



**Jose Villar Collado**

Doctor Ingeniero del ICAI.  
Investigador del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) y Profesor del Departamento de Electrónica y Automática de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.



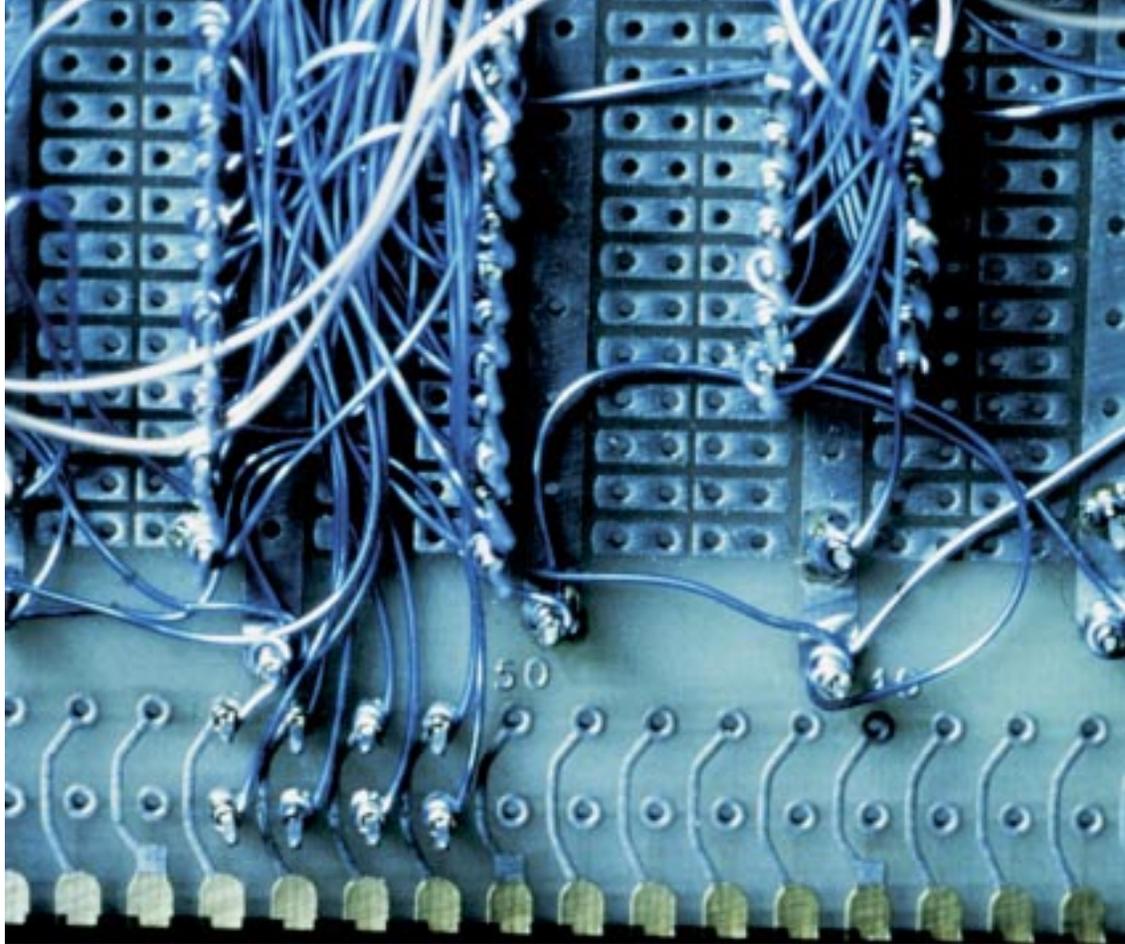
**Antonio Muñoz San Roque**

Doctor Ingeniero del ICAI.  
Investigador del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), donde es sub-director de la Subdirección de Sistemas Industriales (SI), y Profesor del Departamento de Electrónica y Automática de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.



**Eugenio Fco. Sánchez Úbeda**

Doctor Ingeniero del ICAI.  
Investigador del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), donde es coordinador del Área de Sistemas Inteligentes (ASI), y Profesor del Departamento de Sistemas Informáticos de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.



# SGO: sistema de información para la realización de ofertas en el mercado eléctrico español

Este artículo describe el entorno SGO, un sistema de información para la realización de ofertas óptimas en mercados eléctricos liberalizados, fruto de la colaboración entre Endesa y el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas. El SGO está basado en una arquitectura cliente-servidor, y consta de un amplio conjunto de herramientas diseñadas y desarrolladas para facilitar todas las tareas relacionadas con la elaboración de las ofertas del mercado eléctrico español: identificación de recursos de generación, generación de ofertas, generación de informes de resultados, caracterización del comportamiento de la competencia, y análisis y optimización de estrategias de oferta.

