

# MICRO-REDES, UNA SOLUCIÓN SOSTENIBLE PARA UN SUMINISTRO ENERGÉTICO INTEGRAL A ECO-COMUNIDADES

**MICROGRIDS, A SUSTAINABLE SOLUTION FOR AN INTEGRAL ENERGY SUPPLY TO ECO-CITIES**

Eugenio Perea Olabaria  
Ingeniero Industrial  
Labein-Tecnalia

Raúl Rodríguez Sanchez  
Ingeniero Industrial  
Labein-Tecnalia

Elena Turienzo López  
Ingeniera Industrial  
Labein-Tecnalia

Carlos Madina Doñabeitia  
Ingeniero Industrial  
Labein-Tecnalia

Ander Romero Amorrortu  
Ingeniero Industrial  
Labein-Tecnalia

Eduardo Zabala Lekue  
Ingeniero Industrial  
Labein-Tecnalia

## RESUMEN

El presente artículo hace referencia a un caso con el que se pretende dar al lector una idea sobre la forma de proceder a la hora de realizar un estudio de viabilidad de micro-redes en distritos o comunidades y demostrar su viabilidad técnica y económica, aportando además datos sobre sostenibilidad.

Los resultados que se exponen han sido obtenidos mediante una aplicación de cálculo desarrollada por *Labein-Tecnalia*, denominada CEEM-U, Cálculo Energético y Económico de Micro-redes Urbanas.

En una primera fase, dicha aplicación estima los consumos eléctricos y térmicos (agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración) de la zona de estudio. Esta estimación se hace en función de los elementos urbanos que conforman el distrito, como edificios residenciales, edificios o locales comerciales, talleres industriales,

equipamientos comunes como bombas de presión, alumbrado, garajes y ascensores. Se tienen en cuenta las características de los edificios: altura media de viviendas, superficie media de viviendas, tanto por ciento de paredes exteriores, de ventanas respecto de pared, coeficientes de transmisión térmica de paredes, ventanas, techos, número de renovaciones del aire por hora. También se consideran condiciones climáticas y de uso como temperatura exterior en día medio del mes, temperatura objetivo y horas de calefacción o refrigeración según mes.

Posteriormente, teniendo en cuenta otras consideraciones como los costes de instalación, operación y mantenimiento de las infraestructuras de generación y almacenamiento (eléctrica y térmica), así como las condiciones climáticas del lugar, la aplicación permite calcular cuál es la opción más rentable para suministrar

Recibido: 02/09/08  
Aceptado: 17/11/08

la electricidad y el calor demandados en el distrito urbano.

Por último, tomando como base la generación eléctrica y térmica en la microrred a lo largo del año, las tecnologías usadas para dicha generación y su tasa de emisiones de gases de efecto invernadero, se compara el nivel de emisiones generado en el caso de instalar la microrred frente al de no hacerlo y seguir siendo abastecidos por la red de distribución.

**Palabras Clave:** Microrred, eco-comunidad, electricidad, energía térmica, viabilidad económica, sostenibilidad.

## ABSTRACT

*This paper refers to a case in which the reader can have an idea of a*

*feasibility study of a microgrid implemented in urban districts or eco-cities. It wants to demonstrate the economical and technical feasibility of this concept as well as its sustainability.*

*The exposed results have been obtained thanks to an application developed by Labein-Tecnalia, called CEEM-U, Cálculo Energético y Económico de Micro-redes Urbanas (Energetic and Economic Calculation of Urban Microgrids).*

*In a first step, the application estimates the electric and thermal (heating, cooling and water heating) demands in the studied area. This estimation is done considering the urban elements involved in the district like the residential and commercial buildings or premises, industrial facilities, common equipment (elevators, lighting, pumps). It also takes into account the characteristics of the buildings: average height, surface of the housing, rate of walls against windows, rate of exterior walls, thermal transmittance coefficient of walls, windows, ceilings and number of air renovations per hour. Climatic and use conditions, like the exterior temperature, objective temperature and heating and cooling hours are also considered depending on the month.*

*Afterwards, taking into account other considerations like the installation, operation and maintenance costs of the generation (electric and thermal) and storage infrastructures, as well as local climatic conditions, the application allows to calculate which is the most profitable option (generation and storage technologies selection and power rates, including operation countersigns for a whole year) for the electricity and heat supply in the urban district.*

*At the end, after calculating the generation profiles suitable with the most profitable option and knowing the gas emission taxes of the different technologies, the application calculates the global emission rate of the microgrid.*

**Key words:** Microgrid, eco-city, electricity, thermal energy, economic feasibility, sustainability.

## INTRODUCCIÓN

Los resultados que se exponen han sido obtenidos mediante una aplicación de cálculo desarrollada por Labein-Tecnalia, denominada CEEM-U, Cálculo Energético y Económico de Micro-redes Urbanas.

En una primera fase, dicha aplicación estima los consumos eléctricos y térmicos (agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración) de la zona de estudio. Esta estimación se hace en función de los elementos urbanos que conforman el distrito, como edificios residenciales, edificios o locales comerciales, talleres industriales, equipamientos comunes, y otros elementos urbanos como bombas de presión, alumbrado, garajes y ascensores. Se tienen en cuenta las características de los edificios: altura media de viviendas, superficie media de viviendas, tanto por ciento de paredes exteriores, de ventanas respecto de pared, coeficientes de transmisión térmica de paredes, ventanas, techos, número de renovaciones de aire por hora. También se consideran condiciones climáticas y de uso como temperatura exterior en día medio del mes, temperatura objetivo y horas de calefacción o refrigeración según mes.

Posteriormente, teniendo en cuenta otras consideraciones como los costes de instalación, operación y mantenimiento de las infraestructuras de generación (eléctrica y térmica) y almacenamiento, así como las condiciones climáticas del lugar, la aplicación permite calcular cuál es la opción más rentable para suministrar la electricidad y el calor demandados en el distrito urbano.

Por último, tomando como base la generación eléctrica y térmica en la microrred a lo largo del año, las tecnologías usadas para dicha generación y su tasa de emisiones de gases de efecto invernadero, se compara el nivel de emisiones generado en el caso de instalar la microrred frente al de no hacerlo y seguir siendo abastecidos por la red de distribución.

