

**RESUMEN**

Es patente la actual necesidad humana de buscar nuevas formas de generar energía útil y controlable de manera eficiente desde las ópticas de la economía y de la protección al medio ambiente. La tendencia actual de potenciar las energías renovables lo demuestra, pero no aporta la solución definitiva. Por eso, un paso fundamental en el ahorro energético es evitar el despilfarro y el consumo de energía innecesaria. La cogeneración, en todas sus variantes da respuesta a este planteamiento por medio de la utilización de la energía térmica generada en el proceso de producción de electricidad que tradicionalmente se vertía al foco termodinámico frío en la proporción aproximada de 2:1. El planteamiento es optimizar la gestión de energía térmica excedente de la producción de energía eléctrica para evitar el consumo de otros combustibles en diversos usos que abarcan la calefacción, la refrigeración, la desalación de agua, múltiples procesos industriales, etc. La difusión de estas implantaciones tendería hacia un ahorro general del 60% del combustible consumido [1]

Palabras clave: Trigeneración, ciclo combinado, Desalinización, Destilación multi-etapa (med).

Recibido: 27/02/08

Aceptado: 14/03/08



Carlos Cuvilla Suárez
Ingeniero Industrial Superior
Revista DYNA

ABSTRACT

The current need of mankind to seek for new ways of efficient usable controllable energy production from the economic and environmental points of view is obvious. The current trend towards renewable energies, states this fact though it is not the definitive solution. This is why a fundamental step in saving energy is to prevent any misuse or unnecessary energy consumption. Co-generation, with all its variants, is an answer to this problem through the use of the residual thermal energy within electrical production as an usable product instead of as waste to be dissipated in a thermodynamic cooling process in an approximate ratio of 2:1. The basis of the approach is to optimize the management of thermal energy produced during electricity generation to prevent other fuel firing consumptions which can be assumed as

heating, air conditioning, desalinization, industrial processes, etc. The profusion of installations of this kind would imply a gross saving of 60% of the general primary fuel.

Key words: Trigeneration, Combined cycle, Desalinization, multi-effect distillation (med).

1. INTRODUCCIÓN

Es de todos sabido que la generación eléctrica es globalmente un proceso ineficiente por diversos motivos, como pueden ser los termodinámicos, sociales, medioambientales, climatológicos, etc. Mientras las tradicionales centrales térmicas desperdician infinidad de termias calentando ríos, mares y atmósfera (ver fig. 1), se contabilizan las reservas de combustible fósil que se estiman para menos de 100 años.

Ante el lejano horizonte de nuevas energías sustitutivas, las comunidades científicas y tecnológicas buscan

(516 Mtep), lo que supone un rendimiento del proceso de 38%. Esto quiere decir que en términos genera-

tudio lo hace inviable, pero de cualquier manera es un indicador de los parámetros que las nuevas instalaciones y proyectos han de considerar para su realización. En este sentido, el presente proyecto trata de ser un modelo de referencia de cómo utilizar la energía fósil de una manera eficiente minimizando la energía vertida al medio ambiente. El planteamiento se hace con la dimensión de un gran rascacielos (*Millenium Tower*) que hace años que está proyectado por Sir **Norman Foster** en **Tokyo** [3], pero no encuentra financiación para realizarse (ver fig. 2).

