

# Conocimientos y expectativas en la cogeneración de energía eléctrica

<b>Apellidos, nombre</b>	<b>Roger Folch, José</b> (jroger@die.upv.es)
<b>Departamento</b>	<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>
<b>Centro</b>	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Valencia

# 1 Resumen

Hoy en día existen diferentes industrias con capacidad de generar energía eléctrica, al necesitar en sus procesos la participación de las denominadas energías primarias (fundamentalmente gas natural o derivados del petróleo). Esta característica puede resultar muy atractiva tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista medioambiental.

En este trabajo se analizan de forma básica las condiciones que deben reunir las industrias para poder llevar a cabo esta generación (conocida como “**cogeneración**”). Se enuncian las dos formas clásicas de cogeneración y se trata de instruir al lector en una tecnología, por la amplitud de este trabajo, solo se pueden enunciar los criterios mínimos de forma que se pueda adquirir una sensibilización para seguir estudiando detenidamente estos temas y en el ámbito que sea más propicio a las necesidades de cada tipo de industria.

## 2 Introducción

El aprovechamiento de la energía disponible hasta los mayores índices posibles es uno de los temas que hoy en día generan mayor inquietud y supone un campo muy importante dentro de la investigación. Si a este interés se le añade la concienciación de la preservación del entorno medioambiental, entonces nos encontramos ante un campo con un potencial muy alto.

En este trabajo se van a enunciar básicamente los requerimientos básicos a reunir para poder incorporar, como medio de ahorro energético la “**cogeneración de energía eléctrica**”. Para ello solo hay que determinar si en la industria se necesita del aporte de energías primarias, tales como son las provenientes del petróleo (gas, fuel oil, etc.). Este campo se encuentra hoy en día bastante estudiado, por lo que en este trabajo se va a utilizar como ejemplo representativo. Sin embargo en un número bastante alto de instalaciones, de alguna manera se está consumiendo energía primaria que no se aprovecha en su totalidad. Incluso a veces directamente se utiliza la energía eléctrica como energía primaria.

Son muchas las industrias que tienen incorporado en sus sistemas productivos el agua en forma de vapor, en estos casos, para producir vapor, se debe de disponer de una caldera que generalmente funciona con gas o con fuel oil, es decir, lo que se ha denominado como energía primaria. Incluso en el entorno doméstico y en el sector terciario, para el calentamiento de viviendas o locales se utiliza agua caliente mediante una caldera de gas.

Hoy en día, hay multitud de industrias motivadas por el aprovechamiento de cualquier tipo de energía disponible. En muchos casos aprovechan la superficie de los techos de las industrias e instalan gran cantidad de placas solares, bien fotovoltaicas como térmicas.

Dado que se tiene conciencia de ahorro y de no contaminar ¿porqué cuando se dispone de un consumo de energía primaria, los sobrantes de esa energía (humos a altas temperaturas) no son aprovechados?. Se entiende que hayan instalaciones

pequeñas con potencias de placas solares, que suelen tener unos rendimientos energéticos muy limitados, y sin embargo (por desconocimiento) no se utilice o se aproveche toda la potencia disponibles en los humos de las calderas, que además de poder generar energía eléctrica, son humos contaminantes, tanto por la generación de CO<sub>2</sub>, como la contaminación térmica al proyectar a la atmósfera, humos a alta temperatura, este segundo caso es el que ocupa en este trabajo.

Dada la importancia que tiene en el sector eléctrico la cogeneración de energía eléctrica, se dispone en el laboratorio de máquinas eléctricas un montaje los requerimientos necesarios para ensayar las situaciones que se presentan ante un acoplamiento eléctrico entre generadores y la red de alimentación. El autor de este artículo acumula una experiencia de alrededor de 20 años realizando los ensayos a los que asisten un grupo reducido de alumnos de la especialidad eléctrica.