## 1. CONCEPTO DE MICRORRED

A lo largo del presente texto, se llamará microrred eléctrica al sistema formado por fuentes de generación, equipos de almacenamiento y cargas conectadas eléctricamente, que puede funcionar tanto conectado al sistema principal como aislado del mismo en el caso de perturbaciones eléctricas, que se controla desde el opera-

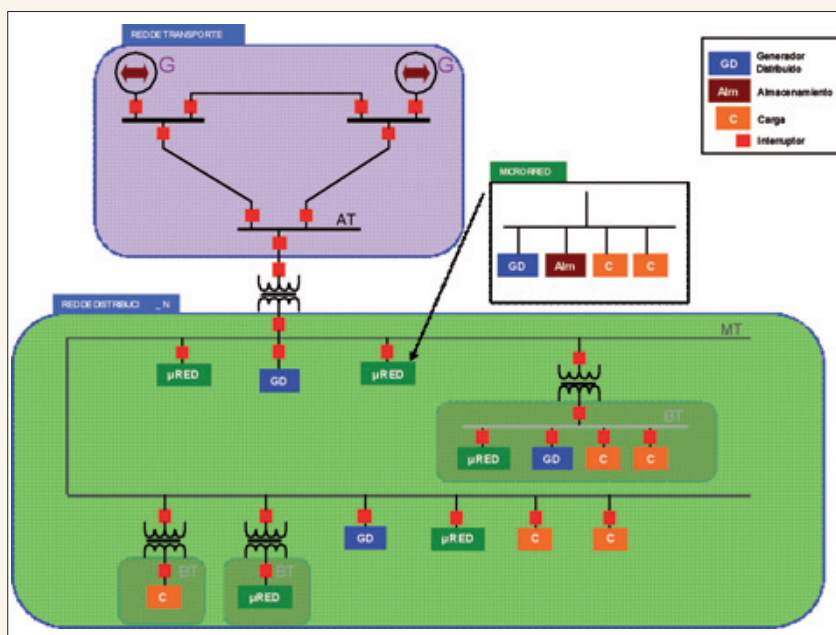


Figura 1: Esquema eléctrico de la microrred y su integración en la red eléctrica

dor del sistema como un sistema agregado, y en el que hay que planificar y gestionar la energía generada y consumida.

Como se observa en la definición anterior, no se especifica si la conexión debe ser en Baja o Media Tensión, ni se fijan límites de potencia. Ello dependerá de la aplicación de la microrred, del volumen de demanda que pretenda satisfacer, así como de su ubicación.

Parte de los generadores que forman parte de una microrred suelen ser unidades de cogeneración. La generación conjunta de electricidad y calor permite maximizar el aprovechamiento del combustible, mejorando la eficiencia energética global.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECO-COMUNIDAD QUE INFLUYEN EN EL DIMENSIONADO DE LA MICRORRED

Para el caso de estudio, se han considerado los datos generales y de usos que se indican a continuación en las tablas 1 y 2:

Como se puede observar en la tabla 2, la suma de superficie por usos en la comunidad es mayor que la superficie total de la comunidad de la tabla 1, debido a que se tienen en cuenta las distribuciones de superficie de las diferentes alturas de los edificios.

## 3. CÁLCULO DE PERFILES DE DEMANDA ELÉCTRICA Y TÉRMICA

Las necesidades energéticas, de la comunidad o distrito, calculadas mediante CEEM-U se clasifican según los siguientes tipos:

- Demanda eléctrica: Se calcularán el consumo eléctrico de cada vivienda o local (industrias, comercios), de cada edificio destinado a oficinas, comercios, industrias o equipamientos comunes, los consumos comuni-

| Datos genéricos de la comunidad en estudio             |       |
|--------------------------------------------------------|-------|
| Superficie (hectáreas)                                 | 39,52 |
| Habitantes (número)                                    | 8.881 |
| Densidad (número/ha)                                   | 225   |
| Total edificios (número)                               | 344   |
| Total viviendas (número)                               | 3.453 |
| Tamaño medio familias (número de personas)             | 2,74  |
| Industria y energía (número de locales de este sector) | 10    |
| Locales comerciales (número de locales de este sector) | 365   |

Tabla 1. Datos genéricos de la comunidad en estudio

| Usos                                | Superficie (m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Residencial                         | 290.707                      |
| Educativo                           | 7.133                        |
| Religioso                           | 1.214                        |
| Cívico-cultural                     | 108                          |
| Sanitario                           | 458                          |
| Deportivo                           | 11.535                       |
| Parcelas equipamentales             | 56.770                       |
| Parcelas con algún uso equipamental | 11.966                       |
| Otras parcelas                      | 126.514                      |
| Otros                               | 121.391                      |

Tabla 2. Distribución de superficies por uso en la comunidad

tarios (alumbrado de escalera, bombas de presión, garajes y ascensores) y el del alumbrado exterior.

- Demanda térmica: Se calcularán el consumo de calefacción, refrigeración y Agua Caliente Sanitaria (ACS) de cada vivienda o local (industrias, comercios) y de cada edificio destinado a oficinas, comercios, industrias o equipamientos comunes.

En los cálculos se ha asumido lo siguiente:

- Por un lado, se han considerado diferentes periodos para la estimación de cargas:
  - Estacionales:
    - Día de invierno (Enero a Marzo y Noviembre a Diciembre) y de entretiempo (meses de Abril, Mayo y Octubre).
    - Día de verano (meses de Junio a Septiembre).

- Día de la semana:

- Día tipo de semana laborable.
- Día tipo festivo, que incluye las vacaciones (Agosto), los fines de semana (Sábados y Domingos) y el resto de días festivos.
- Además, existe una tercera categoría que hace referencia sólo a los niveles de consumo:
  - Días típicos.
  - Días de consumo máximo, que dan una idea de los peores casos.
- Los valores absolutos de consumo de energía eléctrica anual en viviendas se han obtenido a partir de una base de datos propia, elaborada a partir de resultados de encuestas (sondeo de unas 50 personas representativas de otras tantas viviendas)<sup>1</sup>
- Los valores absolutos de consumo de energía eléctrica anual en otro tipo de locales (comerciales, oficinas y talleres para el ca-

<sup>1</sup> Esta Base de Datos clasifica los distintos consumos eléctricos anuales en viviendas en función del tipo de las mismas (grado de electrificación del distrito, superficie de la vivienda, número de personas, grado de ocupación) y tipo de calefacción (eléctrica o no).



so que nos ocupa) se han obtenido partir de estimaciones basadas en datos existentes y recabados en el proyecto del 6º Programa Marco de la Comisión Europea EU DEEP: *"The birth of an European Distributed EnErgy Partnership that will help the large-scale implementation of distributed energy resources in Europe"* (www.eudeep.com).

