

# ANÁLISIS ENERGÉTICO Y ESTRATEGIAS DE OPERACIÓN DE UNA PLANTA DE TRIGENERACIÓN INTEGRADA EN UNA RED DE DISTRITO

LAGANA, Alessandro; MAGNANI, Sara; BRUNO, Joan Carles;

ORTIGA, Jordi; CORONAS, Alberto

juancarlos.bruno@urv.cat

<sup>(1)</sup>Universidad Rovira i Virgili, Departamento de Ingeniería Mecánica, CREVER, Avda. Paisos Talans, 26, 43007 – Tarragona (España)

## RESUMEN

En el marco del proyecto Polycity se construyó una planta de poligeneración de energía de alta eficiencia en un nuevo desarrollo urbano denominado Parc de l'Alba, en Cerdanyola del Vallès (Barcelona). Esta área incluye un Parque de Ciencia y Tecnología con el Laboratorio de Luz Sincrotrón (ALBA), así como edificios de bajo consumo energético. El proyecto se está ejecutando en diferentes pasos. En el primer paso, se construyó una planta de trigeneración basado en motores de cogeneración y en los siguientes pasos que se espera que aumente el número de motores en servicio e introducir una planta de refrigeración solar y un sistema de gasificación de biomasa para completar la planta de poligeneración. La planta de trigeneración ya existente proporciona electricidad, agua caliente y agua fría para el Sincrotrón y los edificios del parque tecnológico a través de una red con cuatro tubos de calefacción urbana y refrigeración. La planta ST-4 se compone de tres motores de gas de cogeneración de gas natural de 3,3 MW de potencia cada uno, una máquina de absorción de doble efecto de 5 MW accionada directamente con gases de escape, una máquina de absorción de simple efecto de 3 MW, y unidades auxiliares: una enfriadora de compresión de 5 MW, una caldera de gas natural de 5 MW. El sistema incluye también un depósito de almacenamiento de agua enfriada de 4.000 m<sup>3</sup>.

En este artículo se presentará un análisis energético detallado de la planta utilizando datos de operación reales y se estudiarán diferentes estrategias de operación aplicando un software de optimización. Otro de los puntos a tratar es el cálculo de las prestaciones de la planta a baja carga ya que actualmente el número de usuarios conectados a la red de distrito es todavía bajo. El software utilizado es un desarrollo propio basado en GAMS como el lenguaje de programación para definir y resolver problemas de simulación y optimización.

Los principales parámetros de funcionamiento de los componentes de la planta se introducen como entradas en la plataforma de optimización, además de la demanda de energía en forma de agua caliente y refrigeración. Esto permite seleccionar las unidades en funcionamiento y la distribución de carga entre las diversas unidades. Los resultados se utilizarán para proponer nuevas estrategias de operación de acuerdo con el patrón de cada demanda, calcular la viabilidad de estas y detectar las posibles fuentes de desviación con respecto al rendimiento esperado en cada unidad.

**Palabras clave:** Trigeneración, análisis energético, optimización.

## 1. Introducción y objetivos

Las plantas de trigeneración integradas en redes de distrito de calor y frío son una opción muy interesante para el suministro de servicios energéticos ya que permiten aprovechar de forma local el calor residual generado en la producción de energía eléctrica de forma muy eficiente.

En el marco del proyecto Polycity se construyó una planta de trigeneración de energía de alta eficiencia para una red de distrito de frío y calor en un nuevo desarrollo urbano denominado Parc de l'Alba, en Cerdanyola del Vallès (Barcelona). Esta área incluye un Parque de Ciencia y Tecnología con el Laboratorio de Luz Síncrotrón (ALBA), así como edificios de bajo consumo energético [1]. El proyecto se está ejecutando en diferentes pasos. En una primera fase, se construyó una planta de trigeneración basado en motores de cogeneración y en las siguientes fases se espera que aumente el número de motores en servicio e introducir una planta de refrigeración solar y un sistema de gasificación de biomasa para completar la planta de poligeneración. La planta de trigeneración ya existente proporciona electricidad, agua caliente y agua fría para el Síncrotrón y los edificios del parque tecnológico a través de una red con cuatro tubos de calefacción urbana y refrigeración.

En este artículo se presenta un análisis energético detallado de la planta utilizando datos de operación reales y se estudiarán diferentes estrategias de operación aplicando un software de optimización. El software utilizado es un desarrollo propio basado en GAMS como el lenguaje de programación para definir y resolver problemas de simulación y optimización. Otro de los puntos a tratar es el cálculo de las prestaciones de la planta a baja carga ya que actualmente el número de usuarios conectados a la red de distrito es todavía bajo.

