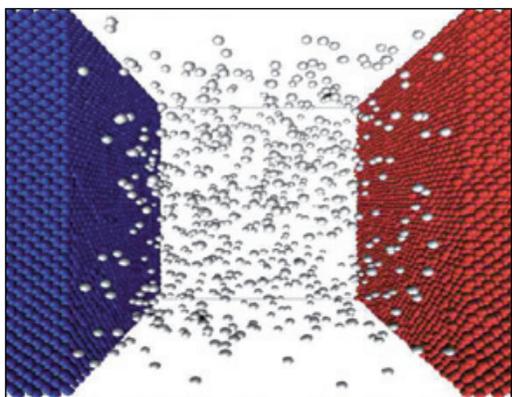


# Viabilidad de una red de distribución de calor y frío



Juan Pablo Jiménez-Navarro\*  
Rogelio Zubizarreta-Jiménez\*  
José Manuel Cejudo-López\*\*

Ingeniero Industrial  
Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Industrial

\* INSTITUTO ANDALUZ DE TECNOLOGÍA (IAT). Parque Tecnológico de Andalucía. C/ Marie Curie, 4 - 29590 Campanillas (Málaga). Tfno: +34 952 028710. [ipjimenez@iat.es](mailto:ipjimenez@iat.es).

\*\* UNIVERSIDAD DE MÁLAGA. Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos. Avda. Cervantes, 2 - 29071 Málaga. Tfno: +34 952 131000.

Recibido: 17/11/2011 • Aceptado: 08/02/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4449>

## DISTRICT HEATING AND COOLING FEASIBILITY

### ABSTRACT

- The purpose of this paper is to present the results of the feasibility study for a district heating-cooling network to cover the energy demand in a Scientific and Technological Park under Mediterranean climate conditions. This study consists of three phases: energy demand, technology analysis and economic study. To evaluate the energy demand a bottom-up strategy has been followed: a building inventory has been carried out to define several building types according to use, envelope and glazing. Energy + has been used to obtain heating and cooling demand profiles for each building type and orientation. According to municipal development plans for PTA and forecast in business growth, the energy demand evaluation in a 10-years timeframe has been carried out. Most appropriate technologies has been analyzed and evaluated: cogeneration (gas turbine and alternative internal combustion engines), biomass boiler and conventional technologies have been evaluated with TRNSYS to obtain consumption profiles, consumption rates, efficiency indicators and energy losses. Finally an economic analysis has been done to technologies in a 20 years period to evaluate technology that better economic results address. The main objective of this work is the promotion of the efficient and effective energy supply in areas with high energy consumption. DCH technology is widely used in the North of Europe and this paper tries to demonstrate that this technology could be applied in Mediterranean areas successfully.
- **Keywords:** district heating cooling (DHC), building energy analysis. technical and feasibility study, district energy, thermal energy generation.

### RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar los resultados del estudio de viabilidad de una red de distribución de calor y frío para satisfacer la demanda de energía en un Parque Tecnológico y Científico bajo condiciones climáticas Mediterráneas.

El estudio ha sido desarrollado en tres fases: *evaluación de la demanda, análisis de la tecnología y estudio económico.*

Para cuantificar la demanda de energía se ha seguido una estrategia “bottom-up” basada en la identificación de edificios tipo. Mediante el SW de simulación Energy + se han obtenido las curvas de demanda de calor y frío de cada edificio tipo, teniendo en cuenta múltiples orientaciones. De acuerdo a los planes de desarrollo urbanísticos y a las previsiones de crecimiento del Parque Tecnológico de Andalucía, se ha realizado una evaluación de demanda en un horizonte temporal de 10 años.

Una vez caracterizada la demanda, han sido evaluadas las tecnologías más apropiadas para esta aplicación mediante SW de simulación TRNSYS: cogeneración (turbina de gas y motor alternativo de combustión interna), biomasa y tecnología convencional.

Finalmente se ha realizado un análisis económico para las distintas tecnologías en un

horizonte temporal de 20 años a fin de valorar la opción que mejor se adapte a esta aplicación concreta.

Este estudio avala que la tecnología de distribución de calor y frío, muy extendida en el norte de Europa, puede ser aplicada en zonas mediterráneas, apoyando así a la promoción de suministros de energía eficientes en áreas con una alta demanda energética.

**Palabras clave:** redes de distribución de calor y frío (DHC), análisis energético en edificios, viabilidad técnico-económico, energía de distrito, generación de energía térmica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el marco energético actual, las redes de distribución de calor y frío, DHC en adelante, constituyen una alternativa para mejorar tanto los procesos de distribución de energía como los procesos de generación a nivel local, permitiendo incorporar diferentes fuentes de energía (combustibles, valorización de residuos energéticos o energía solar), que mejoren la eficiencia del ciclo completo “generación-distribución-consumo”.

Experiencias existentes en latitudes europeas más septentrionales han demostrado que las redes de distribución de calor representan una alternativa que, además de cubrir las necesidades energéticas, constituyen una solución de alta eficiencia para el suministro de energía. La producción de energía térmica a gran escala repercute positivamente en los rendimientos de los equipos de producción frente a una producción atomizada en la que las demandas son intermitentes, provocando que los equipos generadores funcionen a regímenes muy variables.

Este artículo presenta el estudio de viabilidad de una red de distribución de calor y frío para el abastecimiento de un determinado número de entidades que se establecerían en la futura ampliación del Parque Tecnológico de Andalucía ubicado en Málaga (España), analizando la adaptación de esta tecnología a los climas mediterráneos, caracterizados por temperaturas suaves, así como su adaptación en zonas industriales y tecnológicas.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio se ha llevado a cabo en tres fases claramente diferenciadas: caracterización de la demanda, estudio de las mejores tecnologías disponibles y análisis económico.

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

La evaluación de la demanda de energía es el aspecto más crítico, puesto que determinará cuáles son las necesidades de calor y frío que deben ser satisfechas, lo que repercutirá de manera directa tanto en la elección de la mejor tecnología disponible como en el nivel de explotación económico de la red.