- La distribución de los consumos por meses y por horas, en función del tipo de día, laborable y fin de semana, así como verano o invierno, se obtiene, a partir de datos públicos proporcionados por Red Eléctrica de España (www.ree.es).
- Los datos de la energía térmica consumida para los distintos usos (calefacción y ACS en el caso que nos ocupa) y su distribución en el tiempo (día y estación), se ha realizado a partir de fórmulas analíticas y datos publicados por el IDAE (www.idae.es).

A continuación se resumen los datos necesarios y algunas de las consideraciones más importantes para calcular cada tipo de demanda.

### 3.1 DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE NECESIDADES ELÉCTRICAS

Se han considerado dos tipos de edificios de viviendas, según el grado de electrificación de las mismas (un tipo de edificios denominado *"Electrificación v1"* con calefacción eléctrica y el otro denominado *"Electrificación v2"* con calefacción central o a gas). En concreto existen 172 edificios de cada tipo. De la misma forma, se consideran un edificio de oficinas (*"electrificación o1"*), un supermercado (*"electrificación o2"*) y un edificio industrial (*"electrificación o3"*).

Se han caracterizado en concreto los siguientes parámetros:

- De edificio o vivienda: número de edificios de un tipo, número de viviendas por edificio, super-

ficie media viviendas, altura media por planta, número plantas por edificio, número habitantes por vivienda y grado de electrificación de vivienda.

- De otro tipo de locales: número de locales comerciales por edificio, potencia mínima por local comercial, superficie de locales comerciales y potencia mínima por superficie.
- De otro tipo de edificios: para el edificio de oficinas, el de talleres y el de locales comerciales, parecido a edificio de viviendas.
- De garajes: ventilación forzada de garaje (si, no) y potencia mínima por superficie.
- Otro tipo de consumos: potencia de ascensores o elevadores, potencia de alumbrado de portal, escalera, velocidad del o de los ascensor(es) y viajes por persona y día, horas diarias de funcionamiento de centrales de calor y frío, de garajes, de alumbrado de escalera, de alumbrado general, caudal, pérdidas y rendimiento de las bombas, etc.

Para determinar la demanda de energía eléctrica, se necesitan además datos de perfiles de consumo a lo largo del año. Como ya se ha indicado, se han considerado los perfiles a partir de datos y estudios de Red Eléctrica.

### 3.2 DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DE NECESIDADES DE AGUA CALIENTE SANITARIA

Se ha considerado que el distrito está localizado en la zona climática I según la clasificación del Código Técnico de Edificación (CTE) [3].

Para dimensionar el ACS hay que tener en cuenta el consumo máximo en cada tipo de edificio. [2] muestra los valores típicos del consumo de litros diarios por persona en distintos tipos de edificios.

Asimismo, es necesario conocer la temperatura media de cada mes del agua de la red general, la temperatura media de cada mes del ACS, la distribución de consumos por meses y en función del tipo de día (laborable y fin de semana), y la distribución de consumos por horas para un día tipo de verano y de invierno, en función de si es día laborable o festivo.

Con todo ello, se obtienen los consumos anuales y mensuales de ACS, para cada hora de un día laborable medio y de un día festivo medio.

### 3.3 DATOS PARA ESTIMACIÓN DE NECESIDADES DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

Además, se dispone de los siguientes datos, necesarios para la estimación de demanda energética para el caso de calefacción y refrigeración: Porcentaje de paredes exteriores, de ventanas respecto a pared, factor de suplementos<sup>2</sup>, coeficientes de transmisión térmica de puertas, ventanas, techos, muros fachadas, muros interiores, temperatura de confort, número de renovaciones de aire por hora, etc.

### 3.4 ESTIMACIÓN DE CONSUMOS/SEGMENTACIÓN DE LA DEMANDA

A partir de todas las consideraciones anteriores y de los cálculos realizados mediante CEEM-U, se obtienen los perfiles de demanda eléctrica y térmica según usos (ACS y calefacción) mostrados en la figura 2.

## 4. VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE CONSUMOS TÉRMICOS DEL DISTRITO URBANO

Los resultados de las estimaciones de los consumos térmicos del distrito urbano en estudio han sido obtenidos mediante CEEM-U desarrollada por LABEIN-TECNALIA.

<sup>2</sup> En el Factor de Suplementos se tienen en cuenta diversos factores: la orientación norte, reducción nocturna, paradas, el número de paredes al exterior y las últimas plantas del edificio.