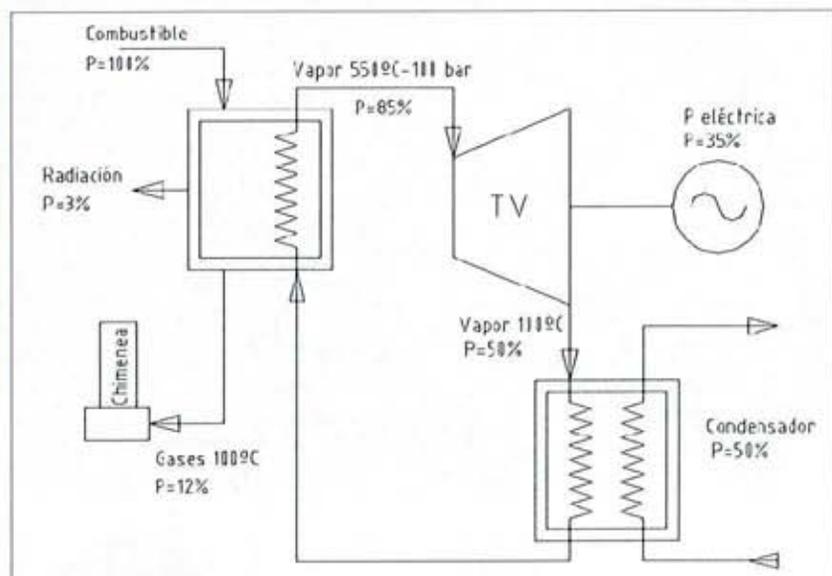


Figura 1. Esquema central convencional

soluciones alternativas que minimicen el consumo de energía y de impacto ambiental en todas sus facetas. La solución obvia e inmediata que puede pensarse con la lógica de ahorro, es no consumir la energía que no se necesita. Esta afirmación tan trivial encierra una gran complejidad técnica y económica. Las centrales existentes están ubicadas donde era cómodo y relativamente económico obtener una refrigeración para el condensador. Aunque existen precedentes de centrales con "district heating" desde hace muchos años, esta no ha venido siendo una práctica muy usual. Por este motivo, no es sencillo ni barato utilizar el calor de una central para algo útil. Este razonamiento no es el mismo para una central a construir, pues se puede estudiar la ubicación de forma que se pueda optimizar la generación, la distribución eléctrica y el uso y distribución de energía térmica.

Según la *Agencia Internacional de la Energía* [2], el consumo de combustibles en generación eléctrica en el mundo era en 2002 de 1.341,7 Mtep . para generar 5.998,6 TWh

les, el potencial de energía térmica a recuperar es el 60% restante (805 Mtep). El consumo final de combustibles es de 2.795,3 Mtep. Con estas cifras se ve que teóricamente se podría ahorrar el 28,8% de combustible para consumo de energía final. Este ahorro supondría alargar la duración de reservas mundiales proporcionalmente, a la vez que disminuir el nivel de emisiones de CO₂ en un 15%. El coste de la materialización de este es-

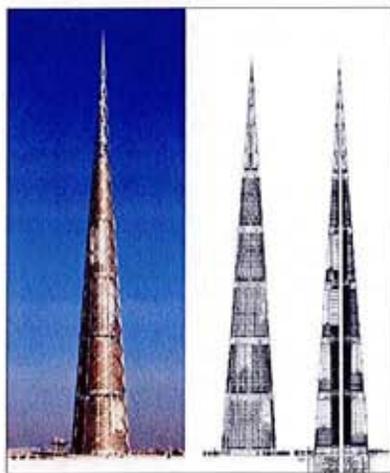


Figura 2. Proyecto Millenium

Representa una comunidad de 60.000 personas en una disposición urbana vertical, con todos los servicios propios de una pequeña ciudad de tal dimensión. Es evidente que los resultados que de este proyecto se extraen son extrapolables a cualquier ciudad de las dimensiones mencionadas en cualquier otra parte.

Más aún, la escalabilidad del proyecto hace que pueda adecuarse a otras dimensiones de comunidad y uso. Por ejemplo, es un modelo apropiado para un hotel en zona costera, un hospital, una gran comunidad de viviendas, etc. Quizá para unidades de menor tamaño es más adecuado el diseño con motores de explosión que con turbina de gas, pero el concepto sigue siendo el mismo. Es, básicamente una aplicación generalizada de trigeneración en la que se ha añadido la desalación como valor añadido, por lo que quizá podría hablarse de un nuevo concepto tetrageneración (ver fig. 3). Aunque no es una generación propiamente dicha del agua, se puede considerar que se genera un producto (agua potable) a partir de una materia prima (agua salada) utilizando energía residual.