## 2. Descripción de la planta de trigeneración

La planta de trigeneración ya existente proporciona electricidad, agua caliente y agua fría para el Síncrotrón y los edificios del parque tecnológico a través de una red con cuatro tubos de calefacción urbana y refrigeración (Fig. 1). La planta ST-4 se compone de tres motores de gas de cogeneración de gas natural de 3,3 MW de potencia cada uno operando según un ciclo Miller, una máquina de absorción de doble efecto (DE) de 5 MW accionada directamente con gases de escape de los tres motores de cogeneración, una máquina de absorción de simple efecto (SE) de 3 MW accionada con el agua caliente generada en la refrigeración de los motores y utilizada para proveer de agua caliente a la red de distrito, y unidades auxiliares: una enfriadora de compresión de 5 MW, una caldera de gas natural de agua caliente de 5 MW. El sistema incluye también un depósito de almacenamiento de agua fría de 4.000 m<sup>3</sup>. Las temperaturas nominales del agua caliente y fría de la red de distrito son de 90°C y 6°C, respectivamente. En Ortiga et al [2] y Ortiga [3] se puede encontrar una descripción más detallada de los equipos existentes y sus características técnicas en condiciones nominales.

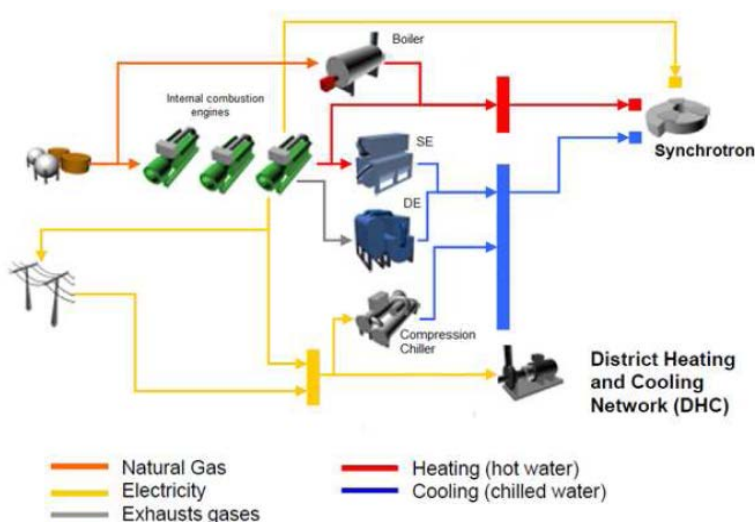


Figura 1. Configuración de la planta de Trigeneración y conexión con la red de distrito.

### 3. Condiciones de operación

#### 3.1. Sistema de monitorización

Toda la planta esta monitorizada y controlada mediante medidores de temperatura, caudal y contadores de energía que recogen estas variables en un tiempo de muestreo seleccionado. En este estudio cada minuto. Los datos de proceso registrados se analizan con un software de muestreo propio "Monitored Data Reader" que permite representar gráficamente las variables medidas y facilita su interpretación a partir de los Tags de cada variable obtenido con el SCADA de la planta. Con este software es posible identificar rápidamente errores en el Sistema de adquisición de datos.

#### 3.2. Estrategia de operación

Para la producción de energía eléctrica, actualmente los tres motores de cogeneración trabajan a plena carga durante todo el año, de las 8:00 a 23:00 h de lunes a viernes siguiendo el criterio de coste favorable de la energía eléctrica generada. Durante la noche y en fines de semana están habitualmente fuera de servicio.

La energía térmica para la red de distrito durante los fines de semana se genera mediante la caldera de gas natural al encontrarse los motores fuera de servicio. Aunque durante los meses de verano el consumo de agua caliente es extremadamente bajo cuando el equipo de frío por absorción no está en servicio. Cabe señalar que en casos de emergencia el calor generado por la caldera permitiría también sustituir al generado por uno de los motores.

La producción de agua fría se realiza con las enfriadoras de SE y DE funcionando a la carga parcial necesaria, habitualmente alrededor de un 50% de su carga nominal, aprovechando el calor residual de la refrigeración de los motores y del calor contenido en los gases de escape. Durante la noche y durante los fines de semana, periodos en los que los motores están habitualmente parados, el suministro de frío se realiza mediante el sistema de acumulación de agua fría y la enfriadora por compresión. Durante la noche se emplea principalmente el sistema de acumulación de agua fría y durante los fines de semana preferentemente el sistema de compresión. Los sistemas de refrigeración por absorción no entran en servicio al no hacerlo los motores de cogeneración. La recarga del sistema de acumulación de agua fría se realiza durante el día, entre las 7:00-8:00 h y las 22:00-23:00 h.

