

# HERRAMIENTA DE APOYO A LA DECISIÓN DE CONTRATACIÓN EN MERCADOS MINORISTAS DE ENERGÍA



**Emilio Gómez-Villalva García**  
Ingeniero Industrial del ICAI (1997) y Doctor Ingeniero Industrial del ICAI (2004). Trabaja en Gómez-Villalva Ingenieros en ingeniería y consultoría energética.



**Andrés Ramos Galán**  
Ingeniero Industrial del ICAI (1982) y Doctor Ingeniero Industrial por la UPM (1990). Es Profesor Propio Ordinario y Director del Departamento de Organización Industrial de la ETS de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas (e-mail: andres.ramos@iit.upco.es).

## Introducción

La liberalización de los mercados de energía ha motivado un gran cambio en la manera de proceder de los distintos agentes involucrados. En el caso de los mercados minoristas, los consumidores han pasado de contratar su energía a precios fijos con contratos estándar a tener la opción de negociar contratos a medida con comercializadores a precios referenciados a los de los mercados de energía. Esta nueva capacidad de elección por parte de los consumidores, añadida a la dificultad de predecir los precios de la energía y la volatilidad de los mismos, complican enormemente la toma de decisiones sobre la política energética que debe seguir el consumidor.

Con objeto de posibilitar la participación activa de los consumidores industriales en este nuevo marco regulatorio, en este artículo se describe una herramienta de apoyo a la decisión que gestiona de forma óptima la operación de instalaciones y la contratación de energía de consumidores industriales.

Los modelos propuestos están ideados para ser implantados y tener una aplicación efectiva en la toma de decisiones de consumidores industriales. Por ello se ha cuidado especialmente que:

- Los datos necesarios se encuentren en fuentes fácilmente accesibles por consumidores.
- Los modelos sean sencillos de parametrizar. A pesar de la complejidad de los problemas planteados, los consumidores no necesitarán conocer su formulación matemática para su utilización; únicamente tendrán que analizar los resultados obtenidos con los datos de entrada propuestos.
- Sea una herramienta completa, esto es, que no necesite ser implantada junto con otras aplicaciones para poder ser empleada de forma efectiva.

En la Figura 1 se muestra la estructura de la herramienta desarrollada. Los datos que emplea son: los precios históricos de combustibles y de electricidad, los parámetros de la instalación y las ofertas de contratos que son realizadas por el comercializador al consumidor. Entre las ofertas propuestas, el consumidor, ayudado por la herramienta presentada, escogerá los contratos más ventajosos.

La herramienta comprende módulos de generación de escenarios y optimización (Figura 1). Los primeros están orientados a obtener escenarios futuros de precios para el horizonte de planificación, mientras que

los segundos determinan la operación de la instalación del consumidor y los contratos óptimos.

El resto del artículo se ha estructurado de la siguiente forma: a continuación se describe el problema y el objeto del modelo de optimización determinista desarrollado; seguidamente se analizan las formas de contratación y la gestión del riesgo por parte de los consumidores industriales; finalmente, se discute la aplicación del modelo estocástico planteado.

### Descripción del problema: Planteamiento determinista

Para el desarrollo de los modelos se ha considerado un consumidor industrial tipo con demanda de energía eléctrica y térmica. Para abastecer estos consumos se dispone de una caldera alimentada por fueloil y de una planta de cogeneración cuyo principal equipo es un motor de gas natural. De esta forma, la energía eléctrica es satisfecha por la cogeneración o la red eléctrica y la energía térmica es cubierta por la cogeneración o la caldera (Figura 2).