2. METODOLOGÍA

El método para desarrollar el proyecto es de síntesis. Se calculan las potencias térmicas y eléctricas requeridas por cada uno de los consumidores y mediante factores de simultaneidad, insolación, climatología, estacionalidad, etc., se determinan

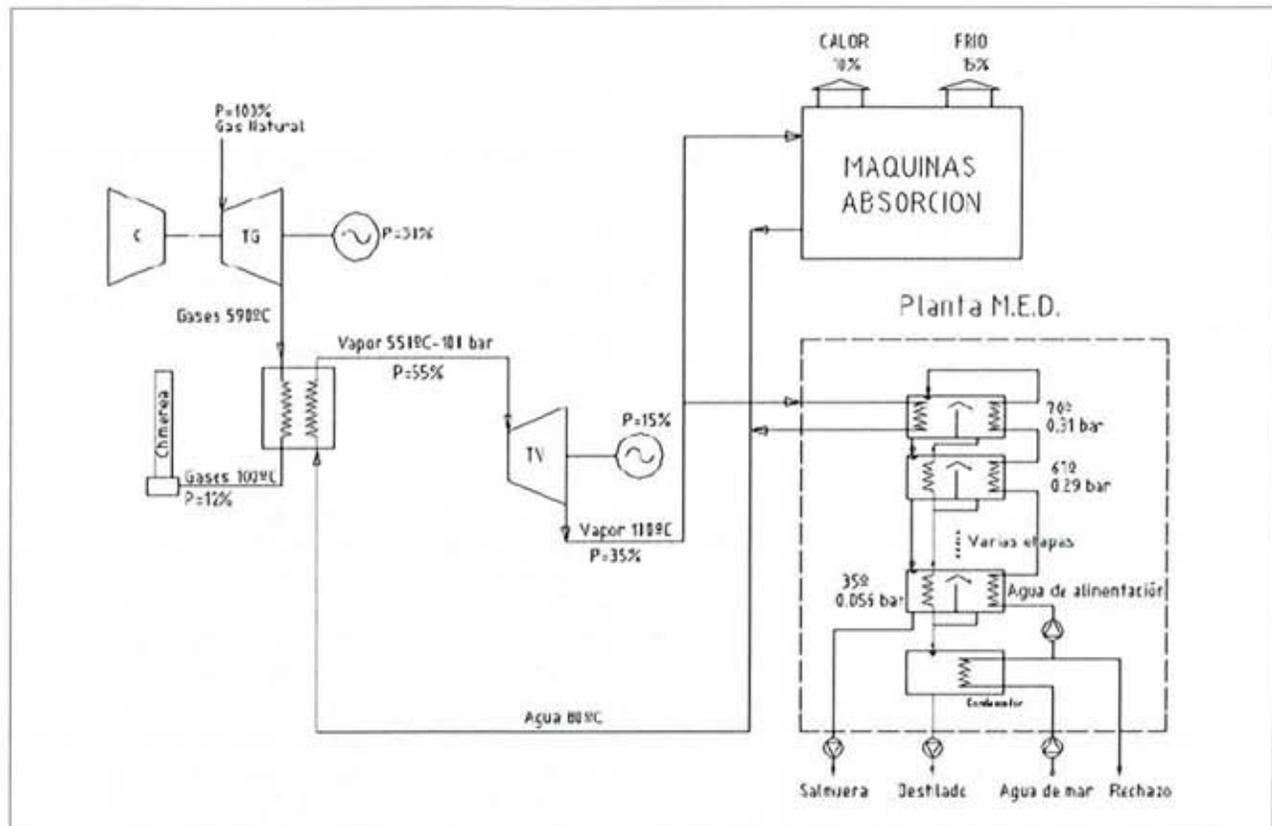


Figura 3. Esquema de trigeneración con desalación

las dimensiones de los equipos. Como elementos principales hay que considerar:

- Turbina/s de gas
- Caldera/s de recuperación
- Turbina/s de vapor
- Unidades de destilación
- Máquinas de absorción
- Intercambiadores térmicos

En primer lugar hay que analizar la cualidad de los suministros previamente a la cantidad, es decir la forma en que éstos varían a lo largo de los diferentes periodos anuales y diarios. La demanda eléctrica así como las diferentes demandas térmicas son muy variables a lo largo de un día y además presentan diferencias estacionales importantes. Por otro lado está la producción de agua potable, que aunque está sujeta también a estos factores, presenta la gran ventaja de ser almacenable. Esta característica será aprovechada para utilizar energía en los periodos valle y minimizar la variación de carga en los generadores en la mayor medida posible. Para el

El coste de la materialización de este estudio lo hace inviable, pero de cualquier manera es un indicador de los parámetros que las nuevas instalaciones y proyectos han de considerar para su realización

dimensionamiento de los equipos es necesario conocer las máximas potencias previsible, pero poco servirá

dimensionar para las puntas de producción si la utilización habitual está fuera del punto de diseño. Esto signi-

fica que hay que modificar las curvas combinadas de demanda para que tengan la forma más plana posible y así garantizar que el punto de diseño de equipos es el presente en la mayor medida de lo posible. El planteamiento de diseño es utilizar un ciclo combinado para generar conjuntamente electricidad y calor que será utilizado directamente con fines de calefacción y generación de A.C.S. o indirectamente para generar vapor útil en refrigeración y destilación de agua.

