

Cogeneración mediante recuperación energética de calor de gases de escape



Manuel Fernández-Fernández*
Carlos Renedo-Estébanez*
Alfredo Ortiz-Fernández*
Severiano Pérez-Remesal*
Inmaculada Fernández-Diego*
Mario Mañana-Canteli*

Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dra. Ingeniera Química
Dr. Ingeniero Telecomunicación

* UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. ETSI. Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética. Av. Los Castros, s/n - 39005 Santander. Tfno: +34 942 20 13 78. manuel.fernandez@alumnos.unican.es; renedoc@unican.es; ortizfa@unican.es; perezrs@unican.es; fernandei@unican.es; mananam@unican.es

Recibido: 23/07/2010 • Aceptado: 15/11/2010

Cogeneration based on energy recovery from exhaust gases

ABSTRACT

• In the world there are a large number of foundry factories that, thanks to their production processes, are great energy consumers. The factories are equipped with various types of furnaces such as gas, electric induction and the cupola furnace. The study carried out in this article focuses on the last type and particularly on those with a continuous casting output.

The gases emitted to the outside by these facilities have a high energy content, since they remain at a high temperature and are therefore susceptible to being energy producers. Currently facilities tend to use this energy for heating the air blown into combustion. But even after that use, exhaust heat can be expelled at temperatures above 600°C and can, therefore, still be of further use.

Heat recovery of these gases can be devoted to producing electricity, which is one alternative that leads to: an increase in the efficiency of the process, a reduction in emissions of gaseous pollutants (electricity generation does not emit anything that has not previously been emitted), and a reduction in plant operating costs.

In this paper the authors have analyzed two alternative uses of waste heat from cogeneration gases. The first is the use of prefabricated modules and the second is a classic cogeneration facility with a boiler and steam turbine. For each alternative, two analyses have been performed: one economic (considering investment, electricity incomes and operating costs) and another technical (where the installation feasibility, and the advantages and disadvantages of each alternative are considered). This dual analysis method has allowed us to establish some general conclusions that are provided at the end of the article.

• **Keywords:** Heat recovery, cogeneration, heating, electrical, reliability, efficiency and profitability.

RESUMEN

En el mundo existe un número importante de factorías de fundición que, por su proceso productivo, son grandes consumidoras de energía. Las factorías trabajan con diversos tipos de hornos como son los de gas, de inducción eléctrica, y de cubilote. El estudio de este artículo se centra en los de cubilote y más concretamente en aquellos que tienen una producción de colada continua. Los gases que estas instalaciones emiten al exterior tienen un gran contenido energético, ya que se encuentran a alta temperatura y por lo tanto son susceptibles de aprovechar energéticamente. Actualmente las instalaciones suelen tener un aprovechamiento energético para el calentamiento del aire soplado a la combustión. Pero incluso después de este aprovechamiento térmico los gases de escape se pueden expulsar a temperaturas superiores a 600°C y por lo tanto aún son susceptibles de aprovechar energéticamente. La recuperación de calor de estos gases se puede destinar a producir electricidad, siendo ésta una alternativa que conduce a: incrementar la eficiencia del proceso, disminuir las emisiones de contaminantes gaseosos (la generación eléctrica no emite nada que no se emitiera anteriormente), y reducir los costes de operación de la planta.

En este trabajo se han analizado dos alternativas de aprovechamiento energético del calor residual de estos gases mediante cogeneración. La primera consiste el empleo de módulos prefabricados, y la segunda en una instalación clásica de cogeneración con caldera de recuperación y turbina de vapor. Para cada alternativa se han realizado dos análisis: uno económico (considerando inversión, ingresos por electricidad y los costes de operación) y otro técnico

(considerando la viabilidad técnica de su instalación, presentando ventajas y desventajas de cada una de las alternativas). Esto nos ha permitido establecer una serie de conclusiones generales que se aportan al final del artículo.

Palabras clave: Recuperación de calor, cogeneración, calefacción, producción eléctrica, fiabilidad, eficiencia y rentabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La cogeneración (también conocida como generación combinada de calor y electricidad; en inglés *Combined Heat and Power*, CHP) es la producción simultánea de más de una forma útil de energía (energía térmica y energía eléctrica o mecánica), partiendo de la misma energía de origen (petróleo, carbón, gas natural o licuado, biomasa, solar o fuentes de calor residual) [1].

Los sistemas de cogeneración tienen como principal ventaja técnica ser capaces de mejorar la eficiencia energética, ya que la producción conjunta de calor y electricidad requiere de una menor cantidad de combustible para producir la misma cantidad de energía útil total. Dependiendo del caso se puede alcanzar un ahorro global de entre el 15 y el 40%. La explicación se debe a que en las centrales convencionales de energía eléctrica se disipa gran cantidad de calor al medio ambiente, mientras que los sistemas de cogeneración aprovechan parte de este calor como energía útil [2].

Otra ventaja asociada a la cogeneración es medioambiental. El aumento de la eficiencia energética conlleva una importante reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (en comparación con los métodos convencionales de generación de calor y electricidad por separado) [3]. Estas reducciones pueden llegar a ser del 50%, dependiendo de la situación de cogeneración que se dé en la instalación.

Aunque la cogeneración presenta una importante limitación: necesidad simultánea y relativamente constante de calor y electricidad. La falta de demanda de electricidad se subsana con la venta de la misma; mientras que la falta de demanda continua de calor se puede paliar con la instalación de almacenamientos térmicos [4], que tendrán que ser más grandes cuanto mayor sea el periodo del ciclo de la demanda térmica.

Existe un potencial crecimiento en el uso de sistemas de cogeneración tanto en el ámbito residencial [5], como en grandes edificios (hospitales, edificios públicos, hoteles...) [6, 7], y en el sector industrial [8].

Antes de decidir implantar un sistema de cogeneración se debe analizar su rentabilidad (inversión inicial, mantenimiento, ahorro en electricidad, precios de la energía...) [9]. Aunque en determinadas situaciones el hecho de conseguir reducir el consumo de combustible y las emisiones determina su implantación [10].

La ventaja de las actuaciones en el sector industrial es el tamaño de las mismas, ya que al ser grandes consumidores de energía, con pocas "actuaciones", se logra conseguir un

gran ahorro energético global, con las consiguientes ventajas medioambientales.

En este artículo se presenta el estudio de la implantación de una cogeneración realizado en una fábrica con un proceso de fundición con cubilote con capacidad de producción de 16 t/h. La producción de la colada es continua durante 24 horas diarias y únicamente realiza paradas para realizar el mantenimiento.

El proceso productivo presenta un sistema de aprovechamiento energético de los gases de escape clásico de este tipo de instalaciones, que es para el recalentamiento del aire que entra al cubilote. Pero aun así, los gases de escape del recuperador todavía tienen gran poder energético ya que tras el recuperador se expulsan a una temperatura superior a 600°C. El estudio se plantea sin modificación en el proceso productivo, es decir, sin alterar la instalación de este recuperador de calor.

Para tener una eficacia óptima es necesario considerar diversas alternativas antes de llevar a cabo el diseño definitivo de la planta cogeneradora. En este trabajo se presentan los análisis técnico y económico de dos alternativas de cogeneración a partir de la utilización térmica de los gases de escape de una empresa de fundición. La primera consiste en la instalación de módulos de cogeneración prefabricados, mientras que la segunda consiste en un sistema clásico con caldera de recuperación, turbina de vapor, etc. En ambas alternativas se pretende utilizar el calor excedentario de la cogeneración para producir agua caliente para la calefacción de las naves de la factoría.

2. CASO DE ESTUDIO

En este trabajo se analiza la posibilidad de realizar recuperación energética en una empresa de fabricación de piezas férreas a partir de la fundición de hierro gris y nodular. En la planta hay instalado un sistema de recuperación de calor de los gases expulsados para precalentar el aire introducido al cubilote. La recuperación energética se plantea a partir del calor contenido en los gases de salida de recuperador de calor. Con ello se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

- Producir electricidad. Puede ser consumida en la planta, o vendida a la compañía eléctrica. Se estudian ambas alternativas, decidiendo a favor de la más rentable, lo que estará determinado por los precios de compra/venta del kWh.
- Generar agua caliente para calefacción de la nave y otras dependencias. Con ello se conseguirá un mayor confort en las instalaciones para los operarios.
- Reducir la cantidad de CO₂ que globalmente se emite a la atmósfera mediante el reaprovechamiento energético de los gases del cubilote. Con ello se reducirá, en alguna medida, el efecto perjudicial que provocan los gases sobre la atmósfera.
- No modificar el proceso productivo actual.