#### 3.3. Análisis energético

En el presente estudio el análisis y optimización de la operación de la planta se efectuará durante el periodo de verano en que la demanda energética corresponde a electricidad y agua fría, mientras que el consumo de agua caliente es prácticamente nulo. El periodo considerado corresponde concretamente al verano de 2014. En la Figura 2 se muestra la producción de energía para el mes de Julio. Puede verse como la producción principal de frío corresponde al equipo de DE que genera casi el 53% del total de frío generado durante ese mes, seguido por el equipo de SE y el de refrigeración por compresión con algo más del 14% de la producción.

Para obtener un modelo de la planta que permita predecir su comportamiento es necesario determinar las curvas de prestaciones de cada componente de la planta dentro de un rango de operación en el que opere habitualmente la planta. En algunos casos estas condiciones difieren mucho de las condiciones nominales de operación de cada componente. Por lo que respecta a la operación de los motores de cogeneración, su eficiencia eléctrica muy similar a la nominal (46%) ya que trabajan a plena carga.

En la situación actual, en la cual el número de consumidores conectados a la red de distrito es aún muy baja, el nivel de consumo de agua fría es también muy bajo, por lo que los equipos de refrigeración por absorción de SE y DE no superan en ningún caso el 50-60% de carga. A pesar de ello la eficiencia de estos equipos continua siendo bastante aceptable tal como se muestra en las figuras 3 y 4.

En las tablas 1 y 2 se incluyen datos de operación típicos de las enfriadoras de SE y DE, respectivamente. Se puede observar que la temperatura del agua caliente de activación es inferior a la nominal (95°C). También lo es el caudal de agua caliente con lo que se consigue que el equipo entregue una potencia inferior pero sin perjudicar excesivamente la eficiencia de la enfriadora. Cabe

destacar también que la temperatura nominal de las enfriadoras de SE y DE es de 6.5°C, con un salto térmico en el evaporador de 5.5°C, y en cambio, en la planta operan a temperaturas de agua fría más baja (unos 5°C) y saltos térmicos más reducidos, entre 2 – 4°C.