Un ciclo combinado convencional consiste en quemar gas en una turbina de gas con un rendimiento eléctrico del orden del 35%. Del 65% restante de la energía residente en los gases de escape, se recupera hasta un 25% como energía eléctrica en una turbina de vapor. Con esto quedaría un 40% del que se podría recuperar algo en un sistema de cogeneración basado en la condensación del vapor de baja presión extraído de la turbina de vapor.

Realizando un planteamiento de generación continua, tanto de energía como agua destilada, se llega a la conclusión de que la demanda térmica es superior a la residual en un ciclo combinado dedicado por completo a la generación eléctrica, es decir se necesita en general, más calor del que el ciclo convencional ofrece. Pero esta situación es variable en función de la hora y estación, por lo que se condiciona el funcionamiento de la turbina de vapor a las necesidades térmicas. Cuando se presentan puntas eléctricas, se dedica la turbina de vapor a generación eléctrica y el defecto de energía térmica se suple con desalinización por ósmosis inversa, cuya energía primaria es eléctrica o como alternativa, se prevé almacenamiento de agua desalinizada en períodos valle. Así mismo, se utiliza refrigeración con ciclo de compresión mecánica de energía primaria eléctrica para estos momentos. Cuando la demanda eléctrica esté en períodos llano o valle se alternará la desconexión total o parcial de la turbina de vapor para dirigir el mismo a usos térmicos y utilizar la energía primaria residual térmica en refrigeración por

...dado que el sistema es global para toda la comunidad, los efectos sinérgicos de ahorro energético global tendrán un mayor efecto en el "Pay-Back" que justifica la inversión extra para generar ahorro energético

absorción y destilación multi-efecto con compresión térmica de vapor. En este caso, se desacoplarían, tanto la ósmosis inversa, como la refrigeración por compresión, y así se optimiza el consumo de energía primaria. En resumen, se trata de alternar el uso de energía primaria para producción térmica o eléctrica en función de las demandas finales. Este planteamiento conlleva un incremento en los costes de inversión inicial; duplicación de sistemas de desalinización (ósmosis inversa y destilación), y de refrigeración (absorción y compresión), mayor complejidad en la caldera de recuperación de gases de la turbina de gas puesto que la presión de vapor es diferente según el uso posterior del mismo. En cualquier caso, dado que el sistema es global para toda la comunidad, los efectos sinérgicos de ahorro energético global tendrán un mayor efecto en el "Pay-Back" que justifica la inversión extra para generar ahorro energético. Por otro lado existe un condicionante técnico importante a tener en cuenta. El sistema se plantea como una isla eléctrica. Esto supone que los excedentes de energía eléctrica no son admisibles como es habitual en redes que admiten bi-direccionalismo de flujo eléctrico en contratos compra-venta de energía. La única opción de utilizar excedente eléctrico en este sistema sería generar un producto almacenable. Este será el agua desalinizada mediante Ósmosis inversa.

La configuración elegida para el ciclo es de dos turbinas de gas con caldera de recuperación y una turbina de vapor. La caldera de recuperación

ha de ser capaz de generar el vapor en dos niveles de presión. Cuando la demanda eléctrica crece, ha de acoplarse la turbina de vapor y el vapor ha de salir con presión para turbinar ($P > 10$ bar). En caso de desacoplar la turbina, el nivel de presión ha de ser el demandado por las máquinas de absorción y la destilación. (Nivel atmosférico). Como la potencia térmica a transferir es la misma en ambos casos, el caudal de vapor será mayor en el caso de presión atmosférica, lo que redundará en una mayor disponibilidad de energía térmica para climatización y destilación. Cuando la demanda eléctrica crece, se deriva consumo de vapor al generador de vapor de alta presión para suministrar a la turbina.