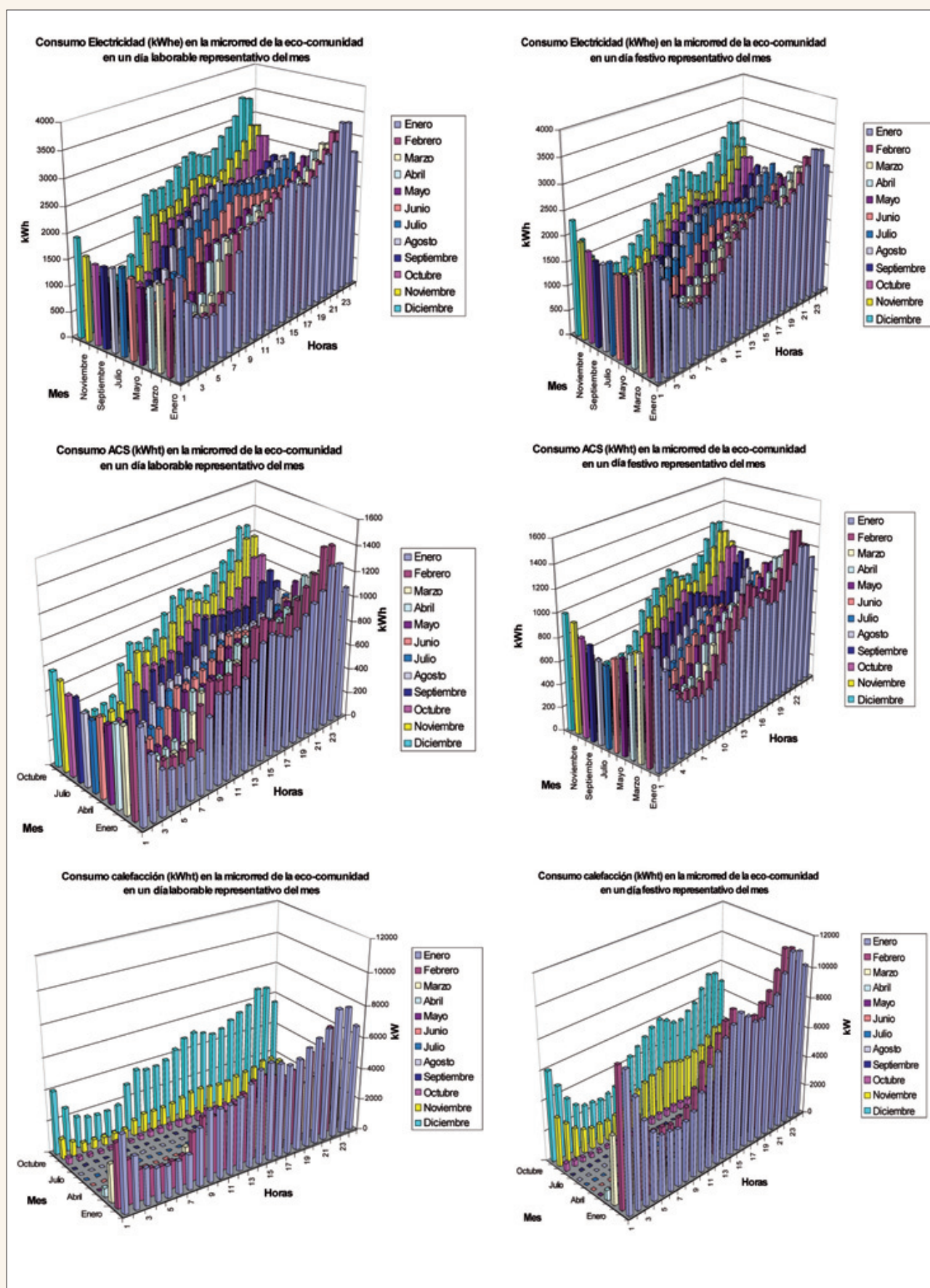


Figura 2: Estimación de la demanda energética (electricidad y calor para ACS y calefacción) de la microrred de la eco-comunidad en estudio

Con el objeto de validar dichos resultados, se ha procedido a realizar la evaluación del consumo térmico del distrito mediante la aplicación del software de simulación dinámico EnergyPlus () ampliamente contrastado. Esta herramienta de simulación permite analizar conjuntamente:

- Los aspectos relacionados con la tipología y los detalles constructivos del edificio (a través de la definición tridimensional del mismo).
- La incidencia del entorno (climatología, radiación incidente, obstáculos).
- La incidencia asociada a las instalaciones del edificio.
- La incidencia asociada al uso del edificio (a través de la configuración del uso de las diferentes instalaciones).

Los datos introducidos en EnergyPlus para la estimación de los consumos de los diferentes edificios que conforman el distrito urbano estudiado se han basado en los supuestos desarrollados en los apartados anteriores.

#### 4.1 METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LA ESTIMACIÓN DE CONSUMOS DEL DISTRITO URBANO

##### 4.1.1 Modelado tridimensional del distrito urbano

El modelado tridimensional de la totalidad del distrito está orientado al análisis de los volúmenes de los edificios, al análisis de la incidencia de unos elementos sobre otros (por ejemplo sombreados) mediante el software ECOTECT ([www.squ1.com/products/ecotect](http://www.squ1.com/products/ecotect)), de forma que sea posible seleccionar y acotar áreas de estudio.

##### 4.1.2 Selección de edificios tipo

En el marco de la evaluación energética de este distrito se ha procedido a la selección de una serie de edificios tipo que se han tomado como

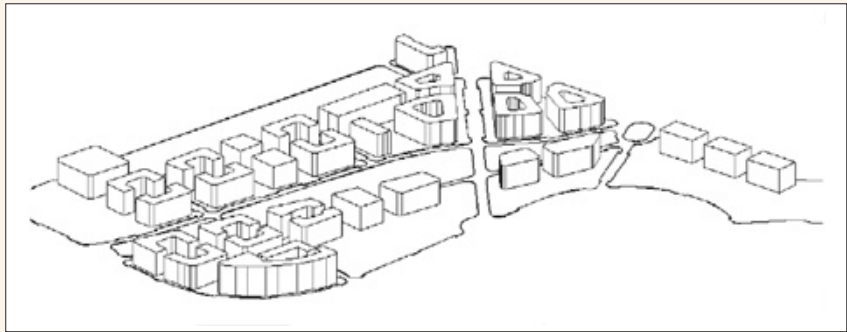


Figura 3: Modelado tridimensional de parte del distrito urbano

representativos de un grupo de edificios.

Se han seleccionado como edificios tipo aquellos que reunían características similares en cuanto a:

- Tipo de uso principal: residencial, comercial (oficinas, comercios, etc.), industrial.
- Características constructivas como envolventes y geometrías.
- Condiciones del entorno: sombreados de edificios colindantes y orientaciones.
- Condiciones de uso: ventilación e instalaciones.

Cada uno de los edificios tipo se ha modelado en detalle y sus consumos se han analizado pormenorizadamente. El consumo de cada edificio agrupado dentro de los de un tipo se ha calculado considerando los mismos consumos anuales por metro cuadrado habitado. Dependiendo de la superficie climatizada del edificio se ha obtenido un perfil de consumo anual para cada edificio.

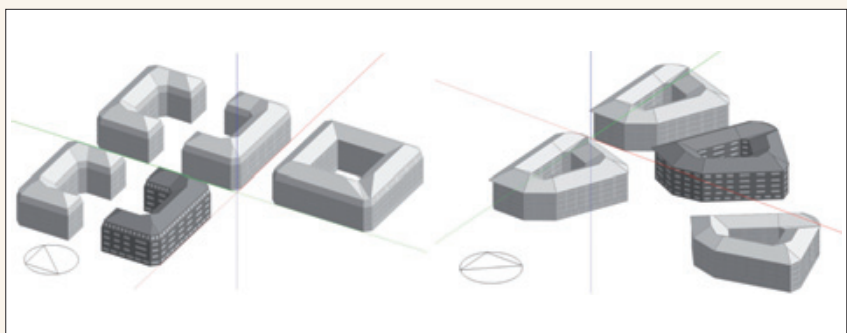


Figura 4: Modelado detallado de edificios tipo

#### 4.2 SIMULACIÓN DE CONSUMOS

Los resultados de las simulaciones realizadas con CEEM-U han sido contrastados con los obtenidos mediante EnergyPlus, método dinámico de estimación de la demanda térmica. Para evitar los errores producidos por la diferencia entre los distintos datos de entrada necesarios en ambos métodos, se han realizado los cálculos en EnergyPlus sólo con aquellos datos de entrada que la herramienta propia desarrollada contempla. A modo de ejemplo, se muestra la comparación de los resultados de simulación de calefacción en uno de los edificios de viviendas con "grado de electrificación v1". En las simulaciones realizadas con EnergyPlus, el edificio en estudio se ha rodeado de los edificios adyacentes, como se muestra en la figura 4.