## Introducción

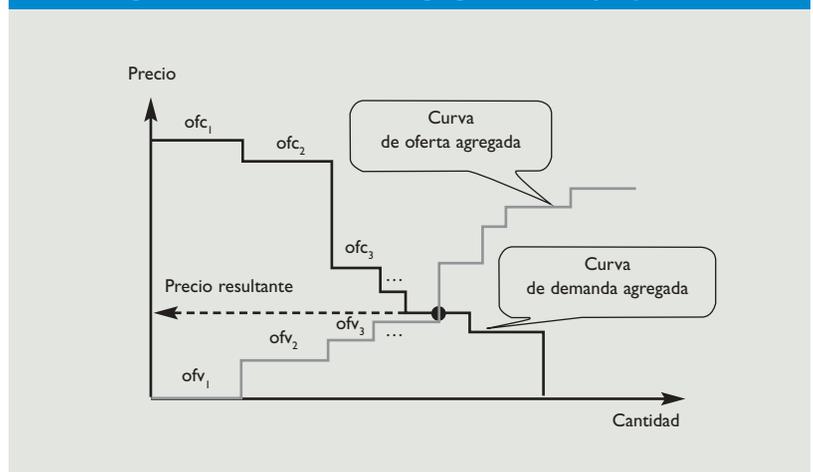
Los recientes cambios acaecidos en las políticas regulatorias de todo el mundo han favorecido la introducción de la competencia en muchos sectores industriales tradicionalmente regulados, como por ejemplo la electricidad, el gas o las telecomunicaciones. Para conseguir una mejor eficiencia económica, los gobiernos están fomentando el desarrollo de distintos tipos de mercados liberalizados para el comercio de estos bienes. La principal característica de estos mercados es la libre concurrencia de ofertas de compra y venta. Cuando lo que se negocia es energía eléctrica, los mercados son convocados según un horario preestablecido y los agentes acuden a ellos manifestando su disposición de adquirir o vender determinadas cantidades de energía (o potencia) a un precio dado. A la hora de cierre, las ofertas de compra y venta son casadas y se comunican las cantidades que han resultado adjudicadas, y el precio al que se liquidan las transacciones. El precio de la energía se obtiene, para cada hora, por intersección de las curvas de oferta agregada (venta) y de demanda agregada (compra) (ver Figura 1).

En estos entornos los participantes tratan de construir sus ofertas para maximizar su beneficio esperado. La complejidad de estos nuevos mercados y la incertidumbre que genera su desconocimiento está favoreciendo el desarrollo de nuevas y complejas herramientas informáticas que combinan las técnicas más tradicionales con las últimas tecnologías en optimización, análisis de datos y sistemas distribuidos [1], [2].

El comercio de energía eléctrica en el sistema español está repartido en distintos tipos de mercados, como son el mercado diario, los mercados intradiarios, y los mercados de servicios complementarios (mercado de reserva secundaria, mercado de reserva terciaria y mercados de desvíos). A su vez estos mercados están gestionados por dos tipos de operadores, el Operador del Mercado (OM), que utiliza criterios principalmente económicos para realizar las casaciones, y el Operador del Sistema (OS), que combina los criterios económicos con criterios técnicos para garantizar la seguridad y fiabilidad de la red [3], [5].

El OM es el encargado de gestionar el mercado diario y los mercados intradiarios, [3]. El objetivo del mercado diario es permitir la realización de las transacciones

Figura 1. Cruce de las curvas agregadas de compra y venta



energéticas necesarias para el establecimiento del programa diario de energía del día siguiente, dividiendo este horizonte de programación en veinticuatro horas consecutivas. Se convoca una única sesión cada día, y es el mercado en el que se negocia actualmente la mayor parte de la energía negociada a lo largo de un ciclo completo de mercados. El programa de energía que resulta se denomina PDBC (Programa Diario Base de Casación), y contiene las energías que cada unidad deberá producir o consumir:

El objetivo de los mercados intradiarios consiste en permitir aquellos ajustes que sean necesarios para corregir y mejorar (mediante varias sesiones convocadas) la programación resultante del mercado diario (PDBC). Se convocan seis veces al día, y su horizonte de programación cubre las horas restantes del día en curso (por lo que forma parte del funcionamiento en tiempo real) así como todas las horas del día siguiente en aquellos casos en que el PDBC de dicho día ya haya sido publicado. El resultado de estos mercados es una nueva programación energética denominada Resultado Acumulado del Intradiario o PIBCA.

En ambos tipos de mercados, diario e intradiarios, las ofertas enviadas por los participantes están compuestas de un número limitado de bloques de energía horarios con diferentes precios cada uno. Pueden ser ofertas simples, en cuyo caso cada conjunto de bloques horarios es independiente de los bloques del resto de horas, o bien compuestas, en cuyo caso se permite el establecimiento de condiciones transversales que ligan los bloques ofertados en horas distintas. Un ejemplo de condición

transversal es la de aceptación completa del primer bloque, que permite asegurar que los generadores que arranquen vayan a seguir acoplados durante todo el horizonte de programación posterior a su arranque, evitando arranques y paradas innecesarios.

Los mercados diario e intradiarios van siempre seguidos de un análisis de restricciones realizado por el OS para determinar si existen restricciones técnicas que impidan la casación de algunas de las ofertas, siempre con objeto de mantener la seguridad y fiabilidad del sistema eléctrico nacional. Con la información enviada por el OS, el OM restablece el equilibrio energético utilizando las ofertas restantes no casadas previamente, dando lugar a una nueva programación energética. En el caso del mercado diario el PDBC seguido del análisis de restricciones dan lugar al PDVD, Programa Diario Viable Definitivo. En el caso de los mercados intradiarios el PIBCA seguido del análisis de restricciones dan lugar al Programa horario final o PHF. Como resultado de éstos análisis de restricciones, y para evitar que sus imposiciones se incumplan en mercados posteriores, el OS publica los ficheros de limitaciones, donde se recogen las limitaciones superiores o inferiores que haya considerado necesario imponer a las unidades generadoras.

Además de los análisis de restricciones, el OS es también el encargado de los mercados de servicios complementarios, cuyo objetivo es dotar al sistema de reservas y energía en tiempo real para garantizar su seguridad y fiabilidad [5].

El mercado de reserva secundaria se convoca una vez al día después del mercado diario para dotar al sistema de la reserva positiva o negativa de potencia para cada hora del horizonte de programación, que permita mantener el equilibrio de potencia del sistema en tiempo real. El OS estima y publica las necesidades de reserva secundaria, recibe las ofertas de los generadores capaces de regular (esto es, aquellos controlados por un AGC) y casa las ofertas necesarias para cubrir su estimación de necesidades.

