6.1 Modelo neuronal extendido

Considerando el modelo neuronal presentado en el apartado anterior, se plantea la posibilidad de completarlo considerando otra variable climática del que pueda depender el consumo, además de las distintas temperaturas, como es la humedad.

Para tener en cuenta dicho parámetro se ha considerado que la evolución de la humedad en un día puede ser muy variable [81], por lo que el valor medio del mismo a lo largo de un día no es representativo (Figura 6.14).

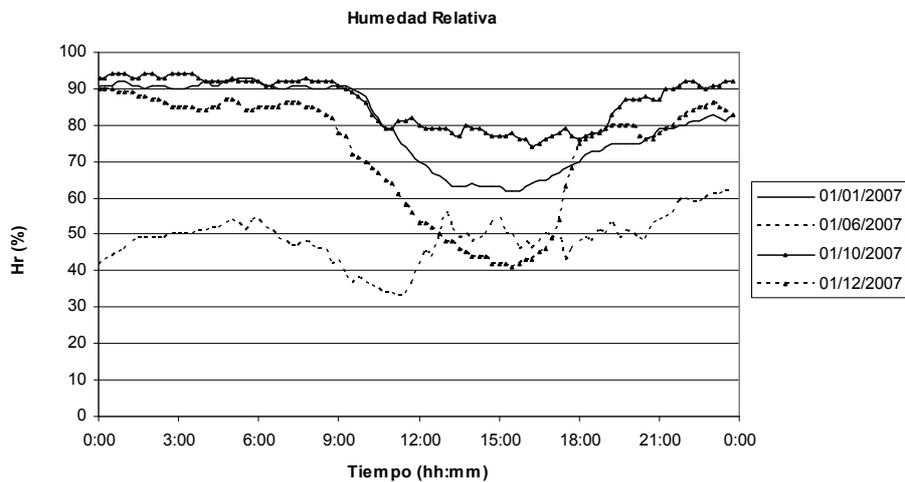


Figura 6.14 Evolución de la humedad relativa en Valencia

Así, para introducir dicho parámetro en el modelo neuronal, se considera que el consumo de un determinado día depende de la humedad relativa durante las primeras

horas del día. Para ello, se divide el día en tres franjas horarias, y se consideran las dos primeras. Hay que indicar la posibilidad de utilizar un tercer parámetro en el que se consideren las últimas horas diarias, pero en una primera iteración se descarta por simplicidad del modelo, entendiendo que ésta no afectará a los resultados que se obtengan. Por tanto, se propone otra red neuronal en la que se consideran dos parámetros adicionales (Figura 6.15):

- H1: Valor medio de % de la humedad de 0:00 - 7:59
- H2: Valor medio de % de la humedad de 8:00 – 15:59

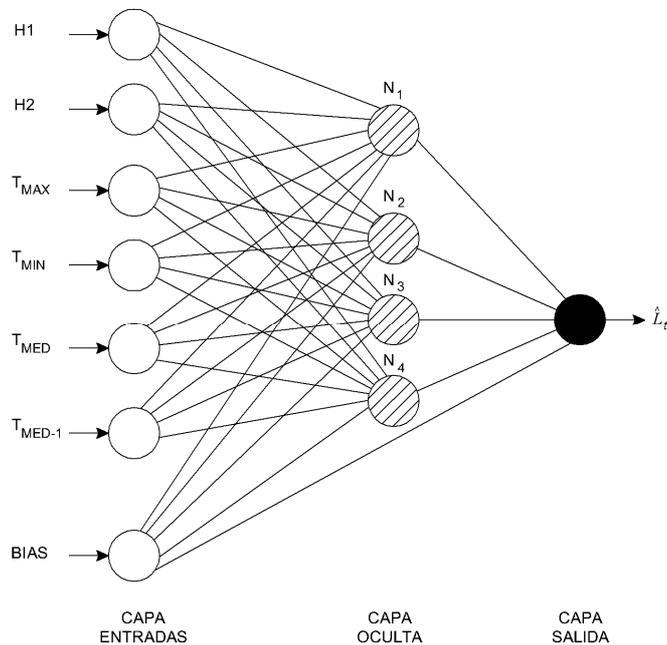


Figura 6.15 Red neuronal extendida para la predicción del consumo

En el Capítulo 8 se presentan los resultados obtenidos con el uso de esta red para estudiar la influencia del parámetro humedad en la predicción del consumo en los distintos clientes analizados.

6.7 Conclusiones del capítulo

La predicción del consumo eléctrico es una herramienta fundamental para la implementación de programas de respuesta de la demanda, ya que es un componente necesario para poder cuantificar las retribuciones de las acciones que toman los consumidores como respuesta a las señales del administrador de un determinado programa.

Una vez analizadas las distintas técnicas empleadas en la literatura (Capítulo 5), se elige la técnica de las redes neuronales, entre otras razones, por su adaptabilidad a sistemas eléctricos con distinto nivel de agregación y facilidad de implementación. En el presente capítulo, se presentan los fundamentos de las redes neuronales artificiales, los elementos que definen una red, estructura, algoritmos de entrenamiento, etc. De entre las distintas arquitecturas se elige, para la implementación práctica, el perceptrón multicapa o MLP (*Multi-Layer Perceptron*), entrenada mediante el algoritmo denominado *retropropagación de errores* o BP, lo que forma una *red de retropropagación*.

Para el diseño de la red neuronal a utilizar para la predicción del consumo, en primer lugar se identifican las variables o factores más influyentes. Como variables de entrada que caracterizan el consumo en la red neuronal, se consideran las temperaturas exteriores máxima, mínima y media del día a realizar la predicción y la temperatura media del día anterior. El resto de variables que afectan al consumo se considerarán en la selección de los días de entrenamiento. Posteriormente, se indican las redes neuronales propuestas a utilizar en el nuevo método de predicción planteado (Capítulo 8) y los parámetros elegidos para el entrenamiento de las mismas. Además, se presenta un modelo neuronal extendido en el que se considera la humedad exterior como variable atmosférica adicional.

CAPÍTULO 7

MODELADO DE SISTEMAS. ESTUDIO DEL CONSUMO POR USOS FINALES

7.1 Introducción

Una vez elegidas las redes neuronales artificiales como método de predicción en la metodología propuesta, un aspecto fundamental a considerar es la definición de los datos a utilizar en el entrenamiento de las mismas.

Para realizar la predicción del consumo con el uso de las redes neuronales comentadas en el capítulo anterior es necesario disponer, para cada día, de datos de las variables de entrada y de los consumos que se producen. Para obtener dichos datos, si es posible se toman medidas de la instalación real, pero es posible que no se disponga de datos de la misma. Muchas pueden ser las causas, por ejemplo, que no sea accesible físicamente el punto deseado a medir o por motivos económicos, que no se disponga de equipos de medida instalados, que se esté realizando la previsión del consumo en la fase de diseño de una instalación, etc. En este capítulo, se introduce como herramienta fundamental para el método de predicción que se plantea en el presente trabajo, el uso de modelos de cargas que proporcionen frente a unas determinadas entradas, como pueden ser la temperatura exterior, la potencia nominal del equipo, las dimensiones físicas de los locales, etc., el consumo eléctrico de los equipos modelados.

Por el bajo nivel de agregación de los consumos considerados (un edificio de oficinas, un hotel, un grupo reducido de edificios, etc.), en el método de predicción propuesto (Capítulo 8) se analiza los consumos por los procesos que los forman, denominándolos *usos finales* (UF). Así, por ejemplo, un consumo típico de un cliente comercial puede descomponerse en climatización, iluminación, equipamiento electrónico y varios. Como ejemplo de la metodología propuesta, en este capítulo, se describe el modelo utilizado para simular el uso final de climatización ya que, por su naturaleza, más posibilidades de acciones de control presenta y, además, representa habitualmente un porcentaje importante (40-60%) del consumo de cualquier instalación de cliente [101]. Dicho modelo considera las variables más importantes que intervienen en el funcionamiento energético de este tipo de equipos.

Modelo: Representación abstracta de las propiedades de un sistema, en particular su comportamiento, cuya validez queda limitada a un conjunto de contextos.

Experimentación: Acto físico por el cual se lleva a cabo la observación (medición) del sistema, pudiendo en algunos casos influir sobre las entradas del sistema y/o sus parámetros.

Simulación: Experimentación virtual en la que se obtiene la respuesta de un sistema en base al modelo desarrollado. Sus características principales deben ser la rapidez y la exactitud, estableciendo su nivel de confianza en base a dos actividades: verificación y validación. Actualmente, los ordenadores se han convertido en una de las herramientas por excelencia para la implementación y desarrollo de técnicas de simulación.

Verificación: Evaluación del proceso de implementación a partir de una representación abstracta intermedia (modelo conceptual).

Validación: Proceso de comparación entre las medidas obtenidas en la experimentación y los resultados de la simulación. Pueden definirse, a su vez, varios tipos de validación: *Conceptual*, donde se evalúa el realismo del modelo. *Estructural*, en función de la estructura percibida del sistema y *de comportamiento*, donde se comparan las salidas del modelo y del sistema.

El proceso de modelado (Figura 7.2) comienza con la identificación de un marco experimental, el cual recogerá tanto las condiciones bajo las cuales el sistema y sus modelos correspondientes podrán ser usados, como los objetivos perseguidos. En el caso más general, consta de un *generador* que describe las variables de entrada del sistema, un *transductor* asociado a las variables de salida y un conjunto de expresiones lógicas de acuerdo con las condiciones bajo las cuales el sistema será estudiado. Una vez definido este marco, el siguiente paso consiste en la selección de una estructura adecuada del modelo. Ésta se hará en base a las medidas realizadas sobre el sistema, teniendo también en cuenta los conocimientos que se tengan *a priori* sobre él (leyes generales, comportamientos ideales, etc.). A partir de este modelo estructural se obtiene un modelo paramétrico el cual será empleado en el proceso de simulación propiamente dicho. Sobre este último se lleva a cabo una etapa de ajuste que consiste en la estimación de los valores asociados a cada parámetro, de forma que se reproduzcan lo más fielmente posible un conjunto de datos medidos con anterioridad sobre el sistema. En este punto, es necesario recordar los objetivos principales perseguidos por la simulación, los cuales pueden sugerir la posibilidad de realizar cambios sobre el modelo inicial.

Una vez que éste sea capaz de reproducir con una exactitud aceptable dicho conjunto inicial de datos, es necesario comprobar que también predice adecuadamente valores de salida ante nuevos comportamientos de la entrada, sin realizar cambios en los valores asignados a los parámetros. Este proceso forma parte de la fase de validación del modelo, comentada ya con anterioridad.

Fuentes de información

Actividades

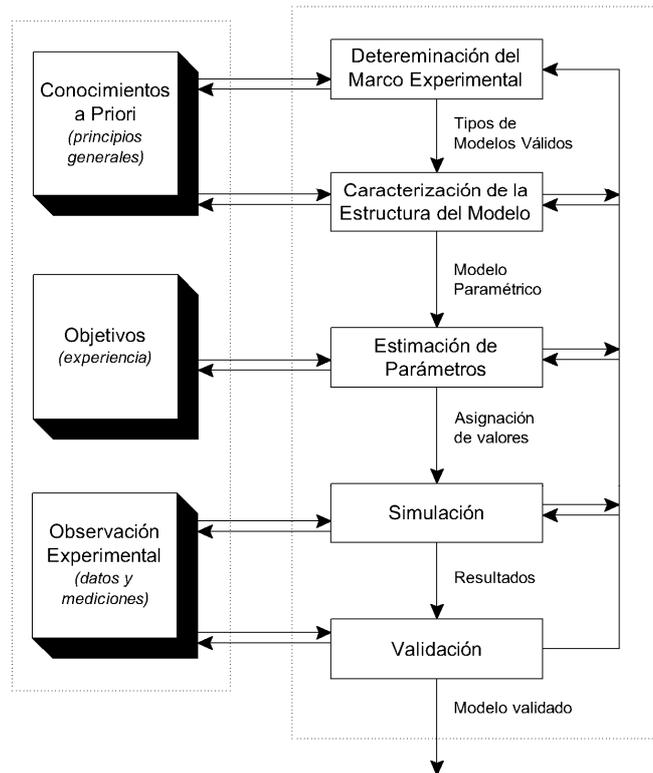


Figura 7.2 Actividades del proceso de modelado y simulación

Por último, señalar que el modelado y simulación ofrecen una vía para estudiar un determinado sistema, pero por sí mismos no aportan soluciones concretas a ningún problema. Además, el experimento de simulación permite observar el comportamiento del modelo, pero no del sistema real. Por lo tanto, las conclusiones derivadas de este estudio serán aplicables al sistema cuanto más exactas hayan sido las fases de modelización.

7.3 Modelado de sistemas de climatización

Los modelos que se presentan en este capítulo tienen como objetivo principal representar el comportamiento de aquellas cargas controladas termostáticamente en la mayoría de las instalaciones como son, en concreto, equipos de aire acondicionado/bomba de calor. Se pretende conocer, tanto su comportamiento eléctrico, como la influencia ejercida sobre el entorno en el que quedan ubicadas, con especial

atención al control que realizan sobre la temperatura interior del recinto en el que se encuentran. La aplicación de estos modelos en el marco de cualquier programa de respuesta de la demanda se centra, por un lado en servir como base en el nuevo método de predicción del consumo propuesto (Capítulo 8) proporcionando datos de consumo del uso final climatización, que habitualmente constituye un porcentaje muy importante del consumo total, para el entrenamiento de las distintas redes. Por otro lado, permitirán la evaluación y selección óptima de estrategias de control de cargas que pueden ser implementadas, por ejemplo, en el SGI desarrollado (Capítulo 4). La elección de este tipo de cargas radica en la posibilidad que ofrecen de establecer una separación temporal (más o menos acusada) entre el intervalo de demanda energética y el período en el que se hace uso de ésta, apoyándose para ello en la inercia térmica del sistema considerado.

El sistema físico queda acotado a los recintos con los que interactúan estas cargas; principalmente la estancia en la que se encuentran, influida, a su vez, tanto por variables climáticas ambientales como por la proximidad de otros espacios adyacentes a ella. Dado el interés por simular el comportamiento energético, se necesitan modelos que permitan reproducir fielmente la realidad durante intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños que permitan observar la dinámica de los procesos que intervienen, en principio se establece en un intervalo de 1 min. La Figura 7.3 muestra el sistema global a considerar.

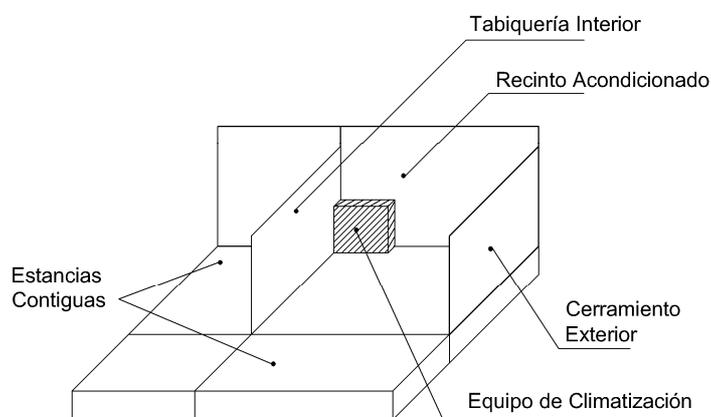


Figura 7.3 Descripción del sistema real con una carga de climatización

Variables de entrada

Se han considerado como variables de entrada al modelo las siguientes:

Temperatura exterior: Temperatura del ambiente en contacto con los cerramientos exteriores.

Radiación global: Supone, en determinadas horas del día, una aportación adicional de flujo energético sobre los cerramientos exteriores y una carga interna

prácticamente instantánea cuando se considera su aportación a través de las superficies acristaladas exteriores.

Temperatura de consigna: Directamente asociada con las preferencias de los usuarios, recoge el valor de temperatura deseada dentro de los espacios acondicionados.

Temperatura de las estancias contiguas: Considerada como variable de entrada, permite determinar la influencia que estos recintos ejercen sobre el sistema modelado. Téngase en cuenta que una cantidad considerable de las estancias residenciales acondicionadas poseen entre un 50 % y un 75 % de tabiquería interior.

Variables de salida

Pueden dividirse en dos grupos, por un lado, las relacionadas con el comportamiento térmico del recinto considerado y, por otro, las asociadas al funcionamiento eléctrico de los equipos, es decir la demanda energética.

Temperatura interior: Representa la temperatura media interior de la estancia en la que se encuentra situado el equipo, suponiendo que todos los elementos presentes en la misma se encuentran a igual temperatura.

Flujos térmicos: Distinguiendo entre el intercambio energético de la estancia con los espacios que la rodean y la aportación debida a la acción/extracción de la carga.

Demanda eléctrica: Considerando como salida la potencia activa, es posible calcular el *duty-cycle*¹ de los equipos así como la energía absorbida durante diferentes períodos de tiempo. De esta forma, puede determinarse las disminuciones esperadas de consumo bajo una estrategia de *gestión de cargas* específica.

Mecanismo de control: El termostato

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, las cargas modeladas poseen como objetivo principal la regulación de la temperatura del entorno en el que se encuentran, supuesto un valor medio para todos los puntos del mismo. En la mayoría de ellas se incorpora un termostato como elemento regulador, el cual se basa en la asignación de una temperatura de consigna o deseada y dos regiones adyacentes a ésta, constituyendo la denominada *banda muerta*, cada una de ellas con un estado de funcionamiento según la finalidad del equipo, enfriamiento o calentamiento (Figura 7.4). La modificación del estado del equipo se produce cuando la temperatura controlada evoluciona desde una de las regiones externas a la banda muerta hasta la otra,

¹ El *duty-cycle* D es la fracción del tiempo en la que un sistema está en estado activo. Se calcula con la expresión $D = \frac{\tau}{T}$, donde τ es el tiempo en el que el sistema está activo y T es el periodo.

manteniéndose invariable mientras los valores de temperatura queden dentro de dicha banda. Evidentemente, también se modifica el estado del equipo si la temperatura de consigna se fija en un valor suficientemente alejado del actual.

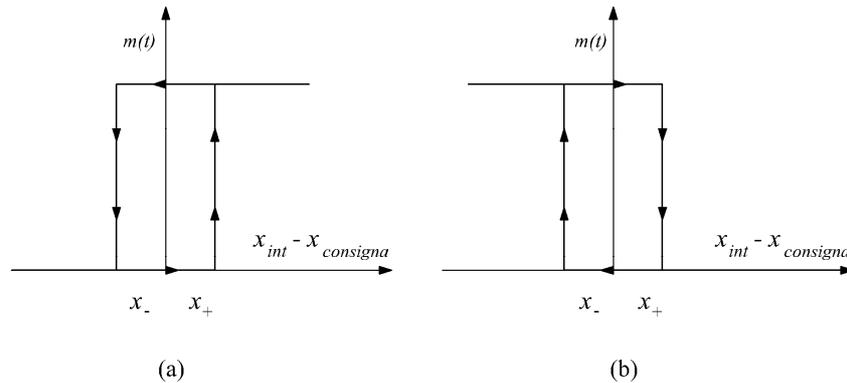


Figura 7.4 Mecanismos de control. Termostatos

La potestad de este mecanismo de control recae directamente sobre el cliente, que adapta el valor de consigna a sus necesidades, variándose en consecuencia los consumos demandados. Resulta conveniente aclarar, llegado este punto, que un valor de estado del equipo sin demanda térmica, no implica una demanda nula de energía a la red, ya que los equipos pueden presentar en este caso una demanda residual asociada principalmente a varias razones como son alimentación de la resistencia de Carter, de los equipos electrónicos, de mecanismos de ventilación de aire, etc. Por otro lado, hay que distinguir dos conceptos: el estado del termostato, $m(t)$, y la conexión y desconexión física que el equipo puede sufrir, es decir, entre la *demanda de servicio* y la *demanda energética*, la primera corresponde al servicio que el cliente obtiene de la energía que ha sido demandada, mientras que la segunda englobaría los períodos de demanda propiamente dichos. Por tanto, al referirse a un equipo y al estado del termostato, se asume en todo momento que el cliente está demandando servicio al equipo, manteniéndose éste físicamente conectado a la red de suministro [103]. La Figura 7.4 muestra los mecanismos de control para el caso de cargas de enfriamiento, caso a, y cargas de calentamiento, caso b. Las variables que intervienen directamente en los mecanismos de control son la temperatura de consigna, el estado de los equipos y la temperatura que se desea regular.

7.3.1 Caracterización del modelo empleado

Partiendo de las medidas realizadas sobre sistemas reales, así como del conocimiento de los modelos previamente desarrollados en este campo, se procede a la presentación de un modelo estructural general, que servirá de base para la modelización del comportamiento de las cargas en estudio. Para ello, se parte del balance energético de la zona a estudiar, recogida en la Figura 7.5, el cuál se ha

realizado sobre una representación simplificada en planta del sistema global mostrado con anterioridad (Figura 7.3). En dicho balance, también se incluye el intercambio energético existente entre la estancia acondicionada y las plantas superior e inferior, a través del suelo y el techo, que queda en dirección perpendicular al gráfico. Los flujos energéticos identificados se analizan teniendo en cuenta las leyes que rigen los procesos de transmisión de calor por conducción y convección [119]. Nótese que las capacidades caloríficas tanto de cerramientos de fachada como de tabiques interiores, suelos y techos han sido explícitamente consideradas, asumiendo en todo momento flujos de calor *unidireccionales*. El espacio interior se encuentra interactuando directamente con el exterior sólo a través de las superficies acristaladas, las cuales se les supone con capacidad calorífica despreciable en comparación con el resto de elementos. Igualmente, se asume que el flujo de calor debido a la radiación exterior que atraviesa dichas superficies se convierte en un aporte instantáneo de energía al interior; mientras que la parte de radiación incidente sobre los cerramientos exteriores no se traslada con esa celeridad al interior.

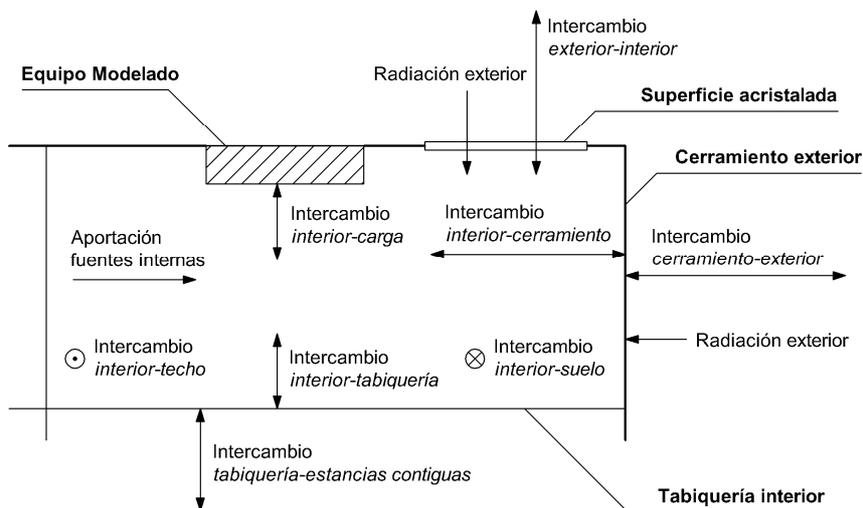


Figura 7.5 Balance energético de la zona en estudio

A partir del balance energético aquí presentado, y haciendo uso de la analogía existente entre los procesos de transmisión de calor y la teoría de circuitos, se presenta en la Figura 7.6 el circuito eléctrico equivalente del sistema anterior. Las intensidades representan flujos de calor, los condensadores están asociados a las capacidades caloríficas de los materiales, las resistencias dependen inversamente de la conductividad térmica y de los coeficientes de convección, y por último, los valores de tensión con respecto a masa simbolizan la evolución de la temperatura en cada punto del sistema. En el Apartado 7.3.2 se detallan cada uno de los parámetros utilizados.

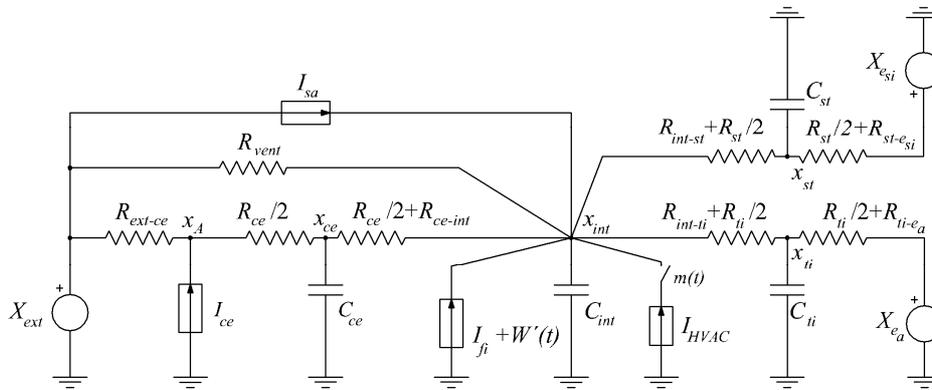


Figura 7.6 Analogía eléctrica. Circuito equivalente global

Como puede apreciarse, se han empleado capacidades equivalentes para modelizar muros multicapas [104]. Por otro lado, la capacidad térmica interior engloba tanto la propia del aire como la asociada al resto de elementos presentes, mobiliario principalmente, considerándose un valor medio de temperatura interior. Esta suposición es matemáticamente equivalente a mayorar la capacidad térmica del aire como consecuencia de los elementos presentes en el espacio interior [106]. En cuanto a la denominación HVAC empleada en la fuente de intensidad ideal asociada a las cargas modeladas, indicar que estas son las siglas de *Heating, Ventilation and Air Conditioning*, asignación dentro de la cual quedan tradicionalmente incluidas las cargas modeladas, pudiéndose encontrar mucha documentación al respecto en la literatura [107].

En cuanto al modelo estructural de las cargas propiamente dichas, éste es similar para el caso de equipos de aire acondicionado/bomba de calor y frigoríficos. El valor de la fuente de intensidad ideal asociada depende de la potencia activa demandada y del denominado *Coefficient of Performance* (COP^1), el cual relaciona dicha potencia activa con el flujo de calor extraído/introducido por el equipo, en función de las características del ciclo de trabajo, temperaturas de los focos, tipo de refrigerante, etc.

7.3.2 Obtención del modelo paramétrico

Puede obtenerse un modelo paramétrico mediante la resolución del circuito de la Figura 7.6. Ésta se realizará escogiendo como variables de estado las tensiones

¹ El Coefficient of Performance (COP) de una bomba de calor es el ratio entre el aporte de calor a la zona a climatizar y el trabajo suministrado para ello, por lo que $COP = \frac{|\Delta Q|}{\Delta W}$. Habitualmente este coeficiente tiene valores comprendidos entre 2 y 3,5.

(temperaturas) de cada nudo del circuito con respecto al nudo de referencia y obteniendo el sistema de ecuaciones a partir de su forma general:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{x} &= [A] \cdot \mathbf{x} + [B] \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= [C] \cdot \mathbf{x} + [D] \cdot \mathbf{u} \end{aligned}$$

donde \mathbf{x} representa el vector de variables de estado, \mathbf{u} el vector de entradas e \mathbf{y} el vector de salidas (Apartado 5.4). De teoría de circuitos, se conoce que, en el caso de un circuito eléctrico lineal, los valores propios de la matriz $[A]$ corresponden a las frecuencias naturales del sistema, cuyas inversas permiten, a su vez, determinar las constantes de tiempo de éste.