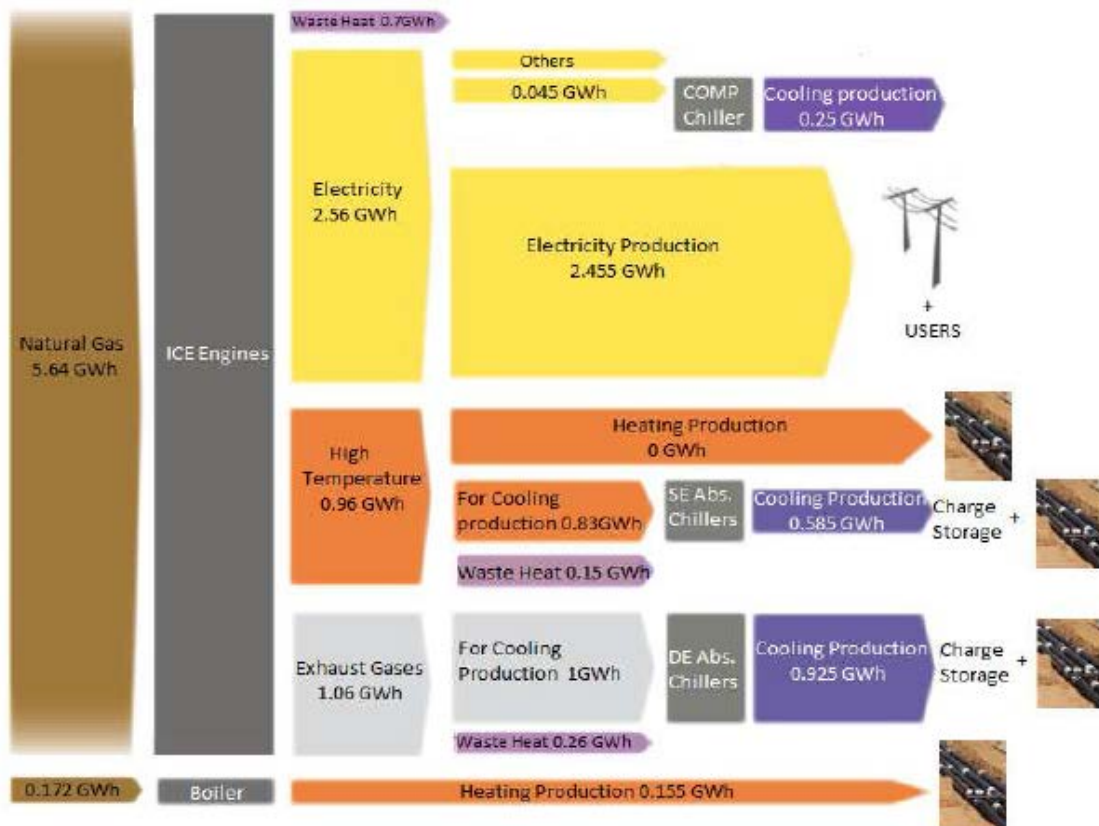


Figura 2. Producción de energía en la planta de trigeneración (Julio 2014).

Tabla 1. Variables de operación típicos de la enfriadora por absorción de Simple Efecto (SE).

Tag_name variable	Unit	Value
T HotW in SE	°C	83
T HotW out SE	°C	60
F HotW SE	m <sup>3</sup> /h	60
Q <sub>gen_ICE</sub>	kW	1600
T ChillW out SE	°C	5
T ChillW in SE	°C	7
F ChillW SE	m <sup>3</sup> /h	450
Q <sub>H2O_chilled</sub>	kW	1040
COP <sub>SE</sub>		0,65
T CoolW in SE	°C	27,5
T CoolW out SE	°C	30
F CoolW SE	m <sup>3</sup> /h	860
Q <sub>H2O_SE_cooling_tower</sub>	kW	2500
Q <sub>losses</sub>	kW	150

Tabla 2. Variables de operación típicas de la enfriadora por absorción de Doble Efecto (DE).

Tag_name variable	Unit	Value
T ExGas All	°C	355
T ExGas outDE	°C	162
F ExGas inDE CL	kg/h	47280
Q <sub>gen_DE</sub>	kW	2940
T ChillW out DE	°C	4,7
T ChillW in DE	°C	8,3
F ChillW DE	m <sup>3</sup> /h	700
Q <sub>H2O_chilled</sub>	kW	3093
COP		1,05
T CoolW in DE	°C	26
T CoolW out DE	°C	30,7
F CoolW DE	m <sup>3</sup> /h	1032
Q <sub>H2O_DE_cooling_tower</sub>	kW	5640
Q <sub>losses</sub>	kW	393

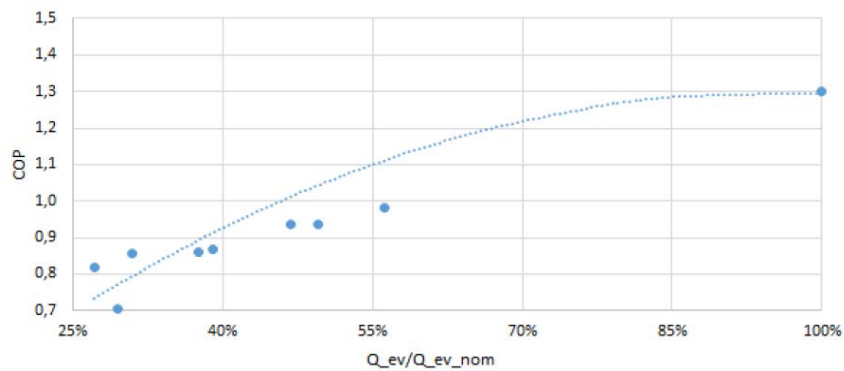


Figura 3. COP de la enfriadora de doble efecto en función de la carga.

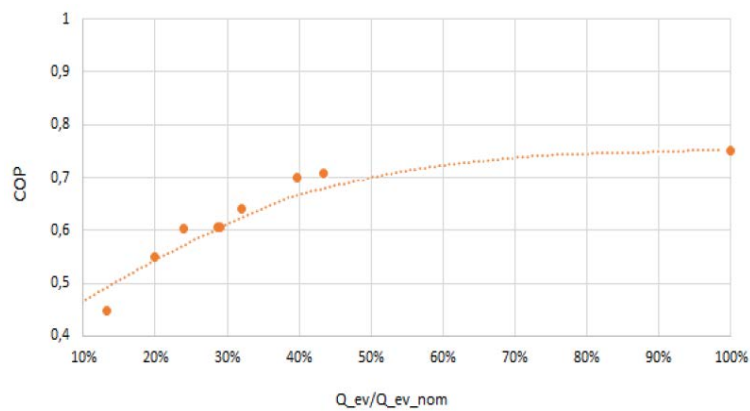


Figura 4. COP de la enfriadora por absorción de simple efecto en función de la carga.