La complejidad en la determinación de la demanda de climatización de un grupo de edificios reside en el propio modelado de los edificios, ya que la caracterización de éstos está sujeta a múltiples variables (tales como climatología, localización, orientación, epidermis, usos, etc.); más aún si tenemos en cuenta que los edificios objeto todavía están por construir. Varios autores como Gustafsson [4], Heiple [5], Huang [6], Pedersen [7] o Segen [8] han desarrollado diferentes métodos para resolver estas dificultades. En el presente estudio, inicialmente se han considerado dos estrategias para la caracterización de la demanda de energía:

1. *Estrategia Top-down:* está basada en métodos estadísticos para la predicción de la demanda de un conjunto de edificios a partir de valores de demanda agregados para grandes núcleos de consumo (ciudades o regiones).
2. *Estrategia Bottom-up:* esta metodología es opuesta a la anterior, ya que como punto de partida toma “edificios tipo” resultando la demanda total como la suma de las demandas de cada uno de los edificios considerados. Para emplear esta metodología es requisito indispensable realizar un inventario de edificios del área objetivo de estudio de forma que todo edificio pueda ser asignado a uno de los edificios tipo definidos. Matemáticamente, esta metodología puede expresarse como sigue:

$$Demanda = \sum_{i=1}^N \left[ A_i \cdot \left( \sum_{j=1}^M EUI_j \cdot P_{ij} \right) \right] \quad [1]$$

donde  $A_i$  es la superficie neta de cada edificio,  $EUI_j$  es la demanda de energía anual para cada tipo de edificio ( $M$  tipos diferentes) y  $P_{ij}$  es la matriz que establece la relación entre el tipo de edificio y su superficie.

Apoyado en los trabajos propuestos por Chow [9], para el estudio se ha elegido una estrategia *bottom-up*. A pesar de no conocer el uso y tipo de cada edificio que se establecerá en la ampliación del PTA, se dispone de la superficie total de la ampliación (651.334 m<sup>2</sup>), el porcentaje de esta área dedicado a cada uso según el plan urbanístico y el área neta de cada parcela. Para dar solución a la incertidumbre relativa al desconocimiento de la tipología de cada edificio, se asume que los nuevos edificios que ocuparían las nuevas parcelas mantendrán características similares a los ya existentes en el propio parque.

Por ello y con el objetivo de caracterizar con exactitud los edificios presentes en el PTA y poder modelar edificios tipos, se ha realizado un estudio pormenorizado de las características constructivas y de uso de cada uno. En dicho estudio se han tenido en cuenta las siguientes propiedades:

- **Características envolventes:** debido a la gran variedad constructiva presente en el PTA, se han tomado los

valores mínimos normativos recogidos en el *Código Técnico de la Edificación* (CTE), ya que los nuevos edificios deberán cumplir los mínimos exigidos en este documento.

- **Superficie acristalada:** se han clasificado los edificios según tres niveles de acristalamiento respecto a la superficie de cerramiento exterior total: poco acristalados (<10%), acristalamiento medio (10-75%) y muy acristalados (>75%).
- **Orientación de los edificios:** caracterizados para las orientaciones predominantes.
- **Uso:** se han considerado las empresas actuales presentes en el PTA y el reparto de usos recogido en el plan de ordenación urbanística.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se han modelado los siguientes edificios tipo:

- Hotel con centro comercial
- Guardería
- Industria ligera
- Edificio de oficinas

En el caso de edificios de oficinas se ha detectado una gran variabilidad en cuanto a la superficie acristalada, por los que se han distinguido en el modelo de oficinas los tres niveles de acristalamiento indicados anteriormente.

En la siguiente figura se muestra el aspecto exterior de los edificios modelados:

Para validar el desarrollo de dichos modelos se han tomado valores de referencia procedentes de diversos análisis de consumo en viviendas [10], [11], [12].

De cara a cuantificar la tasa de implantación de nuevos empresas se han utilizado técnicas de extrapolación a partir



Fig. 1: Características de los edificios existentes en el actual PTA

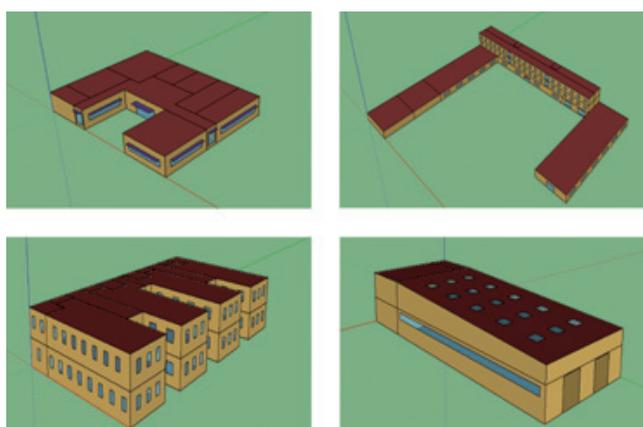


Fig. 2: Modelado de los edificios en Energy Plus

de los datos históricos registrados desde la apertura del PTA según se muestra en la siguiente figura:



Fig. 3: Evolución del número de empresas instaladas en el PTA

La curva polinómica que sigue la evolución de crecimiento del PTA es de orden 4, con la que se obtiene un coeficiente de correlación de 0,9978.

$$y = -0,0031 \cdot x^4 + 0,0482 \cdot x^3 + 1,853 \cdot x^2 - 1,2072 \cdot x + 14,605 \quad [2]$$

A través de la evolución de empresas, considerando el número de empresas por edificio y la superficie por empresa en el año 2009, 751,9 m<sup>2</sup>/empresa, se obtiene la evolución equivalente en lo que a superficie se refiere para los próximos 10 años.

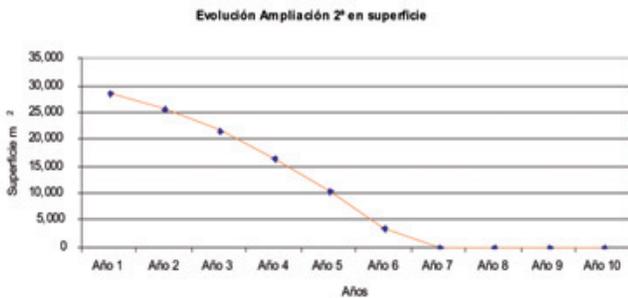


Fig. 4: Evolución de los m<sup>2</sup> edificados para nuevas empresas en los próximos 10 años.