Las expresiones anteriores, aplicadas al caso particular estudiado, conducen a un sistema de espacio de estados híbrido, un estado continuo, formado por un conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas y otro discreto, asociado al comportamiento del termostato.

Estado continuo

Correspondiente a la evolución propia de las variables de estado del sistema, de acuerdo con:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_{ce} \\ x_{int} \\ x_{ti} \\ x_{st} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{ce} \\ x_{int} \\ x_{ti} \\ x_{st} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & 0 & b_{23} & b_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{46} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_{ext} \\ I_{ce} \\ I_{sa} + I_{fi} + W'(t) \\ I_{HVAC} \cdot m(t) \\ X_{ea} \\ X_{esi} \end{pmatrix}$$

donde se tiene:

Variables de estado. Temperatura media de los elementos del sistema:

- x_{ce} : Temperatura media de los cerramientos exteriores.
- x_{int} : Temperatura media del espacio interior acondicionado.
- x_{ti} : Temperatura media de la tabiquería interior.
- x_{st} : Temperatura media de suelos y techo.

Elementos Pasivos. Resistencias de conducción, convección y capacidades térmicas:

- C_{ce} : Capacidad térmica equivalente de los cerramientos exteriores.
- C_{int} : Capacidad térmica equivalente de la estancia interior, considerando el mobiliario como un volumen ocupado por madera.
- C_{ti} : Capacidad térmica equivalente de la tabiquería interior.
- C_{st} : Capacidad térmica equivalente del suelo y el techo.
- R_{ext-ce} : Resistencia térmica de convección entre el entorno y la superficie exterior de los cerramientos.
- R_{ce} : Resistencia térmica de conducción a través de cerramientos (considerado sólo la dirección perpendicular al mismo).
- R_{ce-int} : Resistencia térmica de convección entre la superficie interior (cara interior) de los cerramientos y el ambiente interior.
- R_{vent} : Resistencia térmica de conducción entre el exterior y el ambiente interior a través de las superficies acristaladas.
- R_{int-ti} : Resistencia térmica de convección entre el ambiente interior y la tabiquería interior.
- R_{ti} : Resistencia térmica de conducción a través de la tabiquería interior (considerando sólo la dirección perpendicular a éstas).
- R_{ti-ea} : Resistencia térmica de convección entre la tabiquería y los espacios adyacentes al considerado.
- R_{int-st} : Resistencia térmica de convección entre el ambiente interior y el suelo-techo.
- R_{st} : Resistencia térmica de conducción a través del suelo y el techo (considerado sólo la dirección transversal a los mismos).
- R_{st-esi} : Resistencia térmica de convección entre el suelo y el techo y los espacios adyacentes (superior e inferior).

Elementos Activos. Temperatura ambiente, radiación solar y flujos de calor adicionales:

- X_{ext} : Temperatura ambiente.
- X_{ea} : Temperatura de los espacios adyacentes a la estancia considerada.
- X_{esi} : Temperatura de los espacios superior e inferior a la estancia considerada.
- I_{ce} : Radiación solar incidente sobre los cerramientos exteriores.
- I_{sa} : Radiación solar incidente sobre superficies acristaladas (este flujo energético puede aproximarse a una carga interior prácticamente instantánea).
- I_{fi} : Fuentes de aportación interna de carga.
- I_{HVAC} : Flujo energético asociado a la carga modelada (positivo o negativo en función del tipo de carga).
- $W'(t)$: Flujo energético que modela errores en la asignación de valores a los parámetros, así como en los flujos indicados anteriormente (incluyendo el debido a la radiación solar).

Así pues, considerando la Figura 7.6 y las variables de estado indicadas, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 Dx_{ce} = & \frac{1}{C_{ce}} \cdot \left(\frac{R_{ext-ce}}{R_{ce}/2 \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)} - \frac{1}{R_{ce}/2} - \frac{1}{R_{ce}/2 + R_{ce-int}} \right) \cdot x_{ce} + \\
 & + \frac{x_{int}}{C_{ce} \cdot (R_{ce}/2 + R_{ce-int})} + \frac{X_{ext}}{C_{ce} \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)} + \frac{R_{ext-ce}}{C_{ce} \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)} \cdot I_{ce} \\
 \\
 Dx_{int} = & \frac{1}{C_{int} \cdot (R_{ce}/2 + R_{ce-int})} \cdot x_{ce} - \\
 & - \frac{1}{C_{int}} \cdot \left(\frac{1}{R_{vent}} + \frac{1}{R_{ce}/2 + R_{ce-int}} + \frac{1}{R_{int-st} + R_{st}/2} + \frac{1}{R_{int-ti} + R_{ti}/2} \right) \cdot x_{int} + \\
 & + \frac{x_{ti}}{C_{int} \cdot (R_{int-ti} + R_{ti}/2)} + \frac{x_{st}}{C_{int} \cdot (R_{int-st} + R_{st}/2)} + \frac{X_{ext}}{C_{int} \cdot R_{vent}} + \\
 & + \frac{1}{C_{int}} [I_{sa} + I_{fi} + W'(t)] + \frac{1}{C_{int}} \cdot I_{HVAC} \cdot m(t)
 \end{aligned}$$

$$Dx_{ti} = \frac{x_{int}}{C_{ti} \cdot (R_{int-ti} + R_{ti}/2)} - \frac{1}{C_{ti}} \cdot \left(\frac{1}{R_{ti}/2 + R_{ti-ea}} + \frac{1}{R_{int-ti} + R_{ti}/2} \right) \cdot x_{ti} + \frac{1}{C_{ti} \cdot (R_{ti}/2 + R_{ti-ea})} \cdot X_{ea}$$

$$Dx_{st} = \frac{x_{int}}{C_{st} \cdot (R_{int-st} + R_{st}/2)} - \frac{1}{C_{st}} \cdot \left(\frac{1}{R_{st}/2 + R_{st-esi}} + \frac{1}{R_{int-st} + R_{st}/2} \right) \cdot x_{st} + \frac{1}{C_{st} \cdot (R_{st}/2 + R_{st-esi})} \cdot X_{esi}$$

Así, de estas ecuaciones, expresadas en su forma matricial, permiten identificar las entradas de las matrices de estado $[A]$ y $[B]$. Por lo tanto, se tiene para la matriz $[A]$:

$$a_{11} = \frac{1}{C_{ce}} \cdot \left(\frac{R_{ext-ce}}{R_{ce}/2 \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)} - \frac{1}{R_{ce}/2} - \frac{1}{R_{ce}/2 + R_{ce-int}} \right)$$

$$a_{12} = \frac{1}{C_{ce} \cdot (R_{ce}/2 + R_{ce-int})}$$

$$a_{21} = \frac{1}{C_{int} \cdot (R_{ce}/2 + R_{ce-int})}$$

$$a_{22} = -\frac{1}{C_{int}} \cdot \left(\frac{1}{R_{vent}} + \frac{1}{R_{ce}/2 + R_{ce-int}} + \frac{1}{R_{int-st} + R_{st}/2} + \frac{1}{R_{int-ti} + R_{ti}/2} \right)$$

$$a_{23} = \frac{1}{C_{int} \cdot (R_{int-ti} + R_{ti}/2)}$$

$$a_{24} = \frac{1}{C_{int} \cdot (R_{int-st} + R_{st}/2)}$$

$$a_{32} = \frac{1}{C_{ti} \cdot (R_{int-ti} + R_{ti}/2)}$$

$$a_{33} = -\frac{1}{C_{ti}} \cdot \left(\frac{1}{R_{ti}/2 + R_{ti-ea}} + \frac{1}{R_{int-ti} + R_{ti}/2} \right)$$

$$a_{42} = \frac{1}{C_{st} \cdot (R_{int-st} + R_{st}/2)}$$

$$a_{44} = -\frac{1}{C_{st}} \cdot \left(\frac{1}{R_{st}/2 + R_{st-esi}} + \frac{1}{R_{int-st} + R_{st}/2} \right)$$

Y para la matriz $[B]$:

$$b_{11} = \frac{1}{C_{ce} \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)}$$

$$b_{12} = \frac{R_{ext-ce}}{C_{ce} \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)}$$

$$b_{21} = \frac{1}{C_{int} \cdot R_{vent}}$$

$$b_{23} = b_{24} = \frac{1}{C_{int}}$$

$$b_{35} = \frac{1}{C_{ti} \cdot (R_{ti}/2 + R_{ti-ea})}$$

$$b_{46} = \frac{1}{C_{st} \cdot (R_{st}/2 + R_{st-esi})}$$

En cuanto a las matrices $[C]$ y $[D]$, la primera de ellas es una matriz identidad de dimensiones 4×4 , mientras que la segunda es una matriz de entradas nulas, de forma que se hace coincidir las salidas del sistema con las variables de estado.

Estado discreto

Asociado con el funcionamiento propio de los termostatos $m(t)$. En virtud de lo expuesto en apartados anteriores, la temperatura interior se mantiene dentro de una banda muerta, centrada en la temperatura de consigna del termostato $x_{consigna}$ fijada por el cliente y limitada por x_- y x_+ , con una diferencia entre extremos de 0,5 a 1°C (Figura 7.4). La evolución de los termostatos se puede igualmente describir mediante un ciclo de histéresis.

7.3.3 Modelo simplificado de un sistema de climatización

Para la implementación práctica es posible simplificar el modelo anterior sustituyendo las dos ramas asociadas a los espacios contiguos y a los superiores e inferiores por una sola rama equivalente, de forma que disminuya en un orden el modelo. Esta rama equivalente, con una estructura en T similar a las ramas de partida, se ha determinado estableciendo un paralelo entre aquellas, lo cual equivale a suponer que x_{ti} y x_{st} poseen una evolución muy similar. Por otro lado, indicar que la temperatura interior posee una evolución similar tanto durante el período inicial como una vez alcanzado el régimen permanente de funcionamiento.

Así, se hace uso de la simplificación en un orden del modelo original, reduciéndose por tanto el número de parámetros necesarios.

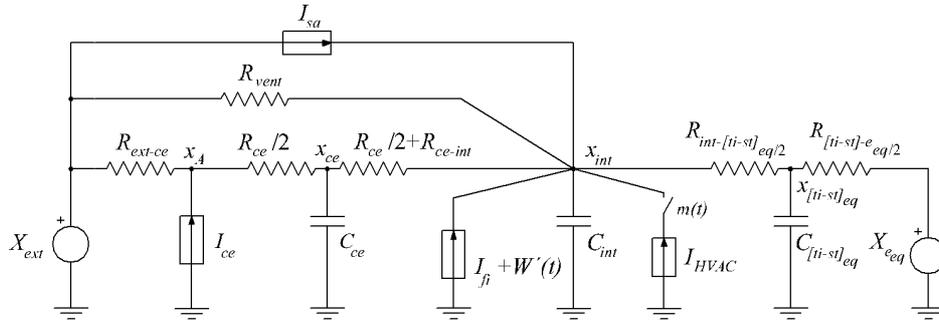


Figura 7.7 Circuito eléctrico equivalente simplificado

Al simplificar el circuito eléctrico, se agrupan las ramas correspondientes a la tabiquería interior y al suelo-techo en una sola rama equivalente de ambas, estableciéndose una temperatura media de los espacios adyacentes, superior e inferior, expresada como X_{eq} . La Figura 7.7 recoge el circuito eléctrico equivalente simplificado, donde se ha asumido que:

$$R_{int-[ti-st]eq/2} = \frac{(R_{int-ti} + R_{ti}/2) \cdot (R_{int-st} + R_{st}/2)}{(R_{int-ti} + R_{ti}/2) + (R_{int-st} + R_{st}/2)}$$

$$R_{[ti-st]-eq/2} = \frac{(R_{ti}/2 + R_{ti-ea}) \cdot (R_{st}/2 + R_{st-esi})}{(R_{ti}/2 + R_{ti-ea}) + (R_{st}/2 + R_{st-esi})}$$

$$C_{[ti-st]eq} = C_{ti} + C_{st}$$

las resistencias definidas poseen subíndices fijados de forma que se mantenga la coherencia en la notación (suma de resistencia térmica de convección y mitad resistencia térmica de conducción).

En cuanto a la obtención de las entradas de las matrices de estado $[A]$ y $[B]$, el procedimiento es análogo al anterior, sólo que en este caso la primera de ellas tiene dimensiones de 3x3 y la segunda 3x6. Seguidamente se presentan las expresiones para cada una de las entradas no nulas de las matrices indicadas, algunas de ellas coincidentes con las del caso anterior:

$$a_{11} = \frac{1}{C_{ce}} \cdot \left(\frac{R_{ext-ce}}{R_{ce}/2 \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)} - \frac{1}{R_{ce}/2} - \frac{1}{R_{ce}/2 + R_{ce-int}} \right)$$

$$a_{12} = \frac{1}{C_{ce} \cdot (R_{ce}/2 + R_{ce-int})}$$

$$a_{21} = \frac{1}{C_{int} \cdot (R_{ce}/2 + R_{ce-int})}$$

$$a_{22} = -\frac{1}{C_{int}} \cdot \left(\frac{1}{R_{vent}} + \frac{1}{R_{ce}/2 + R_{ce-int}} + \frac{1}{R_{int-[ti-st]eq/2}} \right)$$

$$a_{23} = \frac{1}{C_{int} \cdot R_{int-[ti-st]eq/2}}$$

$$a_{32} = \frac{1}{C_{[ti-st]eq} \cdot R_{int-[ti-st]eq/2}}$$

$$a_{33} = -\frac{1}{C_{[ti-st]eq}} \cdot \left(\frac{1}{R_{int-[ti-st]eq/2}} + \frac{1}{R_{[ti-st]-eq/2}} \right)$$

Y para la matriz $[B]$:

$$b_{11} = \frac{1}{C_{ce} \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)}$$

$$b_{12} = \frac{R_{ext-ce}}{C_{ce} \cdot (R_{ext-ce} + R_{ce}/2)}$$

$$b_{21} = \frac{1}{C_{int} \cdot R_{vent}}$$

$$b_{23} = b_{24} = \frac{1}{C_{int}}$$

$$b_{35} = \frac{1}{C_{[ti-st]eq} \cdot R_{[ti-st]-eq/2}}$$

Por último, indicar que las matrices $[C]$ y $[D]$ poseen una estructura similar a la presentada en el apartado anterior, sólo que con dimensiones diferentes para mantener la coherencia con las matrices $[A]$ y $[B]$.

7.4 Validación del modelo de cargas de climatización

Para realizar la validación del modelo eléctrico presentado en el apartado anterior se estudia, en primer lugar, el consumo de una máquina instalada en unas dependencias del Departamento de Ingeniería Eléctrica en el Edificio 5E-Departamental de la UPV [105].

La máquina que se simula es una unidad split de conducto con funcionamiento de bomba de calor, en concreto es una máquina ROCA, cuyo modelo de la unidad exterior es BCBI-20-2571 y de la unidad interior es AHO-200-B-38/B. La unidad exterior dispone de un compresor tipo scroll, de potencia nominal 6,7kW y alimentación 400V, un ventilador de 370W, una batería con un área de $1,86\text{m}^2$ y un peso neto de 258kg. La unidad interior está formada por un ventilador de 0,75kW de potencia nominal, tensión de alimentación de 400V, una batería de $0,57\text{m}^2$ y un peso neto de 120kg.

La unidad exterior está instalada en la cubierta del edificio y la unidad interior en un pasillo de planta primera, anexo a la zona a climatizar. Dicha zona está formada por 6 despachos, con un difusor rotacional por despacho, en los que en todos existe una ventana al exterior orientada al sur. La zona a climatizar está formada por un área de $199,73\text{m}^2$, con un área en ventanas de $61,05\text{m}^2$, una superficie de $149,52\text{m}^2$ en paredes interiores y un volumen de $583,20\text{m}^3$.

Para realizar las simulaciones se ha utilizado un software desarrollado en el IIE con el paquete informático Matlab, en el que se ha implementado el modelo simplificado presentado en el apartado anterior. Este software dispone de una base de datos de coeficientes de conducción térmica de los principales materiales utilizados en la construcción. También, incluye configuraciones estándares de paredes, ventanas, forjados, de cargas térmicas, elementos de ventilación y demás componentes que pueden influir en un sistema de este tipo, preparadas para su utilización.

A continuación, a modo de ejemplo de la metodología a utilizar, se detallan los pasos necesarios para realizar la simulación de la zona indicada. Los datos introducidos para la simulación del equipo, en primer lugar, son los datos geográficos de la zona en estudio: una altitud de 11m y latitud de 39m. Se considera que los muebles son de madera de 570Kg/m^3 , con un calor específico de 2.500J y que el volumen ocupado por estos elementos es del 10%.

En cuanto a las paredes externas se consideran 3 paredes exteriores con las siguientes características: Enfoscado de cemento (0,1m), EPS (0,05m), bloque de

hormigón (0,1m) y enlucido de yeso (0,015m). Este tipo de construcción tiene las siguientes propiedades físicas: K^1 de $0,4264\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ y un peso de $299,5\text{kg/m}^2$. Las 3 paredes exteriores se consideran una de 75m^2 con orientación SE, otra de $26,1\text{m}^2$ con orientación NE y otra de $26,1\text{m}^2$ con orientación SO.

En cuanto a las paredes interiores, se consideran formadas por los siguientes materiales: Enlucido de yeso (0,015m), ladrillo hueco (0,06m) y enlucido de yeso (0,015m). Este tipo de construcción tiene las siguientes propiedades físicas: K de $4,49\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ y un peso de 96kg/m^2 . Se ha considerado una pared interior de 120m^2 .

Para el techo y el suelo se ha elegido el mismo tipo de construcción formado por: Guarnecido de yeso (0,02m), pavimento genérico + mortero (0,05m) y bovedilla de hormigón (0,3m). Este tipo de construcción tiene las siguientes propiedades físicas: K de $3,08\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ y un peso de $466,4\text{kg/m}^2$. En este caso, tanto el área del techo, como en el suelo tienen la misma superficie de $208,05\text{m}^2$.

Se ha definido un tipo de ventana, ya que es posible indicar el número de ventanas iguales que existen en cada una de las estancias. El tipo de ventana definido posee las siguientes características: Área de 5m^2 , con K de $3,7\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, de cristal simple, color transparente, carpintería metálica y espesor 4mm. Posteriormente, introduciendo el número de ventanas que existen en cada una de las paredes, el software recalcula el área correspondiente a la pared y el correspondiente a las ventanas.

En los parámetros de la carga se considera un COP nominal de 3,25, una potencia activa nominal de 7.750W y potencia de stand-by igual a 100W. Para el termostato se considera una tolerancia superior e inferior de $0,04^\circ\text{C}$ respectivamente.

Para las cargas de ventilación, se considera una ventilación de $400\text{m}^3/\text{h}$. La ocupación de la zona suele ser de unas 4 personas, no obstante debido a la funcionalidad de los despachos, se considera que siempre hay alguna persona adicional.

Se consideran distintas cargas de ocupación, iluminación y equipamiento. Estas cargas se han considerado variables a lo largo del día, con la distribución de horarios que sigue el personal dentro de este edificio. En las cargas de ocupación el valor considerado es de 300W/h , corresponde al calor desprendido por 4 personas trabajando sentadas. Existen 1.500W instalados en tubos fluorescentes y debido a la existencia de alguna bombilla de luz incandescente, se ha considerado también el consumo de 50W de este tipo. Hay que destacar que los porcentajes aplicados a esta carga, para cada momento del día, corresponden a los mismos que para la carga de ocupación.

El calor desprendido por el equipamiento ofimático se ha fijado en 1.000W/h , como resultado de los 4 ordenadores considerados. Al igual que en el caso anterior, sigue la misma distribución, en porcentaje, que la ocupación y la iluminación.

¹ Coeficiente de transmisión térmica.

La simulación se realiza para un día completo. El horario de funcionamiento considerado es de conexión a las 8:00 y desconexión a las 21:00. Para simular que la máquina está apagada el resto del tiempo, simplemente, se establece una T_c muy inferior a la que habrá en la habitación, para que simule que la máquina no debe encenderse. En este caso se ha introducido un valor de 0°C (de 00:00 a 07:45 y de 21:00 a 23:45). Se introducen los datos de temperatura exterior para el día a simular, 96 valores correspondientes a un intervalo de 15 minutos. Para la temperatura equivalente de las habitaciones adyacentes se introducen, también, 96 valores. Dado el tipo de habitaciones, formada por laboratorios o zonas de circulación, que no están habitualmente climatizadas, se le ha asignado una temperatura constante de 19°C . Para la temperatura inicial de la habitación, temperatura a las 00:00, a partir de la cual se empieza a simular, se considera de $21,17^\circ\text{C}$ en el vector de medidas para dicho día. La temperatura inicial de las paredes exteriores se ha tomado el valor de temperatura del ambiente exterior a las 00:00, igual a $11,60^\circ\text{C}$.

En la Figura 7.8, se puede observar la evolución de la temperatura exterior (Text), la temperatura interior (Tint) y la potencia consumida por la máquina (P), todos ellos son valores medidos en la zona estudiada para el día 02/12/2007. Además, se indica el horario de funcionamiento del equipo (ON/OFF) y la temperatura de consigna (Tc).

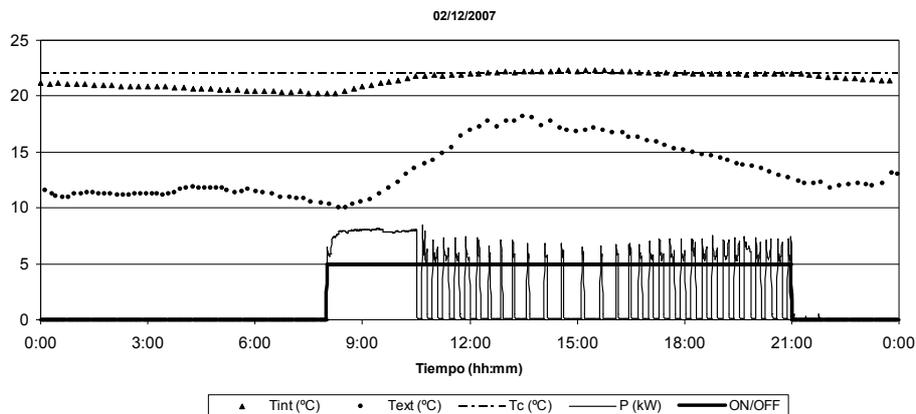


Figura 7.8 Medidas del funcionamiento real de un equipo en el edificio 5E

A partir de los datos físicos descritos y las medidas realizadas, temperatura exterior y temperatura de consigna, se realiza la simulación de la máquina con el software disponible. Así, se comprueba la bondad del modelo, verificando que la potencia simulada y la real son muy similares, especialmente en los instantes iniciales de arranque de la máquina donde se debe elevar la temperatura de la habitación desde la temperatura inicial del periodo nocturno, sin actividad, hasta la temperatura de consigna (Figura 7.9). Se observa también que a lo largo del día, durante el periodo estacionario, los arranques de la máquina son muy similares a los reales por lo que con

dicho modelo se es capaz de obtener el consumo de un equipo de climatización con el modelado del sistema físico en el que opera.

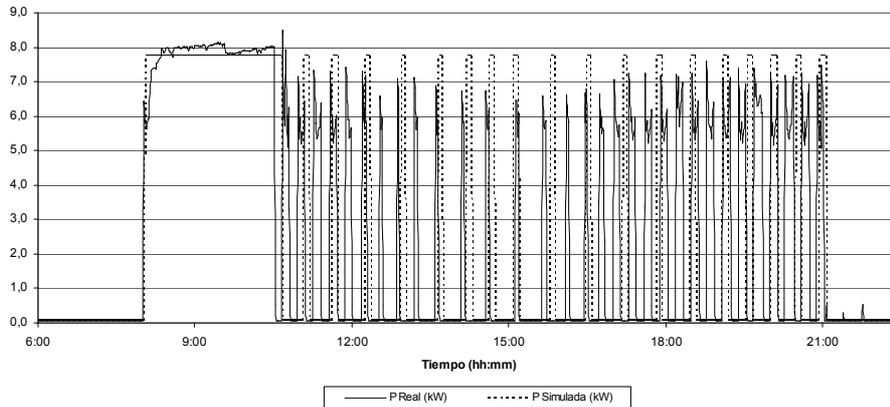


Figura 7.9 Validación del modelo eléctrico de un equipo en el edificio 5E

Cabe destacar que el consumo de energía es muy similar en los dos casos. La energía consumida total medida es de 40,09kWh y la energía consumida simulada es de 38,29kWh, por lo que se comete un error inferior al 5%.

7.5 Agregación de consumos homogéneos

Una vez validado el modelo para una máquina individual, el objetivo de este apartado se centra en la presentación de una metodología de agregación que permita modelar el comportamiento de un conjunto de cargas individuales *iguales*, implementada en el software desarrollado, lo que permite obtener el consumo del uso final de climatización en instalaciones como hoteles, oficinas, etc., donde habitualmente se instalan muchos equipos de las mismas características. Se aplica una metodología al problema de agregación, simulando un conjunto de sistemas elementales (de las presentadas en el apartado anterior) mediante un proceso de tipo Montecarlo [119]. Dicha metodología se apoya en el empleo de estimadores tipo núcleo, con la obtención de funciones de densidad cuyos perfiles dependen del tipo de estimador escogido y del ancho de banda fijado, una solución que aporta información completa y detallada del comportamiento del conjunto de cargas.

Adicionalmente a esta metodología, en el Apartado 7.6 se presenta otro caso, también muy común en las instalaciones reales, que consiste en obtener el consumo total de un conjunto de máquinas de *distintas* características cada una de ellas, en el que se simula cada una de las máquinas individualmente, para posteriormente obtener el consumo total por agregación de las mismas.

7.5.1 Técnica de alisamiento

La aplicación de esta metodología de agregación se basa en la simulación previa de un conjunto $j = 1, 2, \dots, N$ de trayectorias independientes a lo largo de un intervalo global de tiempo T . Estas N trayectorias corresponden a las variables de salida de N sistemas elementales, cuyo comportamiento individual se rige por el conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas presentadas en el Apartado 7.3.2. Para la conductividad térmica de los cerramientos se opta por una variable normal, con desviación típica tal que recoja todas las tipologías consideradas, mientras que para la orientación de los propios cerramientos se emplea una variable uniforme, permitiendo así un mayor acercamiento a la realidad de la agregación. Por último, se incluye también una componente de ruido. La simulación de estos N sistemas elementales corresponde a la ejecución de un proceso de tipo Montecarlo.

Partiendo de las variables de salida de estos N sistemas elementales, se han empleado estimadores no-paramétricos tipo núcleo para obtener las funciones de densidad marginal. Así, a partir de la temperatura interior de cada sistema elemental, $(x_{int}^j(t))_{t \leq T}$, $j = 1, \dots, N$, se construye una función $x \mapsto f_{x_{int}}^j(t; x)$, con x variando dentro del intervalo de temperaturas en el que las $(x_{int}^j(t))$ estén definidas. Este tipo de estimadores (*kernel estimators*) fueron introducidos por Rosenblatt en 1956. Hasta ese momento se habían utilizado histogramas como punto de partida para determinar las funciones de densidad, en los cuales la aportación de cada observación individual quedaba reflejada mediante la inclusión de rectángulos de base despreciable en comparación con su altura, denominados *sharp Needles*, (Figura 7.10, caso a). Rosenblatt propuso entonces asociar a cada observación X_i una función núcleo $K_h(\cdot - X_i)$, centrada en X_i , de forma que la estimación de la función de densidad en un intervalo concreto se determinase a partir del valor medio de un conjunto de dichas funciones núcleo. En el caso b de la Figura 7.10 se presentan las funciones de núcleo triangulares. Es necesario indicar que las funciones núcleo no han de ser necesariamente triangulares, sino que pueden implementarse núcleos uniformes, cuadráticos, gaussianos, etc.