Un consumidor con una instalación de estas características negocia cada año con comercializadores cuatro tipos de contratos:

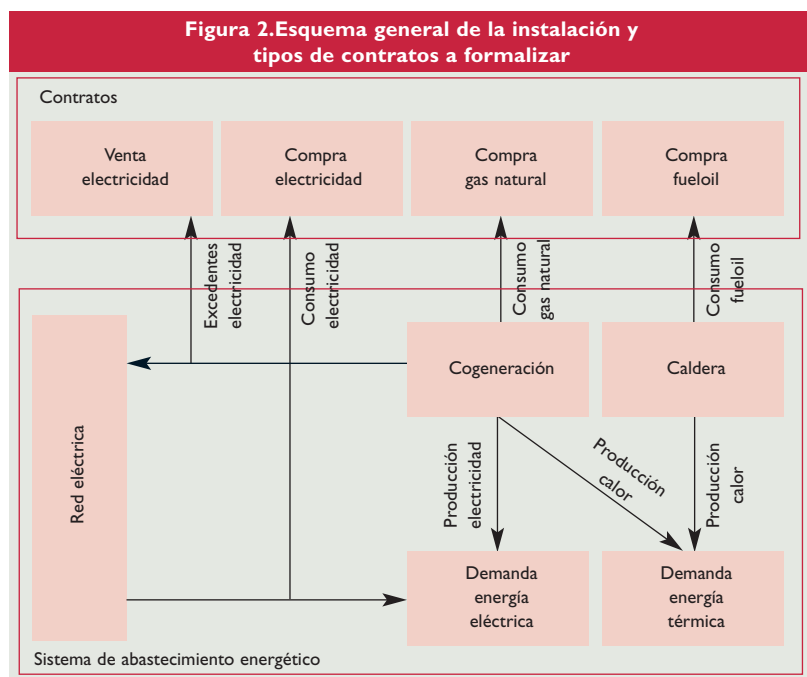
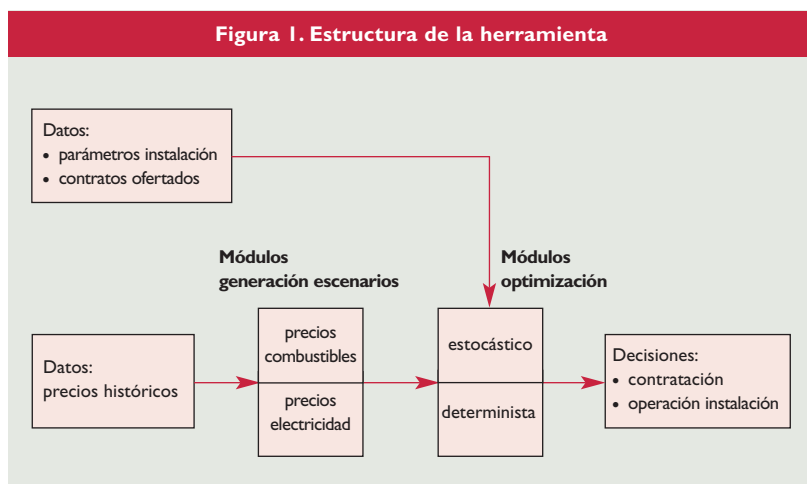
- adquisición de energía eléctrica para aquellos periodos en los que la cogeneración está parada,
- adquisición de fueloil para la caldera,
- adquisición de gas natural para la cogeneración y,
- venta de excedentes de energía eléctrica producidos por la cogeneración.

Esta configuración de la instalación del consumidor es bastante flexible, ya que engloba igualmente a consumidores sin cogeneración o sin demanda térmica. No obstante, cada fábrica es un caso particular, así que para otra instalación habría que adaptar los modelos, algo relativamente sencillo de llevar a cabo.