Con esta curva de evolución de la superficie edificada y considerando como superficie de los edificios la de los modelos desarrollados, la ubicación de edificios en la nueva ampliación del PTA es la que se muestra:



Fig. 5: Ubicación de los edificios considerados en la ampliación 2ª del PTA

siendo:

- Edificio industrial
- Edificio de oficinas con acristalamiento medio
- Hotel
- Guardería
- Edificio de oficinas muy acristalado
- Edificio de oficinas poco acristalado

Así, año tras año se van incorporación edificios modelados siguiendo la curva de superficie presentada en la figura 4, generando una curva de demanda energética en continuo crecimiento hasta el año 7.

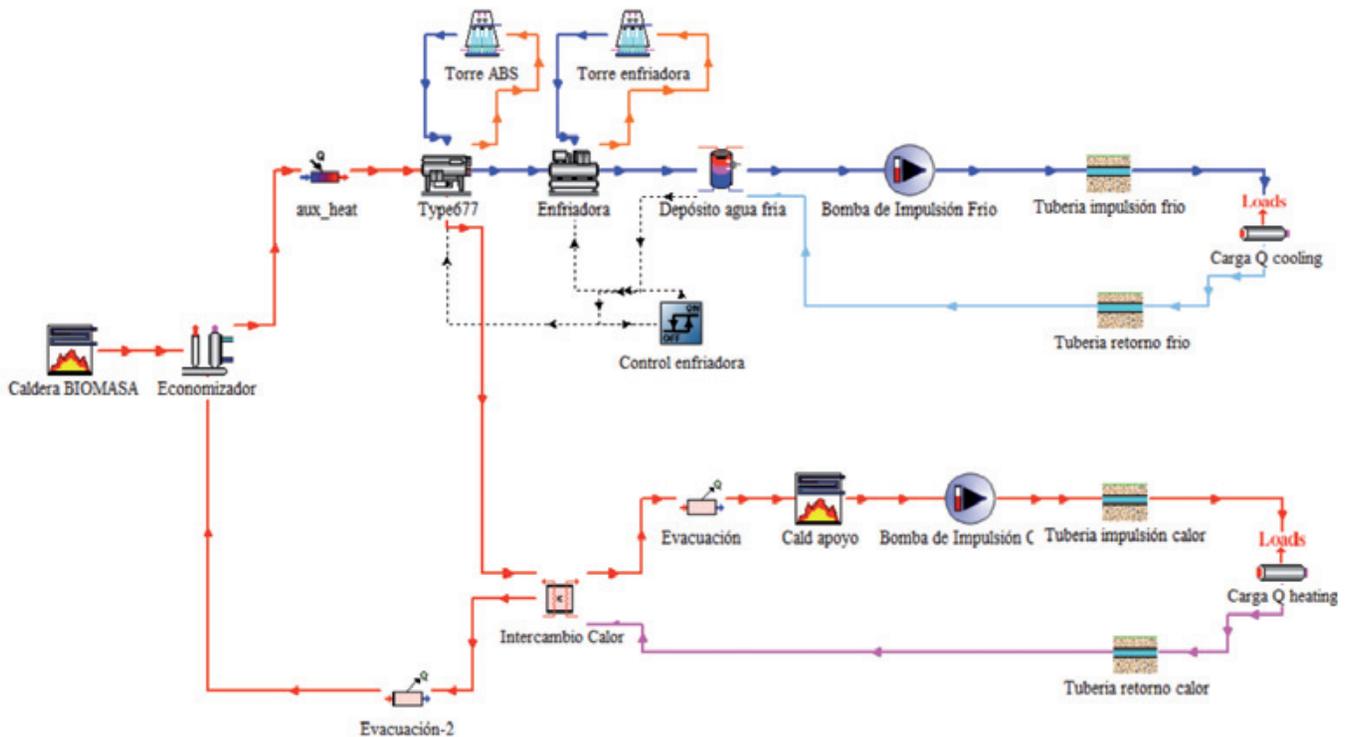


Fig. 6: Modelo TRNSYS. Caldera de biomasa

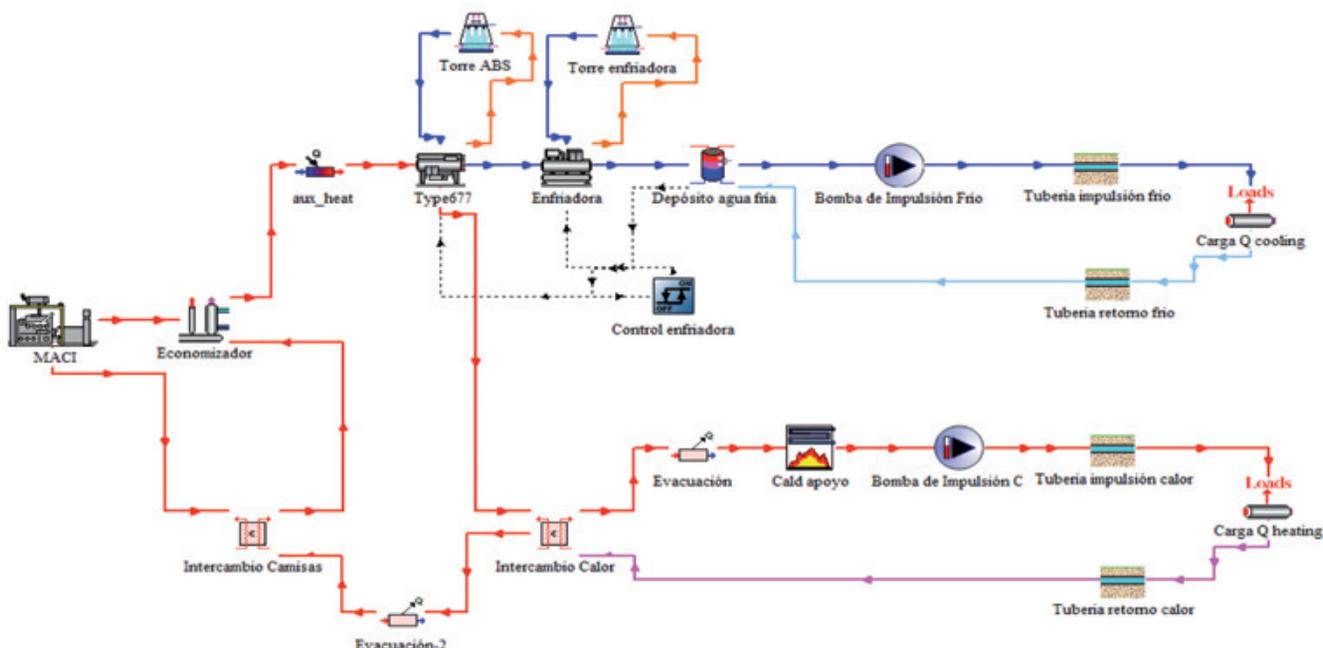


Fig. 7: Modelo TRNSYS. Motor alternativo de combustión interna

## 2.2 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Para el análisis de tecnologías, se ha hecho uso del SW de simulación TRNSYS que permite realizar simulaciones dinámicas evaluando la eficiencia y los parámetros de consumo.