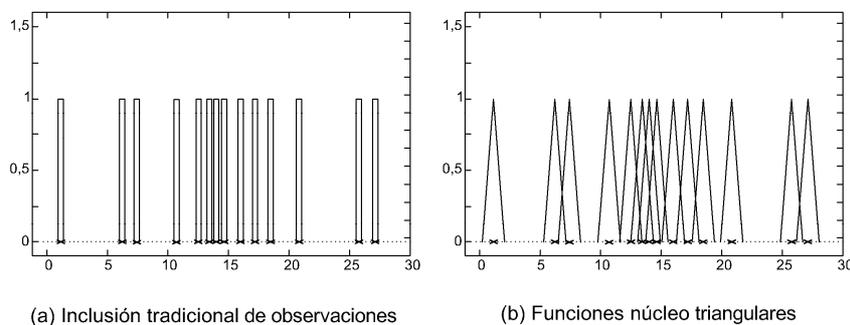


Figura 7.10 Observaciones: Introducción de funciones tipo núcleo

Centrándose sobre la variable $x_{int}^j(t)$, $j=1, \dots, N$, el estimador para un instante específico t vendrá dado por la función [116],

$$\hat{f}_h(t; x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K\left(\frac{x - x_{int}^j(t)}{h}\right)$$

donde h es el ancho de banda a fijar, obteniéndose mayores alisamientos según se aumenta este parámetro, es decir, valores pequeños de h conducen a funciones de densidad con un ruido elevado, mientras que elecciones de h altos producen perfiles mucho más suaves, estando K asociada al tipo de núcleo que se implemente, para el caso de un núcleo triangular la expresión es:

$$K(u) = (1 - |u|)I_{(|u| \leq 1)}$$

donde u puede tomar valores entre -1 y 1.

En cuanto a la selección de un valor de ancho de banda práctico, se hace uso de la siguiente expresión deducida para el caso de núcleos normales:

$$\hat{h}_0 \approx 1,06 \min(\hat{\sigma}, \frac{\hat{R}}{1,34}) \cdot N^{1/5}$$

donde $\hat{\sigma}$ es la desviación típica asociada a las $x_{int}^j(t)$ y \hat{R} representa el rango intercuartílico, definido como

$$\hat{R} = [X_{0,75N} - X_{0,25N}]$$

Por tanto, para una determinada instalación, empleando la metodología presentada, es posible modelar el uso final de climatización como agregación de diversas máquinas simples presentadas en el Apartado 7.3.2, en el que se realiza la agregación del conjunto de máquinas, que pueden tener características similares, introduciendo la aleatoriedad necesaria para obtener resultados válidos.

7.5.2 Aplicación al modelado del UF de climatización en un cliente comercial

Como ejemplo de aplicación de la técnica de agregación, se presenta el cálculo de la simulación del consumo del uso final de climatización en un consumidor comercial. El cliente utilizado es un hotel en Inglaterra, el 'Best Western Admiral Rodney Hotel', situado en Horncastle. Dicho consumidor es uno de los clientes privados que participan a la elaboración del proyecto europeo EUDEEP [24] del que se disponen datos del

consumo total del año 2002 y de las temperaturas exteriores, además de distintos datos de distribución interior, elementos constructivos, horarios de uso, etc.

El hotel está ubicado a una altitud de 50m, en el Lincolnshire (región del este de Inglaterra), en una latitud de 53° Norte. Consta de treinta y una habitaciones (750m²), una cocina (88m²), un bar (110m²), un restaurante (361m²), habitaciones de usos diversos y de conferencias (660m²) y pasillos de circulación (220m²). La superficie total del bloque es de 2.200m², distribuidos en 3 alturas.

Para realizar la simulación del consumo eléctrico en aire acondicionado, para el 01/03/2002, se procede de la siguiente forma [112]:

- De la información disponible, se considera que las zonas con climatización son las habitaciones y el restaurante. Por la geometría del edificio se consideran dos tipos de habitaciones. Las habitaciones Tipo 1 orientadas al este (19 Uds.) y las Tipo 2 orientadas al oeste (12 Uds.).
- Con el software desarrollado se realiza la simulación de 1 habitación de Tipo 1. Posteriormente, teniendo en cuenta las técnicas de agregación comentadas en el Apartado 7.5, se obtiene el consumo agregado de las 19 habitaciones del mismo tipo. Para realizar la simulación, según se ha presentado en detalle en el Apartado 7.4, es necesario tener en cuenta las temperaturas exteriores del día a simular y todos los datos físicos de la habitación, materiales de los cerramientos, etc. También, se introducen las características de los equipos de climatización.
- Del mismo modo se realiza la simulación de una habitación del Tipo 2 y la agregación de las 12 habitaciones del mismo tipo.
- Por último se realiza la simulación del restaurante.

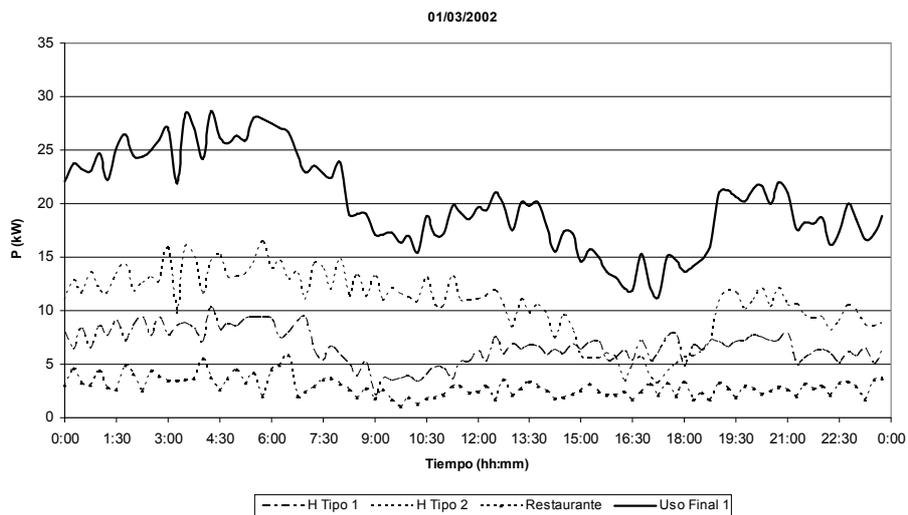


Figura 7.11 Simulación del Uso Final 1 a partir de la simulación de distintas dependencias

El consumo en climatización del edificio se obtiene como la suma de las tres simulaciones anteriores. En la Figura 7.11 se representa el consumo agregado total para el uso final de climatización, Uso Final 1, como suma del obtenido para las habitaciones de Tipo1, las de Tipo 2 y el Restaurante independientemente.

Para la fecha considerada, el aire acondicionado trabaja en modo de calefacción, estando conectado todo el día, y se observa que la demanda mínima se produce alrededor de las 16:30. No es posible validar la simulación obtenida por no disponer de medidas específicas del aire acondicionado, pero sí que se comprueba que el consumo porcentual del aire acondicionado con respecto al total coincide con los datos indicados por el cliente en la encuesta realizada.

Una vez obtenido el consumo del uso final de aire acondicionado, por diferencia de éste con el Consumo Total, del que se disponen medidas reales, se obtiene el Uso Final 2, que engloba el resto de usos del hotel (Figura 7.12).

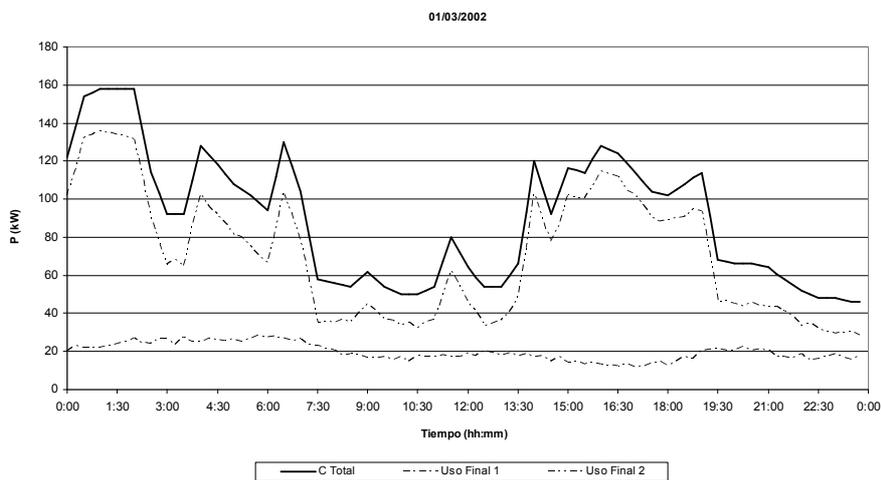


Figura 7.12 Descomposición del consumo en usos finales en un cliente comercial

Así, es posible descomponer el consumo global de una instalación en los distintos usos finales que lo forman, con la utilización de modelos físicos, que constituye un aspecto fundamental en el método de predicción del consumo propuesto en el próximo capítulo, en el que es posible realizar el entrenamiento de las distintas redes con el uso de datos reales u obtenidos a través de simulaciones.

7.6 Modelado del UF de climatización como consumo agregado de un conjunto de equipos heterogéneo

En el apartado anterior se presenta la solución adoptada para el cálculo del consumo agregado producido por un conjunto de máquinas con las mismas

características. En este apartado se presenta la metodología a seguir para simular el consumo agregado de un conjunto de máquinas de aire acondicionado cuando tienen características distintas y/o climatizan estancias distintas.

Como ejemplo, se presenta la simulación del uso final de climatización en el edificio 5E-Departamental de la UPV. El consumo a simular es el correspondiente al cuadro eléctrico denominado Aire Acondicionado de Zona Vieja, que alimenta a distintos equipos que climatizan varios despachos en cada una de las plantas. Se dispone de las características físicas del edificio, los horarios de uso de los equipos, ubicación y características de las máquinas de aire acondicionado. También, se dispone de medidas del consumo del cuadro indicado que está formado por 23 circuitos, que alimentan las 22 máquinas¹ de aire acondicionado que se presentan en la Tabla 7.1.

| CIRC | LOCAL | P ² | INICIO | FIN | CIRC | LOCAL | P | INICIO | FIN |
|------|----------|----------------|--------|-------|------|---------|-----|--------|-------|
| 1 | P2-A | 2,7 | - | - | 13 | ING MEC | 7,7 | - | - |
| 2 | P2-B | 5,5 | 8:30 | 22:00 | 14 | P3-E | 5,5 | 9:30 | 21:00 |
| 3 | P2-C | 7,7 | 7:00 | 21:00 | 15 | AA MEC | 3,5 | 17:30 | 21:00 |
| 4 | AUL HALL | 7,7 | - | - | 16 | PB-A | 4,9 | - | - |
| 5 | DESP AUT | 6,9 | - | - | 17 | PB-C | 7,7 | 13:30 | 21:00 |
| 6 | DESP MAT | 4,9 | - | - | 18 | PB-B | 7,7 | 11:30 | 21:00 |
| 7 | LAB PB | 5,5 | 0:00 | 23:59 | 19 | P1-A | 6,9 | 8:30 | 22:00 |
| 8 | DESP P1 | 7,7 | 7:00 | 21:00 | 20 | P1-B | 7,7 | 7:30 | 21:00 |
| 9 | METR | - | 0:00 | 23:59 | 21 | P1-C | 7,7 | - | - |
| 10 | P3-A | 7,7 | - | - | 22 | P1-D | 7,7 | 11:30 | 21:00 |
| 11 | P3-B | 5,5 | 9:00 | 22:00 | 23 | AUL INF | 5,7 | 13:00 | 15:00 |
| 12 | P3-C | 3,7 | - | - | | | | | |

Tabla 7.1 Características de distintas máquinas de AA en el edificio 5E

Se presenta la simulación del consumo agregado para el miércoles 28 de noviembre de 2007. Se consideran los horarios de uso y potencias de los distintos equipos que se presentan en la Tabla 7.1. Indicar que la máquina alimentada con los circuitos 7 y 9 está funcionando ininterrumpidamente durante las 24 horas del día.

Considerando dichos parámetros y las características específicas de cada local, siguiendo la metodología presentada en el Apartado 7.4, se obtiene la simulación individual de cada una de las máquinas que se presenta en las Figura 7.13 y Figura 7.14.

¹ Los circuitos 7 y 9 corresponden a un mismo local, el circuito 7 alimenta a la unidad interior y el 9 a la exterior.

² Potencia consumida por el conjunto de la unidad interior y exterior expresada en kW.

Nuevas Herramientas para Facilitar la Respuesta Activa de Consumidores

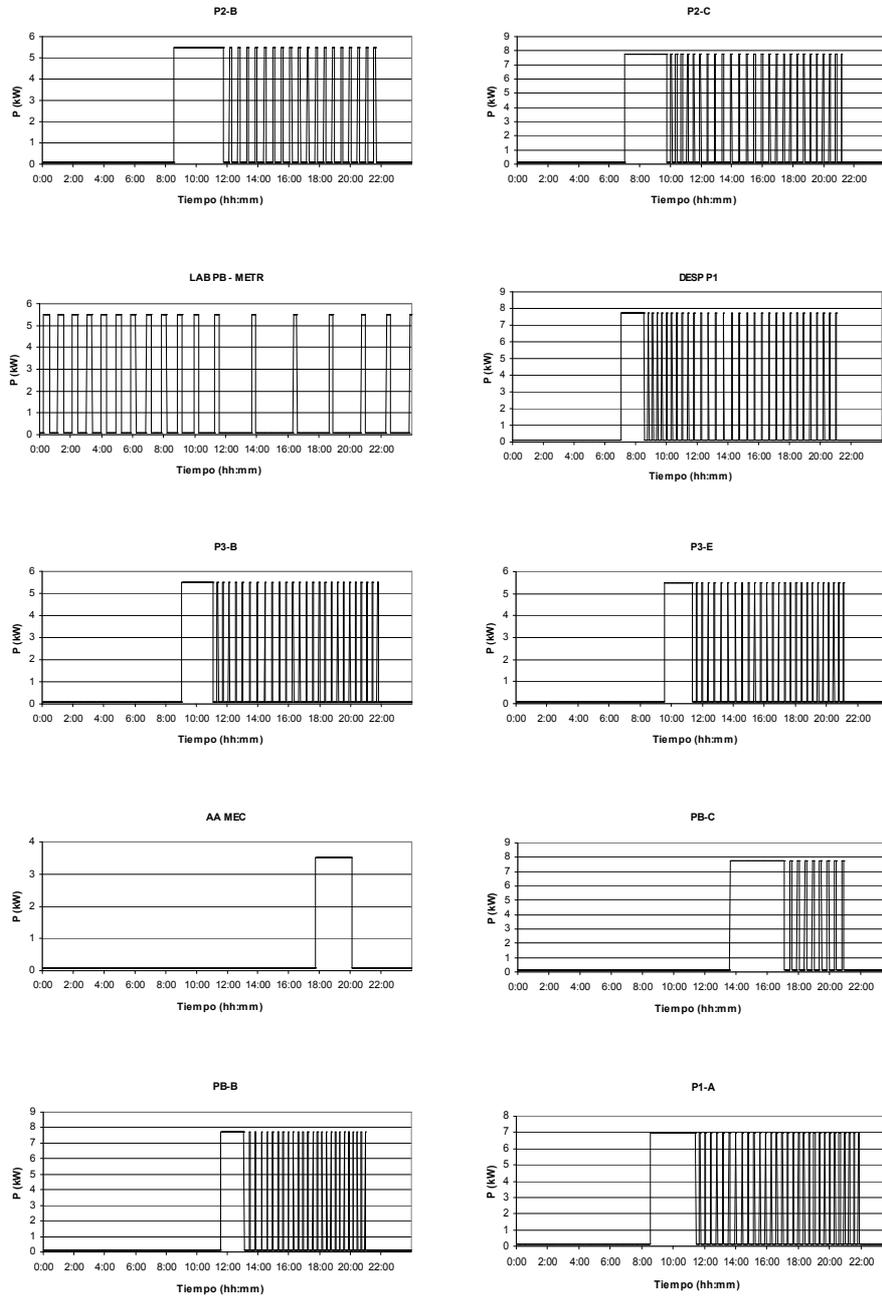


Figura 7.13 Modelado de 10 unidades de AA del edificio 5E

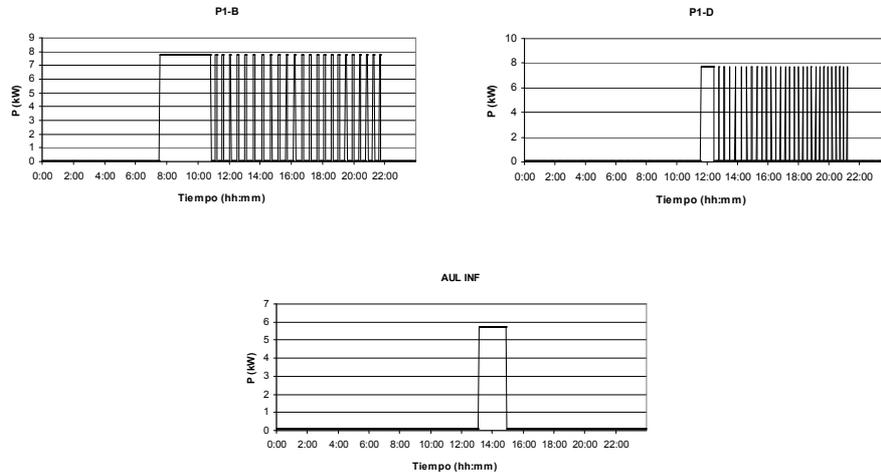


Figura 7.14 Modelado de 3 unidades de AA del edificio 5E

Para cada equipo se realiza una simulación individual, de la misma forma que la presentada en el Apartado 7.4, en la que se considera el horario indicado y los siguientes parámetros.

- Características físicas de las máquinas bombas de calor.
- Parámetros físicos de cada zona climatizada. Constitución de las paredes, suelos y techos.
- Orientación de cada zona climatizada.
- La actividad de los usuarios.

Hay algunas características que se consideran idénticas para todas las máquinas que son:

- Datos de temperatura exterior para el día simulado.
- La altura de cada planta es de 2,98m.
- El COP de cada maquina se considera igual a 3,25.
- La tolerancia de los termostatos es de 0,4°C.
- La iluminación sigue la misma distribución en el tiempo que la actividad de los ocupantes, con una radiación máxima de $10\text{W}/\text{m}^2$. Cuando se está fuera del periodo de actividad, la radiación se conserva igual a $1\text{W}/\text{m}^2$.

Así, considerando los consumos individuales obtenidos para las 13 máquinas utilizadas para dicho día y que las otras 9 máquinas están en estado de stand-by, se considera un consumo base de 750W. Con todo ello, se obtiene el consumo agregado para el cuadro de aire acondicionado considerado. En la Figura 7.15 se presenta la

potencia media cuarto-horaria para el consumo simulado obtenido y el consumo real para dicha fecha, obtenido con el SGI presentado.

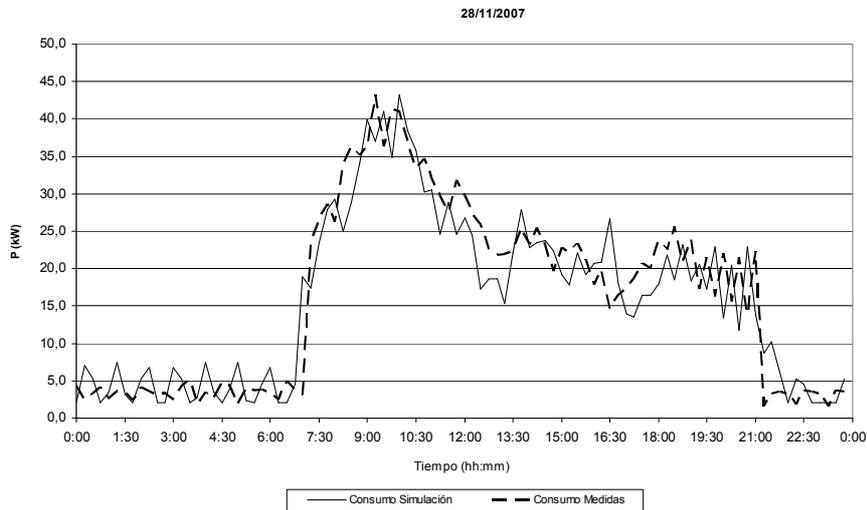


Figura 7.15 Consumo agregado real y modelado de un conjunto de máquinas de AA del edificio 5E

El consumo total real para el grupo de máquinas es de 389,17kWh y para el consumo de agregación simulado es de 372,67kWh. Cuantificando el error cometido se obtiene que el $RECM = 4,5$.

Por tanto, con la metodología presentada, es posible para una determinada instalación disponer de datos de consumo en el uso final climatización, sin necesidad de realizar la medida, a través del modelado. Existen muchas situaciones en las que no es posible obtener medidas reales como, por ejemplo, que la instalación no esté aún desarrollada, no sea posible realizar la media por el diseño de la instalación en la que los equipos de aire se alimentan desde cuadros distintos, por motivos económicos, etc.

7.7 Conclusiones del capítulo

A la hora de entrenar las redes presentadas en el capítulo anterior para poder realizar la previsión del consumo para un determinado punto de medida, se plantea la posibilidad de utilizar distintas fuentes de datos. Si es posible, las redes se deben entrenar con datos obtenidos a partir de medidas en el punto de suministro de interés, por ejemplo datos de medidas de la energía activa cuarto-horaria consumida. Las medidas pueden obtenerse con cualquier analizador de redes del mercado, que incluso pueden almacenar largos periodos de tiempo o, también, es posible utilizar las medidas obtenidas a través del sistema presentado en el Capítulo 4, que cuenta con diferentes ventajas como el almacenamiento en una base de datos de fácil y rápido acceso,

verificación de errores por parte del programa de adquisición, homogeneidad en los datos, etc.

Como alternativa, muy importante, a la utilización de datos medidos de las instalaciones, cabe considerar el uso, en el proceso de entrenamiento de las redes, de los datos de consumo obtenidos a partir de simulaciones de modelos físicos. Así, para cada proceso o *uso final*, en el que se descompone un determinado consumo es posible simular el consumo con la utilización de modelos físicos. Como ejemplo de la metodología, en particular, se presentan modelos contrastados para cargas de climatización. A partir de éstos y de las dimensiones físicas de las estancias en la que se encuentren instalados los equipos es posible obtener una simulación del consumo real de los equipos. En el presente capítulo, después de describir dichos modelos y las ecuaciones que los rigen, se presenta la validación de los mismos en instalaciones donde se dispone de un gran número de equipos de las mismas características, con el uso de un método de agregación de los consumos individuales. Además, también se propone una metodología para realizar la simulación de un conjunto de máquinas de características distintas, comprobando la bondad de las simulaciones con medidas reales.

Con el uso de modelos, se pueden entrenar las redes para obtener la previsión del consumo en situaciones donde no sea posible física o económicamente realizar medidas en el punto eléctrico de interés o incluso, obtener previsiones anteriores a la construcción de una determinada instalación para, por ejemplo, realizar un análisis de los consumos que se tendrán una vez ejecutada la misma y evaluar las posibilidades de respuesta de la demanda de unos determinados consumidores sin la necesidad de realizar medidas en cada una de las instalaciones.

CAPÍTULO 8

NUEVA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PERFILES DE CONSUMO: DISEÑO Y RESULTADOS

8.1 Introducción

A la hora de plantear el problema de predicción del consumo en un determinado punto de suministro muchas son las variables que deben tenerse en cuenta. Este problema, como se ha comentado anteriormente, ha sido abordado desde muchos y distintos puntos de vista en la literatura, donde cada aproximación al problema se ha planteado con fines distintos. El planteamiento que se presenta en este trabajo va dirigido al cálculo del perfil del consumo en un determinado punto de medida de bajo nivel de agregación de cargas, para el día siguiente al que se realiza la previsión. El cálculo se realiza en la última hora del día y se tendrán en cuenta la previsión de ciertos parámetros para el día de predicción, como la temperatura exterior, tipo de día, etc. También, será necesario conocer los consumos de días anteriores en los que poder basar la predicción.

En el ámbito de la respuesta de la demanda, existen diversas razones que justifican la necesidad de una predicción fiable del consumo, una de las más importantes radica en que ésta debe servir de base para calcular la efectividad de las acciones que puedan tomarse en un cliente o que él mismo puede tomar como respuesta a una petición por parte del administrador de un determinado programa de respuesta de la demanda. Ambas partes necesitan tomar como válida la curva de consumo resultado de la predicción, pues una vez tomada la acción, por ejemplo desconexión de alguna parte de un proceso productivo, de la instalación de climatización central, etc., el consumo variará respecto al que se habría producido si no se hubiera tomado ninguna acción. Así, para cuantificar la bondad de la misma, es necesario calcular la diferencia de energía consumida entre la curva real de consumo y la predicción obtenida, que indica el consumo que se habría producido de no realizar ninguna acción.

En los procesos reales influyen muchas variables como puede ser la temperatura exterior, el día de la semana, el periodo del año, horarios de conexión de los equipos, temperaturas de consigna, etc. Por tanto, es necesario tener en cuenta todos estos parámetros a la hora de realizar el cálculo de la predicción, aunque debe de plantarse en qué momento del cálculo es mejor tener en cuenta cada una de las variables para obtener una predicción que sea lo más fiable posible.

La técnica de predicción a utilizar en el cálculo de las previsiones son las redes neuronales, método abordado en el Capítulo 6, donde se presenta la arquitectura de las redes a utilizar, los parámetros de entradas y de entrenamiento, etc. (Apartado 6.6).

8.2 Nueva propuesta de cálculo del perfil de consumo por usos finales

En el presente trabajo se plantea una metodología de cálculo para la predicción del consumo para las 24 horas siguientes al instante en el que se realiza la predicción. El método propuesto permite obtener los 96 valores de energía activa cuarto-horaria consumida en un determinado punto de consumo. Se elige esta unidad de medida para evitar el uso de valores instantáneos y, además, de forma inmediata es posible calcular la potencia media cuarto-horaria escalando los valores con un factor de 4.

Debido al bajo nivel de agregación de los consumos considerados, el método de predicción se plantea por procesos o *usos finales* (UF), ya que así se podrán entrenar redes distintas para cada uno de los usos. Para obtener la predicción de un consumo se parte de la descomposición del mismo en distintos usos finales. Los datos de cada uno de ellos puede que:

- Estén disponibles de medidas realizadas en los distintos procesos, por ejemplo, adquiridas a través del sistema de gestión integral propuesto en el Capítulo 4.
- Se obtengan a través de modelos de los distintos procesos. Un ejemplo del cálculo de consumos por simulación de los distintos sistemas se ha presentado en el Capítulo 7, en el que se detalla la simulación de los consumos para el uso final de climatización.

Con los datos de los consumos de los distintos usos finales y los valores de los parámetros de los que dependen dichos consumos, como son la laboralidad, temperaturas, etc., (Apartado 6.6), se realiza el entrenamiento de las redes neuronales. Una vez entrenadas, con la predicción de las variables de entrada para el día de cálculo, se obtiene, con el uso de las técnicas neuronales presentadas en el Capítulo 6, la predicción de cada uso final, para finalmente obtener la predicción del consumo como combinación de éstas (Figura 8.1).