El proceso en la instalación se encuentra controlado mediante sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Las Figuras 1 y 2 muestran las partes

del cubilote y de la zona de recuperación de calor para el precalentamiento de aire respectivamente. Entre ambas zonas hay otra de lavado de gases.

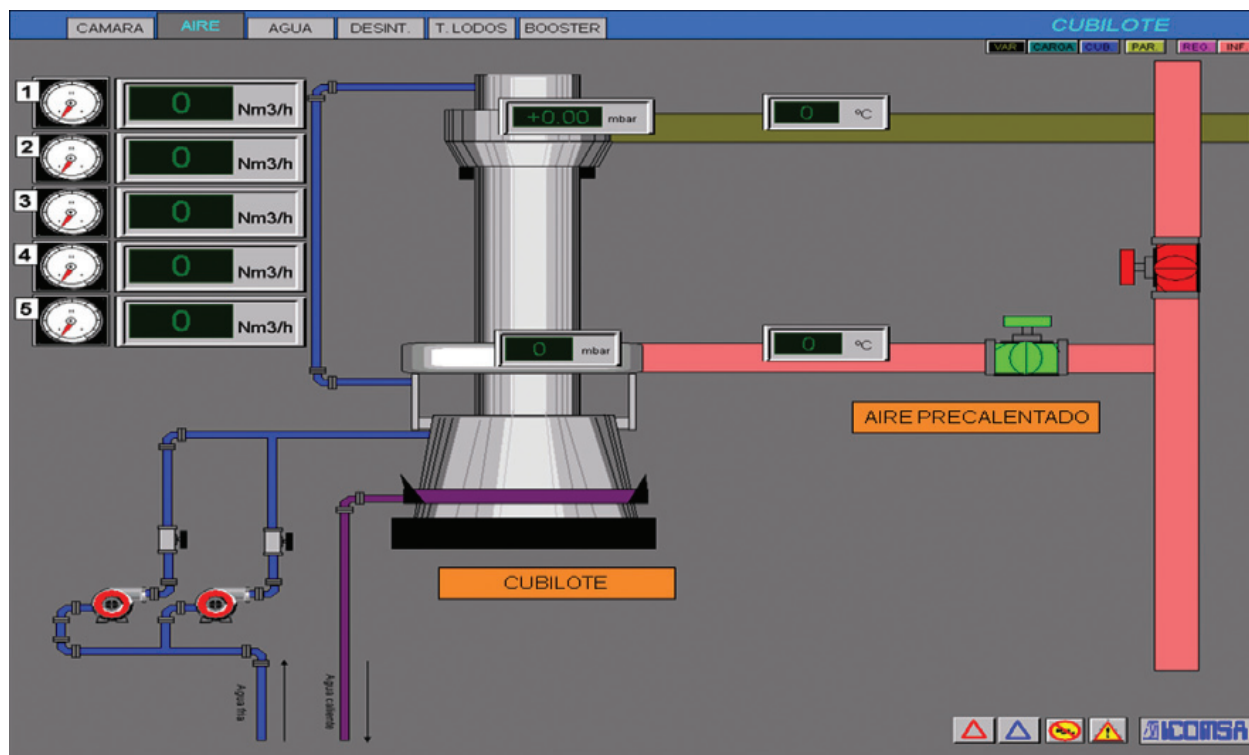


Figura 1: Scada del cubilote

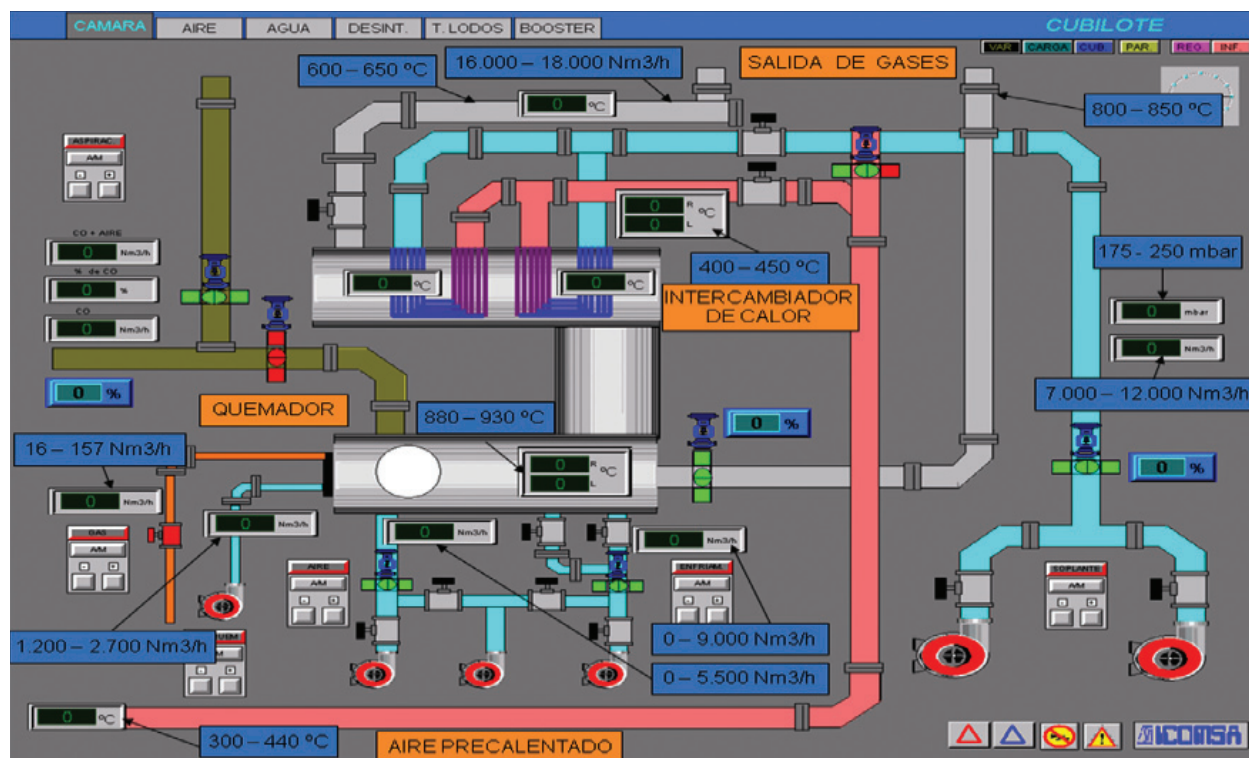


Figura 2: Scada de la zona de precalentamiento de aire

2.1. DATOS DE LA PLANTA

Los datos necesarios son los de la corriente de gases, se obtienen de los sensores de caudal y temperatura que están instalados para el control computerizado del proceso de fundición del cubilote. Las Figuras 3 y 4 muestran la evolución cada media hora del caudal y la temperatura de los gases de salida a lo largo de toda una colada; las