Previo al desarrollo de los modelos, ha sido analizado un amplio abanico de tecnologías basado en los trabajos de Cardona [13], Marimon [14], Ortega [15] y Söderman [16]. Se ha optado por:

**Caldera de biomasa para aprovechamiento de residuos leñosos:** en este caso la tecnología incluye una caldera de biomasa de 20 MW para el calentamiento de agua que alimenta a la red de distribución de calor y al sistema de generación de frío.

**Cogeneración (CHP-Combined Heat and Power):** las dos tecnologías de generación consideradas han sido la tecnología de turbina de gas (TG en adelante) y la tecnología de motor alternativo de combustión interna (MACI en

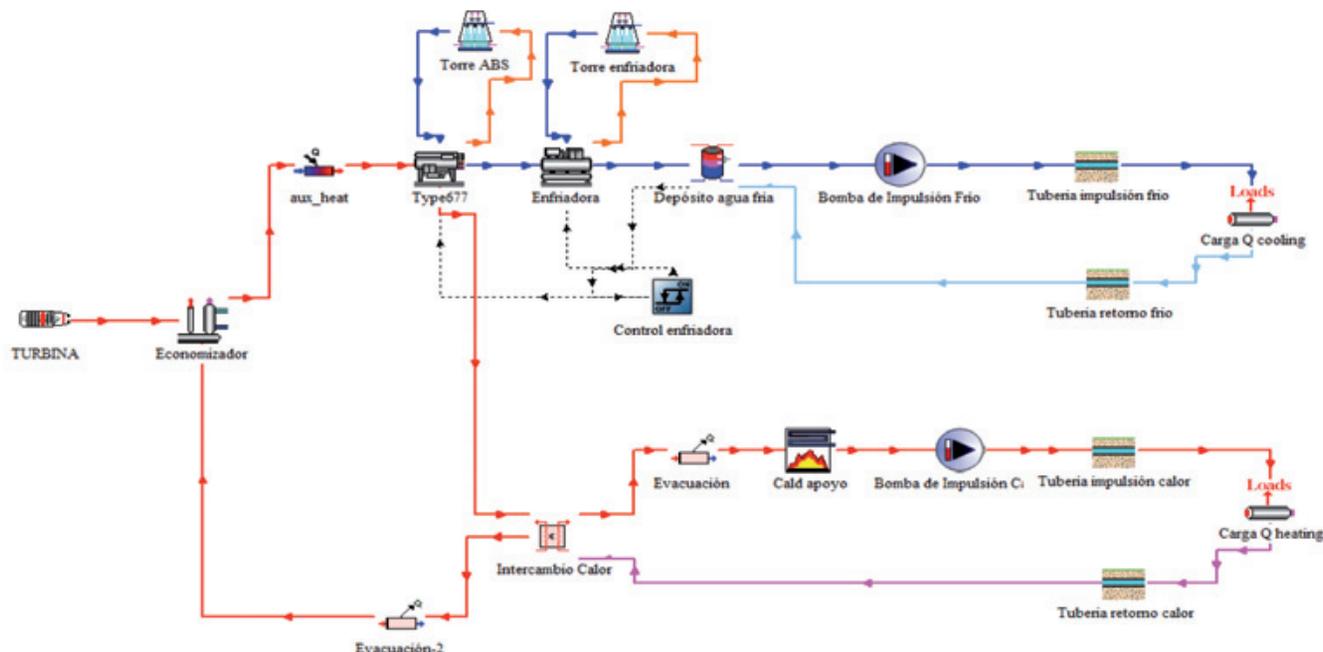


Fig. 8: Modelo TRNSYS. Turbina de gas.

adelante). El dimensionado de los equipos en cada caso se ha realizado siguiendo las recomendaciones aportadas por Cardona [13], Ortega [15] y Söderman [16], y teniendo en cuenta el marco normativo de aplicación [18].

**Energía solar térmica:** esta tecnología no ha sido considerada como alternativa de apoyo a la generación de energía debido a dos razones fundamentales: el alto coste de adquisición de la tecnología y las grandes superficies requeridas para el establecimiento de éstas que no la hacen competitiva desde una perspectiva económica. (Bruno [17]).

**Tecnología de generación de frío:** para la producción de frío se ha elegido una máquina de absorción de doble efecto LiBr para cubrir la demanda de frío considerada. Esta elección se ha realizado teniendo en cuenta las ventajas y desventajas presentadas en los trabajos de Marimon [14]. Es importante señalar que si bien la tecnología de doble efecto proporciona rendimientos superiores requiere unas temperaturas de activación mayores que en el caso de simple efecto. Este mayor nivel térmico supondrá adecuar el régimen de funcionamiento tanto de la TG como del MACI para asegurar el nivel exergético del flujo energético. En todos los casos, se ha elegido una máquina con una potencia de 5,8 MW. Adicionalmente se ha elegido un depósito de acumulación de frío de 15.000 m<sup>3</sup>.

Es muy importante destacar que en todos los casos se ha acoplado en paralelo tecnologías convencionales compuestas por enfriadoras eléctricas y calderas de gas escalables (hasta 6 y 9 MW respectivamente). Esto se ha hecho con un doble objetivo, en primer lugar garantizar el suministro de energía ante cualquier eventualidad y en segundo lugar evitar que durante los primeros años los sistemas de producción estén funcionando a muy bajos niveles haciendo que en muchos casos estén parados.

Para evaluar las prestaciones de cada tecnología, se han considerado los siguientes parámetros:

- **Rendimiento eléctrico equivalente (REE)** definido como:

$$REE = \frac{E_{el}}{E_{input\_by\_fuel} - \frac{H}{\eta_{boiler}}} \quad [3]$$

siendo:

$E_{el}$ : energía eléctrica generada.