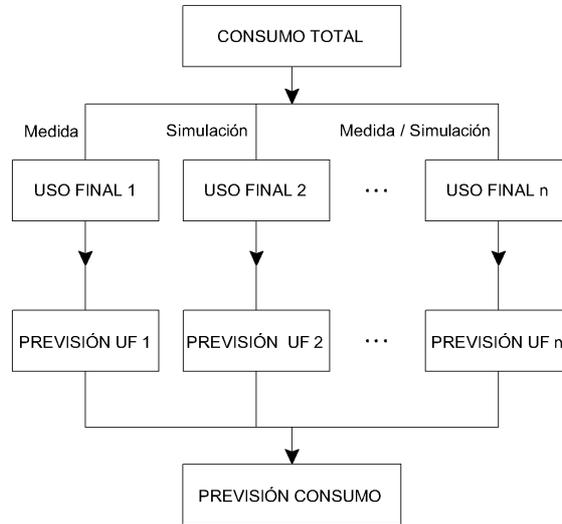


Figura 8.1 Metodología de predicción del consumo por Usos Finales

Se presenta detalladamente la metodología propuesta para obtener la predicción en un determinado consumo. Los distintos pasos a realizar son:

Paso 1: *Obtención del valor de las entradas del día de previsión.* Según la red neuronal propuesta (Apartado 6.6), se debe obtener la previsión de la temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media para el día de cálculo. También, se utiliza la temperatura media del día anterior, necesarios para poder realizar la previsión del consumo una vez se hayan entrenado las redes.

Por el nivel de agregación de los consumos en los que se pretende realizar la previsión, habitualmente un solo edificio, para el día objetivo se debe conocer el horario de uso de los distintos usos finales. Este horario en la mayoría de los casos es el mismo que el de los días de los que se dispongan datos que tengan el mismo valor de *Laboralidad*. Con este parámetro es posible identificar las situaciones de cambio de usos, etc.

Paso 2: *Selección de los días de entrenamiento.* Para cada uso final en el que se descompone el consumo, se dispondrá de medidas de consumo de días anteriores (consumo de energía activa cada 15 minutos). Dichos datos por uso final, como se ha indicado, pueden obtenerse bien midiendo en las instalaciones del usuario (Capítulo 4) o a través de simulaciones de los distintos procesos o usos finales (capítulo 7). Para cada valor de energía se dispone de un parámetro, *horario*, que indica si el proceso está consumiendo energía o no.

Para caracterizar los días con la temperatura se define un parámetro que es el *CT*, *Coeficiente de Temperatura*, del día, cuya expresión es:

$$CT = T_{MAX} + T_{MED} + T_{MIN}$$

La fecha para la que se desea realizar la predicción debe tener asignado un parámetro correspondiente al tipo de día denominado *Laboralidad*, según la actividad laboral del día, que depende de la localización, del punto de suministro, etc. (Apartado 5.7.1).

También, se dispone, por uso final, de un parámetro que caracterice el *Tiempo de arranque* de cada uno de ellos, tiempo durante el cual arranca una instalación y el sistema tiende a consumir lo mismo independientemente de la temperatura exterior.

Para cada uso del que se tiene de medidas, con el transcurso del tiempo, se dispondrá de mayor cantidad de datos, por lo que hay que definir una metodología de elección de los datos en los que debe basarse la predicción:

- En usos finales con fuerte dependencia de la temperatura exterior se seleccionan los 4 días más similares al de predicción según la siguiente tabla de decisión:

| ORDEN SELECCIÓN | 1 | 2 | 7 | 3 | 4 | 8 | 5 | 6 | 9 |
|------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| DÍAS DE BÚSQUEDA | 30 | 30 | 30 | 90 | 90 | 90 | 360 | 360 | 360 |
| CT+2 | X | | | X | | | X | | |
| CT+1 | X | X | | X | X | | X | X | |
| CT-1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| CT-2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| CT-3 | | X | X | | X | X | | X | X |
| CT-4 | | | X | | | X | | | X |
| CT+4 | | | X | | | X | | | X |
| CT+3 | | X | X | | X | X | | X | X |
| CT+2 | | X | X | | X | X | | X | X |
| CT+1 | | X | X | | X | X | | X | X |
| CT-1 | | X | | | X | | | X | |

Tabla 8.1 Criterios de selección en Usos Finales con fuerte dependencia con la temperatura

Así, en el primer grupo, opción marcada con orden de selección 1, se elige de entre los últimos 30 días, dos días con CT superior más próximo al de predicción (CT+1, CT+2) y otros dos días con CT inferior más próximo al de predicción (CT-1, CT-2) con *Laboralidad* similar. El rango de días a considerar con el parámetro de *Laboralidad* es posible definirlo con un intervalo. En cualquier elección de los datos de un día hay que verificar que el día contiene datos válidos, ya que es posible que haya falta de datos durante algún instante por problemas en la adquisición de los mismos.

Si no existen datos que cumplan esta opción, se prueba la marcada con orden de selección 2, donde hay 1 día con CT superior (CT+1) y 3 días con CT inferior más próximo (CT-1, CT-2, CT-3) y así sucesivamente.

- En otros usos finales sin dependencia de la temperatura se seleccionan los 4 días más cercanos con la misma *Laboralidad*.

- En los usos finales en los que se desee considerar una pequeña dependencia con la temperatura se eligen, de entre los últimos 30 datos, aquellos que tengan la misma *Laboralidad* y de éstos se eligen los 4 días que tengan el CT más cercano. En el caso de que no existan 4 días con la misma laboralidad se consideran 90 días anteriores y si tampoco hubiera datos, entonces se consideran 360 días.

Cabe destacar que para el tipo de consumos para los que se plantea el método de predicción no se debe utilizar un gran número de datos para entrenar las redes, ya que al presentar gran aleatoriedad, por el pequeño grado de agregación, un edificio o un pequeño número de edificios, al utilizar muchas medidas se introduce gran aleatoriedad, incontrolada, en los datos de entrenamiento. Por tanto, se intenta elegir un número reducido de días de entrenamiento, pero que tengan un consumo lo más aproximado posible al día a predecir, y con la mayor información posible, por lo que se eligen días con consumos, en principio, tanto superiores como inferiores. En el Apartado 8.10.1 se realiza un análisis de la elección del número de días de entrenamiento para las redes utilizadas.

Paso 3: Obtención de los datos de los días elegidos. Una vez elegidos los días que sirven para entrenar las redes se debe verificar para cada hora que el *Horario* en los datos coincide con el del día de predicción.

- En el caso de que coincidan se toman los datos seleccionados
- En otro caso, se deben tomar los datos anteriores a esa hora que coincida con el mismo *Horario*. Además, durante las horas definidas por el coeficiente de *Tiempo de arranque* se deben considerar los datos de días anteriores correspondientes a este periodo y el resto de datos se mantienen sin modificar.

En el caso de usos finales de los que no se disponga de medidas, los datos que se utilizan se obtienen de la simulación de los modelos de los distintos usos finales. Solamente es necesario realizar 4 simulaciones con las temperaturas de días que cumplan lo indicado en los puntos anteriores y con los horarios coincidentes al día de previsión. Por tanto, para cada día seleccionado por CT, se realizan las simulaciones necesarias para obtener el consumo de energía activa para el uso final considerado con dichas condiciones, lo que permite obtener datos significativos para poder entrenar las redes y poder realizar la predicción.

En el caso de elegir los datos con las opciones 5, 6 y 9, se puede utilizar una corrección de los datos si presentan tendencias, por ejemplo, incremento en el consumo por crecimiento de la instalación considerada (Apartado 8.10.2).

Paso 4: Entrenamiento de las 96 redes. Así, para cada uso final, con los datos elegidos según los criterios del punto anterior y los datos de las variables de entrada para dichos días, se entrenan 96 redes neuronales, una para cada valor cuarto-horario. El método utilizado para entrenar los nodos de las capas ocultas de dicho modelo

neuronal es el algoritmo de retropropagación de errores o BP (Back-Propagation) [84]. Los datos de entrenamiento de los días elegidos no deben coincidir por lo que, si es necesario, se realiza un proceso de formateo de datos introduciendo un pequeño valor aleatorio a cada día, con lo que el dato no se ve afectado.

Paso 5: Predicción de las 96 redes. Así, con los parámetros de entrada previstos para el día a predecir y el uso de las redes neuronales entrenadas, se obtienen las 96 previsiones de energía activa cuarto-horaria para cada uso final. Posteriormente, se realiza la suma de ellas, para cada valor cuarto-horario, obteniendo así una predicción del consumo total.

Paso 6: Validación de la predicción. Es necesario establecer un método de verificación de la salida de las redes. Se propone comparar la previsión obtenida con el consumo en el día anterior con CT cercano y comprobar que la desviación no debe ser superior a un 10 % si los horarios coinciden. Si los horarios no coinciden, se debe realizar la misma comprobación considerando sólo el consumo en las *horas On* de los dos días. En el caso de no cumplir el criterio, se eligen nuevos días de entrenamiento (no se consideran los elegidos previamente) y se realiza una nueva predicción.

Paso 7: Cálculo del error de previsión. Antes de realizar la siguiente predicción se calcula el error cometido en el cálculo anterior. Para valorar la calidad de las predicciones, en este trabajo, se utilizan dos de los índices presentados el MAPE y EME (Apartado 5.6), ya que son índices habitualmente utilizados en la mayoría de trabajos relacionados y permiten caracterizar fácilmente la bondad de las predicciones.

En la Figura 8.2 se presentan los distintos pasos planteados en el método propuesto.

PARA CADA USO FINAL

Previsión día j



Figura 8.2 Etapas del método de predicción propuesto

El método presentado tiene como principal objetivo ser integrable en el SGI propuesto (Capítulo 4). De esta forma, con el uso de las medidas obtenidas a través de éste, la obtención de las predicciones de temperatura posible por disponer de conexión con Ethernet, la presentación de resultados, etc., se aprovechan todas las ventajas del sistema y, además, se está en disposición de servir como herramienta de predicción necesaria para el planteamiento de un sistema de retribución adecuado en cualquier programa de respuesta de la demanda en el propio SGI.

En los próximos apartados se presentan aplicaciones del método descrito a distintos clientes considerando diferentes casos, clientes de los que se disponen medidas de los usos finales, otros en los que hay que realizar la simulación de algún uso final, consumos con distinto nivel de agregación, etc. Esto permitirá realizar un análisis de la bondad del método y extraer las principales conclusiones.

8.3 Aplicación para la predicción del consumo en la UPV

En la actualidad, la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) está formada por más de 42.000 miembros, de ellos cerca de 37.800 son alumnos, 2.600 son profesores y 1.700 integran el grupo de personal de administración y servicios.

La UPV es un consumo tipo del sector comercial. Tiene una potencia contratada de 11.500W y el consumo energético anual supera los 50.000GWh, correspondiente a unos 66 edificios con usos distintos como departamentales, docentes, laboratorios, etc.

Analizando los datos de consumo disponibles de la UPV se considera que el consumo depende directamente de dos variables: la *Laboralidad* y de la *Temperatura* ambiente.

Para caracterizar la actividad que se da en la UPV se distinguen distintos tipos de días para los que se asignan los siguientes valores para la Laboralidad:

| TIPO DE DÍA | P. NORMAL | P. VACACIONES |
|---------------------------|-----------|---------------|
| Lunes | 1,00 | 0,78 |
| Martes, Miércoles, Jueves | 0,96 | 0,75 |
| Viernes | 0,90 | 0,71 |
| Sábado | 0,60 | 0,55 |
| Domingo | 0,50 | 0,48 |
| Media jornada | 0,64 | - |
| Festivo | 0,30 | - |

Tabla 8.2 Laboralidad según el tipo de día en la UPV

Con estos parámetros se asigna para cada día del año un valor que caracteriza el consumo según el tipo de día.

Como se ha indicado en el apartado anterior, la predicción del consumo se realiza por usos finales, por lo que en la UPV se distinguen, en este cálculo, dos usos. Se denota con Uso Final 1 a todos los consumos fuertemente dependientes de la temperatura, como son los sistemas de aire acondicionado, y el Uso Final 2 al resto. El coeficiente de Laboralidad se tiene en cuenta el mismo tanto para el Uso final 1 como para el Uso Final 2, pues los dos dependen del tipo de día (hay un mayor consumo de aire acondicionado y de usos generales cuando hay una mayor afluencia de personas a la universidad).

En este cliente sólo se dispone de datos de medida del Consumo Total, por lo que se debe realizar el modelado de cada uno de los dos usos, para lo que se han realizado distintas acciones. Con el objetivo de identificar los consumos correspondientes al Uso Final 2, uso no dependiente de la temperatura, se han utilizado medidas de otros edificios en los que se han medido circuitos que no alimenten a líneas de aire acondicionado y se ha modelado cual es la curva agregada de los distintos edificios, obteniendo una curva total para la UPV.

Por otro lado se ha identificado la curva del consumo dependiente de la temperatura, modelando su consumo y se ha verificado que es muy similar a la diferencia entre el consumo total medido y el consumo del Uso Final 2, previamente calculado. Así, finalmente, se ha tomado como Uso Final 1, dependiente de la temperatura, la diferencia entre el Consumo Total y el Uso Final 2.

Para realizar las distintas predicciones, tanto en este apartado como en los demás clientes estudiados, se utilizan dos métodos de predicción para poder realizar un correcto análisis de la metodología propuesta:

- Obtención de la previsión del consumo total utilizando los datos totales de consumo (CT).
- Obtención de la previsión del consumo como resultado de obtener la predicción como suma de los diferentes usos finales (UF).

Como ejemplo se presentan los resultados del método de predicción propuesto para el cálculo del consumo total de la UPV para el lunes, 25 de junio de 2007. Para poder realizar la previsión se toman como valores previstos para este día:

| LABORALIDAD | T _{MAX} | T _{MIN} | T _{MED} | T _{MED-1} ¹ | CT |
|-------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------|---------|
| 1 | 37,61°C | 19,95°C | 29,05°C | 24,12°C | 86,60°C |

Tabla 8.3 Datos para el cálculo de la predicción del consumo de la UPV para el 25/06/2007

En este caso, al considerar sólo los datos de Consumo Total, éste es dependiente de la temperatura por lo que, según lo indicado en el Paso 2 de la metodología, para la selección de los días con los que se realiza la predicción se utiliza la Tabla 8.1. En este caso teniendo en cuenta la *Laboralidad* y el *CT*, considerando los

¹ Indica la temperatura media del 24/06/2007, día anterior al considerado.

datos disponibles, el criterio de selección es el 6 (360 días, CT+1, CT-3). Los días elegidos son 24/07/2006 (CT=86,88°C), 31/07/2006 (CT=84,25°C), 17/07/2006 (CT=75,83°C) y 10/07/2006 (CT=73,91°C).

Con los datos de consumo de los días elegidos se entrenan las distintas redes y con los valores de la Tabla 8.3 se realiza la predicción de los 96 valores de energía activa cuarto-horaria del consumo total. En la Figura 8.3 se presentan los resultados obtenidos.

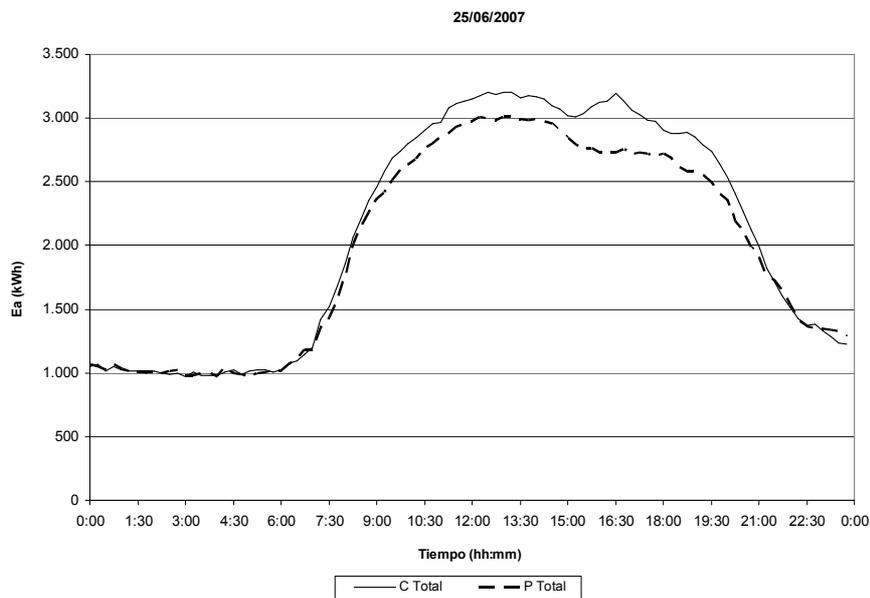


Figura 8.3 Predicción del consumo de la UPV para el 25/06/2007

En la gráfica se representa con la serie *C Total* el consumo total real de la UPV y con *P Total* la predicción del consumo obtenida con el método propuesto utilizando los datos del consumo total.

La predicción presenta un error $MAPE = 4,88$ y un error $EME = 5,95$.

Los valores del consumo calculados son generalmente inferiores a los reales por ser este día uno de los primeros más calurosos del año. Los datos de los que dispone la red para calcular la predicción son días más templados que éste y/o días igual de calurosos pero del año anterior, en los que no se refleja el incremento anual del consumo que se produce en la UPV por el crecimiento de los consumos en la universidad, aspecto que se considera en el Apartado 8.10.2, con la mejora introducida al modificar los datos de entrenamiento de días muy alejados del de previsión.

Por otra parte, se realiza la predicción del consumo total de la universidad como suma de las predicciones de cada uno de los dos usos finales considerados.

Para el Uso Final 1, fuertemente dependiente de la temperatura, según la Tabla 8.1, el criterio de selección elegido es el 6 y por tanto los días a considerar para este uso son los mismos que en el caso anterior.

En cambio, en el Uso Final 2, no dependiente de la temperatura, según lo indicado en el Paso 2 del método, se eligen los días más próximos al de predicción con la misma *Laboralidad* por lo que los días elegidos para este uso final son 18/06/2007, 11/06/2007, 4/06/2007 y 28/05/2007, todos ellos con *Laboralidad* igual a 1.

Se realiza la predicción para cada Uso Final y se obtiene la previsión del Consumo Total como suma de las dos previsiones obtenidas. En la Figura 8.4 se presentan los resultados obtenidos.

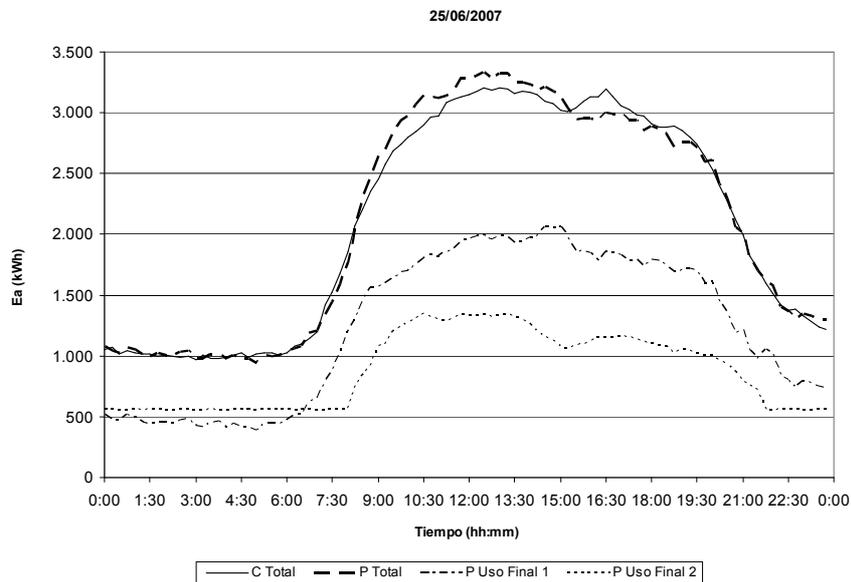


Figura 8.4 Predicción del consumo de la UPV para el 25/06/2007 por Usos Finales

En la gráfica se representa con la serie *C Total* el consumo total real de la UPV, con *P Uso Final 1* la predicción del Uso Final 1 (fuertemente dependiente de la temperatura), con *P Uso Final 2* la predicción del Uso Final 2 (no dependiente de la temperatura) y con *P Total* la predicción del consumo total obtenida a partir de las obtenidas para los usos finales.

La predicción presenta un error $MAPE = 3,16$ y un error $EME = 3,36$ sensiblemente inferiores a los obtenidos con el método anterior.

En la Figura 8.5 se presentan los resultados para una semana completa para este mismo cliente. Se presenta una semana en la que el jueves es festivo, por lo que se pueden observar los resultados para días laborables, sábados, domingos y festivos.

Por el nivel de agregación que presenta el consumo en estudio se obtienen predicciones con errores muy satisfactorios.

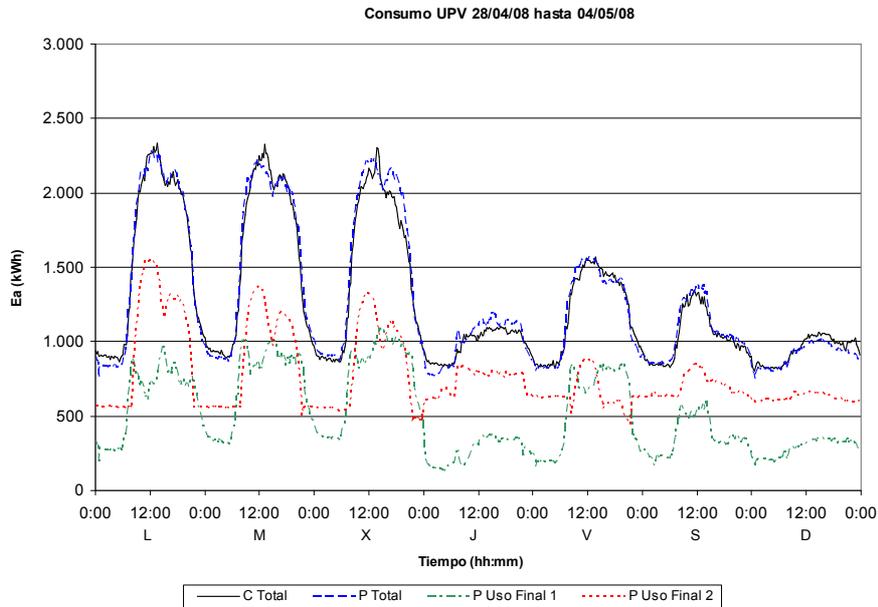


Figura 8.5 Previsión del consumo del 28/04/08 al 04/05/08 en la UPV

Para este periodo la previsión presenta un error $MAPE = 3,69$ y un error $EME = 3,58$. En la Tabla 8.4 se muestran los errores cometidos desglosados por días.

| | L 28/04 | M 29/04 | X 30/04 | J 01/05 | V 02/05 | S 03/05 | D 04/05 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| MAPE | 3,39 | 3,00 | 4,41 | 5,42 | 3,13 | 2,59 | 3,90 |
| EME | 2,70 | 2,93 | 4,78 | 5,38 | 3,05 | 2,72 | 4,01 |

Tabla 8.4 Errores en la previsión del consumo del 28/04/08 al 04/05/08 en la UPV

8.3.1 Análisis de un día con control activo del SGI

Con el sistema de gestión integral (SGI) desarrollado, presentado en el Capítulo 4, se controla una parte importante del consumo total de la Universidad Politécnica de Valencia. Una gran parte de éste está formado por circuitos que alimentan a equipos de aire acondicionado de los diferentes edificios. El control disponible en la actualidad es muy importante pues en periodo de verano, cuando la demanda de energía es mayor debido a las necesidades de climatización, el consumo total es de 13 MW y en este caso se llegan a controlar 2,5 MW.

Según se ha comentado en el Apartado 4.5.2, una de las aplicaciones que se han desarrollado en el SGI presentado, es *Control de Potencia Pico*, que permite definir un valor máximo de potencia contratada y el sistema automáticamente provoca el apagado de distintos equipos (líneas de control), siguiendo diferentes criterios de selección, de forma que sin disminuir el confort del usuario, se consigue reducir la potencia consumida en esos periodos de consumo elevado. Uno de los días en los que se realiza dicho control se presenta en la Figura 8.6, en la que también se representa la predicción del consumo que se habría tenido de no realizar ningún control, utilizando el método desarrollado.

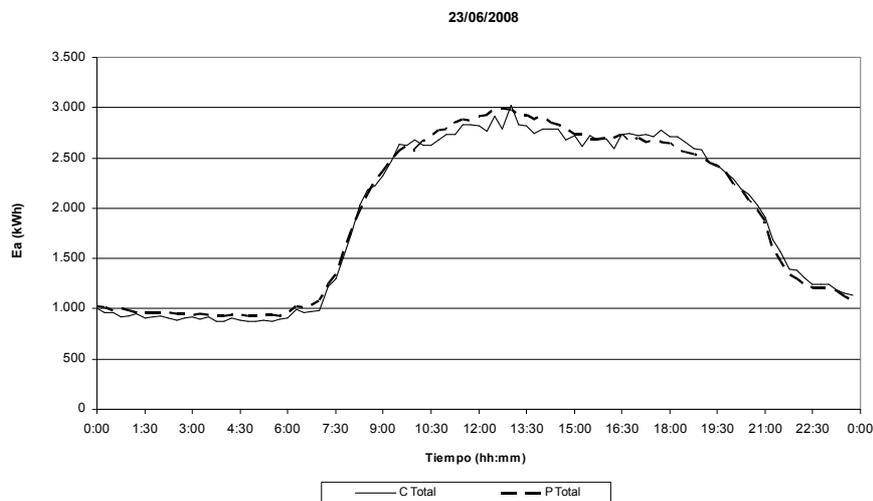


Figura 8.6 Consumo y predicción en la UPV para un día con CPP

En la figura se puede apreciar en el intervalo de 10:00 hasta las 15:00, las diferentes desconexiones de los equipos para conseguir reducir el pico en el horario de mayor demanda. También, se observa de 18:00-19:30 el periodo de recuperación de las máquinas donde se produce un mayor consumo del previsto. El umbral de potencia máxima para el que se realizan los cortes es de 11.500W (2.875kWh, para medida de energía cuarto-horaria) que es la potencia contratada para dicho periodo. El consumo máximo previsto habría sido de 12MW, consiguiendo un ahorro en los excesos de potencia correspondientes. Con dicho control la energía consumida es sólo 1% menor debido al periodo de recuperación.

8.4 Aplicación a un edificio con uso departamental

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos, aplicando el método propuesto, al realizar distintas previsiones del consumo en un edificio de la UPV con uso departamental.

El edificio considerado es el 7D – Departamento de Organización. Es un edificio de 5 plantas de 1.890m² construidos, donde se ubican distintos despachos para profesores, la secretaría del departamento y algunas salas de uso común, como sala de informática, sala para profesores y núcleos de aseos.

Los principales consumos del edificio son alumbrado de zonas comunes y despachos, circuitos de fuerza principalmente cargas de ofimática, como ordenadores, impresoras, etc. y en un porcentaje muy importante el consumo del sistema de aire acondicionado. El sistema de climatización está formado por un sistema de distribución de agua que alimenta a fancoils a dos tubos. La producción de agua caliente/fría se consigue con una bomba de calor Carrier modelo 30DQ-100-901-EE de 100kW. La difusión de aire se realiza con 22 fancoils, con 3 ó 4 unidades por planta, de Carrier modelo 42FMH01687 ó 42FMH00987. Por último, indicar que la distribución de agua se realiza con 3 bombas de unos 5kW cada una.