N ₂	78
O ₂	10
CO ₂	10
H ₂ O	2

Tabla 1: Composición en volumen de los gases de escape

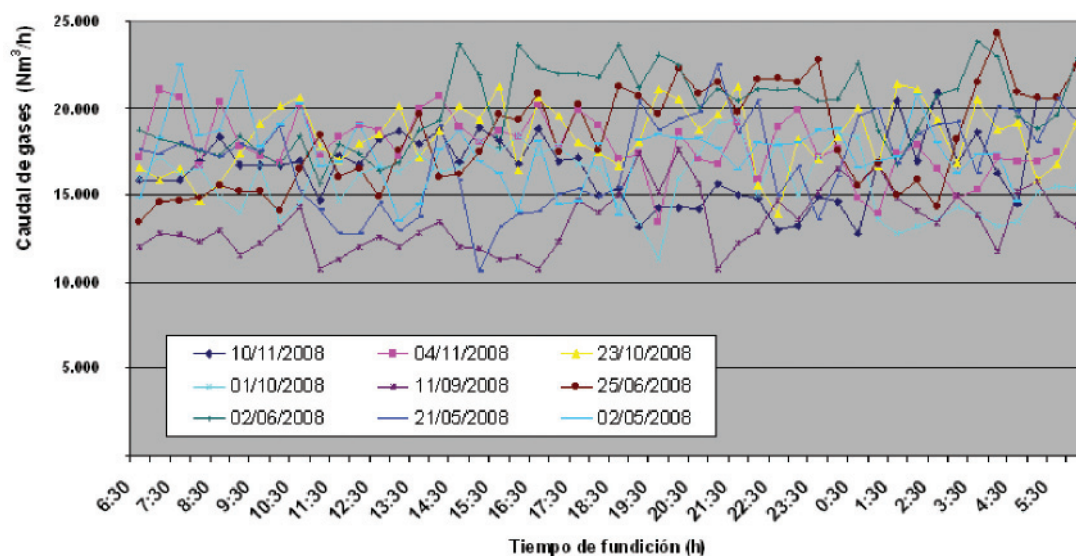


Figura 3: Evolución del caudal de los gases para diferentes coladas

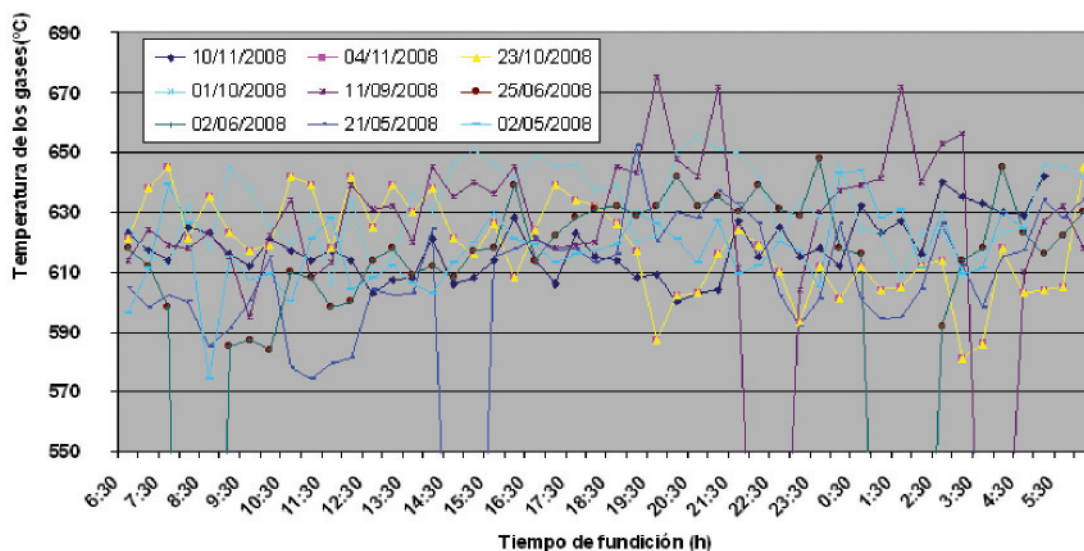


Figura 4: Evolución de la temperatura de los gases para diferentes coladas

figuras muestran los datos de diferentes días del proceso de producción. Los gases de salida tienen un caudal medio de 17.000 Nm³/h, con una temperatura media de 620°C.

Un analizador de gases colocado a la salida de los gases da la composición de los mismos. La Tabla 1 muestra la composición media de los gases.

3. ALTERNATIVAS DE ESTUDIO

En el estudio se consideran dos alternativas del sistema principal de cogeneración:

- La alternativa N°1 consiste en la instalación de módulos prefabricados para la producción de electricidad y de agua caliente. Los gases de salida del recuperador de calor en esta alternativa transferirían su energía a un aceite térmico para, mediante un recuperador de calor, generar vapor y producir electricidad mediante una turbina de vapor, y agua caliente para calefacción. Cada módulo consiste en un equipo compacto que incluye los principales elementos de un sistema de cogeneración (turbina, generador, condensador...) [11]. Todos los elementos se incluyen en un módulo compacto que reduce en gran medida el espacio necesario para realizar la instalación; pero existe una limitación en las potencias eléctrica y térmica a instalar, ya que deben ser múltiplos enteros de las que ofrece el equipo.
- La alternativa N°2 consiste en el diseño de una instalación clásica con turbina de vapor y todos los demás componentes necesarios. La energía de los gases de salida del recuperador de calor se emplearía para generar vapor en una caldera de recuperación, y a partir de aquí el funcionamiento sería como el de una central térmica convencional. Los elementos de la instalación son completamente independientes realizando para cada uno de los equipos su instalación adecuada. Con esta alternativa hay menores limitaciones en cuanto a la potencia a instalar (no tiene que ser múltiplo entero de un determinado valor), y hay cierta flexibilidad en el ratio Energía Eléctrica/Energía Térmica a extraer.

Para las dos alternativas se estudian dos variantes referentes al sistema de calefacción de las naves:

- Por medio de ventiloconvectores o aerotermos
- Mediante cortinas de aire

Y otros dos para la refrigeración auxiliar:

- Torres secas
- Torres húmedas

4. ANÁLISIS OPERACIONAL

En esta sección se realiza el análisis funcional de las dos alternativas consideradas.

4.1. EQUIPOS PREFABRICADOS

La alternativa N°1 tiene un diseño sencillo, ya que el calor de los gases se transfiere directamente al equipo prefabricado, en el cual se conseguirá producir electricidad y generar agua caliente para calefacción de forma simultánea. En el mercado existen algunos fabricantes de estos sistemas, entre ellos [11]. El equipo es independiente, únicamente requiere un espacio donde pueda ser ubicado. Se encuentra integrado por los siguientes elementos: turbina, alternador, recuperador de calor, intercambiador de calor y otros elementos auxiliares, y funciona de acuerdo con el esquema de la Figura 5.

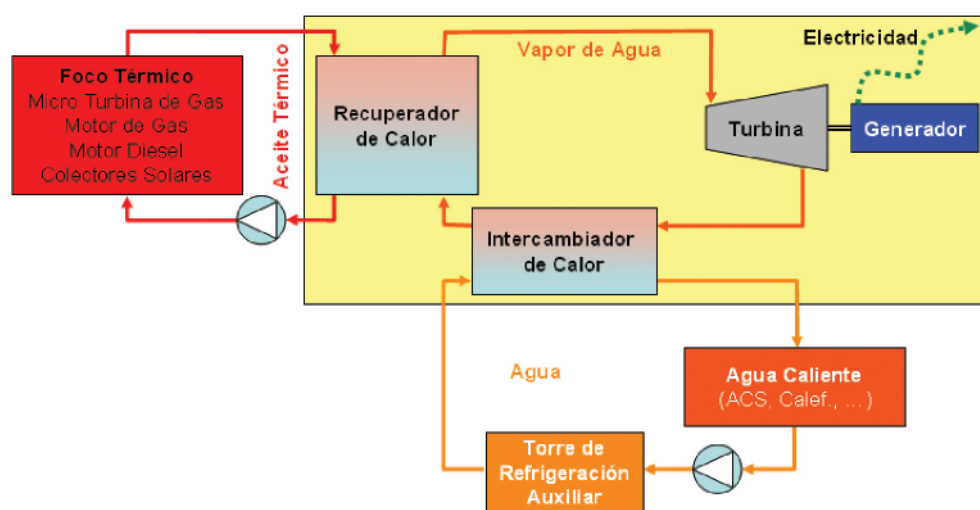


Figura 5: Esquema de funcionamiento de un equipo prefabricado de cogeneración

La secuencia de funcionamiento se basa en extraer el calor de la fuente industrial (en este caso de los gases procedentes del cubilote de fundición), para posteriormente transferirla a aceite térmico, que tras ser calentado circula en circuito cerrado para generar vapor de agua, que será empleado en la microturbina que está acoplada a un generador compacto, elemento que produce la energía eléctrica. El resto de la energía se empleará en un circuito de agua caliente para ser empleado como calefacción, la temperatura de esta agua de calefacción es de 65°C.