Aunque no se pretende validar la herramienta, los resultados de la comparación demuestran que las diferencias máximas entre ambos métodos no son superiores al  $\pm 12\%$ ,



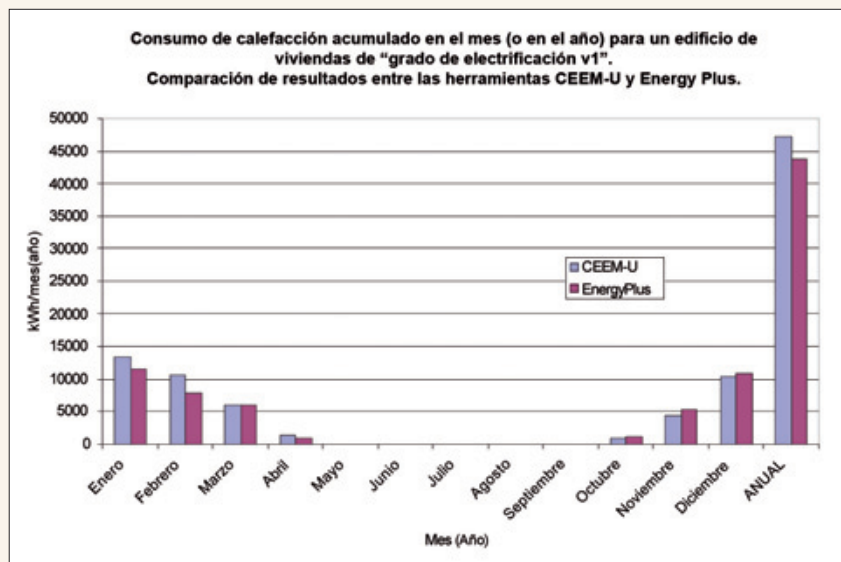


Figura 5: Comparación de resultados de simulación térmica, consumo de calefacción en edificio tipo, obtenidos con CEEM-U y EnergyPlus

valor éste inferior al  $\pm 15\%$  que aconseja el documento [4]. Estas diferencias son debidas a:

- EnergyPlus considera la carga térmica asociada a la ocupación, en este caso supuesta de 24 horas/día. La actual versión de CEEM-U no tiene en cuenta esta carga térmica asociada.
- La distribución de temperaturas exteriores en EnergyPlus son horarias y en CEEM-U son una media de un día tipo del mes. Como consecuencia, las consignas de operación de calefacción en EnergyPlus son programadas de forma horaria, pero no implican funcionamiento (depende de temperatura exterior).
- En EnergyPlus se tienen en cuenta los efectos que producen los sombreados de edificios adyacentes de forma directa, en CEEM-U sólo a través del factor de suplementos.

## 5. ESCENARIOS DE MICRORRED CONSIDERADOS

Una vez estimada la demanda, se buscará definir la microrred que mejor se adapte a las necesidades, teniendo en cuenta tanto aspectos de

viabilidad técnica y económica, así como de sostenibilidad.

Se eligen unos escenarios potencialmente deseables que se comparan con un escenario de referencia en el que no existe microrred. El análisis se realiza teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Se parte de un escenario de referencia en el que no hay microrred. En este caso, la demanda eléctrica se satisfará tomando electricidad directamente de la red pública de distribución eléctrica. Las demandas de calefacción y ACS se abastecerán mediante la quema de gas natural en calderas tradicionales.
- El resto de escenarios se evaluarán en base al VAN (Valor Actual Neto) y el plazo de recuperación de la inversión, asumiendo como beneficio anual el ahorro respecto al escenario referencia.
- La microrred estará formada tanto por los componentes de generación y almacenamiento (instalación incluida), como por otros sistemas necesarios para conformar la microrred (aparataje eléctrica y térmica y el

controlador central de la microrred).

- Los elementos de generación serán renovables y/o de alta eficiencia energética (cogeneración).
- Las fuentes de generación de energía renovable se dimensionarán, a priori, a partir de características climáticas y condicionantes de la eco-comunidad (superficie disponible y demanda de energía térmica) y del CTE.

## 5.1 ELECCIÓN DE ESCENARIOS

Se consideran, además del de referencia, los siguientes escenarios:

- Escenario con sólo renovables según CTE: fotovoltaica y solar térmica. Se dimensionarán según limitaciones de espacio. El resto del calor será proporcionado por calderas.
- Escenario anterior en el que además se incluye un cogenerador que complementa el aporte de calor de las calderas existentes en los edificios, y configurado y operado como microrred.

### 5.1.1 Escenario según el CTE, dimensionado de paneles fotovoltaicos

Según el CTE, sólo es obligatorio instalar paneles fotovoltaicos en hipermercados, centros de ocio, naves de almacenamiento, edificios administrativos, hoteles, hospitales y pabellones de recintos feriales, todos ellos en función de la superficie construida. Tomando en cuenta estas consideraciones, la potencia mínima a instalar es de unos 160 kWp.