Como coeficientes de *Laboralidad* se han considerado los mismos que para el conjunto de toda la universidad, ya que se considera que la afluencia de usuarios es similar. Sin embargo, hay que indicar que los consumos en este edificio por el menor nivel de agregación son más imprevisibles o erráticos, pues dependen de factores tales como que en un curso lectivo se den más prácticas que en otros, haya más alumnos matriculados, etc.

Para este edificio se dispone de medidas del Consumo Total del edificio (CGBT, suministro de red) y del cuadro general de aire acondicionado (CGAA), por lo que para analizar el edificio se consideran dos usos finales. El Uso Final 1, fuertemente dependiente de la temperatura, correspondiente al consumo del CGAA y el Uso Final 2, no directamente dependiente de la temperatura, se considera como la diferencia de las medidas del CGBT y del CGAA.

Se presentan los resultados del cálculo realizado para la previsión del consumo del edificio para el viernes, 27 de junio de 2008. Como en el apartado anterior, primero se realiza el cálculo teniendo en cuenta sólo el Consumo Total y posteriormente se consideran los dos usos finales presentados.

Para poder realizar la previsión se toman como valores previstos para este día:

| LABORALIDAD | T _{MAX} | T _{MIN} | T _{MED} | T _{MED-1} | CT |
|-------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|---------|
| 0,9 | 29,11°C | 22,28°C | 25,61°C | 25,42°C | 77,00°C |

Tabla 8.5 Datos para el cálculo de la predicción del consumo del edificio 7D para el 27/06/2008

En este caso, al considerar sólo los datos de Consumo Total, la selección de los días con los que se calcula la predicción se realiza según la Tabla 8.1. Así, teniendo en cuenta la *Laboralidad* y el *CT* el criterio de selección es el 5 (360 días, CT+2, CT-2). Los días elegidos son 27/07/2007 (CT=78,05°C), 20/07/2007 (CT=77,20°C), 13/07/2007 (CT=72,89°C) y 06/07/2007 (CT=72,79°C).

Con los datos de consumo de los días elegidos se calculan los 96 valores del consumo total. En la Figura 8.7 se presentan los resultados obtenidos.

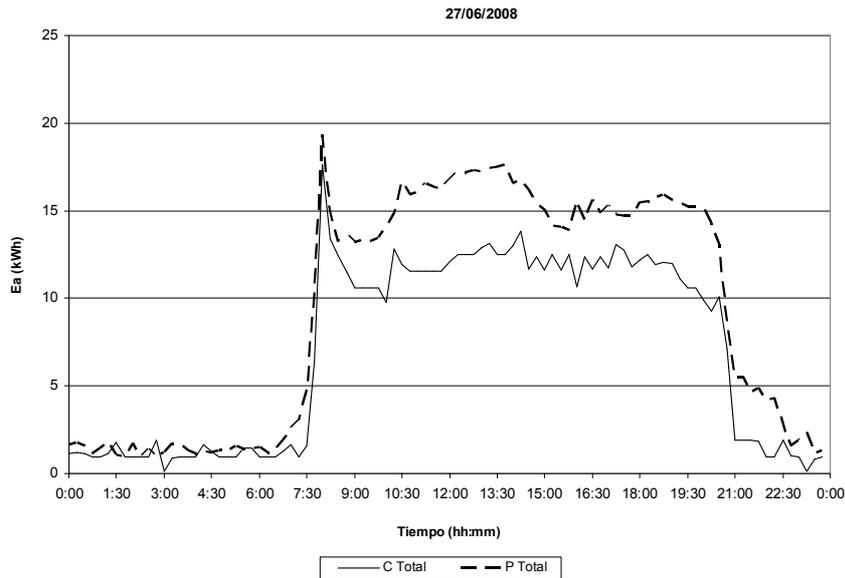


Figura 8.7 Predicción del consumo del edificio 7D para el 27/06/2008

La predicción presenta un error $MAPE = 78,29$ y un error $EME = 34,56$.

Se observa que en este caso la predicción del consumo total no es muy satisfactoria. Esto puede ser debido a que en los días considerados aunque la temperatura es similar al día de predicción los usuarios pueden realizar un uso distinto de las instalaciones y consumir de forma diferente.

Se realiza la predicción para el mismo día pero utilizando la descomposición del Consumo Total como suma de los usos finales presentados.

Para el Uso Final 1, fuertemente dependiente de la temperatura, según la Tabla 8.1 y teniendo en cuenta la *Laboralidad* y el *CT*, el criterio de selección es el 5 (360 días, $CT+2$, $CT-2$). Los días elegidos son 27/07/2007 ($CT=78,05^{\circ}C$), 20/07/2007 ($CT=77,20^{\circ}C$), 26/10/2007 ($CT=74,65^{\circ}C$) y 13/07/2007 ($CT=72,89^{\circ}C$). Los días elegidos en este caso no coinciden con los elegidos para el cálculo con sólo el Consumo Total por falta de datos en alguno de los cuadros medidos. Así, por ejemplo, para 26/10/2007 existe medida del CGAA pero no existen datos del punto de medida del CGBT, por lo que este día no podía utilizarse en la predicción del caso anterior.

En cambio, el Uso Final 2, no dependiente de la temperatura, según lo indicado en el *Paso 2* del método, se eligen los días más próximos al de predicción con la misma *Laboralidad* por lo que los días elegidos para este uso final son 20/06/2008, 6/06/2008, 30/05/2008 y 23/05/2008, todos ellos con *Laboralidad* igual a 0,9, por lo que se

consideran sólo 35 días de datos anteriores. El 13/06/2008 no se considera por no disponer de datos.

Se realiza la predicción para cada Uso Final y se obtiene la previsión del Consumo Total como suma de las dos predicciones obtenidas para cada uno de ellos. En la Figura 8.8 se presentan los resultados obtenidos.

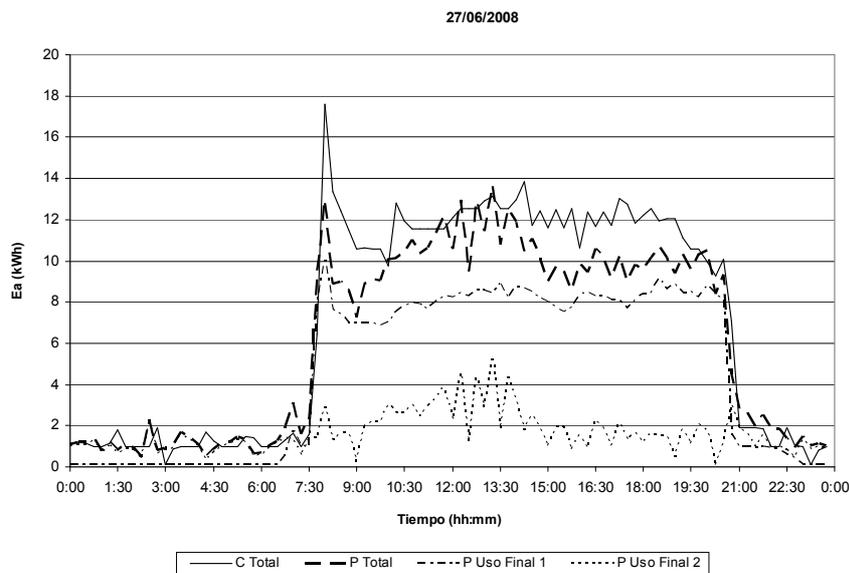


Figura 8.8 Predicción del consumo del edificio 7D para el 27/06/2008 por Usos Finales

La predicción presenta un error $MAPE = 39,19$ y un error $EME = 17,84$. Hacer hincapié en la gran diferencia entre los dos índices, debido a que el $MAPE$ es muy sensible en los valores de consumo pequeños, por lo que se justifica el empleo de ambos en las distintas predicciones para poder realizar un correcto análisis de los resultados.

En este caso también se observa que los errores son menores al usar el método de predicción considerando usos finales que calculando la previsión directamente del Consumo Total. A pesar de los ejemplos presentados, no siempre se obtiene una predicción mejor al usar este método. En el Apartado 8.8 se analiza, considerando un gran número de predicciones, en qué condiciones es mejor utilizar un método u otro.

En la Figura 8.9 se presentan los resultados para una semana completa para este consumo. Al ser el consumo con muy bajo nivel de agregación, un único edificio de pequeño tamaño, y por los usos concretos de sus instalaciones presenta mayor aleatoriedad en los usos que uno con mayor agregación, por lo que los errores que se cometen son sensiblemente superiores al caso presentado en el apartado anterior.

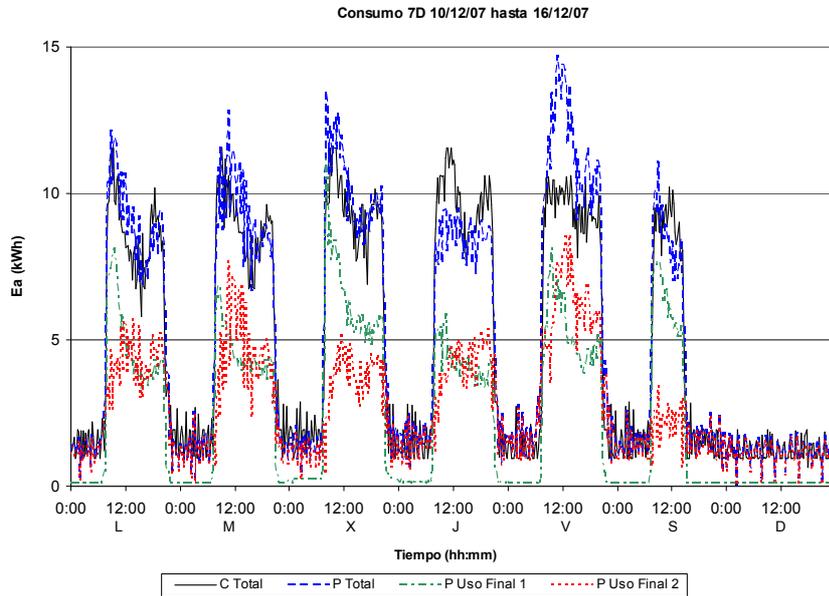


Figura 8.9 Previsión del consumo del 10/12/07 al 16/12/07 en el edificio 7D

Para este periodo la previsión presenta un error $MAPE = 25,78$ y un error $EME = 17,01$. En la Tabla 8.6 se muestran los errores cometidos desglosados por días.

| | L 10/12 | M 11/12 | X 12/12 | J 13/12 | V 14/12 | S 15/12 | D 16/12 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| MAPE | 17,42 | 24,15 | 19,15 | 26,12 | 35,83 | 28,81 | 28,95 |
| EME | 12,73 | 15,98 | 12,05 | 16,49 | 24,47 | 18,19 | 29,05 |

Tabla 8.6 Errores en la previsión del consumo del 10/12/07 al 16/12/07 en el edificio 7D

8.5 Aplicación a un edificio docente

A continuación, se presenta la aplicación del método propuesto para un edificio docente de la UPV, el edificio 7I-7J de Administración de Empresas (ADE) y Cartografía. Es un edificio de 21.797m² en donde se ubican distintas aulas docentes, aulas de informática, despachos de profesores y servicios generales como dirección, secretaría, etc.

El edificio dispone de un sistema de climatización central formado por tres unidades de producción, fancoils y climatizadores para difusión del aire por las plantas. Como unidades de producción hay instaladas dos bombas de calor McQuay de 145kW y una enfriadora McQuay de 161kW. En el edificio hay instalados 63 climatizadores de potencias entre 8-36kW y 325 fancoils de 200-600W. El edificio dispone de una

instalación para la distribución del agua a cuatro tubos, por lo que el sistema puede estar atendiendo demandas de climatización de frío y calor simultáneamente.

En este caso se dispone de datos de medida de los dos usos finales principales del edificio, por lo que no es necesario el modelado de los sistemas. Se cuenta, por un lado, de medida en el interruptor automático general del aire acondicionado (CGAA), que mide todo el consumo de dicha instalación, tanto producción como climatizadores, fancoils, bombas, etc. Por otro lado, se dispone de medida del automático general del edificio (CGBT), que incluye todos los consumos del edificio salvo el aire acondicionado. Así, el primer punto de medida, CGAA, caracteriza a un tipo de consumo fuertemente dependiente de la temperatura, por lo que este uso final dependerá de la *Laboralidad* y de la *Temperatura* exterior. El segundo punto de medida es principalmente dependiente de la *Laboralidad*.

En este caso, también, se consideran los mismos valores para el parámetro de laboralidad que los definidos para la UPV en su conjunto (Tabla 8.2).

Las medidas de cada uso se han obtenido con el sistema de gestión integral desarrollado en el presente trabajo. Los datos de consumo tienen una precisión de décimas de kWh, por lo que puede ocurrir, sobre todo en las horas nocturnas con poca actividad en el edificio que estas coincidan de unos días a otros, por lo que para realizar el entrenamiento de las redes neuronales se introduce un pequeño valor aleatorio (milésimas de kWh), tal y como se indica en el *paso 5* del método.

Se presentan los resultados del cálculo realizado para la previsión del consumo del edificio para el jueves, 15 de mayo de 2008. Como en los apartados anteriores, primero se realiza el cálculo considerando sólo el Consumo Total y posteriormente se utilizan los dos usos finales presentados.

Para poder realizar la previsión se toman como valores previstos para este día:

| LABORALIDAD | T _{MAX} | T _{MIN} | T _{MED} | T _{MED-1} | CT |
|-------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|---------|
| 0,96 | 27,00°C | 15,95°C | 19,80°C | 18,02°C | 62,78°C |

Tabla 8.7 Datos para el cálculo de la predicción del consumo del edificio 7I-7J para el 15/05/2008

En el primer caso en el que se considera un único uso, el Consumo Total, los datos utilizados para obtener la previsión se considera la suma de los dos puntos de medida, el del CGBT más el del CGAA, por lo que solamente se dispondrá de valores para aquellos días en los que se tenga medida de los dos. Como este consumo depende fuertemente de la temperatura la selección de los datos sigue los criterios de la Tabla 8.1, como en los casos anteriores. Con los datos disponibles, el criterio de selección elegido es el 2 (30 días, CT+1, CT-3), por lo que los días considerados para calcular la previsión son 24/04/2008 (CT=64,17°C), 23/04/2008 (CT=61,39°C), 30/04/2008 (CT=59,73°C) y 22/04/2008 (CT=56,56°C). En la Figura 8.10 se presentan los resultados obtenidos.

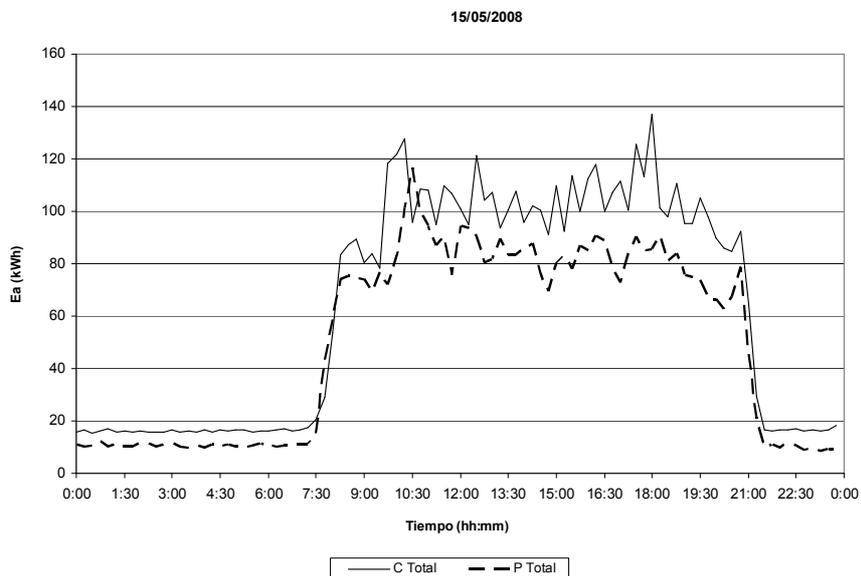


Figura 8.10 Predicción del consumo del edificio 71-7J para el 15/05/2008

La predicción presenta un error $MAPE = 26,79$ y un error $EME = 22,08$.

Para realizar la predicción utilizando los usos finales, en este caso, se dispone de medidas para cada uno de ellos. Se denota como Uso Final 1 al punto de medida correspondiente al CGAA y Uso Final 2 al CGBT. Hay que resaltar que por el diseño de la instalación eléctrica de este edificio el consumo del aire acondicionado no está incluido en el general del edificio, ya que se dispone de dos acometidas independientes.

Así, para el Uso Final 1, dependiente de la temperatura, según la Tabla 8.1, el criterio de selección es el 2 (30 días, CT+1, CT-3), por lo que los días elegidos son 24/04/2008 (CT=64,17°C), 23/04/2008 (CT=61,39°C), 30/04/2008 (CT=59,73°C) y 22/04/2008 (CT=56,56°C), que coinciden con el caso anterior, ya que el Consumo total se ha obtenido como suma de los dos puntos de medida.

En cambio, en el Uso Final 2, no dependiente de la temperatura, se eligen los días más próximos al de predicción con la misma *Laboralidad* por lo que los días elegidos para este uso son 14/05/2008, 13/05/2008, 08/05/2008 y 07/05/2008, todos ellos con *Laboralidad* igual a 0,96, por lo que se consideran sólo 8 días de datos anteriores.

En la Figura 8.11 se presentan los resultados obtenidos al calcular la predicción del Consumo Total como suma de las predicciones de cada Uso Final.

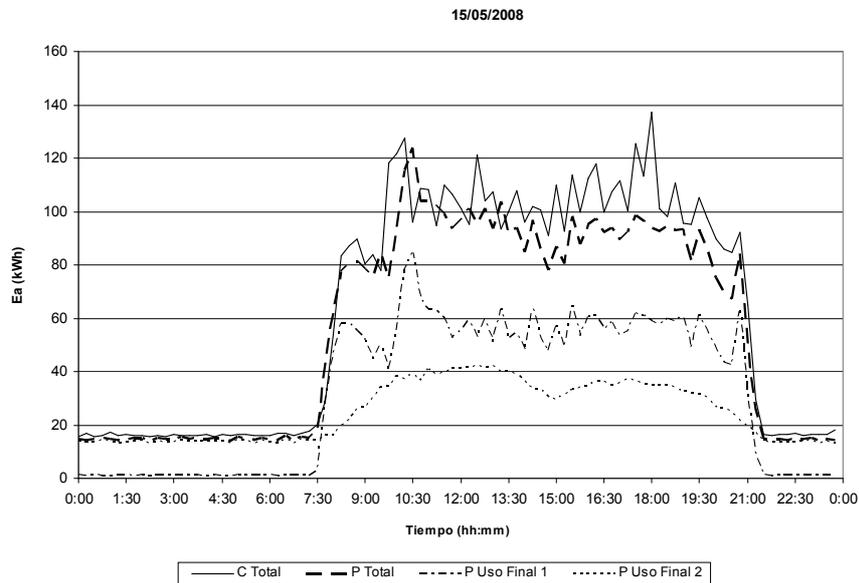


Figura 8.11 Predicción del consumo del edificio 7I-7J para el 15/05/2008 por Usos Finales

La predicción presenta un error $MAPE = 11,83$ y un error $EME = 13,44$.

En este ejemplo se pone de manifiesto que al obtener la predicción de cada uso final individualmente, la predicción mejora. Este resultado se produce cuando se realiza la predicción de un consumo para un día en el que afecta de forma muy distinta a cada uso final. Así, para este día el Uso Final 1 se ve fuertemente afectado pues las temperaturas del día son muy altas y el Uso Final 2 es el consumo habitual de un jueves laborable, por lo que los errores son mucho menores al usar el método de predicción considerando Usos Finales que calculando la previsión directamente a partir del Consumo Total.

En la Figura 8.12 se presentan los resultados para una semana completa para este mismo edificio. En este caso, se realiza la predicción del consumo de un solo edificio, pero con importantes consumos, por lo que los resultados mejoran sensiblemente respecto el estudio realizado en el apartado anterior, ya que la instalación presenta menor aleatoriedad en sus usos. Los edificios de gran tamaño con sistemas de climatización centralizados presentan consumos más estables, menos erráticos, que otros edificios, por ejemplo con climatización a través de equipos partidos, ya que los horarios de uso se establecen de forma centralizada, normalmente iguales para el mismo tipo de día, como laborables, festivos, etc. Así, se pone de manifiesto que a mayor nivel de agregación en los consumos, o mayor estabilidad en los mismos, mejores resultados se obtienen.

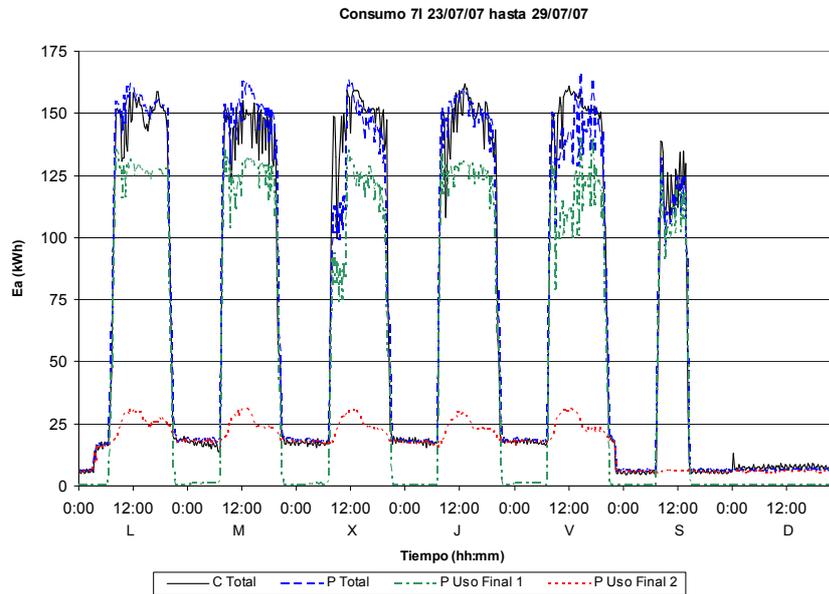


Figura 8.12 Previsión del consumo del 23/07/07 al 29/07/07 en el edificio 71-7J

Para este periodo la previsión presenta un error $MAPE = 9,57$ y un error $EME = 7,32$. En la Tabla 8.8 se muestran los errores cometidos desglosados por días.

| | L 23/07 | M 24/07 | X 25/07 | J 26/07 | V 27/07 | S 28/07 | D 29/07 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| MAPE | 5,84 | 8,66 | 9,11 | 5,90 | 8,09 | 13,47 | 15,93 |
| EME | 4,07 | 6,85 | 10,22 | 5,26 | 8,44 | 9,32 | 16,91 |

Tabla 8.8 Errores en la previsión del consumo del 23/07/07 al 29/07/07 en el edificio 71-7J

8.6 Predicción del consumo en un cliente comercial

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al calcular la previsión del consumo en un cliente comercial del que solamente se disponen medidas del consumo total de la instalación, por lo que no se dispone de medidas de los consumos por usos finales.

Para el calculo de la previsión, el consumo total se divide en dos usos finales. Uno directamente dependiente de la temperatura, del que se obtendrán los consumos a partir de la simulación del sistema de climatización utilizando los modelos presentados en el Capítulo 7 y otro como diferencia del consumo total con el anterior.

El cliente es un hotel, el “Best Western Admiral Rodney Hotel” (utilizado también en el Apartado 7.5.2), situado en Horncastle, una ciudad de la región del este de Inglaterra. El hotel está ubicado a una altitud de 50m, en una latitud de 53° Norte. El clima es oceánico y se caracteriza por temperaturas suaves y abundantes lluvias por la proximidad al océano. La oscilación térmica anual es bastante pequeña. El hotel consta de treinta y una habitaciones (750m²), una cocina (88m²), un bar (110m²), un restaurante (361m²), habitaciones de usos diversos y de conferencias (660m²) y pasillos (220m²). La superficie total del bloque es de 2.200m², distribuidos en 3 alturas.

Para el estudio de este cliente se decide, analizando los perfiles de consumo a lo largo de un año, utilizar distintos valores de laboralidad que lógicamente no son los mismos que en los casos anteriores, por no estar el consumo en la misma ubicación física ni tener el mismo uso que ellos. En este caso, no se identifican periodos de vacaciones ya que en un hotel el consumo no se ve afectado por ser días correspondiente a agosto, por ejemplo, o no, sino por otros parámetros como tipo de ocupación, evento que se produzca en el mismo, etc. Por tanto, analizando las formas de las curvas de consumo se identifican 5 perfiles distintos que se parametrizan con 5 valores de laboralidad distinta.

| TIPO DE DÍA | LABORALIDAD |
|-------------|-------------|
| Periodo 1 | 1 |
| Periodo 2 | 2 |
| Periodo 3 | 3 |
| Periodo 4 | 4 |
| Periodo 5 | 5 |

Tabla 8.9 Laboralidad asignada en un cliente comercial

A continuación, se presentan los resultados del cálculo realizado para la previsión del consumo del edificio para el viernes, 1 de marzo de 2002. Como en los apartados anteriores, primero se realiza el cálculo con sólo el Consumo Total y posteriormente considerando los dos usos finales presentados.

Para poder realizar la previsión se toman como valores previstos para este día:

| LABORALIDAD | T _{MAX} | T _{MIN} | T _{MED} | T _{MED-1} | CT |
|-------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------|
| 2 | 4,10°C | -2,90°C | 0,50°C | 1,60°C | 1,64°C |

Tabla 8.10 Datos para el cálculo de la predicción del consumo de un cliente comercial para el 01/03/2002

En el primer caso en el que se considera un único uso, el Consumo Total, los datos para obtener la previsión se utilizan los facilitados por el cliente. El criterio de selección elegido es el 1 (30 días, CT+2, CT-2), por lo que los días considerados para calcular la previsión son 24/02/2002 (CT=4,69°C), 01/02/2002 (CT=3,58°C), 03/02/2002 (CT=0,77°C) y 02/02/2002 (CT=-5,87°C). En la Figura 8.13 se presentan los resultados obtenidos.

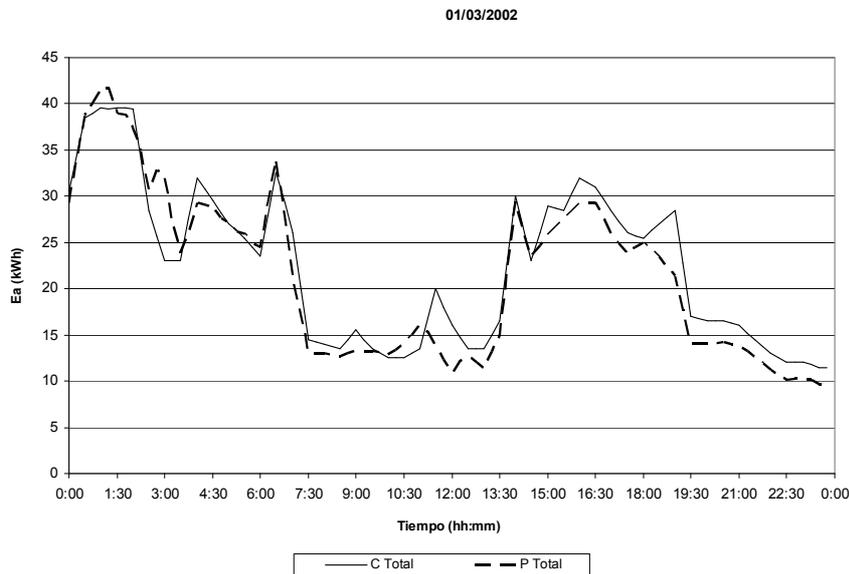


Figura 8.13 Predicción del consumo de un consumidor comercial para el 01/03/2002

La predicción presenta un error $MAPE = 10,10$ y un error $EME = 8,64$.