4.2. DISEÑO CLÁSICO

La alternativa N°2 es el diseño clásico de una instalación de cogeneración, que consiste en producir electricidad en una turbina previa producción de vapor en una caldera de recuperación. Los elementos requeridos son los mostrados en el esquema de la Figura 6.

La operación comienza conduciendo los gases de escape a una caldera de recuperación que produce vapor. El vapor entra en la turbina donde se expande, transforma parte de la energía térmica en energía mecánica que se transfiere a un generador eléctrico. El ciclo se completa a través del condensador, que condensa el vapor húmedo procedente de la turbina para volver posteriormente a la caldera. El calor

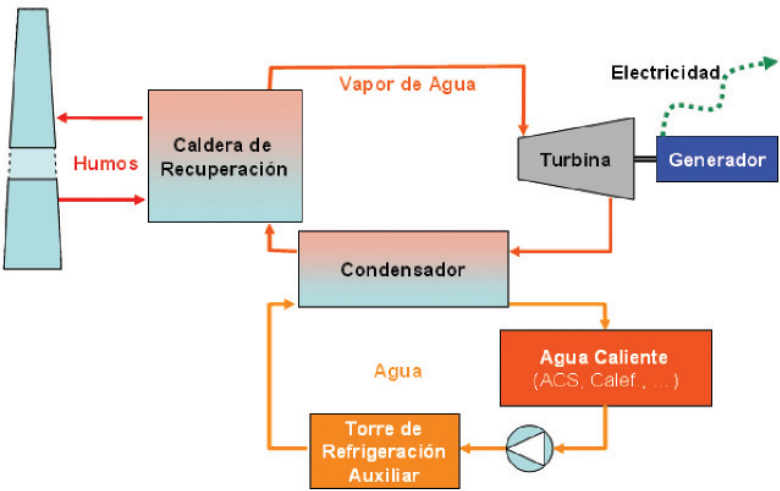


Figura 6: Esquema básico de la instalación clásica de cogeneración

de la condensación se puede aprovechar para la calefacción de las naves.

Este sistema tiene cierta flexibilidad de funcionamiento regulando la temperatura de condensación. Cuando no se necesita calor, se intenta que sea lo más baja posible para maximizar la electricidad producida; cuando se requiere calor a una temperatura apropiada para calefactar se condensa a mayor temperatura disminuyendo la electricidad producida.

Conocida la fuente primaria de energía (gases), y los equipos necesarios para su aprovechamiento, se puede producir 3.700 kg/h de vapor a 20 bar y 400°C.

En la Tabla 2 se ofrece una comparativa de ventajas e inconvenientes de los dos sistemas de generación energética considerados

5. ANÁLISIS ENERGÉTICO

La potencia disponible (P) depende del flujo (de su densidad, ρ , y su calor específico, c_p) y de los cambios de temperatura obtenidos en los gases, y es de aproximadamente 3.000 kW.

$$P = \text{flujo} \times \rho \times c_p \times \Delta T$$

$$P = 17.000 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \times 1,29 \left[\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \right] \times 0,27 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] \times (600 - 166) [^\circ\text{C}] = 2.575.000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \approx 3.000 \text{ kW}$$

5.1. EQUIPOS PREFABRICADOS

Con el fin de obtener el máximo rendimiento del sistema con la alternativa 1, se deben conocer la potencia unitaria del equipo. Cada equipo de los seleccionados necesita 742 kWth de energía primaria, y proporciona 612 kWth y 130 kWe. Teniendo en cuenta la potencia disponible en los gases, y la que requiere cada equipo, se puede concluir que es necesario el empleo de 4 equipos, con lo que se pueden calcular las potencias eléctrica y térmica a extraer.

$$\text{N}^\circ \text{ de equipos} = \frac{Q_{\text{total}}}{Q_{\text{FP120}}} = \frac{3.000}{742} = 4,04 \approx 4 \text{ equipos}$$

$$\text{Potencia eléctrica} = 130 \text{ kWe} \times 4 = 520 \text{ kWe}$$

$$\text{Potencia térmica} = 612 \text{ kWth} \times 4 = 2.448 \text{ kWth}$$

$$\text{Potencia útil total} = 520 \text{ kW} + 2.448 \text{ kW} = 2.968 \text{ kW}$$

La energía térmica se dispondrá a una temperatura de 65°C (en invierno será aprovechado para la calefacción, en verano se disiparán en las torres de refrigeración). Estas cantidades se mantendrán constantes durante todo el año,

	Sistema Modular	Sistema Clásico
Ventajas	La unidad es independiente no requiere ningún tipo de obra civil especial Montaje más sencillo Requiere menor espacio Menor inversión inicial	Mayor rendimiento eléctrico Sistema muy probado Amplia gama de potencias, lo cual permite ajustar la producción a las variaciones en los gases.
Inconvenientes	Produce menos electricidad Coste de mantenimiento elevado, por el hecho de utilizar aceite térmico Fuente de calor a menor temperatura para los equipos de calefacción. Sistema de reciente implantación, por lo tanto el funcionamiento de esta tecnología está sin garantizar Por su tecnología requiere personal con cualificación específica en el equipo	Montaje más complicado Necesaria obra civil Requiere un mayor espacio Equipo muy pesado, con lo cual limita su movimiento Coste más elevado Puesta en marcha lenta

Tabla 2: Ventajas e inconvenientes de los dos sistemas de generación

siempre que el cubilote este trabajando, no se podrá aumentar la generación de electricidad en periodos en los que no haya demanda térmica de calefacción.

El rendimiento del ciclo en la producción de energía eléctrica será:

$$\eta_{\text{eléctrico}} = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{Q_{\text{total}}} = \frac{520}{2.968} = 0,175$$

5.2. DISEÑO CLÁSICO

Se diseñará de forma que sea capaz de satisfacer la demanda térmica en la época de calefacción, y se maximice la producción eléctrica en la época que no exista demanda de calefacción. A continuación se estudian estos dos casos.

5.2.1 Periodo sin calefacción

Esta situación se empleará en las épocas del año en las que no haga frío, de forma que en esta situación lo que se intenta hacer es optimizar la producción de energía eléctrica, es decir, obtener la mayor cantidad de energía eléctrica posible. El ciclo termodinámico se muestra en la Figura 7.