$E_{input\_by\_fuel}$ : energía necesaria para activar el sistema.

H: producción de calor útil.

$\eta_{boiler}$ : valor de referencia del rendimiento para la producción separada de calor.

- **Consumo neto de energía primaria (CNEP):** definida para comparar los consumos de energía en cada caso. La expresión matemática para el consumo

de energía primaria es:

$$CNEP = (E_{el\_cons} - E_{el}) \cdot C_1 + (E_{input\_by\_fuel}) \cdot C_2 + (E_{input\_by\_biomasa}) \cdot C_3 \quad [4]$$

donde

$C_1$ : factor de conversión de energía final eléctrica

$C_2$ : factor de conversión de energía final para gas natural

$C_3$ : factor de conversión de energía final para biomasa

Estos valores son 2.28, 1.07 y 1.25 respectivamente [19].

- **COP<sub>instalación</sub>** definido como:

$$COP_{instalación} = \frac{E_{térmica}}{E_{combustible} - E_{producida}} \quad [5]$$

siendo

$E_{térmica}$ : energía térmica (calor y frío) producido por el sistema y puesta en servicio en los puntos de consumo.

$E_{eléctrica}$ : energía eléctrica generada por el sistema consumida por el sistema.

- **Ahorro de energía primaria (PES)** definido como:

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{CHPH_{\eta}}{Re\ jH_{\eta}} + \frac{CHPE_{\eta}}{Re\ jE_{\eta}}} \right] \cdot 100 \quad [6]$$

siendo:

**PES:** porcentaje de ahorro de energía primaria respecto de la que se hubiera consumido en generación separada de calor y electricidad y/o energía.

**CHPH<sub>η</sub>:** es la eficiencia térmica de la producción mediante la cogeneración definida como la producción anual de calor útil procedente de la cogeneración dividida por la aportación de combustible utilizada para generar la suma de la producción útil de calor y electricidad procedentes de la cogeneración.

**CHPE<sub>η</sub>:** es la eficiencia eléctrica de la producción mediante cogeneración definida como la electricidad anual producida por cogeneración dividida por la aportación de combustible utilizada para generar la suma de la producción de calor útil y electricidad procedentes de la cogeneración.

**RefH<sub>η</sub>:** es el valor de referencia de la eficiencia para la producción separada de calor. [24]

**RefE<sub>η</sub>:** es el valor de referencia de la eficiencia para la producción separada de electricidad. [24]

Estos parámetros permitirán por un lado asegurar que se cumplen los requisitos establecidos en el RD 661/2007 [18] y por otro lado, conocer el funcionamiento global del sistema. Asimismo, a partir de estos parámetros se llevará a cabo el estudio económico.

### 2.3 DIMENSIONADO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

El dimensionado de la red ha sido realizado empleando los valores pico de demanda de energía de forma que la red pueda abastecer a los consumidores finales en cualquier circunstancia. El diseño se ha realizado considerando la demanda pico en el horizonte temporal de 10 años, ya que una vez se acometa la infraestructura relativa a la red, ésta no podrá ser modificada. Bajo estas premisas se han dimensionado: tuberías, depósitos de acumulación y equipos de impulsión.

Para definir el trazado de la red se ha optado por definir el caso más desfavorable siendo éste aquel en el que la central de producción de energía se encuentra en uno de los límites del área de estudio. Esta situación, si bien no afecta directamente a la longitud total de la red, sí afecta a los caudales a tratar y a las pérdidas de carga y energía asociadas. En la siguiente imagen se muestra el trazado de la red propuesta:



Fig. 9: Trazado de la red de distribución de calor y frío

Con este esquema no se pretende hacer una descripción exhaustiva de la red. De cara al diseño en esta fase de estudio, la importancia reside en la definición de la longitud máxima de la red, es decir la distancia entre los extremos del esquema presentado en la figura anterior. Bajo este enfoque, consideramos que la central de producción podría estar en uno de los dos extremos de la red presentada.

En cuanto a las características operativas se han fijado los siguientes valores:

- Temperatura red de calor: 95/65 °C
- Temperatura red de frío: 5/13 °C
- Criterio de pérdidas de presión: 1-2 bar/km.
- Criterio de pérdidas de temperatura en la red de calor: 0,2 °C/km
- Criterio de pérdidas de calor en la red de frío: 0,5 °C/km

Si bien, en la mayoría de los casos las necesidades de los clientes en lo que a calefacción se refiere no van a ser superiores a 95 °C, se ha elegido esta temperatura para asegurar la posible necesidad. Una vez más se ha optado por un criterio conservador ya que producir a temperaturas elevadas es costoso y las pérdidas en la red son mayores.

### 2.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico se ha realizado considerando los siguientes aspectos:

- Costes de adquisición
- Costes de mantenimiento
- Costes de amortización
- Costes de operación (energía, recursos humanos, costes globales)
- Ingresos derivados de la venta de energía

Estos aspectos permiten evaluar las inversiones en términos de retornos de inversión, valor actual neto (VAN en adelante), payback y cash flow acumulado.

## 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del desarrollo de las tres fases anteriores: demanda de energía, tecnologías de producción y evaluación económica son los siguientes:

### 3.1 DEMANDA DE ENERGÍA Y DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Los resultados obtenidos para los modelos una vez ajustados a los valores de referencia [10], [11], [12] son los que se muestran en la siguiente Tabla:

Uso	Ratio consumo (kWh/m <sup>2</sup> )	Refrigeración %	Calefacción %	Iluminación %	Equipamiento %	ACS %
Oficinas	131,57	42	4	39	15	-
Guardería	43	5	60	17	15	3
Industria ligera	214,66	33	15	34	18	-
Hotel	312,66	28	12	29	24	7

Tabla 1: Valores teóricos de demanda de energía

A partir de estos modelos agregando año a año la incorporación de nuevos edificios se obtienen los perfiles horarios de demanda para calefacción y refrigeración para la ampliación objeto de estudio considerando la evolución de demanda a lo largo de los 10 próximos años en la que se aprecia un crecimiento constante debido a la ocupación de nuevas parcelas.