El mercado de reserva terciaria se utiliza para obtener la energía necesaria que permita restablecer la reserva secundaria que esté siendo utilizada, mediante una reprogramación de las unidades generadoras. La reserva terciaria se define como la máxima

potencia positiva o negativa que un generador puede incrementar en quince minutos y mantener hasta un máximo de dos horas. Cada vez que se necesita, el OS casa ofertas de terciaria del conjunto de ofertas de terciaria latentes enviadas previamente por los agentes generadores. Esto significa que este mercado no se convoca formalmente a una hora determinada, sino que los participantes deben enviar constantemente ofertas actualizadas en función de la programación de sus grupos, ofertas que quedan latentes hasta que el OS decide hacer uso de ellas. Es por tanto habitual que los participantes envíen nuevas ofertas de terciaria cada vez que cambia la programación de sus unidades.

Por último, el mercado de desvíos lo convoca el OS cuando predice desviaciones significativas, positivas o negativas, entre la generación de energía programada y el consumo real previsto para las próximas horas, ya que las desviaciones pequeñas son normalmente resueltas haciendo uso de la reserva terciaria. Las desviaciones previstas son comunicadas a los participantes que deben enviar sus ofertas de energía para compensar el desvío en un plazo menor de treinta minutos. Dado que los ajustes de energía deberían realizarse normalmente en los mercados intradiarios, el horizonte de los mercados de desvíos cubre desde la hora siguiente a su convocatoria, hasta el inicio del horizonte del siguiente intradiario del día.

Como se puede intuir del breve resumen presentado, la estructura global del mercado de energía eléctrica español es bastante compleja y exige a cada participante preparar cinco tipos de ofertas distintas y enviarlas a los operadores varias veces al día, con distintas restricciones de tiempo dependiendo del tipo de mercado, que en algunos casos llegan a ser de menos de treinta minutos. Además, las ofertas deben prepararse siempre a partir de la última programación energética disponible, de las últimas limitaciones publicadas por el OS, respetando los compromisos de secundaria adquiridos por las distintas unidades y, por supuesto, con los datos de disponibilidad real de las unidades más recientes para asegurar que las ofertas tienen en cuenta los recursos realmente disponibles.

Todos estos condicionantes han motivado la construcción del SGO, un completo sistema de información para operar en

mercados eléctricos liberalizados [6], [7], desarrollado para Endesa y actualmente en operación en su Centro de Control de Energía desde donde regularmente se preparan y envían las ofertas. Su sistema de información permite una rápida y eficiente identificación de los recursos disponibles para la realización de las ofertas, pero también ha permitido el desarrollo de herramientas de análisis para caracterizar y modelar el comportamiento de la competencia, y así poder optimizar las estrategias de precios empleadas en la elaboración de las ofertas.

Este artículo describe el SGO. Tras esta introducción la sección II describe la arquitectura general del SGO, mientras que las siguientes secciones detallan cada uno de sus principales componentes.

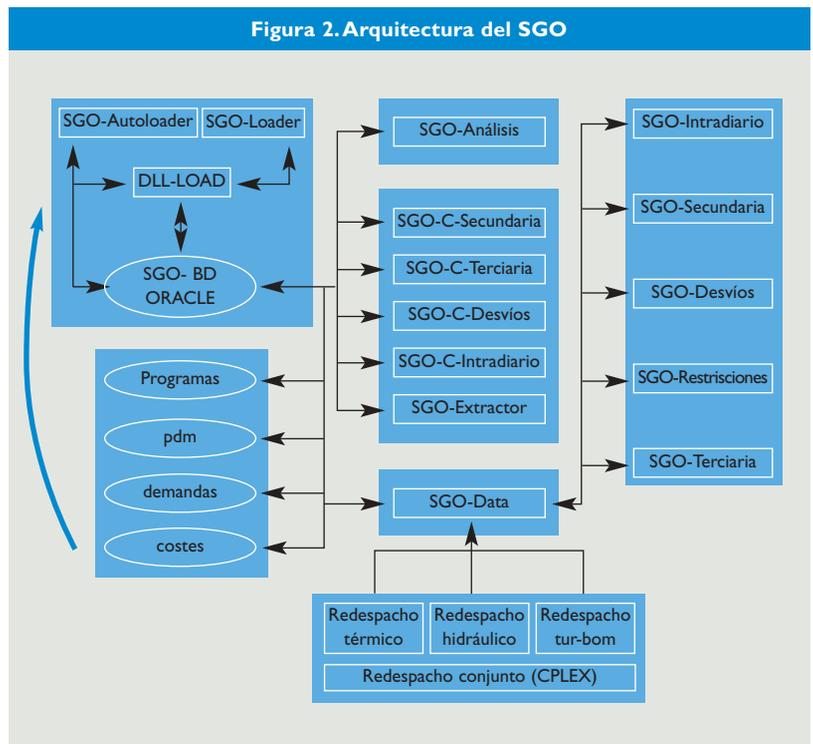
## Arquitectura del SGO

El sistema SGO está basado en una arquitectura cliente servidor con una base de datos soportada por un Servidor de base de datos Oracle, y un conjunto de aplicaciones cliente (Figura 2). Consta de los siguientes módulos:

### Base de datos y herramientas de carga y consulta

- **SGO-BD:** base de datos donde se almacena toda la información necesaria para la generación y análisis de las ofertas de los mercados.
- **SGO-Autoloader:** aplicación cliente para la carga automática en SGO-BD de la información de los ficheros de datos depositados en el buzón de entrada.
- **SGO-Loader:** aplicación cliente para la consulta de la información almacenada en SGO-BD y la carga manual de la información de los ficheros de datos seleccionados. Incorpora además algunas labores elementales de administración y de consulta, que aconsejan su uso para la consulta de datos puntuales, y la supervisión manual del proceso de carga automática.
- **SGO-Data:** aplicación cliente para la recopilación, bien desde el SGO-BD, bien desde los ficheros origen, de la información necesaria para la generación de ofertas de los mercados posteriores al diario. La redundancia hace al sistema más robusto ante posibles incidencias. Desde este módulo se ejecutan los programas de redespacho y se accede a los módulos de generación de ofertas.