Por otro lado, para realizar la previsión por usos finales, al no disponer de medida de los mismos se realiza la simulación del consumo del Uso Final 1 correspondiente a la climatización de las diferentes dependencias. El Uso Final 2, correspondiente al consumo no dependiente de la temperatura, se obtiene como diferencia del anterior con los datos disponibles de medidas de Consumo Total.

Así, para el Uso Final 1, según la Tabla 8.1, el criterio de selección es el 1 y los días elegidos son: 01/02/2002 (CT=3,58°C), 24/02/2002 (CT=4,69°C), 03/02/2002 (CT=0,77°C) y 02/02/2002 (CT=-5,87°C).

Una vez seleccionados los días, para realizar la predicción, es necesario disponer de los consumos de los dos usos finales para los días seleccionados por lo que se realiza la simulación del consumo debido a la climatización en el conjunto del hotel, según se ha presentado en el Apartado 7.5.2. Así, para dichos días, además de los datos de consumo, son necesarios los valores de la evolución de la temperatura exterior. Con dichos datos, para cada día, se realiza una simulación de cada uno de los tipos de habitaciones (H Tipo 1, H Tipo 2 y Restaurante), obtenido el consumo del Uso Final 1 como suma de ellos.

En cambio, para el Uso Final 2, según el Paso 2 del método propuesto, se eligen los días más próximos al de predicción con la misma *Laboralidad* por lo que los días elegidos para este uso final son 28/02/2002, 27/02/2002, 26/02/2002 y 25/02/2002, todos ellos con *Laboralidad* igual a 2, por lo que se consideran sólo 4 días de datos

anteriores. Se realiza la simulación del Uso Final 1, para los días elegidos y por diferencia con el Consumo Total se obtienen los valores del Uso Final 2 para los días seleccionados. Posteriormente, se realiza la predicción para cada Uso Final y se obtiene la previsión del Consumo Total como suma de las dos previsiones obtenidas para cada uno de ellos. En la Figura 8.14 se presentan los resultados obtenidos.

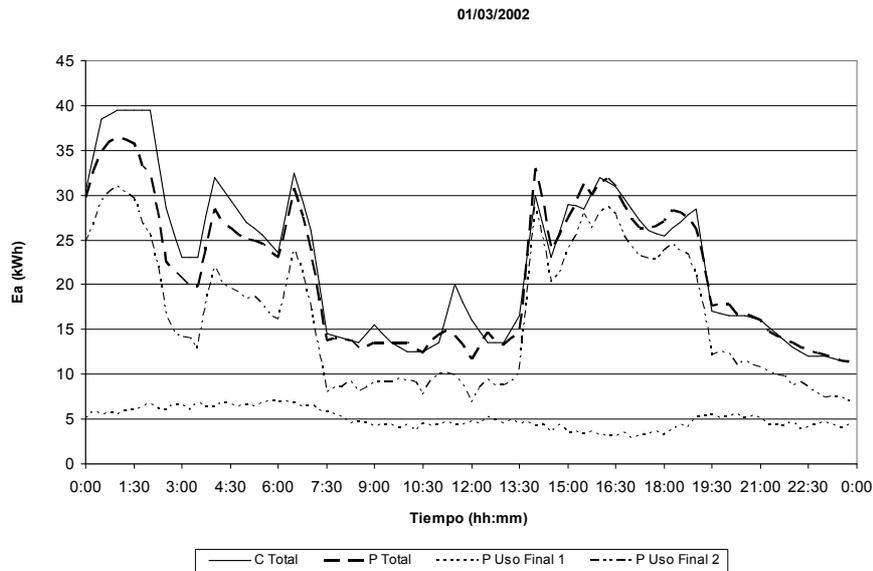


Figura 8.14 Predicción del consumo de un consumidor comercial para el 01/03/2002 por Usos Finales

La predicción presenta un error $MAPE = 6,55$ y un error $EME = 6,72$.

En la Figura 8.15 se presentan los resultados para una semana completa para este mismo consumidor. Para ello se ha simulado, utilizando las temperaturas exteriores de cada uno de los días, el consumo en cada uno de los usos finales. Hacer hincapié en que con la utilización de la descomposición por usos finales, es posible mediante el uso de modelos físicos obtener el consumo de cada uno de ellos, a partir de los cuáles se obtienen previsiones aceptables, considerando el bajo nivel de agregación (un único edificio) del consumo del cliente considerado.

Además, indicar que con el método diseñado, sólo deben simularse los días, que por sus condiciones de temperatura, laboralidad, etc., sean seleccionados para entrenar las redes, por lo que se reduce el tiempo de cálculo de las simulaciones a unos pocos días.

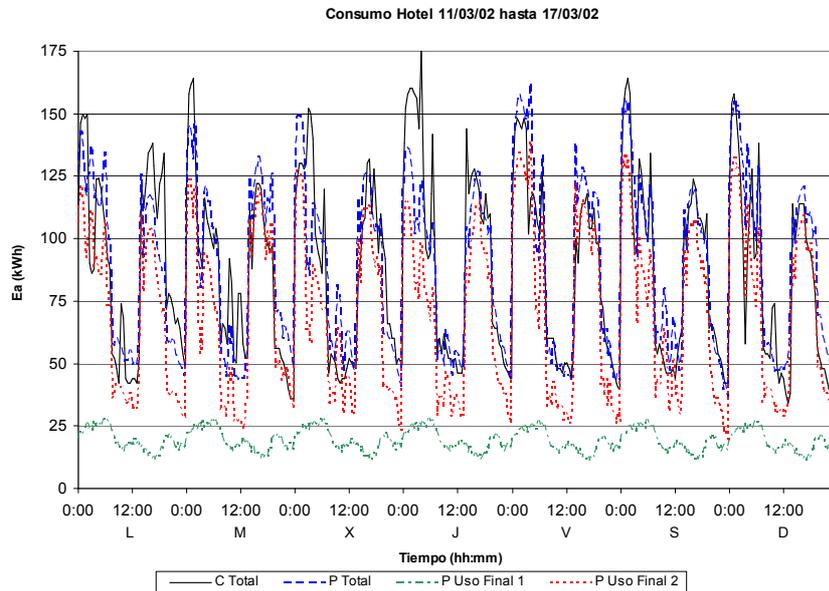


Figura 8.15 Previsión del consumo del 11/03/02 al 17/03/02 en un consumidor comercial

Para este periodo la previsión presenta un error $MAPE = 13,93$ y un error $EME = 13,02$. En la Tabla 8.11 se muestran los errores cometidos desglosados por días.

| | L 23/07 | M 24/07 | X 25/07 | J 26/07 | V 27/07 | S 28/07 | D 29/07 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| MAPE | 17,89 | 17,88 | 16,39 | 10,88 | 9,05 | 9,34 | 16,10 |
| EME | 17,10 | 15,04 | 16,01 | 13,01 | 9,36 | 7,31 | 13,16 |

Tabla 8.11 Errores en la previsión del consumo del 11/03/02 al 17/03/02 en un consumidor comercial

8.7 Predicción en un edificio con usos varios

En este apartado se presentan los resultados de las predicciones realizadas para un edificio con usos varios de la UPV, el 5E - Edificio Departamental, en el que se consideran 3 usos finales. Es un edificio de 2.953m² en donde se ubican distintos departamentos, aulas de informática, laboratorios y zonas de secretaría.

El edificio está dividido en dos zonas, una denominada *zona vieja* que está formada por el edificio original y otra conocida como *zona nueva* que corresponde a una ampliación que se construyó posteriormente. Todo el edificio está climatizado con equipos partidos con unidad condensadora en la cubierta y la unidad evaporadora en el falso techo, realizándose la distribución del aire por conductos. Existen dos cuadros

generales de aire acondicionado, uno para la zona vieja y otro para la zona nueva, de los que se disponen medidas. Así, por tanto se consideran en este edificio 3 usos finales, el Uso Final 1, corresponde al aire acondicionado de la zona vieja (CGAA Zona Vieja), el Uso Final 2, aire acondicionado de la zona nueva (CGAA Zona Nueva) y el Uso Final 3 formado por los otros consumos que no dependen directamente de la temperatura, que se obtiene como diferencia de la medida disponible del CGBT y las dos anteriores.

Por el tipo de equipos de climatización empleados en este edificio, máquinas partidas de conducto principalmente, se observa que el consumo es bastante errático, pero aún así, tal y como se detalla en las siguientes líneas, con el método de predicción utilizado, se obtienen resultados satisfactorios.

Como coeficientes de *Laboralidad* se consideran los mismos que para el conjunto de toda la UPV, ya que se asume que la afluencia de usuarios es similar.

Se presentan los resultados del cálculo realizado para la previsión del consumo del edificio para el jueves, 29 de mayo de 2008. Como en los apartados anteriores, primero se presenta el cálculo considerando sólo el Consumo Total y posteriormente se utilizan los tres usos finales presentados.

Para poder realizar la previsión se toman como valores previstos para ese día:

| LABORALIDAD | T _{MAX} | T _{MIN} | T _{MED} | T _{MED-1} | CT |
|-------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|---------|
| 0,96 | 28,17°C | 13,83°C | 21,46°C | 18,75°C | 63,46°C |

Tabla 8.12 Datos para cálculo de la predicción del edificio 5E para el 29/05/2008

Al considerar sólo los datos de Consumo Total, la selección de los días con los que se hace la predicción se realiza según la Tabla 8.1. Para este caso con medida en tres puntos diferentes se dispone de menor cantidad de medidas, desde 28/05/2008 hasta el 30/06/2008, por lo que el algoritmo de selección de los días considera los datos de forma cíclica, es decir después del último dato anterior disponible considera los días siguientes al de predicción de los que se dispone datos como si fuesen días del año anterior. Así, en este caso, teniendo en cuenta la *Laboralidad* y el *CT* el criterio de selección es el 1 (30 días, CT+2, CT-2). Los días elegidos son 04/06/2008 (CT=76,64°C), 12/06/2008 (CT=68,94°C), 03/06/2008 (CT=61,65°C) y 11/06/2008 (CT=60,19°C).

Con los datos de consumo de los días elegidos se entrenan las 96 redes neuronales y posteriormente con los datos de la Tabla 8.12, correspondientes al día de predicción, se obtiene la predicción de la energía activa cuarto-horaria, con un intervalo de 15 minutos, del Consumo Total. En la Figura 8.16 se presentan los resultados obtenidos.

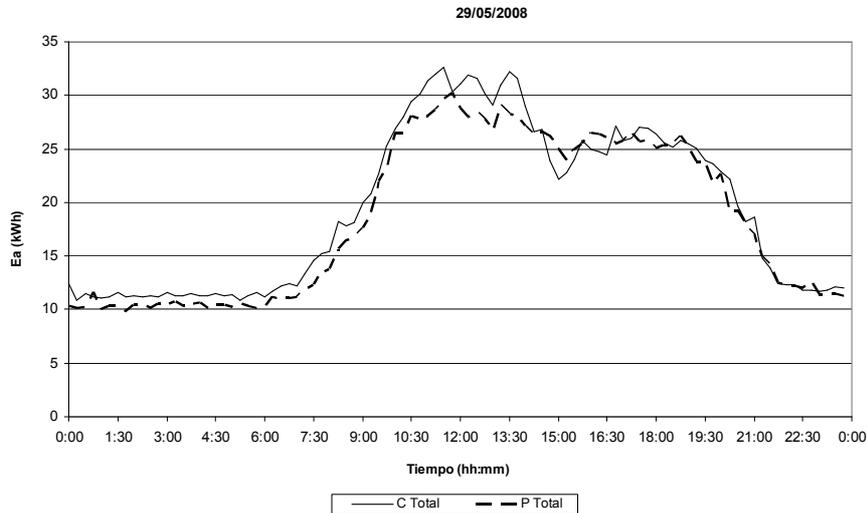


Figura 8.16 Predicción del consumo del edificio 5E para el 29/05/2008

La predicción presenta un error $MAPE = 6,67$ y un error $EME = 6,43$.

Se realiza la predicción para el mismo día, utilizando la descomposición del Consumo Total como suma de los tres Usos Finales. Para el Uso Final 1, CGAA de Zona Vieja, dependiente de la temperatura, el criterio de selección de los días con los que se hace la predicción es el 1 (30 días, CT+2, CT-2). Los días elegidos son 04/06/2008 (CT=76,64°C), 12/06/2008 (CT=68,94°C), 03/06/2008 (CT=61,65°C) y 11/06/2008 (CT=60,19°C). Para el Uso Final 2, CGAA de Zona Nueva, dependiente de la temperatura, los días elegidos son los mismos que en el caso anterior. Por último, para el Uso Final 3, no dependiente de la temperatura, se eligen los días más próximos al de predicción con la misma *Laboralidad* por lo que los días elegidos son 28/05/2008, 27/05/2008, 24/06/2008 y 19/06/2008, todos ellos con *Laboralidad* igual a 0,96, por lo que se consideran sólo 14 días de datos anteriores (considerando cíclicamente los datos disponibles).

Se realiza la predicción para cada Uso Final y se obtiene la previsión del Consumo Total como suma de las tres previsiones obtenidas para cada uno de ellos. En la Figura 8.17 se presentan los resultados obtenidos.

Con este ejemplo, se presenta la versatilidad del método diseñado para todo tipo de consumos con cualquier número de usos finales que se necesiten considerar. La implementación se ha desarrollado de forma secuencial por lo que se van obteniendo cada una de las previsiones de cada uno de los usos, según la disponibilidad de los datos y a partir de éstas se calcula la predicción del consumo total correspondiente.

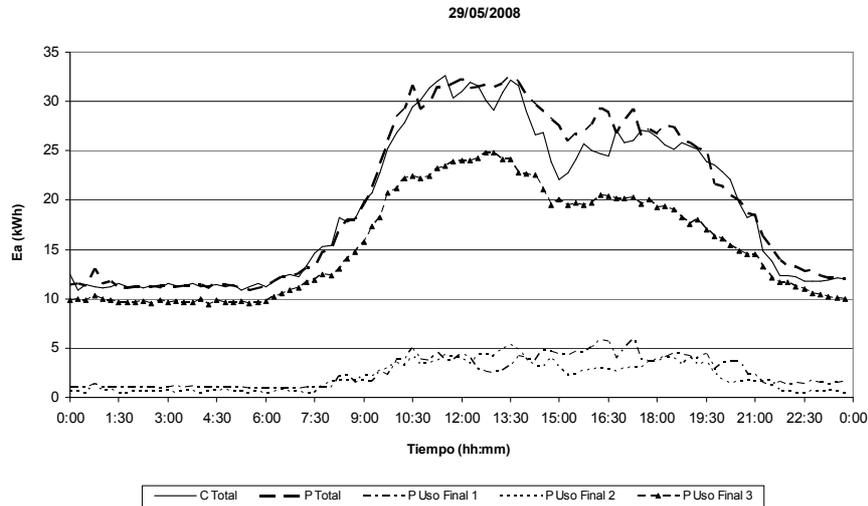


Figura 8.17 Predicción del consumo del edificio 5E para el 29/05/2008 por Usos Finales

La predicción presenta un error $MAPE = 4,89$ y un error $EME = 5,18$.

8.8 Análisis del método de predicción por Usos Finales

En los apartados anteriores se describe la previsión de algunos días en distintos edificios. Para poder, tanto, validar la bondad de las predicciones, en cada una de las instalaciones estudiadas, como comparar los dos métodos utilizados, cálculo de la previsión a partir del Consumo Total o considerando los distintos usos finales de cada instalación, en este apartado se analizan los resultados obtenidos al realizar numerosas simulaciones en los clientes presentados al aplicar la nueva metodología propuesta.

8.8.1 Resultados en la UPV

Con los datos de la UPV se han simulado 450 días, en los que se ha realizado la previsión del consumo siguiendo los pasos descritos en el Apartado 8.2. El software desarrollado permite realizar de forma automática la predicción de todos los días comprendidos entre las dos fechas que se le indiquen. En un informe final indica los casos en los que no se ha podido realizar el cálculo por no disponer de los datos necesarios los datos necesarios

En la Tabla 8.13 se indican los resultados más relevantes de las simulaciones realizadas.

| C SELEC | Nº DÍAS | MAPE UF | EME UF | MAPE CT | EME CT |
|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| TODOS | 450 | 6,45 | 6,62 | 5,28 | 5,27 |
| 1 | 111 | 5,11 | 5,30 | 4,26 | 4,25 |
| 2 | 61 | 5,16 | 5,27 | 4,52 | 4,58 |
| 3 | 92 | 5,81 | 5,89 | 4,76 | 4,68 |
| 4 | 46 | 6,42 | 6,68 | 5,56 | 5,66 |
| 5 | 112 | 8,65 | 8,91 | 6,78 | 6,75 |
| 6 | 11 | 10,82 | 11,18 | 6,15 | 6,23 |
| 7 | 7 | 6,04 | 5,99 | 6,46 | 6,48 |
| 8 | 8 | 5,08 | 5,37 | 5,05 | 5,22 |
| 9 | 2 | 12,17 | 13,42 | 11,82 | 12,80 |

Tabla 8.13 Resultados de múltiples simulaciones en la UPV

En general, las predicciones obtenidas con el método propuesto por usos finales son satisfactorias pues el valor medio del error $MAPE = 6,45$.

Analizando los resultados obtenidos se aprecia que el criterio de selección que mejores resultados presenta es el 1, por considerar días muy cercanos al de previsión, 30 días, y entrenar las redes con días con CT superior e inferior al de previsión. Hay que resaltar que al pasar al criterio de selección 5 (360 días, $CT+2$, $CT+1$, $CT-1$, $CT-2$) el error de predicción aumenta, por lo que se pone de relieve que no por considerar más días en el proceso de selección se obtienen mejores resultados.

Para obtener una buena predicción en este tipo de instalaciones es preferible considerar pocos días para realizar los cálculos, pero que las condiciones de temperatura, de uso de las instalaciones, etc. sean lo más similares posibles a las del día a predecir.

Para analizar la bondad de los dos métodos de predicción, por Consumo Total o por Usos Finales, se presenta la siguiente tabla.

| C SELEC | $E_{UF} < E_{CT}$ | $E_{UF} > E_{CT}$ | $E_{UF} = E_{CT}$ |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TODOS | 129 | 270 | 51 |
| 1 | 27 | 76 | 8 |
| 2 | 16 | 29 | 16 |
| 3 | 25 | 54 | 13 |
| 4 | 19 | 20 | 7 |
| 5 | 34 | 76 | 2 |
| 6 | 3 | 7 | 1 |
| 7 | 2 | 3 | 2 |
| 8 | 2 | 4 | 2 |
| 9 | 1 | 1 | 0 |

Tabla 8.14 Análisis del método de predicción según el MAPE en la UPV

Se considera que los errores son iguales cuando hay una desviación entre ellos menor del 5%.

En la siguiente tabla se presentan los errores medios según el método de predicción.

| C SELEC | $E_{UF} < E_{CT}$ | | $E_{UF} > E_{CT}$ | |
|---------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | E_{UF} | E_{CT} | E_{UF} | E_{CT} |
| - | | | | |
| 1 | 3,95 | 5,23 | 5,45 | 3,76 |
| 2 | 3,23 | 3,58 | 5,87 | 4,55 |
| 3 | 4,50 | 5,07 | 6,58 | 4,54 |
| 4 | 4,75 | 5,64 | 8,02 | 5,20 |
| 5 | 6,27 | 8,09 | 9,65 | 6,06 |
| 6 | 3,84 | 5,67 | 13,34 | 5,19 |
| 7 | 10,06 | 12,14 | 4,81 | 4,44 |
| 8 | 8,62 | 10,51 | 4,75 | 3,75 |
| 9 | 11,99 | 12,79 | 12,34 | 10,85 |

Tabla 8.15 Error MAPE medio según el criterio de selección y método de predicción en la UPV

En este caso el método de predicción que presenta mejores resultados es por Consumo Total. Esto es debido a que en el método por Usos Finales se obtienen mejores resultados sólo si los Usos Finales del sistema se han modelado de forma precisa.

8.8.2 Resultados en un edificio con uso departamental

Con los datos del edificio 7D-Departamento de Organización se han simulado 153 días. En la Tabla 8.16 se indican los resultados más relevantes.

| C SELEC | Nº DÍAS | MAPE UF | EME UF | MAPE CT | EME CT |
|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| TODOS | 153 | 39,63 | 27,84 | 57,95 | 30,72 |
| 1 | 36 | 29,93 | 20,57 | 29,62 | 21,91 |
| 2 | 26 | 36,55 | 30,10 | 36,46 | 30,82 |
| 3 | 25 | 45,33 | 29,48 | 46,67 | 34,59 |
| 4 | 14 | 44,62 | 28,97 | 47,34 | 29,77 |
| 5 | 34 | 44,22 | 34,55 | 50,22 | 40,21 |
| 6 | 6 | 39,88 | 19,17 | 56,07 | 20,01 |
| 7 | 4 | 35,37 | 25,86 | 38,56 | 25,99 |
| 8 | 7 | 46,42 | 28,24 | 39,31 | 28,44 |
| 9 | 1 | 69,12 | 88,42 | 70,71 | 81,55 |

Tabla 8.16 Resultados de múltiples simulaciones en el edificio 7D

Al igual que en el apartado anterior, para obtener una buena predicción en este tipo de clientes es preferible considerar pocos días para realizar los cálculos, pero que las condiciones tanto de temperatura, de uso de las instalaciones, etc. sean lo más similares posibles a las del día a predecir.

Los errores obtenidos son bastante elevados ya que, por el bajo nivel de agregación del consumo, el edificio presenta mucha aleatoriedad en la forma en la que los usuarios hacen uso de las instalaciones. Además, es un edificio con poca potencia instalada, por lo que ligeros cambios en los horarios de uso de cualquier instalación, equipo, etc., afecta de forma notable al consumo total de la instalación.

Para analizar la bondad de los dos métodos de predicción utilizados se presenta la siguiente tabla.

| C SELEC | $E_{UF} < E_{CT}$ | $E_{UF} > E_{CT}$ | $E_{UF} = E_{CT}$ |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TODOS | 63 | 60 | 30 |
| 1 | 14 | 14 | 8 |
| 2 | 6 | 7 | 13 |
| 3 | 10 | 13 | 2 |
| 4 | 7 | 4 | 3 |
| 5 | 16 | 17 | 1 |
| 6 | 3 | 3 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 2 |
| 8 | 5 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 0 | 0 |

Tabla 8.17 Análisis del método de predicción según el MAPE en el 7D

Se observa que, en este caso, ambos métodos aportan resultados similares.

En la siguiente tabla se presentan los errores medios según el método de predicción.

| C SELEC | $E_{UF} < E_{CT}$ | | $E_{UF} > E_{CT}$ | |
|---------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | E_{UF} | E_{CT} | E_{UF} | E_{CT} |
| - | | | | |
| 1 | 24,57 | 28,30 | 34,39 | 29,92 |
| 2 | 28,82 | 32,81 | 46,43 | 43,01 |
| 3 | 42,90 | 54,28 | 46,90 | 40,63 |
| 4 | 47,01 | 55,96 | 39,72 | 33,31 |
| 5 | 47,27 | 69,73 | 42,57 | 33,35 |
| 6 | 33,66 | 71,16 | 46,10 | 40,98 |
| 7 | 58,09 | 71,57 | 33,81 | 32,99 |
| 8 | 52,04 | 58,01 | 35,81 | 34,91 |
| 9 | 69,12 | 70,77 | - | - |

Tabla 8.18 Error MAPE medio según el criterio de selección y método de predicción en el 7D

En este caso el método de predicción que presenta mejores resultados es por Usos Finales. Esto es debido a que se dispone de medidas reales de los dos usos, por lo que es mejor realizar la previsión de cada uno de los usos y obtener la previsión del Consumo Total como suma de la de cada uno de ellos. Se puede observar en la Tabla 8.18 que en los casos en los que el método de los Usos Finales presenta mejores resultados, los errores son sensiblemente menores, que usando el método del Consumo Total. En cambio, también se observa que en los casos en los que el error es menor al usar el método del Consumo Total, los errores con dicho método son sólo ligeramente menores. Así, se puede concluir que al usar el método de los Usos Finales los resultados son sustancialmente mejores o ligeramente peores que en el método del Consumo Total. Este comportamiento puede apreciarse en la Figura 8.18 donde se representa para cada predicción en el eje x el error por Consumo Total y en el eje y el error por Usos Finales.

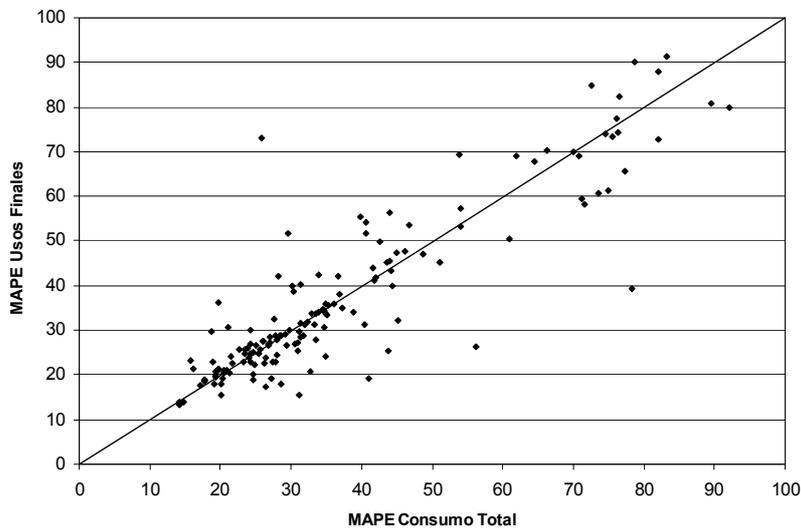


Figura 8.18 Representación de los errores de predicción por CT y UF en el edificio 7D

8.8.3 Resultados en un edificio docente

Con los datos del edificio 71-7J ADE y Cartografía se han simulado 433 días. En la Tabla 8.19 se indican los resultados más relevantes:

| C SELEC | Nº DÍAS | MAPE UF | EME UF | MAPE CT | EME CT |
|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| TODOS | 433 | 23,27 | 22,08 | 25,81 | 23,04 |
| 1 | 113 | 19,48 | 17,44 | 20,32 | 18,01 |
| 2 | 55 | 19,55 | 17,76 | 19,57 | 18,12 |
| 3 | 89 | 23,50 | 20,48 | 25,82 | 22,25 |
| 4 | 40 | 23,61 | 23,20 | 25,22 | 24,24 |
| 5 | 105 | 29,59 | 27,46 | 34,91 | 30,63 |
| 6 | 14 | 26,43 | 31,73 | 30,45 | 32,73 |
| 7 | 8 | 12,20 | 11,73 | 12,13 | 11,60 |
| 8 | 7 | 20,87 | 21,59 | 22,39 | 23,17 |
| 9 | 2 | 35,90 | 34,41 | 74,42 | 72,34 |

Tabla 8.19 Resultados de múltiples simulaciones en el edificio 7I-7J

Se observa que los errores en general son mayores que los obtenidos para el consumo de la UPV, pero menores que en el edificio 7D, esto es debido a que en instalaciones con mayor agregación de consumos el comportamiento es más estable.