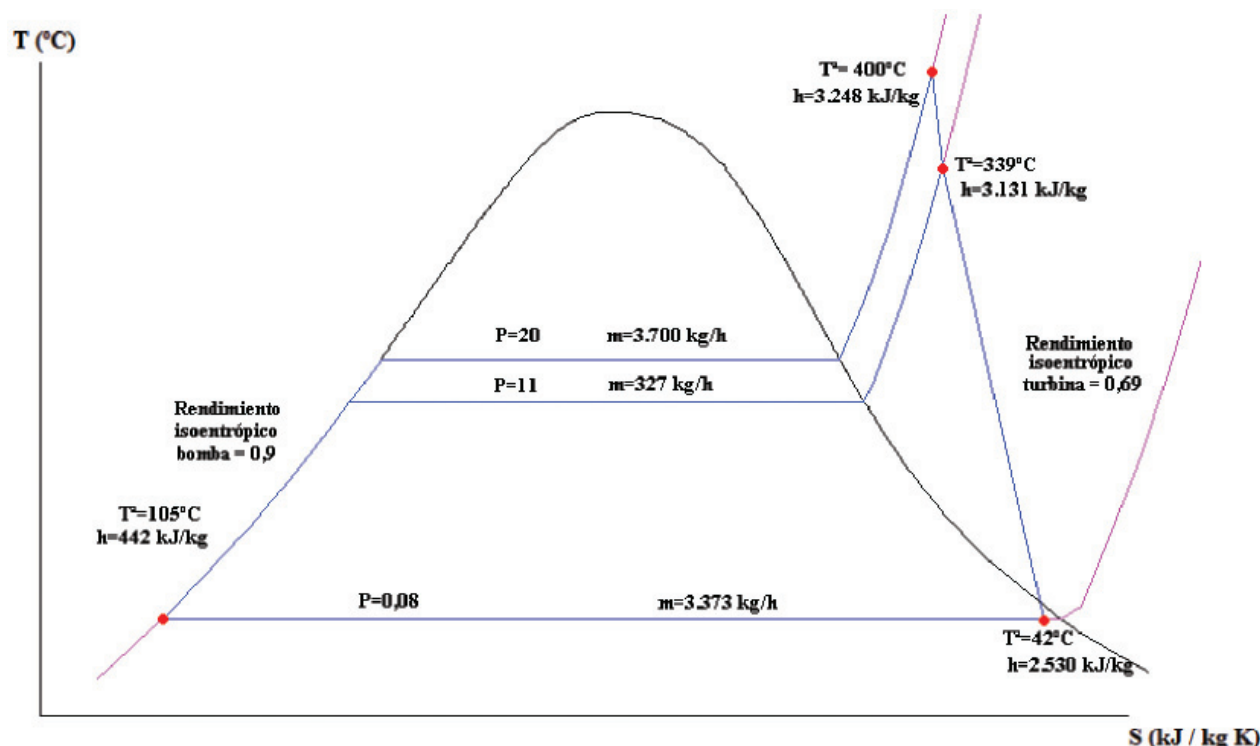


Figura 7: Ciclo del vapor para la situación en la que no se emplee calefacción

La potencia térmica que se requiere de los gases en esta situación es de:

$$P_{\text{total}} = \dot{m} \times (h_{\text{salida caldera}} - h_{\text{entrada caldera}}) = 3.700 \text{ [kg/h]} \times (3.248 - 442) \text{ [kJ/kg]} = 10.382.200 \text{ [kJ/h]} = 2.884 \text{ kW}$$

La potencia a obtener en la turbina será:

$$P_{\text{eje turbina}} = \dot{m} \times (h_{\text{entrada turbina}} - h_{\text{salida turbina}}) = 3.700 \text{ [kg/h]} \times (3.248 - 3.131) \text{ [kJ/kg]} + 3.373 \text{ [kg/h]} \times (3.131 - 2.530) \text{ [kJ/kg]} = 2.458.270 \text{ [kJ/h]} = 683 \text{ kW}$$

Por lo tanto la potencia eléctrica se verá afectada por el rendimiento del generador, siendo de:

$$P_{\text{eléctrica}} = \eta_{\text{generador}} \times P_{\text{eje turbina}} = 0,96 \times 683 = 655 \text{ kW}$$

El rendimiento en la producción de energía eléctrica será de:

$$\eta_{\text{eléctrico}} = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{total}}} = \frac{655}{2.884} = 0,227$$

La potencia térmica disipada por el sistema auxiliar de refrigeración será de

$$P_{\text{térmica}} = P_{\text{total}} - P_{\text{eje turbina}} = 2.884 \text{ kW} - 683 \text{ kW} = 2.201 \text{ kW}$$

5.2.2 Periodo con calefacción

Esta situación se empleará en las épocas del año en las que el sistema de calefacción sea exigido, de forma que lo que se realiza es intentar buscar un compromiso entre ambos objetivos: suministrar calefacción y maximizar la producción

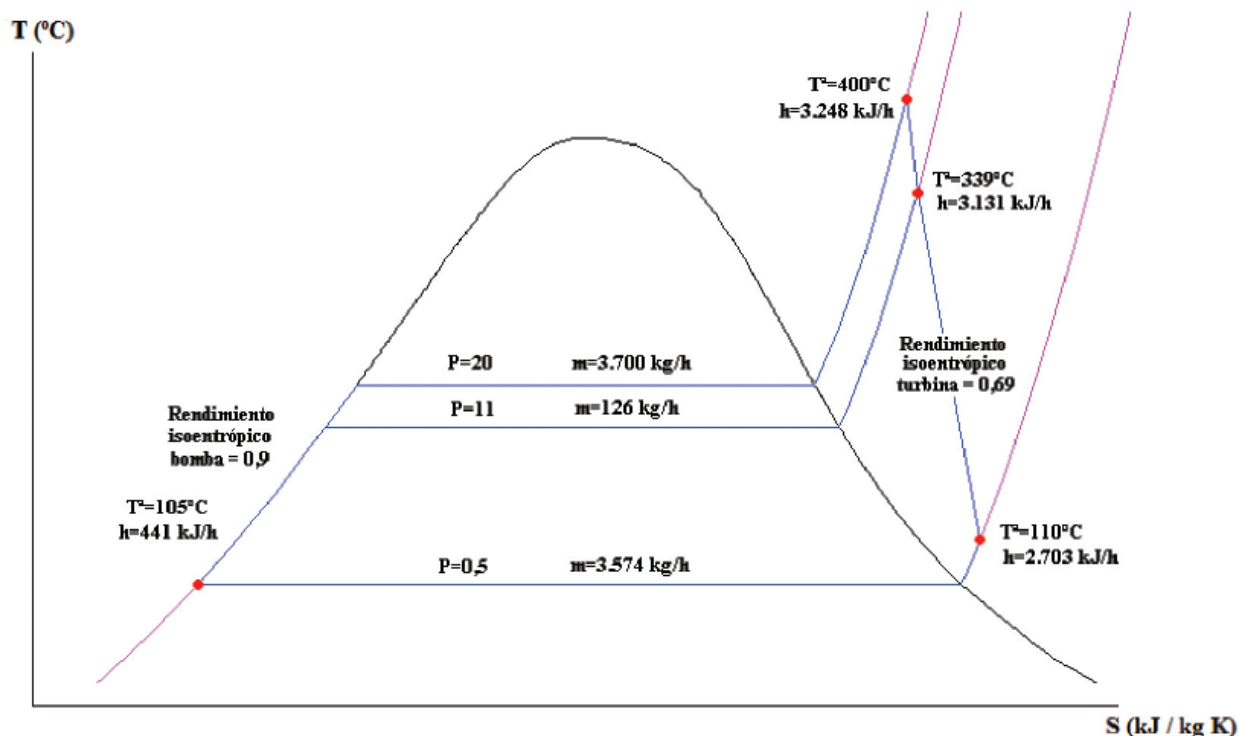


Figura 8: Ciclo del vapor para la situación en la que se demande calefacción

Comparando las Figuras 7 y 8, se puede apreciar como el hecho de necesitar suministrar calefacción obliga a que la condensación se realice a mayor presión y temperatura, lo que disminuye la energía disponible en la turbina, y por tanto la producción eléctrica.

La potencia térmica que se requiere de los gases en esta situación es la misma que la de la situación anterior de 2.884 kW.

La potencia a obtener en la turbina será:

$$P_{\text{eje turbina}} = \dot{m} \times (h_{\text{entrada turbina}} - h_{\text{salida turbina}}) = 3.700 \text{ [kg/h]} \times (3.248 - 3.131) \text{ [kJ/kg]} + 3.574 \text{ [kg/h]} \times (3.131 - 2.703) \text{ [kJ/kg]} = 1.962.572 \text{ [kJ/h]} = 545 \text{ kW}$$

Por lo tanto la potencia eléctrica se verá afectada por el desempeño del generador.

$$P_{\text{eléctrica}} = \eta_{\text{generador}} \times P_{\text{eje turbina}} = 0,96 \times 545 = 523 \text{ kW}$$

El rendimiento en la producción de energía eléctrica es de:

$$\eta_{\text{eléctrico}} = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{total}}} = \frac{523}{2.884} = 0,181$$

La potencia térmica entregada al sistema de calefacción en este caso es de:

$$P_{\text{térmica}} = P_{\text{total}} - P_{\text{eje turbina}} = 2.339 \text{ kW}$$

5.2.3 Disipación de calor

En la disipación de calor hay dos circuitos cerrados. El primero está formado por la refrigeración del condensador. El segundo por la calefacción de las naves. Ambos están comunicados térmicamente a través de un intercambiador de calor.