#### 4. Modelo de optimización

El entorno de optimización seleccionado para desarrollar el modelo es GAMS (General Algebraic Modeling System). La optimización mediante programación matemática permite resolver muchos problemas de optimización en ingeniería relacionados con el diseño de plantas a partir de superestructuras que incluyen todas las alternativas de diseño que se desea considerar y también la optimización de la operación de una planta determinada mediante la selección de los equipos en funcionamiento y del conjunto de variables de operación que dan lugar a un coste de operación óptimo y/o un impacto ambiental mínimo suministrando los productos o servicios demandados.

El modelo incluye como restricciones al problema de minimización del coste, todas las características técnicas linealizadas de cada componente con respecto a su carga, restricciones de mínima y máxima carga, restricción del número de arranques y paradas consecutivos, etc.

La función objetivo (Ec. 1) se expresa como la diferencia entre los ingresos por la venta de electricidad y frío (Ec. 2) menos los principales gastos originados para su obtención, costes de mantenimiento y de operación (Ec. 3):

$$\text{Objective} = \text{Income} - \text{MaintCost} - \text{OperatCost} \quad (1)$$

$$\text{Income} = \sum_{j=1}^{24} (\text{ElecToGrid}(j) * \text{PriceExport} + \text{CoolingDemand}(j) * \text{CoolingPrice}(j)) \quad (2)$$

$$\text{OperatCost} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{24} \text{ICE\_Fuel}(i, j) \cdot \text{CostNaturalGas} + \sum_{j=1}^{24} \text{ElecFromGrid}(j) * \text{PriceImport} \quad (3)$$

El coste del gas natural para aplicaciones industriales se ha estimado en 30.20 €/MWh. El precio de la electricidad es mucho más variable. En este caso se ha considera el mismo precio para la electricidad importada y exportada a la red. La evolución del precio a lo largo del día se ha estimado de acuerdo con la información obtenida en los mercados de la electricidad y se muestra en la figura 5. Durante el periodo de fin de semana el coste de la electricidad es mucho más bajo y se ha estimado en 0.02 €/MWh.

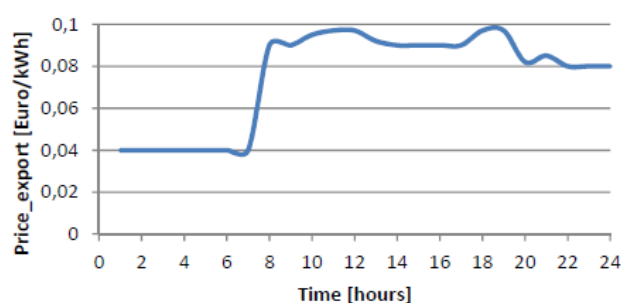


Figura 5. Evolución estimada del precio de la electricidad.

#### 5. Resultados de la optimización

El modelo desarrollado se ha aplicado para la optimización de un día completo de operación. Para ello se ha definido una demanda de refrigeración promedio para un día de verano tal como se muestra en la figura 6 teniendo en cuenta los datos recogidos en planta.

La distribución de la carga de refrigeración óptima para este caso es similar a la que se emplea actualmente: distribución de la carga entre los equipos de absorción durante el día, con elevado coste de la electricidad y los motores de cogeneración en funcionamiento, y uso del sistema de acumulación

de frío y la enfriadora por compresión durante la noche. Sin embargo, los resultados obtenidos con el modelo de optimización muestran preferencia por el uso del equipo de DE, que produce casi el 72% de toda el agua fría requerida (Figura 7). En esta figura se muestra la distribución de la carga óptima entre las diferentes enfriadoras y el calor recuperado o electricidad consumida para su generación.