Además otros datos a considerar de esta tecnología han sido:

- Coste de sistema fotovoltaico e instalación: 6.000 €/kWp.
- Costes fijos de mantenimiento de sistema fotovoltaico: 0,1 €/kWhe.
- Prima a recibir por venta de electricidad de sistema fotovol-

taico de 160 kWp (según RD 661/2007 [5]): 0,41 €/kWh.

térmica total de ACS en todo el año es 6.158.515 kWh. Así, el 30% de esta

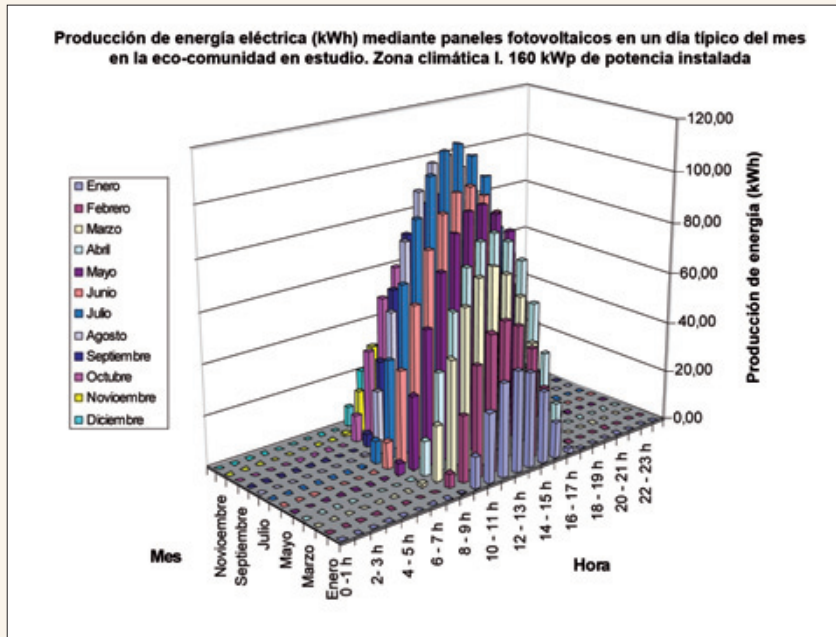


Figura 6: Producción de energía fotovoltaica (kWh) en un día típico del mes en la eco-comunidad en estudio. Zona climática I. 160 kWp de potencia instalada

### 5.1.2 Escenario según el CTE, dimensionado de paneles solares térmicos

La contribución solar mínima depende del consumo de ACS, el combustible al que sustituye y la zona climática. La condiciones a aplicar en este caso:

- La demanda de ACS que no se cubra con solar se abastecerá con gas natural.
- Zona climática I.
- Consumo de ACS entre 500 y 15.000 litros/día por edificio. En los edificios de viviendas resulta un consumo diario de 822 litros/día/edificio (10 viviendas, 2,74 personas/vivienda y 30 l/diarios/persona), y, en el resto de edificios (locales comerciales, talleres industriales), 500 litros/diarios/edificio.

Para estas condiciones, de acuerdo con el CTE, la contribución solar mínima será del 30% y los cálculos deben hacerse con una temperatura de ACS de 60°C. De esta forma, la demanda

cantidad es 1.847.554 kWh, que se tendrán que cubrir con la instalación solar térmica.

Teniendo en cuenta las condiciones de radiación en la zona donde se quiere ubicar la microrred, dicho porcentaje de demanda se cubre y sobrepasa con una superficie de paneles solares térmicos de 2.500 m<sup>2</sup>. Se han considerado, en concreto, 250 paneles de 10 m<sup>2</sup>.

Además, otros datos a considerar de esta tecnología han sido:

- Coste de sistema solar térmico e instalación: 500 €/m<sup>2</sup>.
- Costes fijos de mantenimiento de sistema solar térmico: 0,01 €/kWh.

### 6. ESPECIFICACIÓN DE LAS CONSIGNAS DE OPERACIÓN DE LA MICRORRED

La generación de electricidad seguirá los siguientes criterios:

- Los paneles fotovoltaicos y solares térmicos producirán ener-

gía en función de la radiación solar del momento.

- El cogenerador consume gas natural y opera hasta cubrir la demanda de calor no satisfecha por las renovables. La generación de energía eléctrica dependerá de la demanda de energía térmica.
- Toda la energía eléctrica generada por medio de instalaciones de fuentes renovables o de cogeneración, acogidas al Régimen Especial, se venderá a la empresa distribuidora. A su vez, la energía eléctrica necesaria para el consumo se comprará en el mercado. Como se ha mencionado, el presente marco legislativo (RD 661/2007), favorece la venta de la energía de este tipo de instalaciones a través de primas.

### 7. ESTUDIO ECONÓMICO Y DE SOSTENIBILIDAD DE LOS ESCENARIOS

El estudio de viabilidad económica se realizará mediante la consideración de dos parámetros: el VAN o Valor Actual Neto y el periodo de recuperación de la inversión. Para ello, habrá que calcular en primer lugar el flujo de caja anual por operación, y afectarle, en los 10 primeros años del periodo, del préstamo de los costes de inversión por compra de los equipos o componentes de la microrred. El VAN acumulado del caso con microrred (costes fijos de inversión y variables de operación) habrá que compararlo contra el del caso sin microrred (costes variables de operación). Por último, la sostenibilidad se estudia en base a las emisiones de gases de efecto invernadero (en concreto CO<sub>2</sub>) en el caso sin microrred y en el caso con microrred.

Los costes de operación de la microrred considerados son:

- Precios de compra de electricidad: La compra de electricidad se hace en mercado en lugar de a tarifa (en previsión de una posible futura derogación). Por lo



tanto, se deberán pagar los peajes de acceso y el precio resultante de la casación en el mercado. Se han supuesto los peajes de acceso establecidos para 2007 por el RD 1634/2006 [6], en los que el término de potencia es de 0,00207 €/kW/h y el término de energía de 0,02982 €/kWh.

- En cuanto a los precios de mercado, los días del año se han dividido en tres tipos de días (invierno, verano y entretiempo) y se ha calculado el valor medio del precio de mercado para cada una de las horas de cada tipo de día.
- Precios de compra de gas en 2007: Aplicando la tarifa 3.2, según la Orden ITC/3992/2006 [7], es 0,04210 €/kWhg.

En cuanto a los costes financieros, se han considerado los siguientes valores:

- Tasa de descuento: 7%
- Tasa de inflación: 4%
- Subvenciones: 0%
- Cantidad a financiar: 80%
- Tasa de interés: 4%
- Periodo préstamo: 10 años

Además no se han considerado los costes de mantenimiento especiales, ni la parada obligada de los equipos de la microrred en caso de averías. Es decir, todos los equipos funcionan 8.760 horas/año.

## 7.1 RESULTADOS ECONÓMICOS

A continuación se exponen los resultados económicos que se derivan de acometer la inversión y operación en el supuesto de los siguientes escenarios.