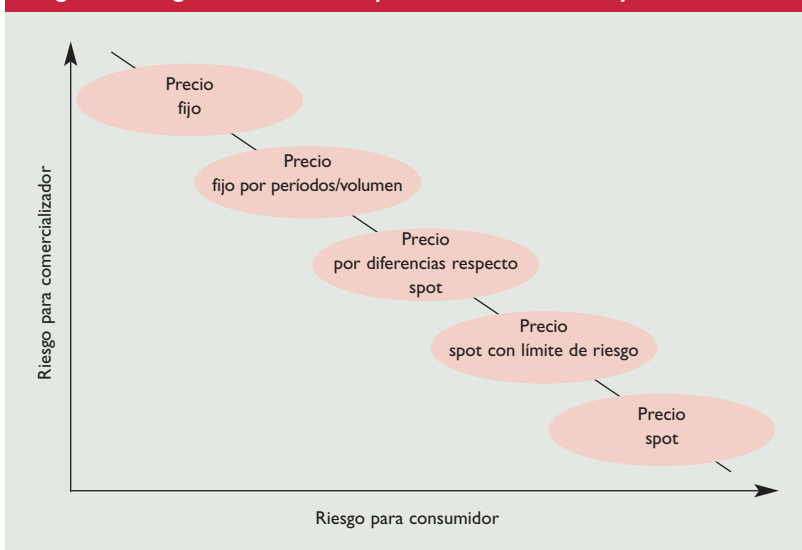
El coste anual del abastecimiento energético del consumidor viene dado por los contratos firmados y por la operación y el mantenimiento de la caldera y la cogeneración. Al tener varias ofertas de cada tipo de contratos, obtener aquéllos que hagan el coste energético mínimo es complejo. El consumidor debe conocer cómo operar la caldera y la cogeneración de forma óptima con cada alternativa de contratos, lo que deriva en un problema combinatorio de gran tamaño.

Con el propósito de dar solución a este planteamiento, en primer lugar se formula un modelo de optimización determinista. Con unas demandas energéticas y unas propuestas de contratos dadas, el modelo determina los consumos anuales de gas natural, fueloil y electricidad, y la venta anual de energía eléctrica excedentaria. Estas cantidades son contratadas mediante las opciones propuestas por los comercializadores para cada uno de estos bienes. Los contratos son de carácter anual tal y como ocurre en el mercado español.

Por tanto, el modelo minimiza el coste de los contratos de compra de gas natural, fueloil y electricidad, y los costes de mantenimiento y operación de la cogeneración y de la caldera, y maximiza el contrato de venta



**Figura 3. Riesgo de los contratos para comercializadores y consumidores**



de excedentes de energía eléctrica. Las restricciones del problema están asociadas a la operación de la instalación, al balance de energía del sistema de abastecimiento energético y a los formatos de los contratos de cada tipo.

A pesar de que el objeto del modelo es obtener los contratos óptimos, es necesario hacer una optimización conjunta de decisiones de operación de la instalación y contratación. El volumen de energía eléctrica consumido/vendido y el de los combustibles comprados dependen de los precios de la energía, que a su vez lo son en función de los contratos determinados.

El planteamiento determinista no contempla la incertidumbre de los precios de la energía. Únicamente considera un escenario de precios, por lo que no refleja el riesgo en el coste de suministro de energía, un factor que es necesario tener presente para escoger los contratos. Este inconveniente se solventa con el modelo estocástico tal y como se discute más adelante.

### Contratación y gestión del riesgo

En líneas generales el riesgo se asocia con la falta de certeza en un resultado económico. Esta incertidumbre lleva a los agentes del mercado a buscar formas de gestionar el riesgo al que están expuestos. Mediante esta gestión, éstos ajustan su política de decisión a la situación del mercado actual y futura prevista al objeto de evitar unos resultados económicos no deseados.

Las fuentes de riesgo son variadas y dependen del agente considerado. En concreto,

para un consumidor industrial, estas pueden resumirse en:

- Riesgo de precios.
- Riesgo de volumen, por un fallo de la instalación o por la incertidumbre de la demanda.
- Riesgos de crédito y regulatorios.

De estos tres tipos de riesgo, el de precios es el principal y el único considerado en la herramienta propuesta. El riesgo de volumen se ha despreciado ya que, por una parte, un fallo de la fábrica que provoque una parada de unas horas no tiene una repercusión relevante en una planificación anual; por otra parte, las fábricas tienen una demanda muy estable. Con respecto a los riesgos regulatorios y de crédito, éstos están fuera del alcance de los modelos matemáticos, por lo que se omiten igualmente.