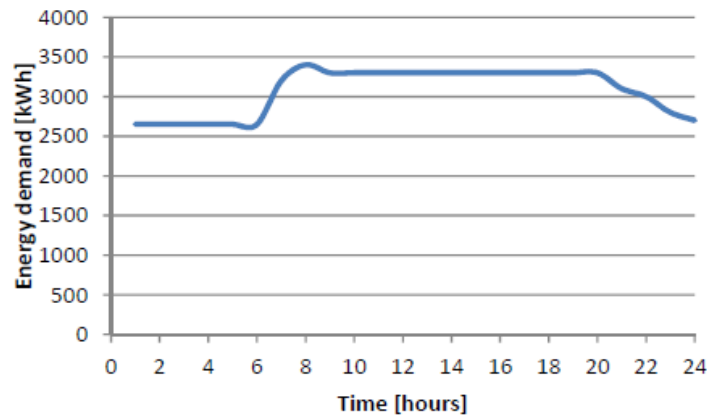


Figura 6. Evolución de la demanda de agua fría típica considera en este estudio.

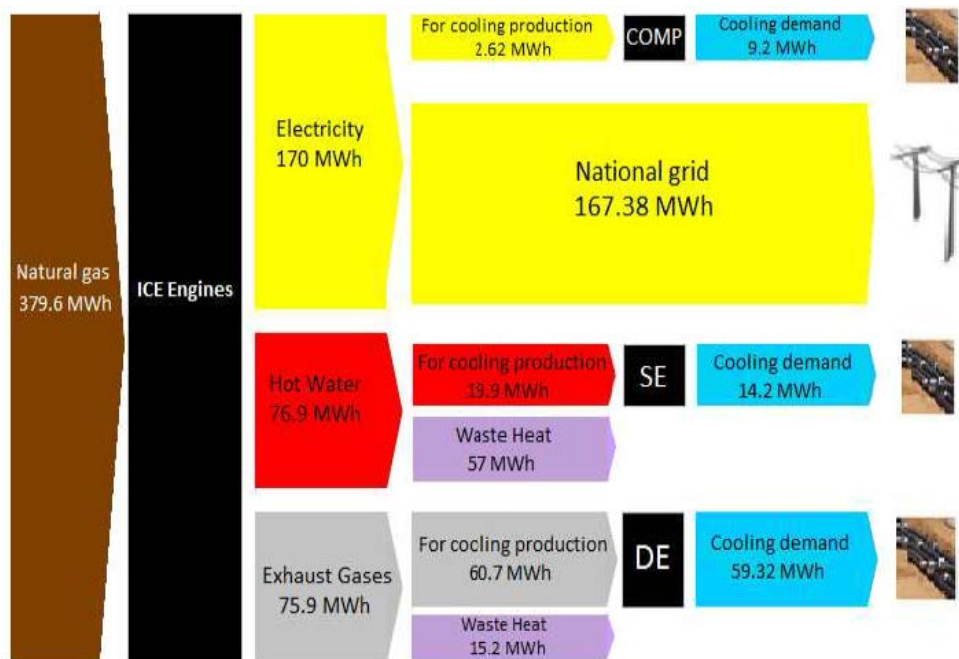


Figura 7. Balance de energía global óptimo para un día laborable de verano.

## 6. Conclusiones

En la etapa inicial de implantación de una planta de trigeneración conectada a una red de distrito de frío y calor de ensanches urbanos, el número de usuarios conectados puede ser generalmente bajo comparado con las expectativas iniciales de implantación. Tal como se muestra en el presente análisis energético de la planta de Cerdanyola del Vallès, a pesar de la baja demanda de refrigeración existente en esta etapa, una planta de trigeneración basada en equipos de refrigeración por absorción avanzados apoyados con sistemas de acumulación de frío y equipos de compresión es suficientemente flexible para cubrir las demandas de frío de forma bastante satisfactoria desde el punto de vista de la eficiencia energética y del económico. La distribución óptima de la carga de refrigeración entre los diferentes tipos de enfriadoras es bastante similar a la que se emplea actualmente en la planta pero con un mayor peso de la enfriadora de doble efecto.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte económico facilitado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del proyecto coordinado de I+D+i, ref. PI2012-38841-C02-01.

## 8. Referencias

- [1] EICKER, U. (Ed.), *Polycity – Energy Networks in Sustainable Cities*. Kraemer Verlag, Stuttgart, Concerto Programme. [www.polycity.net](http://www.polycity.net), 2012.
- [2] ORTIGA, J., BRUNO, J.C., CORONAS, A., Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network, *Applied Thermal Engineering*, 50, 1536-1542, 2013.
- [3] ORTIGA, J., *Modelling environment for the design and optimisation of energy polygeneration systems*, Tesis Doctoral, Universitat Rovira i Virgili, 2010
- [4] BIEGLER, L., GROSSMANN, I., WESTERBERG, A., *Systematic methods of chemical process design*, Prentice Hall, New Jersey, 1997.