En cualquier caso de reparto de caudales de vapor a baja y alta presión, se optimiza el aprovechamiento energético utilizando la condensación del vapor proveniente de la turbina en usos térmicos de climatización y destilación.

3. ANÁLISIS DE DATOS

Aunque el proyecto del arquitecto estaba destinado a ser realizado en **Tokio**, el presente proyecto considerará la ubicación en **Barcelona**, para facilitar la recopilación de datos (climatología, energía, normas y reglamentos, etc.). Los cálculos han de servir para otras ubicaciones de latitudes y climatología similares. Para otras geografías diferentes habría que corregir datos para ver la modificación de los resultados cuantitativamente, aunque no han de presentarse

Para el cálculo de cargas térmicas se tendrán en cuenta, tanto, las cargas internas como externas

cambios cualitativos respecto al sistema de partida descrito en el apartado anterior. En caso de cambiar la dimensión del proyecto, sí que se afectaría a la configuración, puesto que grandes variaciones de potencias y de demandas podrían aconsejar otras configuraciones diferentes. Los datos que se utilizan dependen de las cargas energéticas que se calculan, por lo que se analizarán por separado según la energía de la que se trate.

3.1.- ENERGÍA ELÉCTRICA

Para el cálculo de potencia eléctrica a instalar hay que considerar los diferentes centros de consumo eléctrico en función de sus características así como del número de los mismos. La mayor parte de la superficie del edificio es de vivienda, por lo que la potencia correspondiente se calcula como tal. Esto supone considerar el número total de viviendas y multiplicarlos por la potencia instalada por vivienda. Se aplica un coeficiente reductor de simultaneidad sobre la potencia máxima disponible. El valor resultante será la parte más importante de la potencia total. Por otro lado hay que considerar los receptores singulares:

- Centros comerciales
- Hoteles
- Oficinas
- Servicios sociales (hospital, colegio, etc.)
- Ventilación
- Servicios bombeo incendios
- Servicios bombeo agua residencial
- Servicios bombeo A.C.S.
- Servicios bombeo calefacción
- Servicios bombeo refrigeración
- Sistema desalinización ósmosis inversa
- Sistema refrigeración por com-

presión

- Sistemas elevadores. Trenes pasajeros
- Sistemas elevadores. Ascensores y escaleras.
- Alumbrados generales y particulares

3.2.- ENERGÍA CLIMATIZACIÓN.

Para el cálculo de cargas térmicas se tendrán en cuenta, tanto, las cargas internas como externas. Así mismo se considerarán cargas por conducción-convección, como por radiación. Dado que el edificio es de fachada vítrea, habrá que considerar la importante influencia de la radiación solar en las cargas térmicas, tanto de verano como de invierno. El factor preponderante en este sentido es la aleatoriedad de la intensidad de radiación incidente en función de las condiciones atmosféricas. Se puede dimensionar el equipamiento para un supuesto teórico con condiciones óptimas de transmisión, pero los cálculos energéticos están sujetos a la estimación de las horas de nubosidad. Para esto se elegirá un modelo estadístico de cálculo de radiación. Por

otro lado, la radiación es variable a lo largo del año debido a la eclíptica solar que hace variar el ángulo de incidencia solar en el lugar (declinación solar) [4]. Evidentemente, también hay que tener en cuenta la hora real, a la que está sujeta la intensidad de radiación. Este factor sólo afecta cuantitativa, pero no cualitativamente. Dada la simetría del edificio, es indiferente la hora solar, puesto que en cualquier momento del día se irradia la misma cantidad de fachada, aunque con diferente intensidad. El vidrio utilizado en los cerramientos es de baja transmitancia de calor solar para disminuir la ganancia térmica solar en verano, a la vez que de doble vidrio con cámara de aislamiento con el objeto de obtener un coeficiente de transmisión térmica suficientemente bajo para minimizar las pérdidas por conducción. Bajo estas premisas se puede construir la curva de demanda térmica diaria con una fiabilidad solamente distorsionada por efectos estadísticos de nubosidad [5].