La gestión de la incertidumbre de precios se realiza principalmente mediante contratos. En los mercados mayoristas de energía éstos se suelen negociar a través de mercados financieros, mientras que en los minoristas los consumidores formalizan contratos bilaterales con comercializadores.

La elección de unos contratos u otros viene determinada en gran medida por la actitud que el consumidor industrial muestre ante el riesgo de precios. En general, un consumidor industrial es bastante adverso al riesgo. Lo más habitual es que su negocio principal no sea la gestión energética, por lo que no suele estar dispuesto a asumir sorpresas en sus facturas de energía.

Los contratos considerados en este trabajo son tales que recorren la diferente aversión al riesgo que puede tener un consumidor (Figura 3). Por medio de estos contratos el consumidor adquiere un compromiso entre el resultado económico y el riesgo. En concreto, los principales tipos de contratos representados, comenzando por los que más incertidumbre entrañan para el consumidor y menos para el comercializador, son:

- Precio fijo anual.
- Precio fijo anual por periodos. Típicamente punta, llano y valle para el caso de la electricidad.
- Precio fijo anual por volumen consumo. Un consumo superior/inferior a lo establecido en el contrato supondrá un descuento/aumento del coste del contrato.
- Precio por diferencias respecto al mercado. El precio del contrato para cada periodo

corresponde a la diferencia entre un precio de referencia del contrato y el del mercado spot.

- Precio de mercado con límite de precio. Consiste en establecer unos umbrales máximo y/o mínimo del precio de la energía independientemente del precio del mercado.
- Precio spot de mercado.

Cada uno de los bienes a comprar (electricidad, gas natural y fueloil) y a vender (electricidad) puede formalizarse con los tipos de contratos mencionados. Estos tipos exceden con creces las formas de contratación más habituales en el mercado energético español, lo que le confiere al consumidor una gran flexibilidad a la hora de considerar formatos de contratos.

Para representar matemáticamente una medida de riesgo para consumidores industriales, previamente es necesario definir el riesgo para estos agentes. Según nuestro criterio, estos perciben el riesgo como la posibilidad de incurrir en costes altos del abastecimiento energético una vez desvelada la incertidumbre de precios. A un consumidor no le preocupa tener un coste bajo en sus facturas energéticas, de ahí que medidas tradicionales de riesgo, como la varianza, que reflejan la dispersión total de la distribución de costes no son apropiadas. Con esta definición de riesgo, en el trabajo realizado se ha optado por implementar dos medidas: **Valor en Riesgo (VaR)** y **nivel de seguridad** (Figura 4).

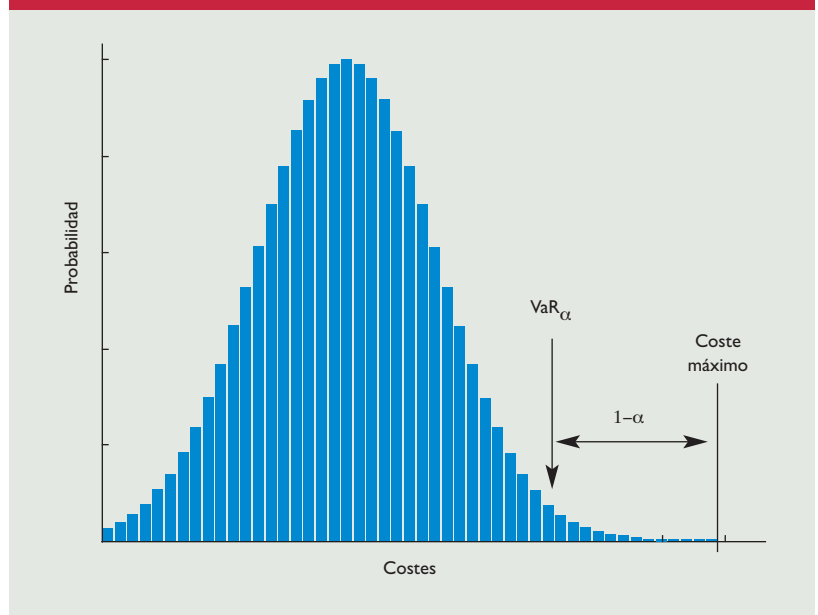
El Valor en Riesgo (VaR) es sin duda la medida estrella en la gestión del riesgo de carteras financieras y son numerosos los autores que hablan de ella. Fue popularizada a mediados de los años 90 por el grupo de gestión de riesgos del banco de inversión J.P. Morgan y desde entonces ha constituido un punto de referencia en la medida del riesgo para empresas e instituciones financieras.