Para analizar la bondad de los dos métodos de predicción utilizados se presenta la siguiente tabla.

| C SELEC | $E_{UF} < E_{CT}$ | $E_{UF} > E_{CT}$ | $E_{UF} = E_{CT}$ |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TODOS | 182 | 154 | 97 |
| 1 | 48 | 30 | 35 |
| 2 | 14 | 17 | 24 |
| 3 | 34 | 41 | 14 |
| 4 | 18 | 14 | 8 |
| 5 | 56 | 44 | 5 |
| 6 | 6 | 2 | 6 |
| 7 | 1 | 3 | 4 |
| 8 | 3 | 3 | 1 |
| 9 | 2 | - | - |

Tabla 8.20 Análisis del método de predicción según el MAPE en el edificio 7I-7J

En la Tabla 8.20 se observa que hay más casos en los que el error de predicción es menor al utilizar el método de los Usos Finales.

En la siguiente tabla se presentan los errores medios según el método de predicción.

| C SELEC | $E_{UF} < E_{CT}$ | | $E_{UF} > E_{CT}$ | |
|---------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | E_{UF} | E_{CT} | E_{UF} | E_{CT} |
| - | | | | |
| 1 | 19,73 | 22,96 | 18,20 | 16,18 |
| 2 | 18,05 | 21,37 | 17,73 | 16,79 |
| 3 | 20,60 | 30,76 | 22,72 | 19,32 |
| 4 | 23,67 | 28,81 | 17,21 | 15,33 |
| 5 | 26,55 | 43,03 | 33,28 | 25,02 |
| 6 | 21,98 | 34,00 | 20,08 | 11,79 |
| 7 | 12,94 | 13,21 | 8,18 | 7,8 |
| 8 | 18,77 | 22,67 | 23,09 | 22,49 |
| 9 | 35,89 | 74,43 | - | - |

Tabla 8.21 Error MAPE medio según el criterio de selección y método de predicción en el edificio 71-7J

En este caso el método de predicción que presenta mejores resultados claramente es por Usos Finales. Esto es debido a que se disponen de medidas reales tanto del Uso Final 1 del CGAA muy dependiente de la temperatura y del Uso Final 2 resto de cargas del edificio, por lo que es mejor realizar la previsión por cada uno de los usos y obtener la previsión del Consumo Total como suma de la de cada uno de sus usos.

Indicar, también, que al realizar la previsión del consumo utilizando la descomposición en usos finales, permite tener en cuenta situaciones excepcionales como por ejemplo, que en este edificio que para un determinado día por problemas en la instalación de climatización no arranque el sistema de aire acondicionado. Con el método presentado al obtener la previsión del consumo total, simplemente habría que tener en cuenta que la aportación del Uso Final 1 es diferente (nula) para este día. Cuanta mayor descomposición se dispongo del consumo, en sus usos finales mayor precisión se puede llegar a alcanzar en las predicciones en situaciones de este tipo.

Se puede observar en la Tabla 8.21 que en los casos en los que el método de los Usos Finales presenta mejores resultados, los errores son sensiblemente menores, que usando el método del Consumo Total. En cambio, también se puede observar que en los casos en los que el error es menor al usar el método del Consumo Total, los errores con dicho método son sólo ligeramente menores. Así, al igual que en el apartado anterior, al usar el método de los Usos Finales los resultados son o sustancialmente mejores o ligeramente peores que en el método del Consumo Total. Este comportamiento puede apreciarse en la Figura 8.19.

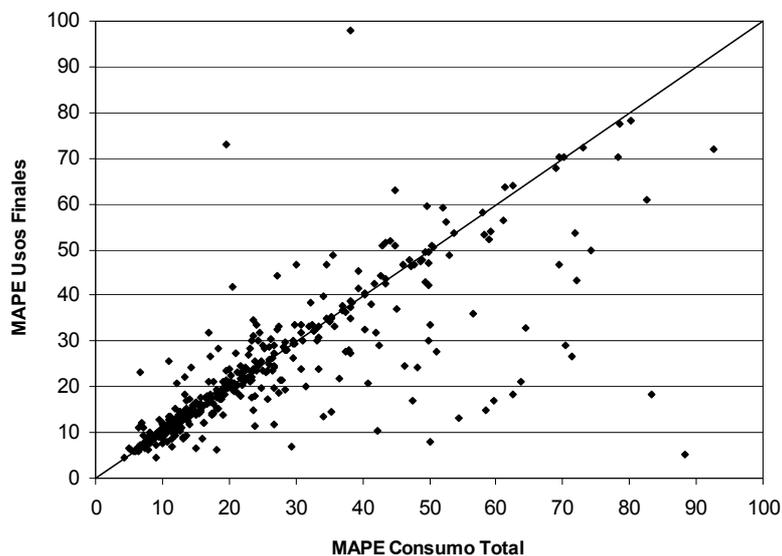


Figura 8.19 Representación de los errores de predicción por CT y UF en el edificio 71-7J

8.8.4 Resultados en un cliente comercial

En este caso, con los datos del cliente comercial analizado, el Best Western Admiral Rodney Hotel de Inglaterra, se han simulado 364 días. En la Tabla 8.22 se indican los resultados más relevantes:

| C SELEC | Nº DÍAS | MAPE UF | EME UF | MAPE CT | EME CT |
|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| TODOS | 364 | 22,81 | 20,14 | 22,54 | 20,16 |
| 1 | 231 | 22,04 | 19,37 | 21,80 | 19,44 |
| 2 | 38 | 23,38 | 20,11 | 23,17 | 20,01 |
| 3 | 11 | 18,27 | 15,45 | 18,18 | 16,77 |
| 4 | 3 | 18,53 | 15,90 | 16,83 | 13,91 |
| 5 | 62 | 25,91 | 22,75 | 25,59 | 22,15 |
| 6 | 4 | 34,55 | 30,15 | 27,99 | 24,70 |
| 7 | 13 | 21,49 | 19,51 | 22,81 | 20,92 |
| 8 | 0 | - | - | - | - |
| 9 | 2 | 22,20 | 21,13 | 23,30 | 22,67 |

Tabla 8.22 Resultados múltiples simulaciones en un cliente comercial

Según la Figura 8.20, no se observa una tendencia clara que indique que un método proporciona mejores resultados que otro.

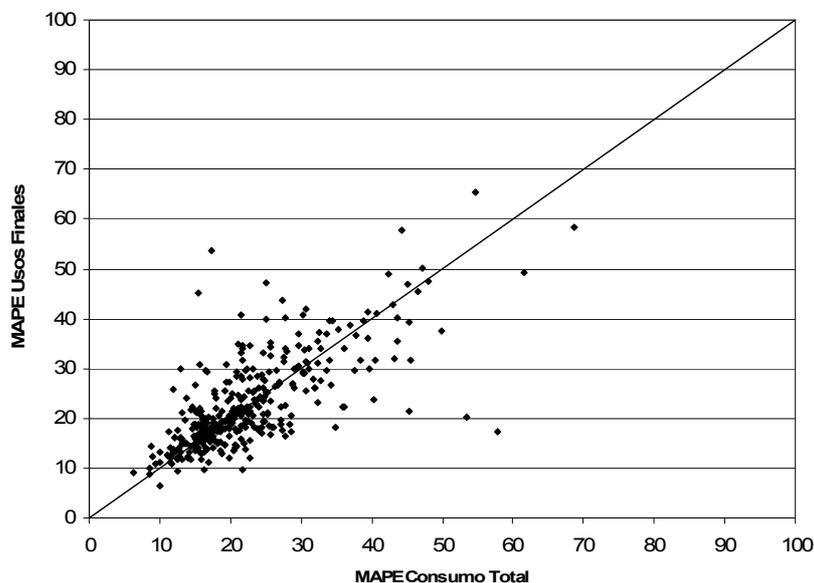


Figura 8.20 Representación de los errores de predicción por CT y UF en un consumidor comercial

Una razón para dicho comportamiento se encuentra en que, en general el consumo del Uso Final 2 (resto de usos) es mucho mayor que el Uso Final 1 (aire acondicionado) simulado.

8.9 Evaluación de los modelos propuestos

En este apartado se valoran los resultados obtenidos en la predicción del consumo al utilizar distintos modelos. Así, se denota:

- RN CT: Modelo propuesto basado en redes neuronales utilizando datos de Consumo Total.
- RN UF: Modelo propuesto basado en redes neuronales utilizando datos de los Usos Finales.
- MH: Modelo heurístico, implementado en la actualidad en el SGI desarrollado, que obtiene la previsión según la ecuación:

$$\hat{L}_t(1) = \frac{L_{t-6} + L_{t-13}}{2}$$

Indicar que, a pesar de su sencillez, estos modelos heurísticos aportan buenos resultados, especialmente en días laborables [72].

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos al calcular la predicción en un consumo con mayor nivel de agregación como el Consumo Total de la UPV. Se realizan 419 predicciones, considerando los consumos desde 01/02/07 hasta 17/06/08. Se obtiene que un 65% de las predicciones presentan un error menor con el modelo RN CT que con el modelo MH. En la Tabla 8.23 se presentan los errores medios que se cometen utilizando los distintos modelos.

| TIPO DÍAS | Nº DÍAS | RN CT | RN UF | MH |
|-----------|---------|-------|-------|-------|
| Todos | 419 | 5,13 | 6,29 | 9,69 |
| Festivos | 67 | 8,42 | 10,37 | 23,35 |
| Resto | 352 | 4,51 | 5,55 | 7,20 |

Tabla 8.23 Error MAPE medio al emplear diferentes modelos en la UPV

Como ejemplo, se presentan en la Figura 8.21 los errores que se obtienen al realizar las previsiones de 14 días, del 10/12/07 al 23/12/07 para dicho cliente.

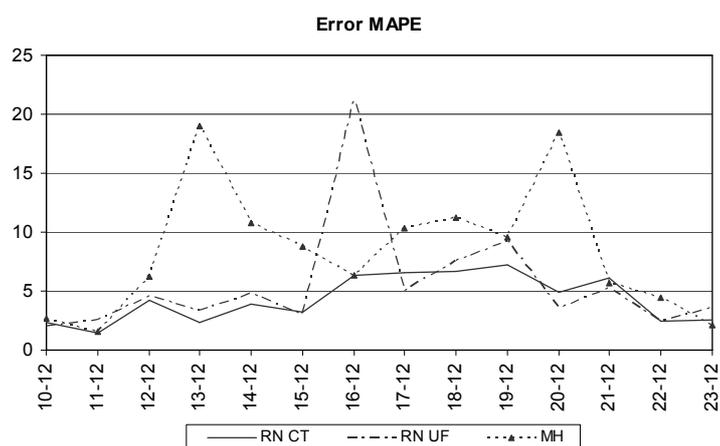


Figura 8.21 Errores MAPE de las predicciones del 10/12/07 al 23/12/07 en la UPV

Se realiza el mismo análisis pero considerando el consumo de un edificio individual, el 71-7J de ADE y Cartografía. Se realizan 416 predicciones, considerando los consumos desde 01/02/07 hasta 17/06/08. Un 60% de las predicciones presentan un error menor con el modelo RN UF con respecto al modelo MH. En la Tabla 8.24 se presentan los errores medios que se cometen utilizando los distintos modelos.

| TIPO DIAS | Nº DÍAS | RN CT | RN UF | MH |
|-----------|---------|-------|-------|--------|
| Todos | 416 | 29,55 | 27,77 | 62,76 |
| Festivos | 66 | 56,16 | 50,97 | 258,23 |
| Resto | 350 | 24,53 | 23,40 | 25,90 |

Tabla 8.24 Error MAPE medio al emplear diferentes modelos en el edificio 71-7J

En la Figura 8.22 se representan los errores que se obtienen al realizar las previsiones de 14 días, del 05/02/07 al 18/02/07.

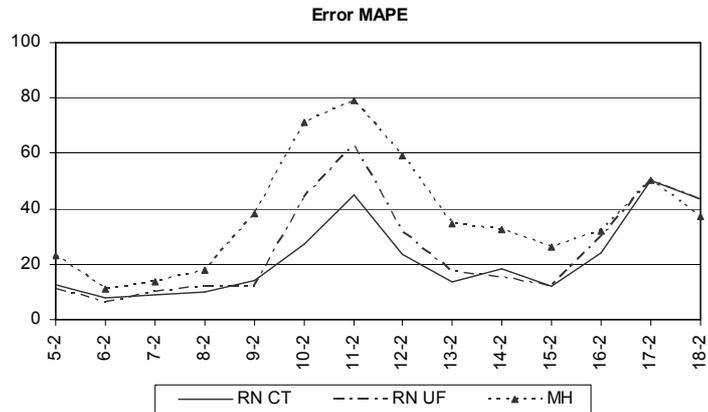


Figura 8.22 Errores MAPE de las predicciones del 05/02/07 al 18/02/07 en el edificio 71-7J

Del análisis realizado se pueden extraer distintas conclusiones:

- En los consumos que presentan mayor nivel de agregación los resultados de cualquier modelo son sensiblemente mejores, ya que hay menor aleatoriedad en los datos.
- En el caso de disponer de una correcta identificación de los usos finales, como en el edificio 71-7J, el método que mejor resultados aporta es el modelo RN UF.
- En general, al usar el método RN UF los resultados son o sustancialmente mejores o ligeramente peores que el RN CT.
- El MH en consumos muy poco agregados aporta resultados muy pobres.

8.10 Funciones adicionales en el método de predicción

Con la utilización del método planteado llevada a cabo con las distintas aplicaciones presentadas en los apartados anteriores, se plantean nuevos aspectos a considerar en el mismo, como pueden ser el número de días de entrenamiento de las redes, influencia de otros factores físicos a considerar en el modelo neuronal, etc. La implementación informática del método permite, con pequeñas variaciones, realizar el estudio de estos nuevos aspectos. En los próximos apartados se presentan en detalle el modo de considerarlos y las conclusiones a las que se han llegado.

8.10.1 Número de días de entrenamiento

Según el *Paso 2* de la metodología plateada (Apartado 8.2) se eligen para entrenar las redes 4 días anteriores al de predicción, según unos criterios de selección (Tabla 8.1). En este apartado se estudia el efecto de aumentar el número de días de entrenamiento, para lo que se realizan diversos ensayos en los que se ha comprobado que al aumentar el número de días de entrenamiento de las redes no aporta mejoras apreciables, aunque, sin embargo presenta diversos inconvenientes como:

- Mayor tiempo de cálculo en el proceso de entrenamiento.
- Mayor dificultad para disponer de días para realizar las predicciones, especialmente para los días específicos, como festivos, lunes de vacaciones, etc.
- Se debe disponer de periodo de tiempo de datos mayores para disponer de los datos suficientes para realizar el cálculo.

En concreto se presentan los resultados obtenidos al entrenar las redes con 10 días. El procedimiento de selección de los días es similar al presentado para 4 días. Así, por ejemplo, en primer lugar se intenta elegir de los 30 últimos días 5 con CT superior y 5 con CT inferior, al del día de previsión, si no es posible se consideran las otras opciones pero como mínimo debe haber 2 con CT inferior y 2 con CT superior, si no es posible se realiza la búsqueda entre los últimos 90 días. Si no es posible, se consideran 360 días. En el caso de que tampoco sea posible se considera de los últimos 30 días, los 10 días con CT más cercano al de previsión.

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos en la UPV, utilizando los errores MAPE obtenidos en las previsiones realizadas. Se observa en la Tabla 8.25 que los resultados son muy similares con los dos métodos.

| LABORALIDAD | Nº DÍAS | $E_{10} < E_4$ | $E_{10} > E_4$ | $E_{10} = E_4$ |
|-------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| TODOS | 480 | 133 | 120 | 227 |
| 0,30 | 16 | 3 | 6 | 7 |
| 0,48 | 10 | 1 | 2 | 7 |
| 0,50 | 55 | 19 | 13 | 23 |
| 0,55 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,60 | 54 | 14 | 16 | 24 |
| 0,64 | 3 | 1 | 0 | 2 |
| 0,71 | 9 | 2 | 4 | 3 |
| 0,75 | 26 | 4 | 10 | 12 |
| 0,78 | 7 | 3 | 3 | 1 |
| 0,90 | 57 | 14 | 17 | 26 |
| 0,96 | 185 | 58 | 37 | 90 |
| 1,00 | 58 | 14 | 12 | 32 |

Tabla 8.25 Análisis del número de días de entrenamiento en la UPV

En todos los tipos de días se observa un comportamiento similar, por lo que se puede concluir que al considerar más días de entrenamiento no se consiguen mejores resultados.

En la Tabla 8.26 se presentan los resultados obtenidos de realizar el mismo estudio para el edificio docente 7I-7J ADE y Cartografía.

| LABORALIDAD | Nº DÍAS | $E_{10} < E_4$ | $E_{10} > E_4$ | $E_{10} = E_4$ |
|-------------|---------|----------------|----------------|----------------|
| TODOS | 456 | 99 | 127 | 230 |
| 0,30 | 16 | 4 | 6 | 6 |
| 0,48 | 10 | 1 | 4 | 5 |
| 0,50 | 52 | 15 | 20 | 17 |
| 0,55 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,60 | 50 | 14 | 15 | 21 |
| 0,64 | 4 | 2 | 0 | 2 |
| 0,71 | 9 | 3 | 4 | 2 |
| 0,75 | 27 | 8 | 9 | 10 |
| 0,78 | 7 | 1 | 4 | 2 |
| 0,90 | 54 | 12 | 18 | 24 |
| 0,96 | 174 | 31 | 35 | 108 |
| 1,00 | 53 | 8 | 12 | 33 |

Tabla 8.26 Análisis del número de días de entrenamiento en el edificio 7I-7J

Se observa que al igual que en el caso anterior los errores son muy similares en los dos métodos, por lo que no se justifica un aumento del número de días de entrenamiento, considerando los distintos inconvenientes que ello comporta.

8.10.2 Factor de corrección en datos alejados al día de predicción

Según el método de selección de los días en los que se entrenan las redes neuronales, hay casos en los que se consideran 360 días anteriores a la fecha de predicción por lo que el consumo de los días más alejados al de predicción puede que haya variado de forma considerable. Para minimizar este efecto, se plantea la posibilidad de usar un factor de corrección para aquellos días seleccionados con fecha anterior a 180 días al de predicción. Así, de los clientes estudiados, se puede considerar en el caso de la Universidad Politécnica de Valencia, que con este factor se consiguen corregir los consumos de aquellos días seleccionados que sean de la temporada anterior, por lo que se considera el crecimiento que de un año a otro experimenta dicho consumidor.

En la Figura 8.23 se presenta la aplicación de este método para la predicción del consumo en uno de los días más calientes de 2008, el 03/07/2008, por lo que se entrenan las redes con datos de días similares de 2007.

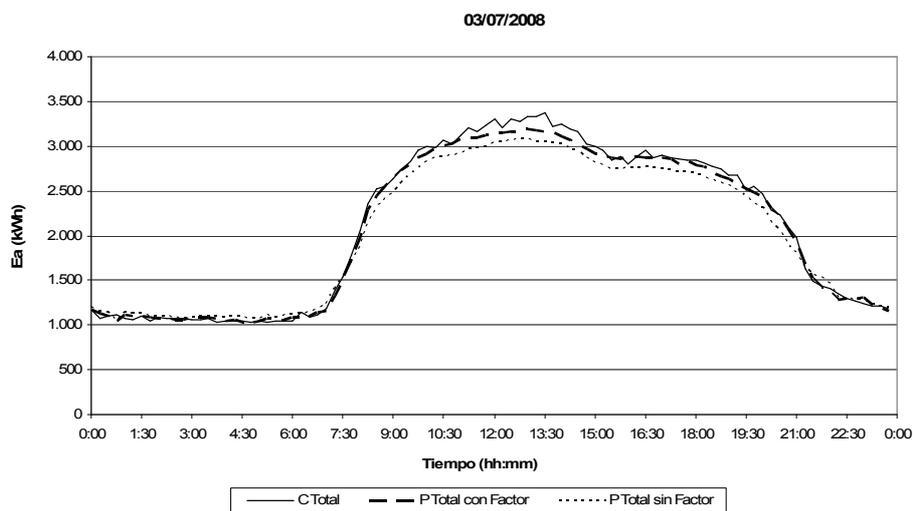


Figura 8.23 Predicción del consumo de la UPV para el 03/07/2007 con corrección de datos

Así, la predicción sin corrección presenta un $MAPE = 4,94$ y la predicción con la corrección, según el incremento medio del consumo, presenta un $MAPE = 2,23$.

8.10.3 Influencia de la variable climática humedad en las predicciones

Para realizar las distintas predicciones utilizando el método propuesto, se considera que los consumos son dependientes de distintas variables físicas. Inicialmente se consideran la temperatura máxima, mínima y media del día de previsión y del día anterior, además de otros parámetros, como la laboralidad, etc.

Adicionalmente, se plantea la posibilidad de considerar otro parámetro, como variable de entrada al modelo, como es la humedad. Para analizar los resultados que se obtienen al considerar dicha variable en las predicciones se utiliza la red neuronal presentada en el Apartado 6.6.1.

Se ha utilizado dicha red para realizar distintas predicciones en distintos clientes y compararlas con las obtenidas con la red original obteniendo los siguientes resultados:

- Para la Universidad Politécnica de Valencia se realizan 478 predicciones de las que 339 tienen el mismo error de predicción que utilizando la red anterior, en 59 casos se obtiene una predicción con mejores resultados y en 80 con peores.

- Para el edificio 71-7J de ADE y Cartografía se realizan 454 predicciones de las que en 360 se obtiene el mismo error al utilizar la red ampliada, en 52 casos se obtienen mejores resultados y en 42 peores.

Considerando dichos resultados se puede concluir que considerar la variable humedad no aporta beneficios sustanciales, por lo que no es necesario, al menos en los casos estudiados, considerar dicho parámetro ya que se obtienen predicciones muy similares y en cambio presenta diversas desventajas como son: Es muy laborioso preparar los datos de entrenamiento para las fechas a considerar, se aumenta el tiempo de cómputo al ser la red más compleja, hay más probabilidad de que los días no tengan datos válidos pues se consideran más parámetros, etc. Si bien, hay que indicar que en ciertos ensayos, se aprecia una ligera mejoría en los resultados en las primeras horas del día.

8.10.4 Integración de los horarios de cada proceso

El método de predicción propuesto en el presente trabajo, se diseña para ser aplicado a consumos donde el nivel de agregación es muy bajo. Es, por tanto, necesario considerar la influencia en las previsiones del hecho de que un determinado proceso no esté activo en un determinado momento. Para ello, se considera para cada uso final, la posibilidad de que presente un horario distinto al de los días de entrenamiento, por lo que se debe conocer el horario para cada día de cada uso final. Es en el *Paso 2* del método, donde se realiza dicho análisis y corrección de los datos. Así, con el uso del parámetro *tiempo de arranque* se realiza una corrección de los datos de los días seleccionados antes de ser utilizados en el entrenamiento de las redes, según se comentó en el Apartado 8.2.

8.11 Conclusiones del capítulo

Como herramienta para facilitar el proceso de retribución en los programas de respuesta de la demanda, se presenta una nueva metodología para la predicción del consumo basada, por el bajo nivel de agregación de los consumos considerados, en los procesos o usos finales que lo forman. Así, para el cálculo de la predicción del consumo de un determinado día, se propone el cálculo de la predicción para cada uno de los usos finales, para posteriormente obtener la previsión del consumo total como combinación de éstas, lo que permite analizar los procesos de forma independiente.

De las distintas variables de las que depende el consumo se considera, por un lado, la influencia de la temperatura con el uso de los distintos modelos neuronales propuestos (Capítulo 6) y, por otro, el resto de variables que se consideran en el proceso de selección de los datos de entrenamiento.

Para realizar el entrenamiento de las redes se plantean dos posibilidades. A través de medidas del consumo en las distintas instalaciones, funcionalidad que aporta

el SGI propuesto en el presente trabajo (Capítulo 4) o con el uso de los datos obtenidos de simulaciones de los distintos procesos con el uso de modelos físicos (Capítulo 7).

Se realiza un análisis de la metodología de predicción propuesta, por usos finales y por consumo total de una instalación, en el que se observa que en el caso en el que los usos estén correctamente identificados se obtienen mejores resultados o similares a los obtenidos al usar el consumo total.

El método planteado presenta predicciones bastante cercanas al consumo real, disminuyendo el error en aquellos puntos de medida con agregación de varios edificios pues los consumos son más estables. Para un edificio individual, al ser los consumos muy aleatorios, el error de predicción aumenta por la arbitrariedad de los mismos.

Se realiza, también, una evaluación del método con otros, en el que se observa que los resultados que proporciona son satisfactorios. También, se identifican algunas funciones adicionales en la implementación del método desarrollada que permiten obtener una mejora en los resultados, como son la corrección de los datos de días muy alejados al de predicción, número de días de entrenamiento, etc.

Para finalizar, se ha analizado la influencia de la humedad en las predicciones, llegando a la conclusión de que, al menos para el tipo de clientes analizados, al considerar dicho parámetro no se obtienen mejores resultados. En cambio, es más laboriosa la preparación de los datos y se incurre en mayor tiempo de cálculo al realizar las predicciones.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

9.1 Conclusiones

En las siguientes líneas se presentan las principales conclusiones y aportaciones que se han obtenido con la realización de la presente tesis. Además, para finalizar, se indican las principales líneas de desarrollo futuras que de ella se derivan.

El trabajo presentado en esta tesis se centra en la elaboración de herramientas para facilitar la respuesta activa de los consumidores en los sistemas eléctricos. Como punto de partida se analizan las indudables ventajas que, a priori, se obtienen al disponer de una importante participación activa de la demanda, consiguiendo así evitar la inelasticidad de la misma al intentar gestionar el sistema eléctrico sin tener en cuenta la participación de los consumidores. Se analizan algunos de los programas de respuesta de la demanda implantados hasta el momento y se identifican cuáles son los principales inconvenientes por los que no se han obtenido los resultados esperados de los mismos. Se presentan distintas barreras por las que al implantar un programa concreto no se obtienen los resultados deseados de entre las que, por su importancia, el presente trabajo se centra en dos:

- Barreras tecnológicas: A la hora de implantar un programa de respuesta de la demanda es necesario disponer del apoyo de un sistema de gestión que facilite distintas funciones necesarias como son la medida de la energía consumida en un determinado cliente, facilidad de realizar acciones de control en las instalaciones de los consumidores, etc. Para ello, se realiza un estudio de los distintos sistemas de gestión y control (SGC) existentes en el mercado, comprobando que en la actualidad existe multitud de hardware disponible, que cumple las especificaciones necesarias, pero se detectan dos carencias importantes. Por un lado, los sistemas de control desarrollados en la actualidad se centran en el control de las instalaciones de climatización, electricidad, seguridad, etc., de los edificios, por lo que no disponen de las funciones específicas necesarias para la gestión de programa de respuesta de la demanda. Principalmente, no presentan una arquitectura desarrollada para acceder a un gran número de clientes y guardar datos de los mismos. Por otro lado, aún más importante, no se han desarrollado las aplicaciones software necesarias para la gestión de los consumos desde el punto de vista de la respuesta de la demanda, por lo que no hay en

el mercado aplicaciones software que aporten dicha funcionalidad. Es en estos aspectos en los que se centra el desarrollo de la tesis y se realizan las principales aportaciones. En el presente trabajo, para salvar las carencias detectadas, se diseña un nuevo sistema de gestión integral (SGI) cuya principal funcionalidad debe ser la de constituir un lugar de encuentro de todos los participantes de un determinado programa, donde éstos puedan ponerse en contacto e intercambiar información entre sí, permita al administrador del programa enviar avisos a los consumidores con rapidez y de forma concurrente, etc.