Figura 2. Arquitectura del SGO



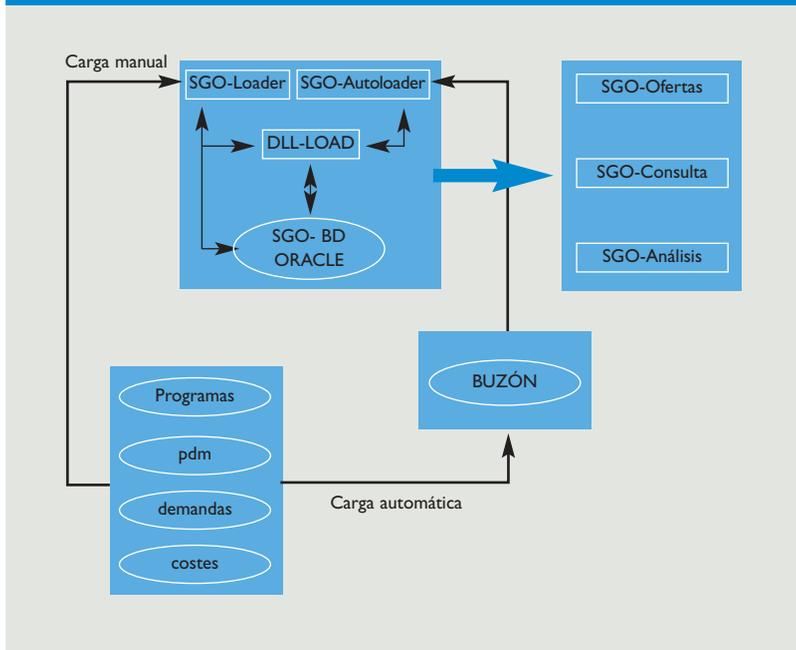
### Redespachos

- **Redespacho de unidades hidráulicas:** programa para el reparto óptimo de la energía casada y compromisos de secundaria de las unidades de oferta hidráulicas entre las unidades técnicas que las componen.
- **Redespacho de unidades térmicas:** programa para la obtención de un programa factible de potencia a partir de la energía casada y de los compromisos de secundaria de las unidades de oferta térmicas.
- **Redespacho de unidades de turbina-ción/bombeo:** programa para el reparto óptimo de la energía casada y compromisos de secundaria de las unidades de oferta de turbinación/bombeo entre las unidades técnicas que las componen.
- **Redespacho conjunto:** actualmente se esta poniendo en explotación un nuevo redespacho que permite una identificación óptima de las reservas de oferta disponibles, considerando conjuntamente todas las unidades de generación.

### Modulos de oferta

- **SGO-Secundaria:** aplicación para la generación de ofertas del mercado de reserva secundaria.
- **SGO-Intradiario:** aplicación para la generación de ofertas de los mercados intradiarios.
- **SGO-Desvíos:** aplicación para la generación de ofertas de los mercados de desvíos.

Figura 3. SGO-BD e interacciones con otros módulos



- **SGO-Terciaria:** aplicación para la generación de ofertas de reserva terciaria.
- **SGO-Restricciones:** aplicación para la consideración de las restricciones en las ofertas del mercado diario.

#### Módulos de consulta y análisis

- **SGO-Consulta Intradiario:** módulo de consulta para analizar y generar informes sobre los resultados de la casación de los mercados intradiarios.
- **SGO-Consulta Secundaria:** módulo de consulta para analizar y generar informes sobre los resultados de la casación del mercado de reserva secundaria.
- **SGO-Análisis:** conjunto integrado de herramientas para el análisis histórico de las ofertas presentadas al OS/OM por los distintos agentes para caracterizar las estrategias de la competencia y optimizar la curva de oferta propia.

El SGO permite disponer de fuentes de información y procedimientos de lectura/escritura unificados, proporcionando una fácil integración de nuevos módulos de oferta, de nuevas herramientas de consulta y de análisis, y en definitiva, una mejor capacidad de aprovechamiento de la información histórica disponible.

#### SGO-BD

SGO-BD es el núcleo del sistema SGO. Es una base de datos Oracle que contiene la información relevante para el proceso de

generación y análisis de ofertas. Esta información puede dividirse en tres tipos.

Por un lado está la información general relativa a los agentes del mercado, las unidades que cada uno de ellos oferta, las participaciones económicas de los agentes en las unidades de oferta, las zonas de regulación existentes, etc. Esta información, aunque dinámica, cambia con poca frecuencia.

Por otro lado está la información de mercado, procedente o bien del OM o bien del OS. Es un tipo de información muy dinámica ya que en la mayor parte de los casos se producen actualizaciones después de cada mercado, e incluso de forma horaria en otros. Esta información consta principalmente de las programaciones horarias publicadas por el OS o por el OM, los compromisos de secundaria publicados por el OS, las limitaciones impuestas por el OS, las necesidades establecidas para alguno de los mercados (como por ejemplo de reserva secundaria, o de energía para el mercado de desvíos), y las asignaciones y precios resultantes de las casaciones.

Por último está la información propia del agente, y en concreto la descripción completa de sus unidades de oferta, tanto de sus características técnicas como de sus disponibilidades en tiempo real. En el modelo de datos diseñado para el SGO las unidades de oferta están compuestas de unidades técnicas. Las unidades técnicas son la mínima unidad necesaria que el SGO considera para poder realizar el cálculo de recursos de oferta disponibles.