El sistema de calefacción se realiza como una calefacción de distrito

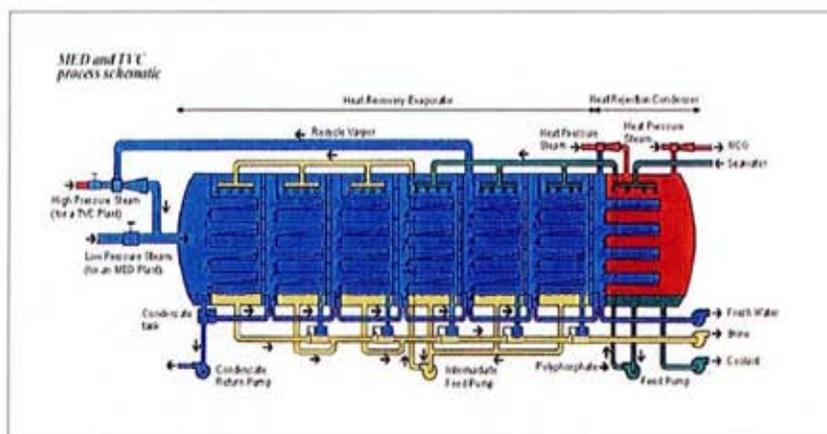


Figura 4. Esquema destilación multietapa



Figura 5. Sistema destilación multietapa.

convencional mediante distribución de vapor de baja presión procedente del escape de la turbina y actuando en sustitución del condensador.

En el caso de refrigeración, se intercalan máquinas enfriadoras de agua de absorción, ubicadas en diferentes puntos del edificio que distribuyen agua enfriada por diferentes fan-coils que transmiten el frío a los sistemas de ventilación

3.3.- ENERGÍA PARA AGUA CALIENTE SANITARIA

Otra de las utilidades prácticas de la energía térmica excedente es la preparación de A.C.S. para: aseos, baños, piscinas, etc. Para evaluar esta potencia, se considerará el uso de A.C.S. tabulado según históricos y funcionalidades, para lo que se parte de curvas de demanda en diferentes usos; hoteles, hospitales, colegios, centros deportivos, viviendas, etc. Con estas gráficas se obtiene una curva de demanda total con la que obtener, tanto potencia necesaria de preparación, como volumen de almacenamiento.

3.4.- ENERGÍA PARA DESTILACIÓN

Una de las cargas térmicas más importantes es la generación de vapor para destilación de agua salina. Con la necesidad de agua de una comunidad de 60.000 personas incluyendo servicios sociales diversos, la cantidad de agua es muy importante. Aunque podría considerarse para el proyecto que existe una red urbana de abastecimiento, se planteará el problema con autosuficiencia hídrica. Esta hipótesis se realiza con el objeto de generalizar el diseño de las instalaciones a cualquier otra geografía en

destilación multi-efecto con compresión térmica de vapor. Este es un sistema muy adecuado cuando se tiene calor residual en forma de vapor. La evaporación del agua salina puede realizarse a temperaturas del orden de 35 a 70° C si la presión es suficientemente baja. El concepto es tan sencillo como utilizar el calor latente del vapor para evaporar el agua salina. Esto se consigue efectuando una cascada de etapas en la que el vapor procedente de la turbina o caldera de recuperación, evapora la primera fracción de agua salina, que se en-



Figura 6. Curva tipo demanda eléctrica

la que pudiere no existir ninguna red de agua. Se diseña un sistema de

cuenta a baja presión y ha sido previamente precalentada en las etapas

Dada la simetría del edificio, es indiferente la hora solar, puesto que en cualquier momento del día se irradia la misma cantidad de fachada, aunque con diferente intensidad

En otras ubicaciones sin red de abastecimiento energético, habría de acudir a suministro mediante depósitos

posteriores de destilación. De esta manera se aprovecha el calor de condensar los vapores de etapas anteriores en evaporar el agua salina [6]. (Ver Fig. 4 y 5)

Se puede mejorar el rendimiento del proceso utilizando vapor a más presión (2 bar) para que, mediante un efecto "venturi", se recircule el vapor final aprovechando así, su calor residual en destilación, en vez de perderlo en condensación de cola.

3.5.- ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS

La dificultad principal de este proyecto es el hecho de que se considere su funcionamiento como isla energética. De ahí, que el objetivo prioritario sea acoplar y desacoplar los sistemas de forma que la demanda energética de las turbinas de gas sea lo más uniforme posible. Esto responde a dos cuestiones importantes.