En los periodos donde se requiere calefacción en el primero de ellos el agua se calienta en el condensador hasta 70°C; a su salida se encuentra el intercambiador de calor donde cede calor al circuito de calefacción. A la salida del intercambiador el agua de condensación se encuentra con la torre de refrigeración auxiliar, en la que es necesario que se enfríe hasta 50°C antes de retornar al condensador. En el intercambiador el agua del circuito de calefacción se calienta hasta 60°C, disipando calor adquirido en la nave, en la que refrigera hasta 40°C antes de retornar al intercambiador. Esto se esquematiza en la Figura 9.

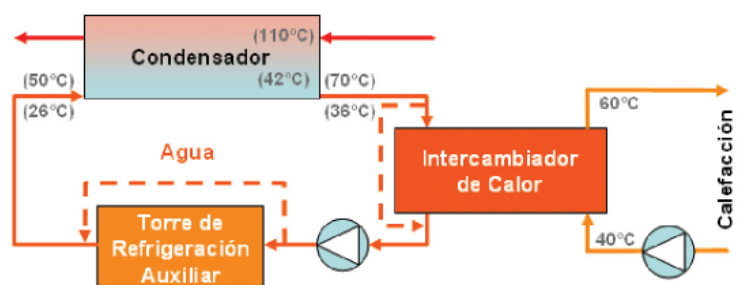


Figura 9: Circuitos de refrigeración y de calefacción

Conocidas las temperaturas que se desean en el circuito de condensación y la potencia térmica que se dispone, el caudal de agua a circular por él debe ser de:

$$\text{Flujo}_{\text{agua condensación}} = \frac{P_{\text{th}}}{\rho \times c_p \times \Delta T} = \frac{2.339 [\text{kJ/s}] 3.600 [\text{s/h}]}{1.000 [\text{kg/m}^3] 4,18 [\text{kJ/kgK}] \times (343 - 323) [\text{K}]} = 101 \text{ m}^3/\text{h}$$

Como se emplea el mismo salto térmico en el agua del condensador que en el de calefacción, esta misma cantidad de agua es la que debe circular por el circuito de calefacción.

En los periodos en los que no se requiere calefacción de las naves, el agua del circuito de condensación puentea el intercambiador de calor, pasando directamente a la torre de refrigeración auxiliar en la que se refrigera antes de retornar al condensador. En estas circunstancias, y para maximizar la producción de electricidad interesa que la condensación se realice a la temperatura más baja posible. Con la climatología local, es posible que la torre trabaje con temperaturas de 36 a 26°C, lo que implica que la condensación se puede realizar a 42°C.

5.3. ALTERNATIVAS EN EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE LA NAVE

En este apartado se analizan las alternativas para disipar el calor. Se estudian tanto las dos posibilidades consideradas para el circuito de calefacción (aerotermos y cortinas de aire), como las dos tenidas en cuenta para la refrigeración auxiliar (torres secas y torres húmedas).

5.3.1 Equipos de calefacción

Las naves industriales están térmicamente muy mal aisladas, y por su funcionamiento tienen multitud de huecos abiertos permanentemente al exterior. Un estudio de cargas térmicas indica que en situaciones de invierno son un sumidero térmico que acepta prácticamente todo calor que se le suministre. De este modo los equipos de calefacción instalados en las naves deben ser capaces de disipar todo el calor que suministre el sistema térmico.

Los aerotermos son una batería o serpentín de tubos aleteados, y un ventilador de circulación de aire. Se manda agua caliente a la batería, mientras que el ventilador fuerza el paso de aire, que se calienta en la batería, y es enviado al interior del local. El ventilador suele tener varias velocidades de giro, y a medida que esta se aumenta se incrementa el calor disipado por el aerotermino. En general, son capaces de trabajar con agua caliente entre 60 y 130°C. En la Tabla 3 se ofrece un ejemplo de calor disipado por un aerotermino con agua de alimentación a 65°C en función de la velocidad.

Velocidad	Potencia (kW)	Caudal agua (l/s)	Caudal aire (m³/h)
1	32,4	0,31	1.970
2	40,9	0,4	2.760
3	52,9	0,52	4.270
4	60,1	0,59	5.250

Tabla 3: Calor emitido por un aerotermino

Las cortinas de aire, al igual que los aerotermos, constan de una batería, a la que se le manda agua caliente y un ventilador de circulación. Lo característico de las mismas es

tanto su forma, ya que es alargada y adaptada a su colocación encima de puertas y ventanas, como el ventilador, que impulsa el aire a gran velocidad; de esta manera crean una barrera de aire que impide muy eficazmente la entrada de corrientes de aire frío y proporciona un ambiente interior caliente.

El ventilador de la cortina puede tener dos velocidades, al aumentarla se aumenta tanto el calor disipado como el alcance de la cortina (altura del hueco sobre la que se puede poner). Típicamente son capaces de trabajar con agua caliente entre 60 y 130°C, emiten entre 59,5 y 171,1 kW por metro lineal de cortina, y el alcance es de hasta 6 m de altura. En la Tabla 4 se ofrece un ejemplo de calor disipado por una cortina y alcance con agua a 65°C en función de la velocidad.

Velocidad	Potencia (kW)	Alcance (m)	Caudal agua (l/s)	Caudal aire (m³/h)
1	67	3	0,75	7.500
2	135	6	1,45	15.000

Tabla 4: Características de una cortina de aire

El funcionamiento correcto de la cortina depende en gran medida de un buen ajuste de la misma al hueco sobre el que se la instala. Estas se deben colocar encima de las puertas y aberturas, tratando de hacer que el edificio se convierta en una unidad lo mas hermética posible, haciendo que el calor se quede dentro.

5.3.2 Sistema de refrigeración auxiliar

En la situación en la que las naves requieran calefacción, todo el calor excedentario del ciclo será disipado por el circuito de calefacción, y el sistema de refrigeración auxiliar no será necesario. Cuando no se emplee la calefacción, el sistema de refrigeración disipará la cantidad de energía térmica mencionada anteriormente. Por lo tanto, debe estar diseñado para disipar una potencia térmica de 2.400 kW. Los dos sistemas que se pueden emplear son torres secas y húmedas.

Los sistemas con torre seca refrigeran el agua con aire ambiente, mientras que las torres húmedas aprovechan calor latente de evaporación de agua [12]. De este modo las segundas tienen mayor eficacia. Como consecuencia de ello tienen menos superficie de intercambio térmico, son menos voluminosas, y requieren menos espacio disponible. Además necesitan menor caudal de aire, lo que implica menos consumo de energía auxiliar y menos ruido; como inconvenientes tienen que necesitan más mantenimiento y que tienen consumo de agua.

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico se centra en obtener:

- Costes de los equipos e instalaciones de las alternativas.
- Ingresos y costes de operación de cada alternativa.

Y con ello realizar el análisis económico para cada una de las alternativas.

6.1. COSTE DE LA INVERSIÓN EN EQUIPOS E INSTALACIONES

En la alternativa con los equipos prefabricados, el sistema de cogeneración necesita 4 módulos prefabricados, con un precio unitario sin IVA que ronda los 270.000 €.

En la alternativa clásica estos módulos quedan sustituidos por una caldera de vapor piro-tubular diseñada para el aprovechamiento de gases de recuperación (cuyo coste aproximado es de 280.000 € + IVA), y un turbogrupa a vapor (con un coste estimado de 960.000 € + IVA).

Para cualquiera de las dos alternativas hacen falta una serie de instalaciones auxiliares. Estas, con su precio estimado sin IVA, son las siguientes:

- Conducción de gran diámetro para los gases de escape (200.000 €)
- Acondicionamiento del espacio para ubicar los dispositivos generales (21.000 €)
- Instalación eléctrica de enlace (26.000 €)
- Sistema de refrigeración auxiliar, las dos alternativas consideradas para ello son:
- Torre húmeda (36.500 €)
- Torre seca (177.000 €)
- Circuito hidráulico de refrigeración auxiliar (16.000 €)
- Equipos de calefacción de las naves, las dos alternativas consideradas para ello son:
- Aerotermos (96.000 €)
- Cortinas de aire (200.000 €)
- Circuito hidráulico de calefacción (100.000 €)

Respecto a las torres de refrigeración, y como la fábrica ya tiene otras torres húmedas instaladas (lo que mengua el problema asociado al mantenimiento), tanto los factores energéticos como económicos decantan claramente la elección por las torres húmedas. En lo concerniente al sistema de calefacción, y dado que el objetivo no es realizar una climatización exhaustiva de la nave, sino simplemente calefactarla, la opción más lógica es la más económica, y por lo tanto optar los aerotermos.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de la inversión total en equipos que se ha de realizar para cada una de las alternativas.