La evolución mensual de la demanda de calefacción y refrigeración a lo largo de los primeros 6 años son los que se muestran en las siguientes figuras. Tal y como se muestra en la Fig. 4, se ha considerado que la totalidad de edificios se establecerá en los 6 primeros años, por lo que, para el resto de años sucesivos la demanda de energía no sufrirá modificaciones.

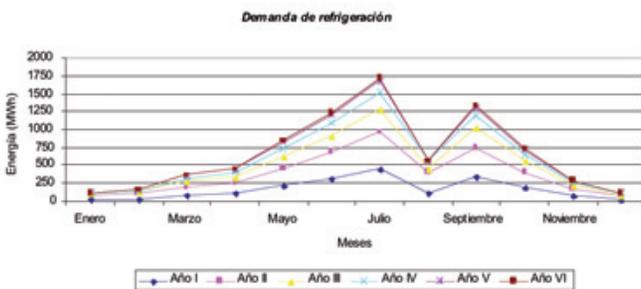


Fig. 10: Evolución de la demanda de refrigeración

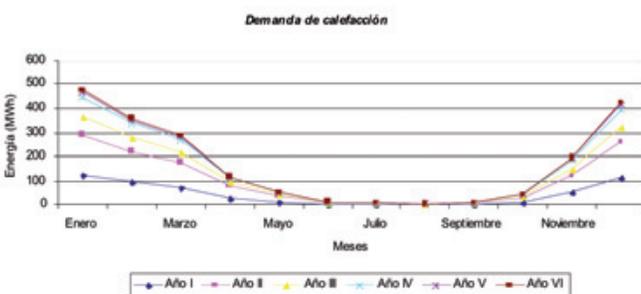


Fig. 11: Evolución de la demanda de calefacción

Como puede observarse, la demanda de refrigeración se reduce drásticamente en el mes de agosto ya que se ha considerado este mes como el período vacacional predominante.

En las figuras 12 y 13, se presentan las curvas agregadas de demanda tanto de calefacción como de refrigeración para el año 10. Estas curvas son muy útiles para dimensionar los equipos de cogeneración según [13].

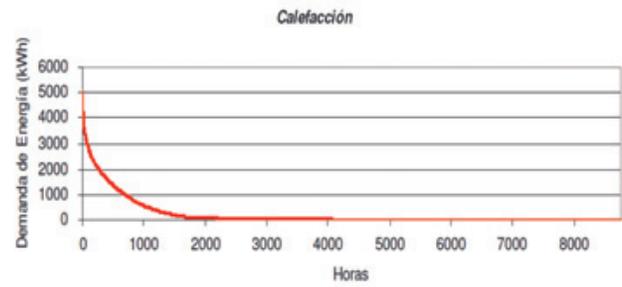


Fig. 12: Curva de demanda agregada. Calefacción

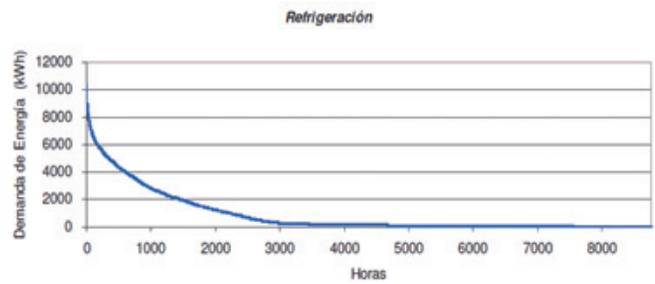


Fig. 13: Curva de demanda agregada. Refrigeración

Las gráficas de demanda agregada no es más que la representación de los valores de demanda ordenados de mayor a menor. Así por ejemplo para el caso de la Figura 13, observamos como un nivel de demanda de 2000 kWh o superior tiene lugar aproximadamente durante 1.500 horas al año.

Como se muestra en las figuras anteriores, la demanda pico para el año 10 queda fijada en 7,7 MW para calefacción y 12,22 MW para refrigeración.

Con estos valores de potencia máxima y considerando unos saltos de temperatura de 30°C para calefacción y 8°C para refrigeración, el caudal máximo para cada red son: 61,8 kg/s en calefacción y 364,6 kg/s para refrigeración. Estos valores de caudal garantizan aseguran unas pérdidas tanto de presión como de temperaturas adecuadas [23].

En la Tabla 2 se muestran los valores característicos de la red.

Es importante destacar la diferencia de tamaños entre la red de distribución de calor y la red de distribución de frío. Este hecho se debe a los niveles térmicos de cada una frente a los niveles térmicos de la demanda. Es decir, la diferencia de temperaturas en la red de calor es aproximadamente de 60 °C mientras que en la red de frío el salto térmico es de unos 10 °C, lo que hace que el caudal en este último caso tenga que ser mayor.

	DN tuberías (mm)	Espesor de aislamiento (mm)	Potencia de bombeo (kW)	Volumen de acumulación (m <sup>3</sup> )
Cooling	600	7,1	315	15.000
Heating	350	5,6	75	-

Tabla 2: Parámetros de diseño de la red

### 3.2 EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Una vez presentadas las características de los modelos y su simulación correspondiente, el desglose de resultados es el que se muestra en la siguiente Tabla resumen. En ella se muestran los cuatro aspectos fundamentales sobre cómo está teniendo lugar el aprovechamiento energético en cada caso.

	Consumo de energía primaria (MWh)	Ahorro de energía primaria	COP instalación	REE
Tecnología convencional	16.118,15	-	1,14	-
Caldera de biomasa	15.989,36	-	0,747	-
Turbina de gas	22.763,06	7,07 %	0,571	0,541
Motor alternativo de combustión interna	26.999,38	3,88 %	0,570	0,528

Tabla 3: Parámetros globales de las distintas tecnologías

De los resultados presentados en la tabla anterior, se pueden obtener diversas conclusiones de cara a discernir qué tecnología se adapta mejor a la aplicación objeto de estudio:

- En lo que respecta a flujos energéticos de entrada en los sistemas (consumo de energía primaria) es evidente cómo en los casos de trigeneración el consumo de energía de entrada es mayor, debido a que se está produciendo una doble generación eléctrica y térmica, lo que hace que el sistema sea más eficiente pero que también se requiera mayor cantidad de energía en el sistema.
- Si analizamos el parámetro de ahorro de energía primaria, en los dos primeros casos no aplica, ya que no existe producción de energía eléctrica. En los resultados obtenidos para las dos últimas alternativas vemos que, para la tecnología de TG, el ahorro de energía primaria es mayor debido al régimen de funcionamiento modelado. Así, para el caso de TG, se ha modelado un régimen de operación acorde al nivel de demanda, mientras que el MACI opera a carga constante. El comportamiento adaptativo a la demanda hace que se optimice el consumo de energía (mejor PES), pero disminuye la cantidad de energía eléctrica que como veremos en el siguiente punto penaliza la cuenta de resultados de la explotación.
- En cuanto al parámetro definido como COP de la instalación que representa el cociente entre energía térmica producida y la energía consumida (bien eléctrica o bien gas), es superior en los casos convencional y biomasa. Esto se debe a que mediante estas dos estrategias de suministro de energía se prioriza el consumo de energía térmica, mientras que, en los casos de MACI y TG, la producción de energía térmica y eléctrica simultánea hace disminuir este parámetro.
- Finalmente, el REE es un parámetro importante desde un punto de vista normativo. Así según el RD 661/2007

el REE equivalente mínimo en el caso de Gas Natural y GLP en motores térmicos es de 0,55, mientras que en el caso de Gas Natural y GLP en turbinas de gas es de 0,59. No obstante, si la potencia instalada es menor o igual a 1 MW, el rendimiento eléctrico equivalente se reduce un 10%, arrojando unos valores mínimos de 0,495 y 0,531. Como observamos, en el caso de

la turbina de gas, dado el control modelado sobre la misma, el REE obtenido es ligeramente superior que en el caso del motor alternativo de combustión interna. Es importante señalar que para garantizar el cumplimiento normativo se han requerido equipos de producción más pequeños de los obtenidos mediante métodos de selección habituales. Esto, se debe a la propia naturaleza de la demanda de energía (curva de demanda inestable en el tiempo de acuerdo al horario de edificios de oficinas). De esta forma se han elegido dos motores de 514 kW<sub>e</sub> y una turbina de gas de 1.000 kW<sub>e</sub> ambos en el límite de instalaciones inferiores a 1 MW<sub>e</sub>.

### 3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

La siguiente tabla muestra el análisis económico para cada tecnología evaluada mientras en la Figura 14 se muestra el *cash flow* acumulado en cada caso.

	Payback (años)
Tecnología convencional	> 20
Caldera de biomasa	>20
Turbina de gas	16,23
Motor alternativo de combustión interna	12,97

Tabla 4: Análisis económico

Desde una perspectiva económica, vemos cómo la variable producción de electricidad es la que dictamina cómo de buena será la inversión en términos monetarios. Como era de esperar, no es posible obtener un rendimiento positivo en las instalaciones de producción mediante

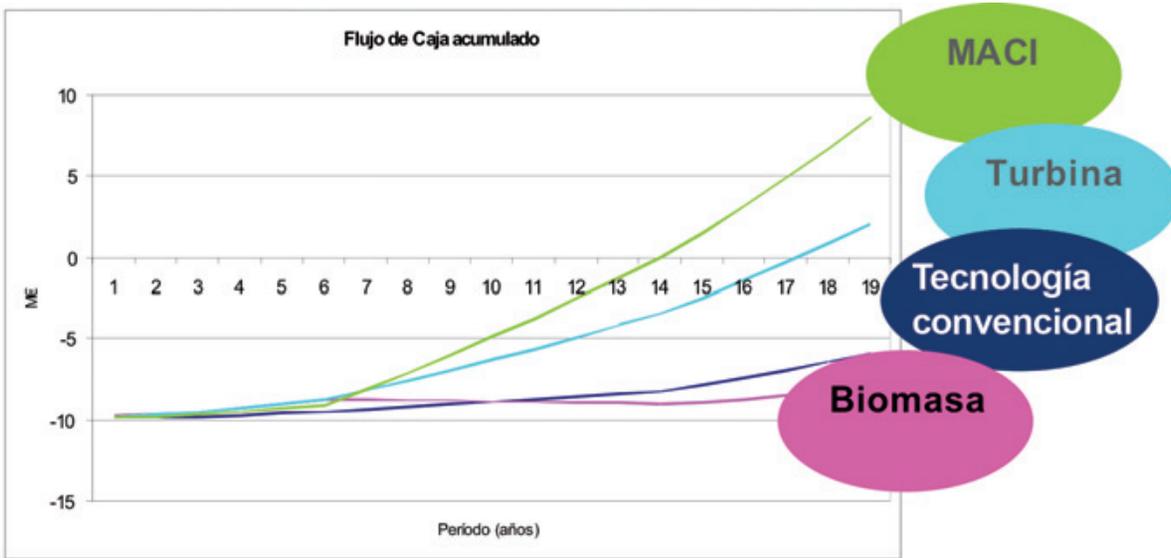


Fig. 14: Flujo de caja acumulado para cada tecnología estudiada

tecnología convencional o biomasa. El objetivo de estas instalaciones es suministrar energía térmica suficiente al parque edificatorio objeto de estudio. Esta situación no se da en el caso de las instalaciones de trigeneración, ya que en este caso la explotación del sistema reportará beneficios debido fundamentalmente a la venta de energía eléctrica. Idealmente desde el punto de vista del explotador de la instalación, éste desearía vender la mayor cantidad de energía eléctrica posible, si bien este hecho entra en conflicto directo con el cumplimiento normativo recogido en el RD 661/2007 en cuanto al rendimiento eléctrico equivalente y ahorro de energía primaria.

Teniendo en cuenta que el modelado del motor se ha hecho de forma que éste opera de manera continua, mientras que la turbina se adapta a la demanda de cada instante, implica que los resultados de explotación sean más favorables en el caso del MACI.

#### 4. CONCLUSIONES

Como puede observarse en la Tabla 4, la tecnología que ofrece un menor período de retorno de inversión es el Motor Alternativo de Combustión Interna seguido de la Turbina de Gas. Este hecho es consecuencia directa de los ingresos derivados de la venta de energía eléctrica. Para el caso del MACI, los beneficios comienzan a ser positivos a partir del año 13.

Es evidente que los costes de adquisición e implantación de la red de distribución son muy elevados y que es crucial garantizar un adecuado nivel de demanda en el futuro, pero bajo las hipótesis de trabajo consideradas, la tecnología MACI resulta atractiva dado el volumen de ingresos si bien el *payback* es muy elevado para este tipo de inversiones.