- El rendimiento de las turbinas cae drásticamente cuando su funcionamiento se aleja del punto de diseño
- Al trabajar como una isla no hay posibilidad de vender excedentes eléctricos o térmicos ni de comprar energía eléctrica.

Dado que el dimensionamiento del sistema prevé la tasa de cobertura eléctrica sin déficit, hay que ajustar la curva de producción de modo que cuando la demanda térmica es pequeña se cubra con el aprovechamiento de la energía residual de satisfacer la demanda eléctrica. Pero cuando la demanda térmica crece, no puede subirse la producción eléctrica linealmente, puesto que no hay opción de vender electricidad. En este caso hay que derivar el exceso de energía eléctrica para sustitución de servicios térmicos, en vez de aumentar linealmente la producción. En la Fig. 6 se ve una curva de demanda eléctrica tipo, en la cual se ven los picos y valles de demanda eléctrica con

cuya información se puede programar la producción térmica.

Por este motivo se instala sistema de ósmosis inversa y de refrigeración por compresión, que además de servir como sistemas de emergencia frente a averías o mantenimientos, sirven para deslastrar consumos térmicos que no puedan cubrirse en las puntas.

3.6.- ENERGÍA PRIMARIA

Aunque el sistema funciona como una isla energética, es evidente que la energía primaria ha de ser suministrada regularmente, bien mediante una red de combustible o bien mediante tanques de almacenamiento. En este caso se opta por un suministro continuo de Gas Natural por ser de fácil acceso en la geografía seleccionada. En otras ubicaciones sin red de abastecimiento energético, habría de acudir a suministro mediante depósitos (GLP, fuel, etc.).

4. CONCLUSIONES

Este proyecto pretende invitar a una reflexión sobre la racionalización energética. Actualmente, está ampliamente extendido el concepto de "ahorro energético". Esto no es un error en sí mismo como concepto, pero está muy generalizado el error de utilizar el término para definir procesos y usos que no implican un ahorro de energía. La palabra ahorro hace referencia a algo cuya utilización se posterga para algún momento posterior cuando sea más útil. Un ahorro energético implicaría guardar la energía para el futuro cuando no se necesita. Esta no es la práctica habitual. Lo que hoy día se persigue en la mayor medida, no es ahorrar energía, si no obtenerla con menor coste. En este punto aparece el factor económico que define el límite entre el interés por los recursos naturales y el interés por los financieros.

Aunque, ambos van ligados, no se trata de usar menos energía, si no de conseguir un cero de energía desaprovechada. Y aquí es donde se choca con el término "ahorro". Hay que utilizar toda la energía sin disipar ninguna fracción susceptible de consumo. El objetivo es una "racionalización" del uso de la energía para que toda ella se aproveche en algo útil. La consecución de este propósito implica inherentemente un menor consumo de energía primaria y subsecuentemente, un ahorro indirecto de la misma y es a esto a lo que ha de tenderse.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lluís Jutglar i Banyeras, *Cogeneración de calor y electricidad*. Ediciones CEAC, 1996. Pag 14. ISBN: 8432965537.
- [2] Estadísticas MICYT. Libro de la energía en España, p.11. (año 2004).
- [3] www.fosterandpartners.com (Febrero 2008).
- [4], [5] Manuel-Alonso Castro Gil, *Simulación de centrales de energía solar. Aplicación a la gestión energética*. Ediciones Saber hoy S.A. 1990. pag. 49 y 62.
- [6] Alonso González, Juan et al. *Técnicas de conservación energética en la industria. Fundamentos y ahorro en operaciones. Tomo 1*. Ediciones del servicio de publicaciones del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Centro de estudios de energía, 1982. p. 237. ISSN: 847494170X.
- [7] Grancher, Pierre. "Central termoeléctrica sin emisión CO₂". DYNA Diciembre 2005. Vol. 80-9. pag. 21-26. ISSN: 0012-7361.
- [8] Resa López, Sylvia. "Central de ciclo combinado que incorpora energía solar térmica". DYNA Marzo 2006. Vol. 81-2. pag. 39-45. ISSN: 0012-7361. ■