La carga de datos en SGO-BD puede realizarse mediante dos procedimientos (Figura 3). El procedimiento habitual es la carga automática mediante el SGO-Autoloader (cargador automático). Este módulo vigila constantemente la aparición de nuevos ficheros en su buzón de entrada, en cuyo caso procede a su lectura, identificación de su tipo, validación del fichero y carga de los datos que contiene. Cuando el cargador detecta ficheros erróneos los salva en un directorio especial para su análisis posterior por los administradores de la base de datos, indicando el error producido en un fichero de Log.

Cualquier fichero puede alternativamente cargarse mediante el cargador manual o SGO-Loader. Esta aplicación permite seleccionar un conjunto de ficheros para su carga, realizar consultas sencillas sobre los datos cargados, y mostrar de forma compacta y ordenada el conjunto de datos disponibles para un periodo de tiempo determinado.

Esto último permite verificar rápidamente si se dispone de toda la información necesaria para la realización de las ofertas y si está correctamente actualizada.

Ambas aplicaciones de carga comparten un conjunto de librerías DLL que facilita su mantenimiento y actualización frente a las frecuentes modificaciones de las reglas de funcionamiento del mercado eléctrico español, que suelen venir acompañadas de modificaciones en los formatos de ficheros ya existentes, o con la aparición de nuevos ficheros.

### SGO-Data y redespachos

El módulo SGO-Data habilita el acceso de los módulos de oferta a la información necesaria para la elaboración de las mismas, de forma transparente e independiente de su procedencia (ficheros o base de datos) y del formato de dichos datos (tanto en los ficheros como en la base de datos). Es el único módulo preparado para seleccionar y recuperar la información necesaria para la realización de una oferta, ya sea desde la base de datos del SGO o desde los ficheros originales, lo que independiza en gran medida el mantenimiento de los módulos de oferta debido a posibles modificaciones de las reglas del mercado. Además, la posibilidad de obtener la información por dos caminos alternativos hace al sistema mucho más robusto ante posibles incidencias, mejorando su fiabilidad.

SGO-Data utiliza a su vez tres módulos externos para la identificación de los recursos de generación. Estos módulos, llamados "redespachos" y programados en lenguaje C y GAMS [16], determinan el programa de energía factible y las disponibilidades de cada grupo de generación, a partir de los programas casados de energía y de reserva secundaria de cada unidad de oferta y de las limitaciones impuestas por el OS. En caso de detectar infactibilidades en los programas casados, ya sea por restricciones técnicas (como las rampas de los grupos térmicos) o reprogramaciones para poder cumplir los compromisos de reserva secundaria, los desvíos del programa han de ser ofertados en los mercados intradiarios posteriores para obtener un programa factible para cada unidad de oferta. De otro modo se incurriría en penalizaciones por no cumplir el programa casado.

Los redespachos se resuelven de forma distinta según el tipo de unidad de oferta que se trate. En el caso de las unidades

térmicas, donde cada unidad de oferta corresponde a un único grupo de generación, es necesario convertir el programa horario de energía de cada grupo en un perfil de potencia para detectar infactibilidades debidas al sobrepaso de la plena carga, mínimo técnico, rampas de subida y de bajada, y capacidad de regulación secundaria.

Las unidades de oferta de bombeo y de turbinación hidráulicas incluyen varios grupos técnicos (por ejemplo cada unidad de oferta de bombeo incluye varias máquinas). Es pues necesario que el redespacho reparta el programa de energía de la unidad entre los grupos que la componen, teniendo en cuenta las limitaciones debidas a sus características técnicas y a la disponibilidad de los embalses.

### SGO-Ofertas-i

Los módulos SGO-Ofertas-i son las aplicaciones de generación de ofertas desarrolladas para cada uno de los mercados posteriores al mercado diario. Todas ellas utilizan el módulo SGO-Data para acceder a la información de partida y calcular los recursos de generación. Incluyen además un conjunto de parámetros para establecer distintas opciones de oferta y la estrategia de precios a aplicar.

En el caso del módulo de oferta de reserva secundaria, se ha desarrollado un complejo algoritmo de optimización para la identificación de los recursos de regulación que compatibiliza los recursos de regulación a subir y a bajar de las unidades de una misma zona de regulación.

El resto de los módulos de oferta siguen un mismo proceso de generación de ofertas. Los pasos principales de este algoritmo son:

- Identificación de los recursos de generación mediante la ejecución de los redespachos en el módulo SGO-Data.
- Desagregación de los recursos de cada unidad técnica en bloques de energía, utilizando una curva de costes lineal a tramos para cada unidad técnica. Cada bloque de oferta lleva asociado su propio coste.
- Para cada hora se ordenan los bloques de oferta por coste.
- Asignación de una estrategia de precio a cada bloque. La estrategia de asignación de precios se realiza dividiendo el volumen total de recursos en distintos intervalos, en función de la naturaleza de la demanda que cubren. A cada intervalo se le asigna una estrategia de precios distinta, como combi-

nación de distintas funciones parametrizadas del coste de los bloques, del precio del bloque anterior, del precio marginal de mercados previos, etc. Los bloques de demanda siguen un mecanismo similar:

- Cálculo del precio de oferta de cada bloque según la estrategia asignada y asegurando una sucesión de precios crecientes para las ofertas de venta y decreciente para los de compra.
- Construcción de las ofertas a partir de los bloques de energía de cada unidad técnica y de los precios calculados, según el formato establecido por los operadores. Las ofertas han de presentarse agrupadas por unidades de oferta.

### SGO-Consulta-i

Estos módulos permiten generar de forma automática informes de resultados tras la casación de cada mercado, de forma diaria o mensual. Los resultados se presentan con distintos niveles de desagregación (por agente, tecnología o unidad de oferta) e incluyen variables de control utilizadas para monitorizar la posición de los distintos agentes en el mercado.