	Módulos	Clásica
Módulos prefabricados	1.080.000	-
Turbogrupa a vapor	-	280.000
Caldera recuperación	-	960.000
Tubos de gases	200.000	
Acondicionamiento espacio	21.000	
Instalación eléctrica de enlace	26.000	
Torre refrigeración húmeda	36.500	
Circuito hidráulico refrigeración	16.000	
Equipos de calefacción (aerotermos)	96.000	
Circuito hidráulico calefacción	100.000	
Coste total (€), sin IVA	1.575.500	1.735.500
Coste total (€), con IVA (18%)	1.859.000	2.047.900

Tabla 5: Inversión a realizar para cada alternativa

6.2. INGRESOS

La fábrica funciona durante tres turnos de producción, es decir, las 24 horas del día, durante aproximadamente 280 días al año, por lo tanto la instalación funcionará durante 6.720 horas.

El precio actual de compra por la empresa de la energía eléctrica es de 0,0973 €/kWh [13]. Según el BOE [14] la instalación que se estudia está englobada en el grupo a.2 dentro de las instalaciones de régimen especial. Según [15] las unidades de régimen especial podrán elegir entre dos opciones para vender su electricidad: (1) cederla al sistema a un precio fijo (tarifa) y (2) venderla en el mercado de producción (precio de mercado más prima de referencia). A ambas opciones se les suma la retribución por Factor de Potencia. Para que los productores puedan participar en el mercado su potencia instalada debe ser mayor de 1 MW [16], lo que no se cumple en esta instalación.

En la Tabla 6 se muestra la composición del posible precio de venta de la energía eléctrica producida a la compañía eléctrica.

Retribución (c€/kWh)	Tarifa Regulada
Precio (2009)	4,9025
Retribución por F.P.	0,3197
TOTAL	5,2222

Tabla 6: Tarifa de venta de la electricidad a la compañía eléctrica

Como se observa, la venta de la energía proporciona un precio de la energía menor que el que cobra la empresa eléctrica a la fábrica, por lo que la opción razonable es consumir toda la energía producida, dado que reporta un mayor beneficio.

Con la instalación de los equipos modulares la producción de electricidad es independiente de la época del año, 520 kW, mientras que con la instalación clásica tiene una producción en los periodos en los que no se demanda calefacción (3.360 h) de 655 kWh, siendo de 523 kWh cuando hay demanda de calefacción (3.360 h). En la Tabla 7 se reflejan los ingresos (disminución de pago a la compañía eléctrica) por la producción y autoconsumo de electricidad en las dos opciones.

Alternativas	Producción de electricidad (€)
Módulos	340.000
Clásica	385.120

Tabla 7: Ingresos por la producción de electricidad

El calentamiento de las naves es un aprovechamiento del calor residual que mejora el confort de los operarios en las mismas, pero se considera que no produce ingreso al no sustituir ningún sistema actual de producción térmica.

6.3. COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En este apartado se han considerado los costes de operación y mantenimiento de los diferentes equipos (mano de obra, consumo de las bombas y ventiladores, etc.) teniendo en cuenta las características de los equipos y datos ofrecidos por fabricantes. La Tabla 8 ofrece un cuadro resumen para las dos alternativas.

	Módulos	Clásica
Costes de operación		
Ventiladores aerotermos	5.000	
Ventiladores torre refrigeración	6.500	
Consumo bombas	9.000	
Costes de mantenimiento		
Caldera	25.000	10.500
Turbina		17.000
Resto equipos	5.000	
Costes de mano de obra	30.000	
TOTAL ANUAL	80.500	83.000

Tabla 8: Costes de operación de las dos alternativas

6.4. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Conocida la inversión en equipos, los ingresos generados y los costes de operación y mantenimiento de las dos alternativas se realiza un estudio de rentabilidad de las mismas. En la Figura 10 se muestra, para las dos alternativas, la evolución de la Valor Actualizado Neto (VAN) en función de la Tasa de Actualización. Los puntos de corte con el eje de abscisas indican el valor de la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).

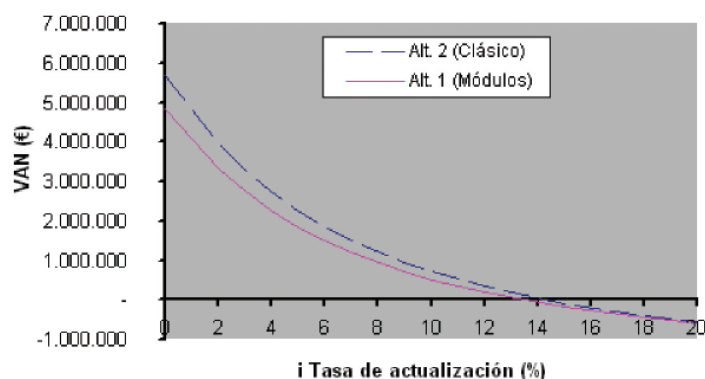


Figura 10: Evolución del Valor Actualizado Neto para las dos alternativas

La vida útil de ambas alternativas de instalación se ha fijado en 25 años. La alternativa con los módulos prefabricados es rentable hasta una tasa de actualización de un 13%, mientras la alternativa clásica es rentable hasta una tasa de actualización de un 14,5%. Para la tasa actual que se encuentra fijada en torno a un 3%, la alternativa clásica es más rentable debido a que se obtiene una mayor tasa interna de retorno. También es notable el observar que con una tasa de actualización más grande ambas alternativas tienden al equilibrio, pero esa situación se producirá con tasas de interés mucho mayores de la que se tiene actualmente.

6.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PRECIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Para comprobar como influye la variación del precio de la energía eléctrica, así como el tipo de intereses que se tenga, se realiza un análisis de sensibilidad considerando tres intereses (3, 5 y 7%) y otros tres precios de la electricidad (5, 7,5 y 10 c€/kWh). En las Figuras 11 y 12 se observan los resultados para la alternativa modular y para la clásica.

Con el fin de poder realizar una comparativa de los dos sistemas de cogeneración, la Tabla 9 ofrece el cociente y la diferencia entre los VAN del sistema clásico y modular para las opciones consideradas de precios de la electricidad y tasas de interés. En ella se observa que en cualquiera de las situaciones contempladas la solución con el sistema clásico es mejor que los equipos modulares. La alternativa clásica incrementa la diferencia a medida que el precio de la energía aumenta y el interés es más pequeño.