La clave del éxito del VaR es la sencillez de su interpretación. La medida del VaR responde a la pregunta: ¿Cuál es el máximo coste esperado del abastecimiento con un nivel de confianza  $\alpha$  en un horizonte dado y en condiciones normales del mercado? Matemáticamente, si  $X$  es la distribución de costes de abastecimiento, el  $\text{VaR}(\alpha)$  para el nivel de confianza  $\alpha$  se define como (Figura 4):

$$P\{x \leq \text{VaR}(\alpha)\} = \alpha$$

Por tanto, el  $\text{VaR}(\alpha)$  es el valor límite por encima del cual se producirán costes únicamente con probabilidad  $1 - \alpha$ . En otras pala-

Figura 4. Función de densidad de costes de abastecimiento: medidas de riesgo



bras, el coste de abastecimiento será inferior a  $\text{VaR}(\alpha)$  con probabilidad  $\alpha$ , o el  $\alpha 100\%$  de las ocasiones el coste de abastecimiento será menor que el  $\text{VaR}(\alpha)$ .

La otra medida de riesgo implantada, nivel de seguridad, corresponde al coste máximo de la distribución de costes (Figura 4). El consumidor escogerá el valor de un parámetro denominado nivel de seguridad, que es una cota superior del coste máximo de la distribución. Así, el decisor se asegura un coste máximo de la distribución independientemente de la cartera de contratos escogida.

Frente al VaR, el nivel de seguridad es más conservador, más sencillo y menos flexible; nótese que el VaR para un nivel de confianza  $1$  es equivalente a limitar el coste máximo de la distribución de costes. Entre estas dos medidas, la mejor es aquella que mejor se adapte a la percepción del riesgo del consumidor, de tal forma que la medida más indicada depende de cada usuario.

Una vez descritas las medidas de riesgo que emplea la herramienta y los posibles tipos de contratos empleados para gestionar el riesgo, en el apartado siguiente se describe el objeto y el funcionamiento del modelo estocástico.

## Planteamiento estocástico

Cualquier decisión que entrañe incertidumbre requiere un compromiso entre un resultado esperado y el riesgo que se asume. Los mercados energéticos no son una ex-