Además de estos informes de formato predefinido, el SGO dispone de la herramienta SGO-Extractor basada en Oracle Discoverer para el acceso personalizado a la información. Esta herramienta facilita el acceso al "Data Mart" del SGO, de tal forma que se simplifica la extracción de información agregada de la base de datos.

### SGO-Análisis

La aplicación SGO-Análisis está formada por un conjunto de herramientas de análisis que realizan las siguientes tareas para cada mercado considerado:

- Cálculo de las curvas de oferta de los agentes del mercado: a partir de las ofertas enviadas por los agentes a los operadores, se calculan las curvas de oferta agregadas de compra y de venta de cada agente. A partir de estos resultados se obtienen y se almacenan versiones simplificadas de las curvas reales, que serán utilizadas para el análisis.
- Caracterización del comportamiento de la competencia: mediante la aplicación de algoritmos de "clustering" y de estimación de funciones de densidad de probabilidad sobre las curvas de oferta agregadas, se identifican los patrones de comportamiento de la competencia. Como resultado de este análisis se obtienen por un lado los perfiles

característicos de oferta, y por otro la distribución estadística de las curvas reales de oferta en torno a estos perfiles. Los perfiles característicos de oferta son una descripción simplificada y fácilmente interpretable del comportamiento de la competencia, extraída mediante técnicas de minería de datos a partir de la información disponible para cada mercado, aplicadas a un elevado volumen de datos difícilmente interpretable a priori. El análisis de la activación temporal de estos perfiles y de su relación con otras variables son la fuente de conocimiento del mercado más importante del sistema SGO.

- **Ánálisis de variables explicativas:** con el objetivo de explicar la activación de los patrones identificados en el paso anterior, el módulo SGO-Análisis facilita el ajuste de modelos supervisados basados en redes neuronales artificiales y árboles de decisión [11], [12], [13]. Estos modelos utilizan como variables de entrada una selección de la información disponible en el momento de establecer la estrategia de oferta. Entre esta información se encuentra la última programación disponible, ya sea por empresa, tecnología, o grupo, el nivel de hidraulicidad, la estimación de demanda, las necesidades de cada mercado, el tipo de día (laborable/festivo) y de hora (llano/punta/valle), etc.

- **Generación de escenarios de la competencia:** una vez que se dispone de una estimación de la activación de los perfiles característicos y de la distribución estadística de las curvas de oferta en torno a estos patrones, es posible generar escenarios de la competencia mediante la aplicación de técnicas de Monte Carlo [17]. Estos escenarios son utilizados para evaluar con criterios estocásticos la calidad y robustez de una determinada estrategia de oferta frente a un conjunto de posibles comportamientos de la competencia.

- **Optimización de estrategias de oferta:** este módulo de optimización, basado en algoritmos genéticos [8], [15], permite ajustar los parámetros de la estrategia de asignación de precios a cada bloque de oferta, minimizando distintas medidas de riesgo definidas sobre el conjunto de escenarios de la competencia generados en el paso anterior.

La aplicación SGO-Análisis (Figura 4) está siendo desarrollada a partir de la herramienta IDAT, un módulo desarrollado sobre

Matlab en el IIT para el análisis inteligente de información.

### Cálculo de las curvas de oferta de los agentes del mercado

Con objeto de asegurar la transparencia en la operación del mercado, los operadores publican de forma periódica las ofertas que concurren a los distintos mercados [5]. SGO utiliza esta información para calcular las curvas de oferta y de demanda acumuladas, en forma de funciones escalón correspondientes a los distintos pares energía/potencia y precio ofer-



Figura 4. Interfaz de usuario de SGO-Análisis

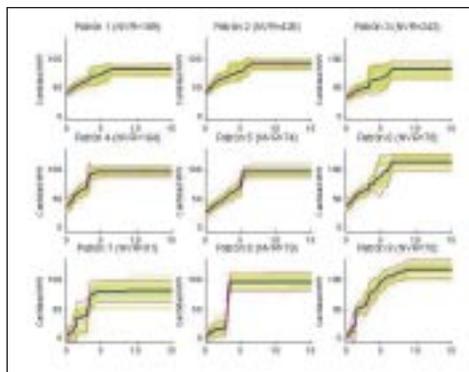


Figura 5. Ejemplo de perfiles tipo de oferta del mercado de reserva secundaria

tados por los agentes [7][8]. Estas curvas son posteriormente traducidas con el modelo Sigmoido [9] a un formato más adecuado para el análisis, como suma de funciones sigmoideas continuas y derivables. Esta transformación simplifica el algoritmo de casación y reduce la cantidad de información a almacenar:

### Caracterización del comportamiento de la competencia

La aplicación de algoritmos de "clustering" y de estimación de funciones de densidad sobre las curvas de oferta acumuladas permite identificar los patrones o perfiles tipo de oferta de la competencia más representativos, así como caracterizar la dispersión de las curvas reales de oferta en torno a estos patrones (Figura 5). Este análisis aporta una información muy valiosa sobre el comportamiento de la competencia, ya que como resultado del mismo se obtienen, además de los perfiles característicos, la secuencia temporal de activación de estos perfiles (Figura 6), cuyo análisis permite identificar cambios de estrategia de la competencia, y la probabilidad estimada de cada curva de oferta, facilitando la detección de situaciones anómalas. El modelo de estimación utilizado es la red neuronal PRBFN (Probabilistic Radial Basis Function Network, [10]) ya que el mismo modelo realiza las labores de agrupamiento o "clustering", estimación de funciones de densidad y generación de los perfiles tipo. La Figura 6 representa una secuencia temporal de activación de perfiles de oferta del mercado de reserva secundaria. En este gráfico aparece claramente el efecto de las horas de llano, punta y valle, el efecto de los días festivos y los cambios de estrategia. La herramienta permite realizar este análisis para un conjunto agregado de agentes, o para cada agente por separado.