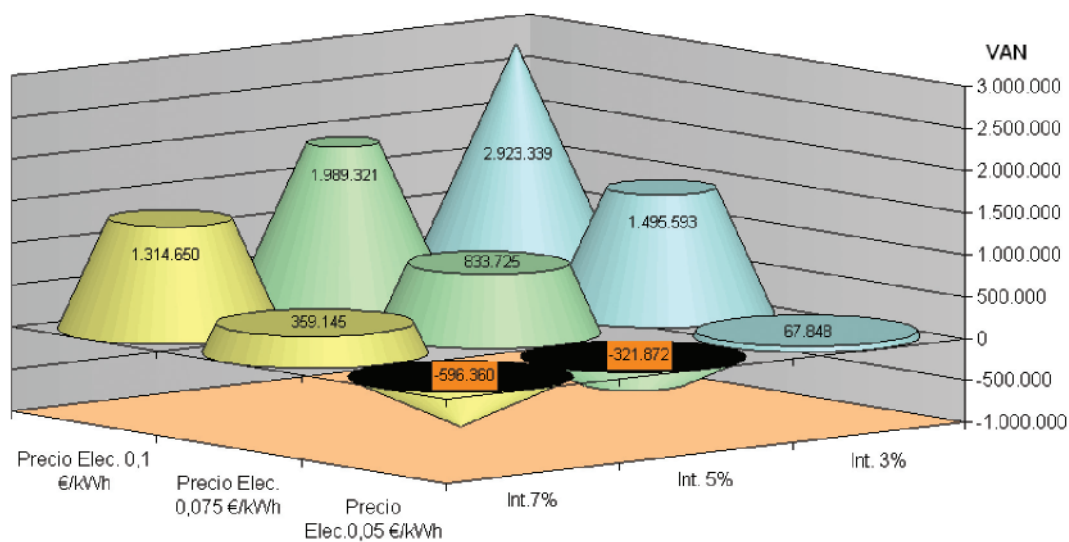


Figura 11: Análisis de sensibilidad para el equipo modular

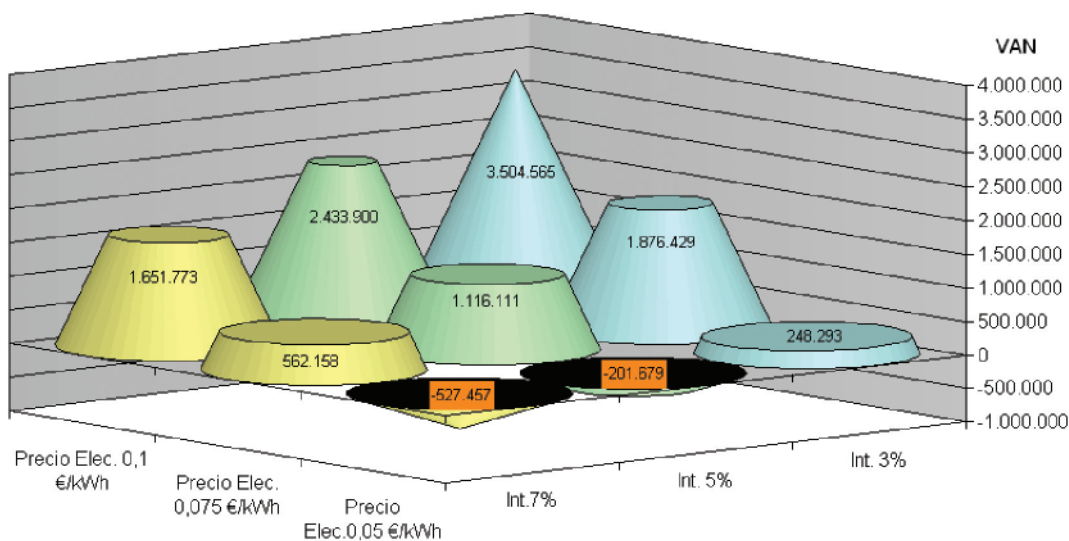


Figura 12: Análisis de sensibilidad para el sistema clásico

De las Figuras 11 y 12 se observa que las instalaciones son más sensibles a la variación del precio de la energía que a posibles variaciones en el tipo de interés, siempre teniendo en cuenta los datos de análisis tomados.

Con las tasas de interés actuales, y el precio actual de la electricidad, tendente a aumentar, ambos sistemas serán rentables. Sólo en situaciones desfavorables para la cogeneración, bajos precios de la electricidad y altos intereses, las instalaciones dejarán de ser rentables, pero esta no es la tendencia del mercado actual.

7. CONCLUSIONES

Tras realizar el análisis funcional, energético y económico, se pueden extraer las siguientes conclusiones para cada una de las alternativas.

Con las tasas de interés actuales ambas alternativas para la recuperación energética de gases de escape de proceso son rentables, por lo que son una oportunidad de negocio.

La alternativa clásica necesita mayor inversión, pero resulta más rentable por su mayor producción eléctrica. Además se adapta mejor a los cambios de régimen de verano a invierno, ya que se puede variar con correlativa facilidad la tasa de electricidad/calor con una extracción de vapor en la turbina.

	VAN _{Clásico} / VAN _{Modulos}			VAN _{Clásico} - VAN _{Modulos}		
	Precio Elec.	Precio Elec.	Precio Elec.	Precio Elec.	Precio Elec.	Precio Elec.
	0,05 €/kWh	0,075 €/kWh	0,1 €/kWh	0,05 €/kWh	0,075 €/kWh	0,1 €/kWh
Int. 3%	3,66	1,25	1,20	180.445	380.836	581.226
Int. 5%	0,63 *	1,34	1,22	120.193	282.386	444.579
Int.7%	0,88 *	1,57	1,26	68.904	203.013	337.122

NOTA: * VAN negativo

Tabla 9: Cociente de VAN de las dos alternativas

La alternativa modular resulta de más fácil instalación. Pero son equipos que están en desarrollo y su eficiencia eléctrica y versatilidad de funcionamiento son limitadas. La mejora de estos equipos podrá dar un impulso a la eficiencia energética industrial mediante la recuperación energética de calor de gases de escape de proceso, permitiendo emplear estos equipos en instalaciones existentes de manera sencilla.

El hecho de implantar un sistema de generación de electricidad partiendo de la recuperación energética de gases de escape reducirá el consumo eléctrico externo realizado en la factoría, con lo cual se obtienen beneficios de índole industrial en lo que se refiere a dependencia energética exterior y descarga del sistema eléctrico. Asimismo disminuirá la cantidad de CO₂ que se emite a la atmósfera, lo cual, además de mejorar el impacto ambiental originado por la empresa, mejora la imagen corporativa de la misma.

Respecto a los trabajadores el hecho de implantar el sistema de calentamiento de las naves hará que aumente el confort, se reduzcan las bajas laborales y aumente la producción de la empresa. En este estudio no se ha considerado, pero el calor residual en la época estival podría emplearse para calentar (o precalentar) el agua de las duchas, climatizar una piscina municipal, etc.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment. Cap 7. 2000. ASHRAE, Inc. ISBN: 1-931862-06-0

[2] Benelmir R, Feidt M. "Energy cogeneration systems and energy management strategy". *Energy Conversion Management*; 39 (1998) 1791-802.

[3] Major G. "Small scale cogeneration". 1995. The Netherlands: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies. CADDET Energy Efficiency Analysis Series 1. IEA/OECD; 1995. 129 pg. ISBN 90-72647-22-X

[4] Peredo J, Renedo CJ, Ortiz A, Mañana M. "Use of thermal storages in industrial heat exchanger networks for heat recovery", *Ingeniería Química Uruguay*, 33 (2008) 22-29

[5] Onovwiona HI, Ugursal VI, "Residential cogeneration systems: review of the current technology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (2006) 389-431

[6] Renedo CJ, Ortiz A, Mañana et al. "Study of Different Cogeneration Alternatives for a Spanish Hospital Center". *Energy and Buildings*, 38 (2006) 484- 490.

[7] Trujillo Armas F, Gómez García E, Rivero Rodríguez P, et L. "Determinación de la configuración óptima de instalaciones de cogeneración en instalaciones hoteleras". *DYNA Ingeniería e Industria* Vol.71-7 p.24-28

[8] Wen-Tien T, Kuo-Jung H. "An analysis of cogeneration system utilized as sustainable energy in the industrial sector in Taiwan". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 2104-2120

[9] Hinojosa LR, Day AR, Maidment GG, et al, "Comparison of combined heat and power feasibility models". *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007) 2166-2172.

[10] Wilkinson B W, Barnes R W. Cogeneration of electricity and useful heat. CRC Press Inc.1980. 272 pg. ISBN: 0849356156

[11] <http://www.freepower.co.uk/index.htm> [consultado 8/ oct/2010]

[12] IDAE. "Guía técnica de torres de refrigeración". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2007. 80 pg. ISBN: 978-84-96680-09-8

[13] Datos internos de la empresa, Comunicación personal

[14] España, Orden ITC/3519/2009 de 28 de diciembre. Boletín Oficial del Estado, 31 de diciembre de 2009, Núm. 315 Sec. I. Pág. 112136

[15] Real Decreto 661/2007

[16] <http://www.omel.es/frames/es/index.jsp> [consultado 8/ oct/2010]