A modo de resumen las conclusiones derivadas del estudio son las siguientes:

- Como se ha expuesto una curva de *demanda diaria intermitente* dificulta la viabilidad de este tipo de instalaciones, siendo más adecuada en aquellas situaciones donde la curva de demanda diaria es uniforme. El hecho de que la demanda de energía sea intermitente implica que sea necesario recurrir a equipos de producción más pequeños.

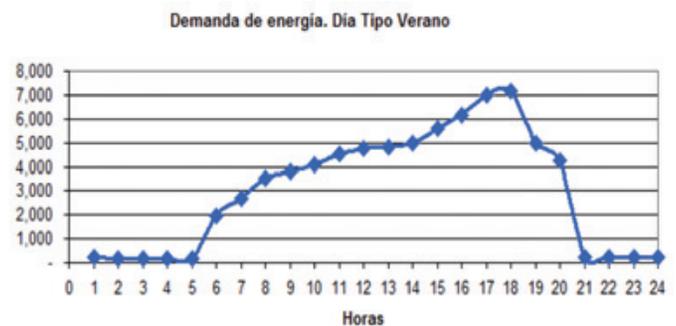


Fig. 15: Curva de demanda de refrigeración. Día tipo de verano

En la gráfica se observa cómo en horario fuera de oficinas la demanda cae drásticamente repercutiendo negativamente en el REE de la instalación y obligando a ésta a reducir su régimen de funcionamiento.

- Gran dependencia con la tasa de establecimiento de nuevas empresas. El estudio realizado está sujeto a la velocidad de establecimiento de nuevas empresas ya que de otra forma las inversiones realizadas no se recuperarán en un plazo de tiempo razonable. Por esta

razón se propone en los primeros años de evolución de la demanda un suministro de energía convencional que sea modulable a la demanda y que finalmente constituya un sistema de apoyo en el caso de dificultades de suministro. Por esta razón se contemplan enfriadoras y caldera de elevada potencia (6 y 9 MW).

- Necesidad de grandes inversiones → elevados períodos de recuperación de inversión.
- CHP: MACI y TG son las MEJORES opciones técnicamente y económicamente.
- La venta de energía eléctrica es decisiva de cara a garantizar la viabilidad económica.
- Modelo de negocio: necesidad de colaboración público-privada para hacer frente a las fuertes inversiones iniciales. Es importante tener en cuenta que para una red como la planteada con una longitud de 4 kilómetros el coste de la misma asciende a 7,5 M€ según el precio de mercado.
- La posibilidad de integración de energía solar ha sido descartada debido a dos factores fundamentales, en primer lugar los elevados niveles térmicos requeridos para la activación térmica de la máquina de absorción, lo que implicaría por un lado la necesidad de recurrir a tecnologías de última generación y, en segundo lugar, los elevados niveles energéticos puestos en juego suponen la implementación de instalaciones de gran superficie con la consecuente ocupación de suelo necesaria que las hace inviable desde un punto de vista económico.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Directiva 2009/28/EC del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de Abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables
- [2] Directiva 2002/91/EC del Parlamento Europeo del 16 de Diciembre 2002 relativa a la eficiencia energética en edificios.
- [3] Secretaría de Estado de Energía, (2008). "La energía en España 2008". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- [4] Gustafsson S. "Optimal heating of large block of flats". Energy and buildings. 40 (2008) 1699-1708.
- [5] Heiple S. "Using building energy simulation and geospatial modelling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles". Energy and buildings. 40 (2008) 1426-1436.
- [6] Huang YJ, Akbari H, Rainer L, Ritschard R. "Prototypical Commercial Buildings for 20 Urban Market Areas". Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley 1991. LBL-29798.
- [7] Pedersen L, Stang J, Ulseth R. "Load prediction method for heat and electricity demand in buildings for the purpose of planning for mixed energy distribution systems". Energy and Buildings, 40 (2008) pp. 1124-1134
- [8] Segen O, Franconi EM, Koomey JG "Technology data characterizing space conditioning in commercial buildings: Applications to end-use forecasting with COMMEND 4.0 LBL-37065" 1995.
- [9] Chow TT, Fong KF, Chan ALS, Yau R, Au WH, Cheng V. "Energy modelling of district cooling system for new urban development". Energy and Buildings, 36 (2004) pp. 1153-1162
- [10] Ministerio de Economía. "Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España, 2004-2012". Noviembre 2003.
- [11] Bohdanowicz P, Martinac I. "Determinants and benchmarking of resource consumption in Hotels – Case study of Hilton International and Scandic in Europe". 2006.
- [12] Pérez-Lombard L, Adnot J, Ortiz, JA et al. "HVAC Systems energy comparison for an office building". 2004.
- [13] Cardona E, Piacentino A "A methodology for sizing a trigeneration plant in Mediterranean areas" April 2003.
- [14] Marimón MA. "Diseño y caracterización de configuraciones avanzadas de sistemas de trigeneración en edificios". DEA 2008.
- [15] Ortiga J, Bruno JC, Coronas A. "Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks". 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17. 2007.
- [16] Söderman J, Pettersson F. "Structural and operational optimisation of distributed energy systems". Applied Thermal Engineering, 2006, 26:1400-1408.
- [17] Bruno JC, López J, Coronas A et al. "Techno-economic design study of a large scale solar cooling plant integrated in a district heating and cooling network". 61st ATI National Congress – International Session "Solar Heating and Cooling". Perugia, 2006.
- [18] Real Decreto 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. BOE 126, p. 22846-86; 2007.
- [19] Factores de conversión de consumo o producción a energía primaria (EP) y factor. Secretaría General. Departamento de Planificación y Estudio IDAE. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; 2010.
- [20] ASHRAE Handbook – Fundamentals. 2009.
- [21] Energy Plus v5.0. Gard analytics. U.S. DOE Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)
- [22] TRNSYS v16. TRaNsient SYstem Simulation Studio. Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison.
- [23] "Análisis de tecnologías y escenarios para redes de distribución de calor y frío". Gas natural. 2007.
- [24] 2007/74/CE. Decisión de la Comisión de 21 de diciembre de 2006 por la que se establecen valores de referencia armonizados para la producción por separado de electricidad y calor. Anexo II