### Análisis de variables explicativas

El objetivo de este análisis es identificar el subconjunto de variables disponibles que permite explicar la activación horaria de los patrones de oferta obtenidos en la etapa anterior. Entre esta información se encuentra la última programación disponible, ya sea por empresa, tecnología, o grupo, el nivel de hidráulicidad, la estimación de demanda, las necesidades de cada mercado, el tipo de día (laborable/festivo) y de hora (llano/punta/valle), etc. Para realizar esta selección, se ajustan modelos de aprendizaje supervisado

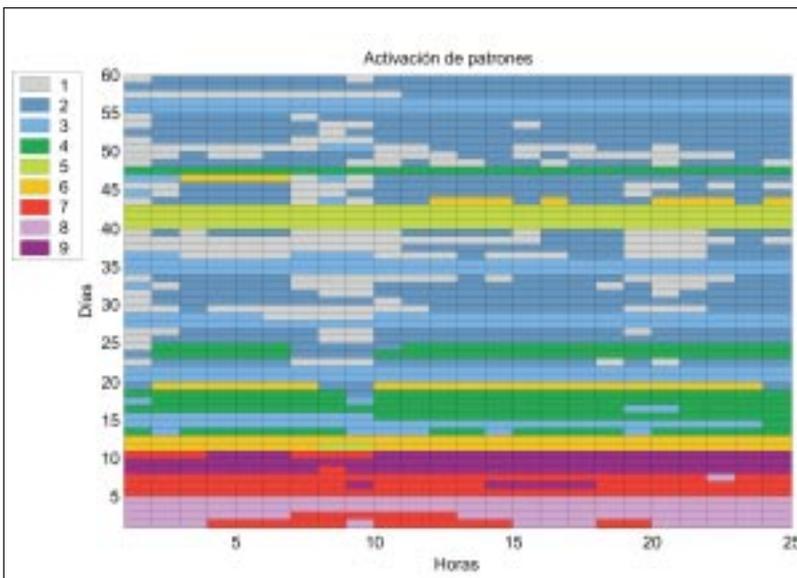


Figura 6. Secuencia temporal de activación de patrones de oferta

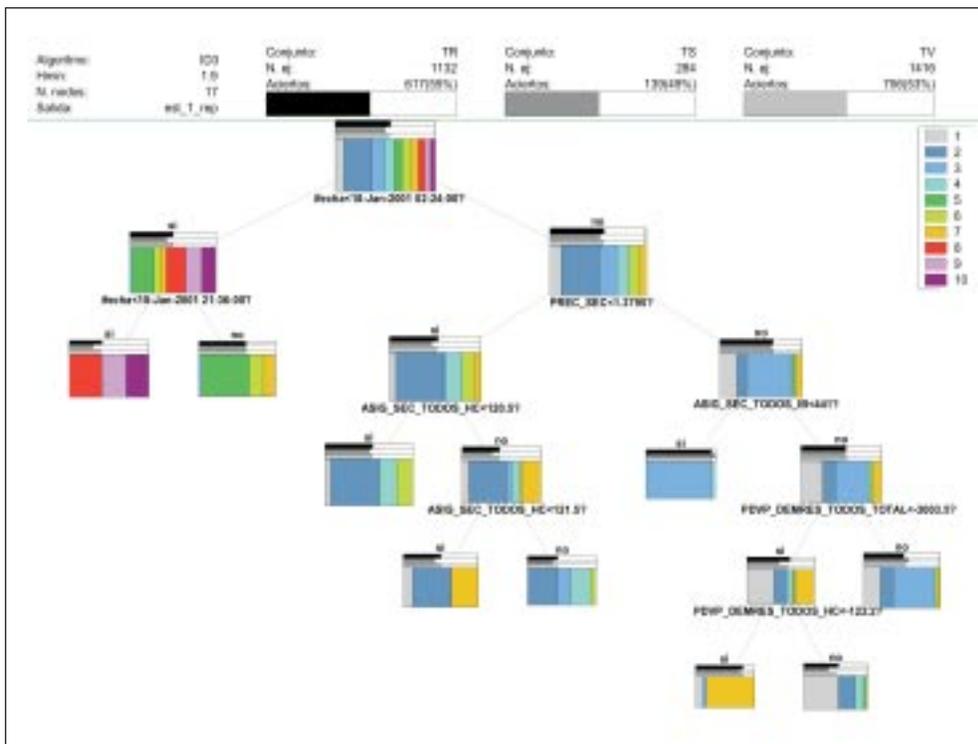


Figura 7. Árbol de decisión para predicción de los patrones más probables

(como los Perceptrones Multicapa [11] o los Árboles de Decisión [12]), para predecir el patrón activado en cada hora utilizando como entradas del modelo las variables explicativas candidatas. Una vez ajustado el Perceptrón Multicapa, el Análisis Estadístico de sus Sensibilidades [13] permite identificar el subconjunto de variables de entrada que realmente aportan información para predecir el patrón activado. En el caso de los Árboles de Decisión, el propio mecanismo de aprendizaje es capaz de seleccionar las variables de entrada más relevantes (Figura 7).

### Generación de escenarios de la competencia

Una vez que se dispone de una estimación de la activación de los perfiles característicos y de la distribución estadística de las curvas de oferta en torno a estos patrones, condicionada a las variables explicativas observadas, es posible generar escenarios de la competencia mediante la aplicación de técnicas de Monte Carlo. Estos escenarios son utilizados para evaluar con criterios estocásticos [8] la calidad y robustez de una determinada estrategia de oferta frente a un conjunto de posibles comportamientos de la competencia y, así, poder evaluar los riesgos incurridos.

Actualmente se está investigando la aplicación de modelos ocultos de Markov de

entrada/salida (IOHMM) [14], como generadores de escenarios de la competencia.