### 7.1.1 Escenario de referencia (sin microrred)

Considerando un rendimiento del 80% de las calderas de gas, el flujo de caja anual por operación es -2.486.985 €. En este caso la operación se basa en los siguientes aspectos:

- Se compra la electricidad en el mercado al precio del mercado,

más peajes de acceso y término de potencia, según el mencionado RD 1634/2006, y el gas natural a la empresa distribuidora, según la tarifa 3.2, según la Orden ITC/3992/2006, para cubrir todas las demandas.

- No hay venta de energía, puesto que no hay generación.

### 7.1.2 Sólo renovables según el CTE

El flujo de caja anual por operación de este escenario de renovables según el CTE, pero sin operación como microrred, es -2.346.502 €. En la siguiente figura se observa el desglose de cuentas año a año. Habrá que asumir que:

- Los beneficios se obtienen al término (facturación) del año dos, esto es el 31 de Diciembre de 2.009. Estos beneficios son afectados por el Índice de Precios al Consumo o IPC.
- El VAN es la suma en todos los años de vida útil de la instalación de los beneficios por operación de la instalación afectados por el IPC menos costes del préstamo de cada año, actualizada al valor del dinero del año cero, es decir, afectándole la tasa de descuento.

Por lo tanto,

- en el año 11 la diferencia de los flujos de caja anuales empiezan a ser positivos,

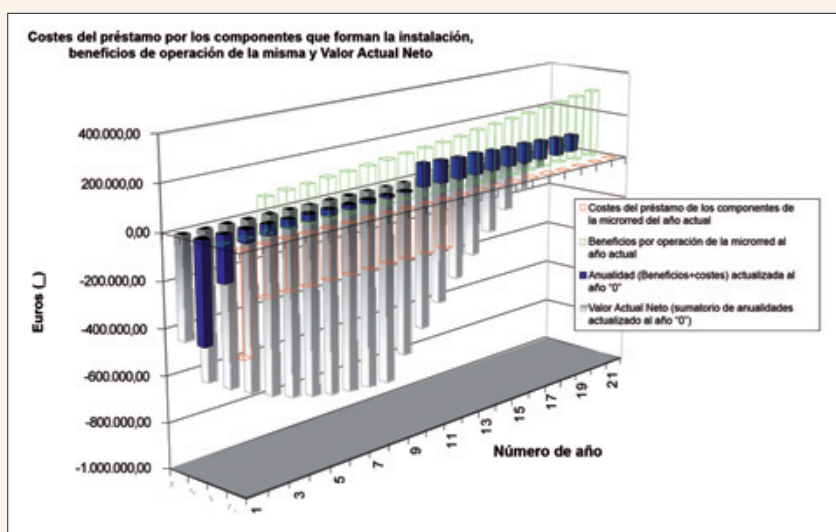


Figura 7. Costes del préstamo por los componentes que forman las instalaciones solares térmicas y fotovoltaicas, beneficio de operación de la misma y Valor Actual Neto

- En el año cero, por ejemplo la fecha 31 de Diciembre del año 2.007, se pagará o tendrá retenido en cuenta íntegramente el coste de la inversión (20% de fondos propios y el resto financiado, por lo que habrá que pagar una amortización e intereses en años sucesivos).
- Durante el año uno se acomete la realización y construcción de la instalación. Es decir, el 31 de Diciembre de 2008 no se obtiene beneficio alguno, pero hay que pagar la amortización del préstamo e intereses.

- al cabo de 20 años se recupera la inversión. Recordemos que estamos en una zona climática I según el CTE y que no se recibe ningún tipo de subvención para cubrir los gastos derivados de la adquisición e instalación de los componentes.

### 7.1.3 Renovables según CTE y cogenerador de dimensiones óptimas, operados como microrred

En este caso, además de mantener el dimensionado de los paneles fotovoltaicos y solares

térmicos del caso anterior, se incluyen:

- Un cogenerador de 500 kWe. El precio de inversión del cogenerador es de 875 €/kWe (ejemplo: motores alternativos). El precio de mantenimiento es 0,01 €/kWe. Este dimensionado de cogenerador se ha obtenido tras un análisis de sensibilidad, en el que el parámetro potencia del cogenerador y el coste por kW de pico del mismo han sido variados (según precios de mercado), hasta conseguir la rentabilidad máxima del proyecto. Se suponen los siguientes rendimientos del cogenerador:

- rendimiento eléctrico: 29,45%
- rendimiento térmico: 55%

- Elementos de la microrred, tales como aparataje eléctrica (transformadores, relés de protección, cables, aisladores, interruptores, interruptor estático en el punto de conexión de la microrred con la red eléctrica de distribución, etc.) y térmica (tuberías, bombas de presión, etc.), así como los elementos de inteligencia y control, que han sido descritos en los capítulos precedentes. El montante de estos elementos para constituir la microrred es de 798.600 €.

Con estos elementos, el flujo de caja anual (sin tener en cuenta costes de inversión, sólo ingresos y gastos de operación) es -2.167.568 €. Y el desglose año a año, teniendo en cuenta los costes de inversión:

Es decir,

- El flujo de caja anual es positivo a partir del año dos.
- Se recupera la inversión en el año 13.
- Al cabo de 20 años, el beneficio acumulado de la inversión por instalar la microrred es de 1.494.336 € respecto al caso de no acometer la inversión (sin microrred).

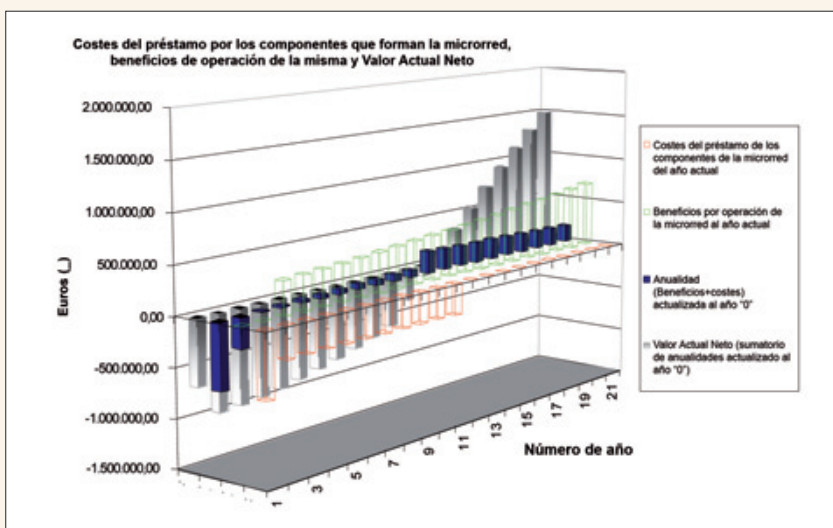


Figura 8. Costes del préstamo por los componentes que forman la microrred, beneficio de operación de la misma y Valor Actual Neto. Microrred formada por instalaciones solares térmicas, fotovoltaicas y cogeneración