- Barreras económicas: Los consumidores sólo participarán de forma satisfactoria en un programa de respuesta de la demanda si obtienen beneficio económico por ello. Es, por tanto, necesario establecer un sistema de retribución en el que todos los participantes del programa se sientan cómodos, es decir, que sea fiable y aceptado por todos ellos. Para poder cuantificar la respuesta de un consumidor frente a una señal emitida por el administrador de un programa, es necesario por un lado medir cuál es el consumo real del consumidor, durante un periodo de tiempo dado, funcionalidad que aporta el SGI desarrollado y, por otro, disponer de una previsión del consumo que se habría incurrido en la instalación del cliente de no haber realizado ninguna acción de control. Por tanto, como punto de partida para establecer un adecuado sistema de retribución para todos los participantes es necesario disponer de un método de predicción del consumo que aporte buenos resultados. Es por tanto objetivo del presente trabajo el desarrollo de un nuevo método de cálculo del perfil del consumo en un determinado punto de suministro.

En el capítulo 4 se describe el diseño del nuevo SGI que aporta soluciones a las carencias detectadas en los sistemas actuales. Se detallan las funciones específicas que introduce dicho sistema, la arquitectura que debe presentar y como aplicación se describe la solución del SGI desarrollada en el Instituto de Ingeniería Energética (IIE). Los equipos hardware seleccionados para la implementación del sistema se han elegido de distintos fabricantes disponibles en el mercado, por lo que se asegura la disponibilidad y fiabilidad de los mismos, ya que son marcas comerciales de reconocido prestigio dentro del sector de la automatización. Además, como otra de las aportaciones importantes del presente trabajo, se presentan distintas aplicaciones software desarrolladas hasta el momento en el grupo de trabajo e integradas en el SGI implementado. Indicar que el desarrollo íntegro de dichas aplicaciones, permite que sean totalmente actualizables y ampliables según las necesidades de los programas de respuesta de la demanda concretos que se quieran implantar a través del sistema presentado.

El SGI propuesto es un sistema de gestión y control con aplicaciones específicas basado en una plataforma Web. Se describe, por una parte, la instalación necesaria a realizar en los clientes, es decir, los equipos a instalar para realizar las medidas de consumo necesarias y poder realizar las acciones de control deseadas. Por otra parte, en el centro de control, se centraliza toda la gestión del sistema. La comunicación se basa en el protocolo TCP-IP a través de Ethernet. La ventaja de esta arquitectura es que los clientes pueden estar alejados entre sí pero se crea un espacio común donde se

concentra toda la información. El interfaz de comunicación entre los distintos usuarios y el centro de control es a través de la plataforma Web que permite consultar cualquier dato desde cualquier punto con conexión a la red sin necesidad de instalar ningún software adicional, además al disponer de una potente base de datos implementada en SQL, se puede acceder a toda la información de forma concurrente sin problemas de colisiones.

Por otro lado, como se ha indicado, desde el punto de vista de la respuesta de la demanda es muy importante, y actualmente constituye una barrera en la implantación de los distintos programas, saber cuál es el consumo de un cliente para un determinado día, de forma que al modificar su consumo como respuesta a una señal del administrador del programa, sea posible evaluar la acción tomada y sirva de base para realizar una correcta retribución, ya que éstos basan sus incentivos en la reducción de carga llevada a cabo por los consumidores en un determinado periodo de tiempo con respecto a un perfil de consumo de referencia. Por ello, otra aportación del presente trabajo, para facilitar la respuesta de la demanda y salvar las barreras económicas detectadas, consiste en el desarrollo de un nuevo método de cálculo de la predicción del consumo fácilmente integrable en el SGI propuesto, para así utilizar la potencia de cálculo disponible del servidor central y, con la conexión con Ethernet, obtener la predicción de los datos necesarios para poder realizar las previsiones.

Para el planteamiento del nuevo método de predicción, después de realizar un análisis de las distintas metodologías utilizadas en la extensa literatura sobre el problema, se plantea el uso de las técnicas neuronales. En concreto se implementa el perceptrón multicapas con un algoritmo de aprendizaje por retropropagación de errores. Tras identificar las variables de las que depende el consumo se diseñan las redes neuronales a utilizar, cuya principal característica es que como variables de entrada se utilizan la temperatura máxima, mínima y media, del día de predicción y la temperatura medida del día anterior para considerar así la inercia de los sistemas. El resto de variables identificadas se tienen en cuenta en la selección de los días de entrenamiento de los modelos neuronales.

Para poder realizar la predicción del perfil del consumo, debido al bajo nivel de agregación, se plantea un nuevo enfoque, considerando el consumo total de una instalación como suma de los diferentes procesos o usos finales que lo forman. Así, la predicción del consumo se plantea como la suma de cada una de las predicciones para cada uso final. Para los días de entrenamiento se elige un número reducido de días, con el fin de disminuir en lo posible la aleatoriedad en los datos, pero con características lo más similares posibles al de predicción. Para ello, en primer lugar, se obtiene la previsión de temperaturas para el día a predecir y el tipo de día. Con esos datos se eligen los días anteriores más similares, y con los consumos en éstos se entrenan las redes. Se entrenan 96 redes, una para cada medida de energía activa cuarto-horaria del día a realizar la predicción y, posteriormente, se realiza la previsión de cada una de las redes de cada uso final, para obtener el consumo total como combinación de éstas.

Como importante aportación se plantean dos opciones para el entrenamiento de las redes. Por un lado, utilización de datos de días anteriores medidos en cada uso final, obtenidos con el SGI propuesto y, por otro, se plantea el uso de datos obtenidos a través de modelos físicos de cada uno de los procesos. Como ejemplo, en el Capítulo 7, se presentan distintos modelos para obtener el consumo eléctrico de equipos de climatización, por ser este tipo de cargas, unas de la que mayores posibilidades de control presentan al aprovechar la inercia de los sistemas a climatizar. Se realiza la validación de los modelos empleados en instalaciones reales, lo que permite el uso de los mismos para la obtención de los datos de entrenamiento mediante simulaciones de los modelos planteados.

Como conclusión final del trabajo, indicar que el SGI presentado, se ha concebido como un sistema abierto, ampliable y escalable, por lo que se considera que no existen fuertes restricciones para que pueda integrar todas aquellas aplicaciones que cualquiera de los agentes de un determinado programa estime necesarias, además de ser fácilmente trasladables a cualquier otro que se decida implantar.

9.2 Líneas futuras de desarrollo

Al realizar un estudio en el ámbito de la respuesta de la demanda, muchas son las líneas abiertas en distintos campos. En algunas de ellas se está trabajando actualmente en el Instituto de Ingeniería Energética y otras pretenden ser abordadas en un plazo breve de tiempo. De entre ellas se destacan las siguientes líneas de desarrollo:

- Utilización, en el SGI, de otros equipos hardware disponibles en el mercado para aumentar la versatilidad del mismo, con lo que se permite la integración de un mayor número de equipos en el sistema presentado.
- Diseño de distintos programas de respuesta de la demanda y la implantación del SGI propuesto como medio para gestionarlos y desarrollarlos.
- Implementación de nuevas aplicaciones software necesarias para la integración total de los programas a través del uso de sistema propuesto.
- Integración de las funciones específicas de los agregadores y las compañías suministradoras en el SGI.
- Desarrollo de otros modelos de cargas para poder realizar las distintas simulaciones, no sólo en el uso final de climatización sino en otros usos relevantes.
- Diseño de nuevos modelos neuronales específicos para consumidores tipo.
- Implementación de nuevas aplicaciones software, que faciliten un mayor conocimiento de los consumos por parte de los clientes y fortalezcan la confianza en su participación activa en el funcionamiento de los sistemas eléctricos.

- Desarrollo de otras aplicaciones que permitan al resto de agentes de los sistemas eléctricos, agregadores, comercializadores, etc., una mayor participación y mayor flexibilidad en los mercados eléctricos.
- Planteamiento de un sistema de retribución que utilice los datos tanto del método de predicción planteado como de las medidas obtenidas a través del sistema propuesto.
- Desarrollo del software necesario para implementar la gestión económica de los programas en el SGI a través de la plataforma Web disponible mediante la creación de modelos económicos de retribución.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rassanti, S., Smith, V. and Wilson, B. *Controlling market power and price spikes in electricity networks: Demand-side bidding*. Interdisciplinary centre for economic science, George Mason University, julio 2001
- [2] Kirschen, D.S. *Demand-side view of electricity markets*. IEEE trans. power systems, vol. 18, pp. 520-527, mayo 2003
- [3] R. Cowart. *Efficient reliability, the critical role of demand-side resources in power systems and markets*. The national association of regulatory utility commissioners, junio 2001
- [4] ICF Consulting. 2002. *Economic assessment of RTO policy Report*. FERC, mayo 2002
- [5] Álvarez, C., Gabaldón, A. and Molina, A. *Assessment and simulation of the responsive demand potential in end-user facilities: Application to a university customer*. IEEE trans. power systems, núm. 19, pp. 1223-1231, 2004
- [6] C. W. Gellings, W. M. Smith. *Integrating demand-side management into utility planning*. IEEE proceedings, vol. 77, núm. 6, pp. 908-918, 1989
- [7] C.W. Gellings. *Bibliography on load management*. IEEE trans. on power apparatus systems, vol. PAS-100, núm. 5, pp. 2597-2601, 1981
- [8] A. K. David. *Optimal consumer response for electricity spot pricing*. IEE proceedings, vol. 135, núm. 5, pp. 378-384, 1988

- [9] N. Encinas. *Metodología de diseño y evaluación de productos de respuesta de la demanda en mercados eléctricos competitivos*. Tesis doctoral. Director Dr. C. Álvarez. Universidad Politécnica de Valencia, 2006
- [10] C. W. Gellings. *The concept of demand-side management for electric utilities*. IEEE proceedings, vol. 73, núm. 10, pp. 1468-1470, 1985
- [11] M. P. Bhavaraju, J. D. Hebson, W. Wood. *Emerging issues in power system planning*. IEEE proceedings, vol. 77, núm. 6, pp. 891-898, 1989
- [12] E. Gardner. *Load management: past, present and future*. 39th annual conference rural electric power, pp. A2/1-13, 1995
- [13] Kirschen, D.S. *Demand-side view of electricity markets*. IEEE trans. power systems, vol. 18, pp. 520-527, mayo 2003
- [14] Encinas, N., Alfonso, D., Álvarez, C., Pérez-Navarro, A. and García-Franco, F. *Energy market segmentation for DER implementation purposes*. IET generation, transmission and distribution, vol. 1, núm. 2, marzo 2007
- [15] C. Álvarez, M. Alcázar, G. Escrivá and A. Gabaldón. *Technical and economical tools to assess customer demand response in the commercial sector*. IET generation, transmission and distribution, en revisión, 2009
- [16] G. Strbac, D. Kirschen. *Assessing the competitive of demand-side bidding*. IEEE trans. on power systems, vol. 14, núm. 1, pp. 120-125, 1999
- [17] Energy Information Administration, Department of Energy. *The changing structure of the electric power industry 2000. An Update*. DOE/EIA-0562(00), octubre 2000
- [18] B. Lescoeur, J.B. Galland, E. Husson. *Marginal cost pricing: an efficient tool to ensure electricity demand side management. Demand-side management and electricity end-use efficiency*. Eds. A.T.D. Almeida, Kluwer Academic Publishers, pp. 191-205, 1988

-
- [19] M.L. Chan, F. Albuyeh. *Integrating Load management into energy management systems normal operations*. IEEE trans. on power systems, vol. 1, núm, 4, pp. 152-157, 1986
- [20] C. Alvarez, A. Gabaldón, I. Valencia, M. Alcazar, G. Escrivá,. *Market integration of responsive customers: Application to energy and balancing markets*. International journal of power and energy systems, vol. 29, núm. 1, cod. 203-4096, 2009
- [21] I. E. Agency. *New products and services in competitive electricity markets*. [Http://dsm.iea.org](http://dsm.iea.org), marzo 2000
- [22] I. E. Agency. *New demand side bidding in a competitive electricity market. Task VIII*. [Http://dsm.iea.org](http://dsm.iea.org), marzo 2000
- [23] R. S. Clair. *Load management technology in future challenges*. IEE seminar on electricity trading, núm. 2000/038, pp. 5/1-5/4, 2000
- [24] Coordinator E. Gehain, Gaz de France. *The birth of a European Distributed EnErgy Partnership that will help the large-scale implementation of distributed energy resources in Europe (EUDEEP)*. European project supported within the sixth framework programme for research and technological development, 2004-2009
- [25] C. Álvarez, D. Alfonso, M. Alcázar, G. Escrivá, A. Miranda. *Technical and economical tools to assess customer demand response in the commercial sector: application to the EU-DEEP field tests*. 3rd International conference on integration of renewable and distributed energy resources, Paris, diciembre 2008.
- [26] J. L. Pérez Arriaga, L. J. Sanchez de Tembleque y M. Pardo. *La gestión de la demanda de electricidad*. Preparado para la Fundación Alternativas, junio 2005
- [27] Grayson C. Heffner. *Configuring loads as a resource for competitive electricity markets – Review of demand response programs in U.S. and around the world*. Laurence Berkeley National Laboratory. [Http://etd.lbl.gov/EA/EMPU](http://etd.lbl.gov/EA/EMPU), noviembre 2002

- [28] New York ISO. *Emergency demand response program manual*. http://www.nyiso.com/services/documents/groups/bic_price_responsive_wg/demand_response_prog.html, abril 2003
- [29] PJM Interconnection, L.L.C. *Emergency load response program*. Tariff Revision. <http://www.pjm.com/services/demandresponse/documents.html>, marzo 2002
- [30] ISO New England Inc. *ISO-NE Load response manual*. http://www.iso-ne.com/smd/market_rule_1_and_NEPOOL_manuals/NEPOOL_manuals/MLRP_Load_Response_Program, enero 2004
- [31] SDG&E. *Rolling blackout reduction de SDG&E*. www.house.gov/hunter/news_prior_2006/PUCpresident.html, 2006
- [32] PJM Interconnection, L.L.C. *Economic load response program*. Tariff Revision. <http://www.pjm.com/services/demandresponse/documents.html>, marzo 2002
- [33] S. W. Illerhaus, J. F. Verstege. *Assessing industrial load management in liberalized energy markets*. Power engineering society summer meeting, vol. 3, pp. 2303-2308, 2000
- [34] S. M. Nadel. *Using utility demand-side management programs to spur the development of more efficient appliances*. IEEE trans. on industry applications, vol. 30, núm. 4, pp. 877-882, 1994
- [35] Honeywell International Inc. *Características de los sistemas de control*. <http://www.honeywell.com/sites/es/Automation-Control-Solutions.htm>, 2008
- [36] Agencia Valenciana de la Energía. *Guía de ahorro y eficiencia energética en locales comerciales de la Comunidad Valenciana*. Plan de ahorro y eficiencia energética, 2005
- [37] Documentación protocolo LON. www.lonmark.org/products/guides.htm, 2008

- [38] F. Mugarra. *Desarrollo de un sistema para la gestión optimizada de los recursos energéticos distribuidos*. PFC. Director D. G. Escrivá. Universidad Politécnica de Valencia, marzo 2006
- [39] Twido. *Manual de funcionamiento de TwidoSoft*. Spa. Schneider Electric, Versión 3.2, 2006
- [40] Schneider Electric S. A. *Power Logic Manual*, 2005
- [41] Controladores Programables Twido. *Guía de referencia de hardware*. TWD USE 10AS. Schneider Electric. Versión 3.2, 2006
- [42] Telemecanique. *Documentación Pasarela ETG100 de Telemecanique*. www.telemecanique.com/Product/index/system/architectures/Connexium, 2006
- [43] Hagner. *ELV-741 Light Sensor*. www.hagner.se/pdf/elv741.pdf, 2005
- [44] STA/TTA. *Captadores y transmisores para temperatura ambiente. 4-20mA, 2 hilos por pt100*. www.domout.com, 2007
- [45] Telemecanique. *Constituyentes de control industrial de Telemecanique*, 2007
- [46] Microsoft Corp. *MSDN Seguridad en ASP. NET*. www.microsoft.com/spanish/msdn/botica/menu/asp_sec.aspx, 2006
- [47] Bussiness Objects. *Manual de Crystal Reports*. www.vb-mundo.com/tutoriales/Crystal-Reports/17.html, 2006
- [48] Microsoft Corp. *Manual SQL Server 2005*. www.microsoft.com/spain/sql/productinfo/overview/default.aspx, 2005
- [49] Demanda Activa de Energía S. L. www.demandactiva.es, 2009
- [50] Microsoft Corp. *Visual Basic.net*. <http://msdn.microsoft.com>, 2008
- [51] Microsoft Corp. *Visual Studio 2005*. <http://msdn.microsoft.com>, 2005

- [52] Microsoft Corp. *Internet Information Services (IIS)*. <http://msdn.microsoft.com>, 2008
- [53] Adobe. *Flash Player 9.0*, www.adobe.com/support/documentation/es/flash, 2007
- [54] Schneider Electric S.A. *Manual de usuario ActiveX cliente modbus TCP-IP*, 2005
- [55] L. Buil. *Diseño e implementación de medidas de eficiencia energética en edificios de la U.P.V. PFC*. Director D. G. Escrivá. Universidad Politécnica de Valencia, mayo 2007
- [56] G. Escrivá, M. Alcazar, C. Alvarez. *Integral management system for the energy efficiency improvement in commercial facilities: Application to the Polytechnic University of Valencia*. International conference on renewable energy and power quality (ICREPQ'09), abril 2009.
- [57] W. Brockmann and S. Kuthe. *Different models to forecast electricity loads*. EUNITE world wide competition on electricity load prediction, noviembre 2001
- [58] S. Rahman, I. Drezga. *Identification of a standard for comparing short-term load forecasting techniques*. Electric power systems research, núm. 25, pp. 149-158, 1992
- [59] T. Baumann, H. Strasser, H. Landrichter. *Short term load forecasting methods in comparison: Kohonen learning, backpropagation learning, multiple regression analysis and Kalman filters*. 11th power system computation conference, vol. 1, pp. 445, agosto 1993.
- [60] M. Casey, V. Bui-Nguyen, J. Schmidt. *Another look at forecast accuracy of neural networks*. Proceedings of the second international forum on applications of neural networks to power systems, IEEE 93TH0532-2, pp. 389-394, Yokohama, abril 1993.
- [61] E. Handshin, Ch. Dornemann. *Bus load modelling and forecasting*. IEEE transactions on power apparatus and systems, vol. 3, núm. 2, pp. 627-633, mayo 1988.

-
- [62] C. Chàtfield. *The analysis of time series: An introduction*. Chapman&Hall /CRC Press, quinta edición, New York, 1996
- [63] T. Hastie, J. Friedman and R. Tibshirani. *The elements of statistical learning*. Springer Verlag, New York, 2002
- [64] I. Rojas and H. Palomares. *Soft-computing techniques for time series forecasting*. Proc. of the European symposium on artificial neural networks (ESANN), pp. 93-102, Bruges (Belgium), abril 2004
- [65] H. T. Yang and C. M. Huang. *A new short term load forecasting approach using self-organizing fuzzy ARMAX models*. IEEE transactions on power systems, núm. 13, pp. 217-225, 1998
- [66] R. Ramanathan, R. Engle, C. W. J. Granger, F. Vahid-Araghi and C. Brace. *Short run forecast of electricity loads and peaks*. International journal of forecasting, núm. 13, pp.161-174, 1997
- [67] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. *Time series analysis: Forecasting and control*. Prentice Hall, tercera edición, New Jersey, 1994
- [68] Minsky, M., Papert, S. *Perceptrons: An Introduction to computational geometry*. MIT Press, 1969
- [69] T. Senjyu, P. Mandal, K. Uezato and T. Funabashi. *Next day load curve forecasting using hybrid correction method*. IEEE transactions on power systems, vol. 20, núm. 1, febrero 2005
- [70] P. Mandal, T. Senjyu, N. Urasaki, T. Funabashi, *A neural network based several-hour ahead electric load forecasting using similar days approach*. Electrical power and energy systems, núm 28, pp. 367-373, 2006
- [71] Red Eléctrica de España, S.A. *Demanda de energía en tiempo real*. www.ree.es, 2008
- [72] S. Añó, *Modelo de demanda híbrido para sistemas de distribución de energía eléctrica*. Tesis Doctoral. Director Dr. C. Álvarez. Universidad Politécnica de Valencia, 1996

- [73] Harrison, P. J., Stevens, C. F. *Bayesian forecasting*. Journal of the Royal Statistical Society, series B, núm. 38, 1976.
- [74] Abu-El-Magd, M. A., Sinha, N. K. *Two new algorithms for on-line modelling and forecasting of the load demand of a multimode power system*. IEEE transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-100, núm. 7, pp. 3246-3253, julio 1981
- [75] Harvey, A. C. *Forecasting, structural time series models*, 1975
- [76] Wang, Li-Xing. *Adaptive fuzzy systems and control*. Ed. Prentice, 1994
- [77] Passino, K., Yurkovich S. *Fuzzy control*. Ed. Addison-Wesley, 1998
- [78] Jang, J. S. R., C. T. Sun, E. Mizutan. *Neuro fuzzy and soft computing*. Ed. Prentice-Hall, 1997
- [79] Holland, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Cambridge, 1992
- [80] Herrera F. Verdegay J. L. *Genetic algorithms and soft computing*. Physica-Verlag, 1996
- [81] Weather Underground Station. *Datos históricos de temperatura y humedad en diferentes zonas geográficas*. www.wunderground.com, 2008
- [82] B. Martín de Brio, A. Sanz. *Redes neuronales y sistemas borrosos*. Ed. RA-MA, tercera edición, 2006
- [83] M. Martín-Merino. *Técnicas neuronales y estadísticas para la predicción de demanda eléctrica*. Ed. Amarú Ediciones, 2004
- [84] Rumelhart, D.E., McClelland, J.L. *Parallel distributed processing*. Foundations. MIT Press, vol. 1, 1986
- [85] Rumelhart, D. E., Zipser, D. *Feature discovery by competitive learning*. Foundations. MIT Press, vol. 1, 1986

-
- [86] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. Willians, R. J. *Learning representations by backpropagating errors*. Nature, núm. 323, pp. 533-6, 1986
- [87] Müller, B., Reinhardt, J. *Neural networks. An introduction*. Springer-Verlag, 1990
- [88] Abu-Mostafa, Y. S., Psaltis, D. *Computadoras óptico-neuronales*. Investigación y ciencia, pp. 58-65, mayo 1987
- [89] Gedeon, T. D., Wong, P. M., Harris, D. *Balancing the bias and variance: Network topology and pattern set reduction techniques*. Proc. int. work on artificial neural networks, IWANN95, pp. 550-8, Torremolinos, España, junio 1995
- [90] Rosenblatt F. *Principles of neurodynamics*. Spartan Books, Nueva York, 1962
- [91] Denker, J. S., Schwartz, D., Wttner, b., Solla, S., Howard, R., Jackel, L., Hopfield, J. J. *Large automatic learning, rule extraction and generalization*. Complex Systems, núm.1, pp. 877-922, 1987
- [92] Windrow, B., Hoff, M.E. *Adaptative switching circuits*. 1960 IRE WECON Convention Record, núm. 4, pp. 96-104, 1960
- [93] Widrow, B., Lehr, M. A. *30 years of adaptative neural networks: Perceptron, Madaline and Backpropagation*. Proc. IEEE, núm. 78, pp. 1415-1442, 1990
- [94] Hecht-Nielsen. R. *Neurocomputing*. Ed. Addison Wesley, 1990
- [95] Funahashi, K. I. *On the approximate realization of continuous mappings by neural networks*. Neural Networks, núm. 2, pp. 183-192, 1989
- [96] Bishop, C. M. *Neural networks and their applications*. Rev. sci. instrum., núm. 65-6, pp. 1803-1832, 1994
- [97] Bishop, C. M. *Neural networks for patter recognition*. Oxford University Press, 1995

- [98] Baum, E. B., Haussler, D. *What size net gives valid generalization?*. Neural computation, núm. 1, pp. 151-160, 1989
- [99] Haykin, S. *Neural Networks. A comprehensive foundation*, ed. Prentice-Hall, segunda edición, 1999
- [100] R. D. Tabors, F. C. Schweppe, M. C. Caramanis. *Utility experience with real time rates*. IEEE trans. on power systems, vol. 4, núm. 2, pp. 463-471, 1989
- [101] Molina, A., Gabaldón, A., Fuentes, J.A., Álvarez, A. *Implementation and assessment of physically based electrical load models: Application to direct load control residential programs*. IEE proceedings gen. trans. distr., vol. 150, núm. 1, enero 2003.
- [102] B. P. Zeigler. *Theory of modelling and simulation*. Malabar, 1984
- [103] F. C. Schweppe, B. Daryanian, R. D. Tabors. *Algorithms for a spot price responding residential load controller*. IEEE trans. on power systems, vol. 4, núm. 2, pp. 507-516, 1989
- [104] M. Domínguez, O. Herrera, I. Alvarez. *Resolución de la ecuación de transmisión de calor en muros multicapa, aplicando la impedancia térmica*. Documentación técnica, Instituto del Frío C.S.I.C, España, 1985
- [105] H. Algarra. *Diseño de estrategias de control en equipos de climatización para la mejora de la eficiencia energética*. PFC. Director D. G. Escrivá. Universidad Politécnica de Valencia, marzo 2008
- [106] K. A. Antonopoulos, E. P. Koronaki. *Effect of indoor mass on the time constant and the thermal delay of buildings*. Int. J. of Energy Research, vol. 24, pp. 391-402, 2000
- [107] L. James - Northern Michigan University. www.learnhvac.com, 2002
- [108] J. A. Fuentes, A. Gabaldón, E. Gómez, A. Molina. *Desarrollo e implementación de un sistema flexible de adquisición de datos*. XII Reunión de grupos de investigación en ingeniería eléctrica. Córdoba, 2002

-
- [109] F. J. Jiménez. *La madera: propiedades básicas*. Grupo Estudios Técnicos, Madrid, 1999
- [110] S. Kalpakjian, S. Schmid. *Manufacturing engineering and technology*. Prentice Hall Inc, cuarta edición, 2001
- [111] J. M. Pinazo. *Manual de climatización II*. Universidad Politécnica de Valencia, vol. 2, 1996
- [112] A. Marrec. *Análisis y simulación del consumo eléctrico por usos finales en consumidores comerciales*. PFC. Director D. G. Escrivá. Universidad Politécnica de Valencia, noviembre 2008
- [113] F. C. Schweppe, B. Daryanian, R. D. Tabors. *Algorithms for a spot price responding residential load controller*. IEEE trans. on power systems, vol. 4, núm. 2, pp. 507-516, 1989
- [114] K. Tomiyama, J. P. Daniel, S. Ihara. *Modeling air conditioner load for power system studies*. IEEE trans. on power systems, vol. 13, núm. 2, pp. 414-420, 1998
- [115] A. Gabaldón. *Modelos estocásticos de carga para la gestión de la demanda en sistemas de distribución de energía eléctrica*. Tesis Doctoral. Director Dr. C. Álvarez. Universidad Politécnica de Valencia, 1992
- [116] W. Härdle. *Smoothing techniques: with implementation in S*. Springer-Verlag, 1991
- [117] P. E. Kloeden, E. Platen. *Numerical solution of stochastic differential equations*. Springer, segunda edición, 1995
- [118] A. R. Pedersen. *A new approach to maximum likelihood estimation for stochastic differential equations based on discrete observations*. Scandinavian Journal of Statistics, vol. 22, pp. 55-71, 1995
- [119] A. Molina. *Métodos y modelos para la gestión de cargas eléctricas residenciales en redes de distribución*. Tesis doctoral. Director Dr. A. Gabaldón. Universidad Politécnica de Cartagena, 2002