### Optimización de estrategias de oferta

Dado un conjunto de posibles escenarios de la competencia, generados según la función de densidad de probabilidad estimada y condicionada al valor de las variables explicativas seleccionadas, es posible optimizar los parámetros de la estrategia propia de oferta. Para cada conjunto candidato de parámetros de estrategia, se obtienen las distribuciones de ingresos, costes y cuotas obtenidos al casar los escenarios de la competencia con las ofertas que resultan de aplicar la estrategia evaluada sobre los recursos propios. A partir de estas distribuciones es posible definir distintas funciones objetivo que midan el riesgo asociado a la estrategia evaluada, como por ejemplo el percentil del 5% del beneficio esperado o la cuota media alcanzada. Esta característica abre el camino a la aplicación de métodos de optimización multiatributo. Por otro lado, la función objetivo resultante es una función compleja, en general no derivable, que justifica la aplicación de Algoritmos Genéticos [15] para su optimización. Estos algoritmos presentan la gran ventaja de no imponer restricciones a priori a la función objetivo, siendo únicamente necesario disponer de una codificación adecuada de los parámetros y de una función de evaluación efectiva.

La contrapartida a esta generalidad es el elevado número de evaluaciones de la función objetivo que se requiere generalmente hasta alcanzar soluciones aceptables, así como la inexistencia de condiciones de optimalidad. En la práctica, estas consideraciones no limitan la aplicabilidad de la herramienta, ya que no es necesario optimizar la estrategia en tiempo real para cada convocatoria del mercado, sino que el mismo conjunto de parámetros de estrategia optimizados puede mantenerse en vigencia hasta que se detecta un cambio en las condiciones del mercado. En ese momento es posible recuperar de la biblioteca de parámetros el conjunto que mejor se adapte a las nuevas condiciones del mercado, si éstas ya se han dado en el pasado, o realizar una nueva optimización.

### SGO-Expert

El módulo SGO-Expert está siendo actualmente desarrollado como sistema experto de monitorización de la casación de los distintos mercados. Tras la detección automática de la llegada de nueva información del mercado a la base de datos del SGO, el sistema SGO-Expert dispara la evaluación de un conjunto de índices de control de la casación que son analizados por las reglas preestablecidas en el sistema experto. Estas reglas permiten detectar de forma automática las posibles anomalías que se producen en el mercado, ya sea por error en la casación o cambio en las condiciones del mercado, activando las alarmas correspondientes con el fin de alertar a los operadores del Centro de Control.

### Conclusiones

Este artículo ha presentado el Sistema de Gestión de Ofertas del mercado eléctrico español (SGO), fruto de la colaboración entre el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas y Endesa, donde lleva más de cuatro años en operación.

El sistema desarrollado es un claro ejemplo de la aplicación de las técnicas más avanzadas de gestión, análisis y minería de datos a un proceso industrial y empresarial donde el volumen de información intercambiada es inmanejable por otras vías. Esta misma situación se está trasladando a otros sectores industriales, gracias al desarrollo de las telecomunicaciones y a la propagación de los sistemas automáticos de medida, monitorización y adquisición de datos.

La gestión adecuada de esta información y su explotación mediante técnicas avanzadas de análisis se ha convertido en uno de los requisitos indispensables de la empresa del siglo XXI. ■

### Referencias

- [1] G. P. Azevedo, B. Feijó, M. Costa, "Control Centers evolve with Agent Technology", IEEE Computer Applications, vol 13, n. 3, Julio 2000.
- [2] Simulator for Electric Power Industry Agents (SEPIA): Complex Adaptive Strategies, en <http://www.epri.com>.
- [3] Reglas del Mercado de Producción de Energía Eléctrica, <http://www.omel.es>.
- [4] Contrato de adhesión, <http://www.omel.es>.
- [5] Procedimientos de operación del mercado eléctrico español, <http://www.ree.es>
- [6] D. Friedman, J. Rust (eds.), The Double Auction Market. Institutions, Theories and Evidence, Addison-Wesley, 1993.
- [7] E. F. Sánchez-Úbeda, J. García-González, "Management of sealed-bid auction curves: Applications of the Linear Hinges Model", IP-MU'2000, Madrid, Julio 2000.
- [8] A. Mateo, E. F. Sánchez Úbeda, A. Muñoz, J. Villar et al., "Strategic Bidding under uncertainty using genetic algorithms", PMAFS'2000, Madeira, Portugal, Sept. 2000.
- [9] A. Mateo, E. F. Sánchez Úbeda, A. Muñoz, J. Villar et al., "Modeling bidding curves: the linear hinges model versus the sigmo model", IEEE Power Tech 2001 Conference, Oporto, Portugal, Sept 2001.
- [10] A. Muñoz, M. A. Sanz-Bobi, "An incipient fault detection system based on the probabilistic radial basis function network. Application to the diagnosis of the condenser of a coal power plant", International Journal of Neurocomputing (Elsevier Science). No. 23, (1998), pp. 177-194.
- [11] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, "Learning internal representations by error propagation", Parallel Distributing Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition (D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, eds), vol.1, capítulo 8, Cambridge, MA, MIT Press, 1986.
- [12] E. F. Sánchez Úbeda, "Models for data analysis: contributions to automatic learning," Tesis doctoral, Univ. Pontificia Comillas, 1999.
- [13] A. Muñoz, T. Czernichow, "Variable selection using feedforward and recurrent neural networks", International Journal of Engineering Intelligent Systems. Vol 2, pp. 91-102, 1998.
- [14] Y. Bengio, P. Frasconi, "Input-Output HMM's for sequence processing", IEEE Transactions on neural networks, vol 7, n° 5, Sept, 1996.
- [15] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, 1989.
- [16] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, GAMS User's Guide, Gams Development Corporation, 1996.
- [17] R. Y. Rubinstein, Simulation and the Monte Carlo Method, John Wiley and Sons, 1981.