Figura 5. Ejemplo de frontera eficiente

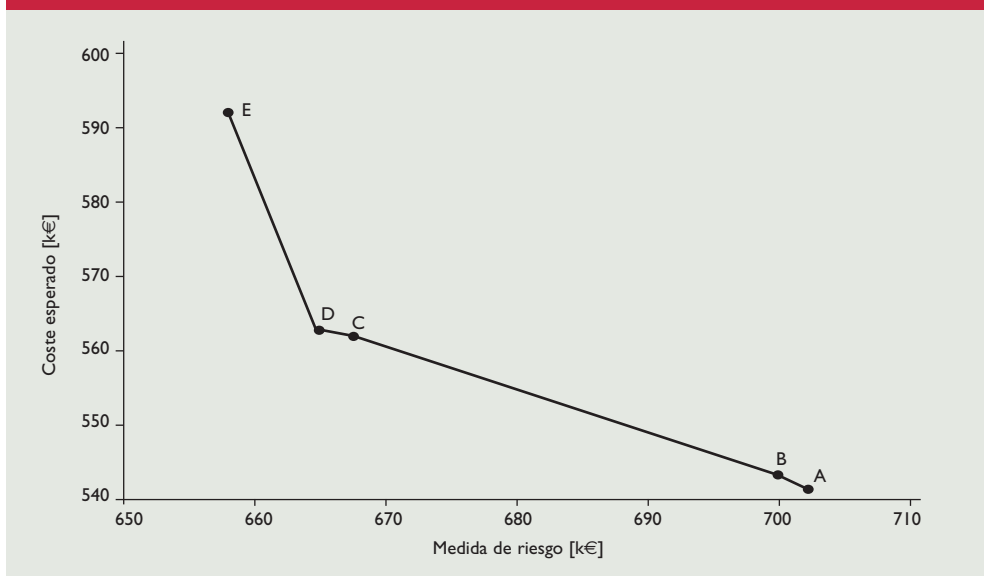
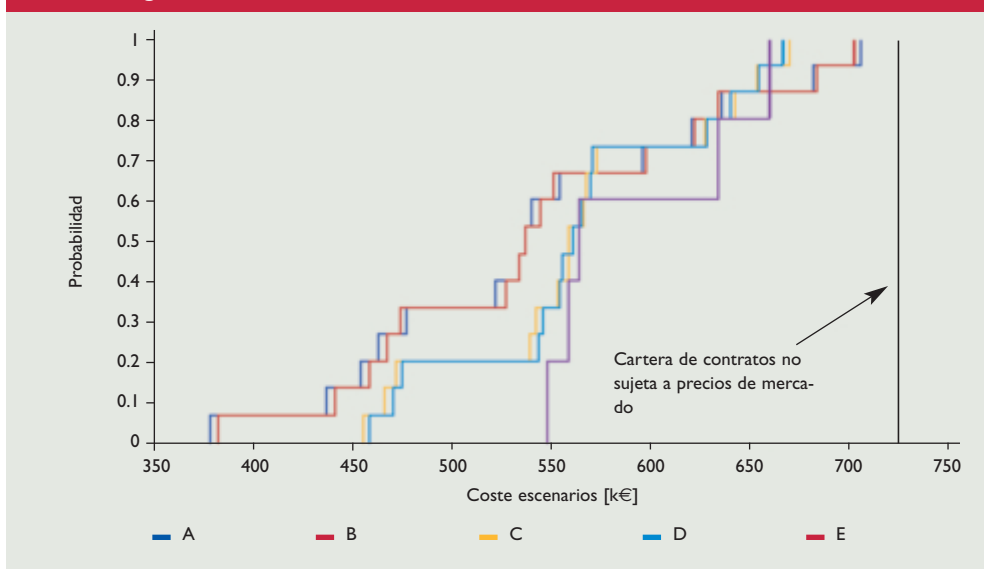


Figura 6. Funciones de distribución de las carteras de la frontera eficiente



cepción. Los agentes en estos mercados procuran obtener un beneficio máximo y un riesgo mínimo y, por tanto, sus decisiones se basan en un compromiso entre riesgo y beneficio. De la misma manera, un consumidor industrial pretende minimizar su coste esperado de abastecimiento energético asumiendo un riesgo mínimo. Según se ha comentado, en el medio plazo este compromiso coste-riesgo en su abastecimiento energético lo realiza mediante la gestión de contratos de suministro de energía.

Para formular este problema recurrimos a la programación estocástica, la cual supone una técnica muy potente para la toma de

decisiones ya que, frente a la optimización determinista, permite la representación de la incertidumbre de los parámetros del problema.

Los modelos estocásticos desarrollados emplean como datos de entrada precios aleatorios que se representan mediante árboles de escenarios. La herramienta engloba un módulo para determinar precios de electricidad y otro para determinar precios de los combustibles gas natural y fueloil (ver Figura 1). El no estimar conjuntamente todos los precios se debe a que en España no existe una correlación significativa entre ambos tipos de precios en el mercado energético español.



El modelo estocástico obtiene soluciones óptimas y únicas de los contratos a formalizar en función de las decisiones de operación de la instalación, las cuales dependen de la incertidumbre de los precios. La cartera óptima de contratos se determina a partir de un compromiso entre los objetivos *coste de abastecimiento esperado* y *medida de riesgo* (VaR o nivel de seguridad). Estos objetivos, que se pretenden hacer mínimos, son contrapuestos, de forma que el compromiso entre ambos se establece mediante un parámetro denominado *aversión al riesgo*.