## 7.2 RESULTADOS DE SOSTENIBILIDAD

Se ha indicado con anterioridad que el estudio de sostenibilidad se ha realizado en base a emisiones de gases de efecto invernadero, en concreto CO<sub>2</sub>. Se ha hecho la comparación de emisiones del escenario de referencia sin microrred, respecto del es-

Se ha partido del dato de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes por MWh de gas natural quemado (dado que es la energía fósil usada en el caso del cogenerador y calderas): 0,22523 t CO<sub>2</sub>/MWh (toneladas de CO<sub>2</sub> por MWh quemado). Los resultados obtenidos son los que se muestran en la tabla 3.

|                                                               | Referencia (sin microrred) | Con microrred |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------|
| Emisiones de CO <sub>2</sub> eq (t)                           | 5.982                      | 6.149         |
| Energía total generada [kWh <sub>t</sub> + kWh <sub>e</sub> ] | 21.247.246                 | 24.771.898    |
| t CO <sub>2</sub> eq/MWh(mixto)                               | 0,2815                     | 0,2482        |

Tabla 3. Emisiones de CO<sub>2</sub> absolutas y normalizadas (mixto) por la energía generada en cada uno de los casos

cenario con microrred (fuentes de generación fotovoltaica, solar térmica y cogeneración ya especificadas).

Como conclusión importante, cabe destacar que haciendo la comparación en base al parámetro que re-

|                                   | Referencia (sin microrred) | Con microrred |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------|
| kWh gas quemados por cogeneración | 0                          | 9.879.216     |
| kWh gas quemados por calderas     | 26.559.057                 | 17.420.872    |

Tabla 4. Gas quemado por los quemadores en el caso de referencia (sin microrred) y por el cogenerador en el escenario con microrred

|                                                                                           | Referencia (sin microrred) | Con microrred |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------|
| Electricidad generada y vendida por las fuentes de generación acogidas a Régimen Especial |                            | 3.524.652     |
| Fotovoltaica                                                                              |                            | 190.931       |
| Cogeneración                                                                              |                            | 3.333.720     |
| Energía térmica generada por las fuentes de energía distribuida que es consumida          |                            | 7.310.548     |
| Solar térmica                                                                             |                            | 1.876.979     |
| Cogeneración                                                                              |                            | 5.433.569     |
| Energía térmica generada por las calderas que es consumida                                | 21.247.246                 | 13.936.697    |

Tabla 5. Balance energético en le escenario de referencia (sin microrred) y en el escenario con microrred

|                             | Referencia (sin microrred) | Con microrred |
|-----------------------------|----------------------------|---------------|
| Electricidad comprada (kWh) | 16.008.627                 | 16.008.627    |
| Gas comprado (kWh)          | 26.559.057                 | 27.300.089    |

Tabla 6. Energía comprada a las compañías suministradoras de gas y electricidad

sulta de normalizar (dividir) las emisiones de CO<sub>2</sub> entre la energía total generada en el distrito urbano (sólo calor en el caso de las calderas y calor más electricidad en el caso de la cogeneración), sale más favorable al caso de la microrred. Con microrred (cogenerador y quemadores) se emiten 0,2482 t/MWh, es decir, el 88% de las 0,2815 t/MWh que se emiten en el caso de referencia (en base a sólo quemadores). Con esto se quiere demostrar que se genera electricidad y calor de forma más eficiente y sostenible con la microrred. Las siguientes tablas detallan cómo se han obtenido los números de la tabla 3.

La tabla 4 muestra el gas quemado y la tabla 5 el balance energético en los dos escenarios, sin y con microrred.

Es decir, la energía comprada a las compañías suministradoras de gas y electricidad es:

## 8. CONCLUSIÓN

A lo largo del artículo, queda patente que las inversiones que sería

conveniente realizar, para hacer del distrito una eco-comunidad a través de una agregación de soluciones de generación agrupadas y gestionadas como una microrred, han de ser debidamente estudiadas en términos de usos, potencia de pico, costes de inversión y costes de operación y mantenimiento. La selección de fuentes de energía de Régimen Especial permite que la electricidad generada se venda cobrando las primas correspondientes. Todo ello en conjunto, con la planificación y el análisis dimensional adecuado, hace que la inversión pueda ser rentable.

La integración de diversas fuentes de generación y almacenamiento y su gestión mediante un controlador o gestor energético que genere consignas de operación, y que maximice el beneficio a partir de estimaciones de cargas según predicciones climatológicas y de usos, es hoy por hoy tecnológicamente viable. Queda fuera del ámbito de este artículo el debate acerca del camino que les queda por recorrer a las micro-redes hacia su

implementación en distritos o comunidades, sobre todo en lo que concierne a los aspectos legislativos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

[1] Lasseter R, Akhil A, Marnay C, Stevens J, Dagle J, Guttromson R, Meliopoulos AS, Yinger R, Eto J. "White paper on Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS Microgrid concept", Consortium for Electric Reliability Technology Solutions. Preparado para el U.S. Department of Energy. Abril de 2002.

[2] Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura, IDAE, PET-REV-Octubre 2002.

[3] España. Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial del Estado, Martes 28 de Marzo de 2006, núm. 74, p. 11816-11831.

[4] Documento de condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos. Procedimientos simplificados de certificación energética, Ministerio de Vivienda y el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

[5] España. Real Decreto 661/2007, de 25 de Mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Boletín Oficial del Estado, Sábado 26 Mayo de 2007, núm. 126, p. 22846-22886.

[6] España. Real Decreto 1634/2006, de 29 de Diciembre, por el que se establece la tarifa eléctrica a partir de 1 de Enero de 2007. Boletín Oficial del Estado, Sábado 30 de Diciembre de 2007, núm. 312, p. 46656-46679.

[7] España. Orden ITC/3992/2006, de 29 de Diciembre, por la que se establecen las tarifas de gas natural y gases manufacturados por canalización, alquiler de contadores y derechos de acometida para los consumidores conectados a redes de presión de suministro igual o inferior a 4 bar. Boletín Oficial del Estado, Sábado 30 de Diciembre de 2007, núm. 312, p. 46684-46692. ■