Los desarrollos realizados se han validado mediante una aplicación numérica que emplea datos reales de una fábrica de celulosa y 15 escenarios de precios. Véase como ejemplo de los resultados obtenidos la Figura 5, en la que se representa la *frontera eficiente* calculada utilizando el nivel de seguridad como medida de riesgo. Esta curva representa el conjunto de soluciones óptimas (carteras de contratos) obtenidas al variar el parámetro de aversión al riesgo. Son carteras de contratos óptimas desde el punto de vista del doble objetivo coste esperado-medida de riesgo. Soluciones por encima de esta curva empeoran en al menos uno de los dos objetivos, mientras que por debajo de la frontera eficiente no existen soluciones factibles del problema.

En este caso se han obtenido 5 carteras de contratos eficientes (A-E). Cada cartera está formada por un contrato de cada uno de los tipos: compra de electricidad, compra de gas natural, compra de fueloil y venta de electricidad. La cartera denominada A firma contratos a precio spot de mercado, lo cual es lógico ya que es la de mayor riesgo y menor coste esperado. En el extremo opuesto, la solución E escoge contratos a precio de mercado con límites de riesgo y contratos a precio fijo, elevando por tanto el coste esperado y disminuyendo el riesgo.

En la Figura 6 se muestran las funciones de distribución de cada una de las alternativas calculadas. Cada función está formada por 15 valores, que corresponden a cada uno de los costes de abastecimiento para los escenarios de precios considerados. La diferencia de coste de los escenarios de cada alternativa se debe a la operación de la instalación en función de los precios, ya que los contratos son los mismos.

Es significativo observar que todas las carteras de contratos obtenidas contienen contratos indexados al mercado. Una cartera

no sujeta a los precios del mercado se situaría según lo indicado en la Figura 6. Esta cartera no es *eficiente* ya que tanto el coste esperado como la medida de riesgo (sea VaR o nivel de seguridad) son iguales y superiores al de la alternativa E.

Nótese que esta cartera formada por contratos a precio fijo tiene una dispersión nula, esto es, una incertidumbre nula. Sin embargo el riesgo de esta alternativa, medido según los criterios expuestos (VaR o nivel de seguridad) es alto. Para esta cartera, la prima de precio que exige el comercializador al consumidor por garantizar una incertidumbre nula es muy alta, de forma que no es una cartera eficiente para el consumidor.

Los resultados obtenidos con este caso ejemplo hay que analizarlos con prudencia ya que, aunque los contratos han sido parametrizados de forma realista, no han sido proporcionados por comercializadores. No obstante, este ejemplo muestra la utilidad de la herramienta desarrollada para analizar la conveniencia de formalizar unos u otros contratos.

## Conclusiones

Existe un número significativo de herramientas de optimización para la operación de instalaciones y la contratación orientadas a empresas generadoras. Sin embargo, los modelos en el campo de los consumidores industriales son escasos. Mediante este tipo de herramientas se incentivaría la entrada de nuevos consumidores en el mercado así como la participación más activa de aquéllos que ya lo hacen.

En este artículo se ha descrito una aplicación para el apoyo en la decisión de consumidores industriales acerca de la contratación de energía en mercados liberalizados. Mediante esta herramienta el consumidor podrá aprovechar las oportunidades que ofrece la apertura de los mercados, logrando una disminución de sus facturas energéticas y un control del riesgo que asumen por contratar a precio variable.

Aunque la herramienta presentada está concebida para ser empleada por consumidores industriales, puede ser igualmente útil para comercializadores de cara a realizar ofertas competitivas a sus clientes. La aplicación también puede ser empleada para la comparación de sistemas de cogeneración a instalar en una fábrica. Para ello bastaría ejecutar los modelos para varios años con los distintos sistemas propuestos. ■