### 3 Objetivos

La preocupación por el medio ambiente y el aprovechamiento de la energía en el mayor porcentaje posible, son por si solos suficientes objetivos para plantear cualquier tipo de trabajo, pero desde luego la especialidad del autor no es ninguna de ellas. Ahora bien, la repercusión que tiene el aprovechamiento de cualquier energía mediante su transformación en energía eléctrica, si que se está en disposición de poder tratar, y en base a ello se plantea una serie de objetivos, planteados por el propio autor como consecuencia de las sucesivas preguntas que los alumnos han ido realizando a lo largo de los años en los ensayos, así entre otros se pueden destacar:

- Conocer de las instalaciones actuales de cogeneración, para que sirvan de modelo en el planteamiento de futuras aplicaciones.
- Planteamiento de las **variables eléctricas** que permiten la conexión para la cogeneración.
- **Autoconsumo**, como complemento de optimización de la energía primaria.
- Presentar a la máquina eléctrica síncrona, como máquina generadora.
- Analizar la generación en **cabeza** y la generación en **cola**.
- Otros usos de la máquina eléctrica para optimizar la inversión.

Aunque este trabajo se centre fundamentalmente en los modos de generación de energía útil (energía activa, de tipo eléctrico), cabe decir que allá donde no sea posible la instalación de un grupo de generación de energía eléctrica, siempre hay métodos de aprovechamiento de la alta temperatura con los que se emiten convencionalmente los gases de las calderas, que rebajen la contaminación (al menos térmica) de dichos gases, tales como son el calentamiento del agua sanitaria (para duchas y baños).

## 4 Desarrollo

Aunque el trabajo se plantea para aquellas industrias y aplicaciones con un consumo de energía primaria (gas, otros derivados del petróleo, etc), existen otro tipo de industrias que utilizan otros materiales de desecho que poseen un importante poder energético que pueden ser causa de su aprovechamiento [1]. En el sector de la madera de vital importancia en la Comunidad Valenciana, se pueden encontrar suficientes ejemplos de posible utilización y/o generación de materia prima o consumo de la energía primaria, son ejemplos de ello, la fabricación de chapas de madera donde existen secaderos con altas temperaturas, en estas se utiliza gas para alcanzar esta temperaturas, las fabricas de muebles el sobrante de madera, es material con energía primaria, y en muchos casos, hay que recurrir a empresas externas que lo retiran para su eliminación y/o aprovechamiento, además hay en este sector otras empresas que curvan madera (para hacer patas de sillas y similares) también se realiza a alta temperatura.

Con consumo de energía primaria, el autor encuentra entre otros los siguientes sectores: las fábricas de papel, las fabricas de piensos compuestos, lavaderos de vehículos con agua caliente y a presión, todo tipo de hornos, etc. En cualquiera de ellos es interesante poder aplicar la generación de energía eléctrica o denominada como **“cogeneración”**.

Fundamentalmente para la obtención de la energía eléctrica, se necesita una máquina síncrona de potencia adecuada [2], que generalmente puede ser arrastrada por una turbina que a su vez es movida por vapor de agua a presión, este vapor de agua es obtenido a partir de la energía primaria, bien directamente o utilizando el sobrante de energía primaria utilizada en el proceso productivo. El nivel de potencia a obtener dependerá en todo caso de la energía primaria disponible, ya se ha comentado que puede ser hasta niveles muy pequeños, aunque en estos casos el coste de instalación con respecto al ahorro sea poco recomendable, pero en todo caso desde el punto de vista de aplicación es idéntico.

### 4.1.- Generación de energía eléctrica “en cola”.

La **generación en cola**, viene a significar que inicialmente se requiere de la energía primaria para la fase de producción industrial y que el sobrante de energía se utiliza para generar energía eléctrica. Un caso muy representativo de este tipo de generación se encuentra en los hornos de cocción de la cerámica, estos hornos trabajan a casi 1000 °C de temperatura. En este caso los humos sobrantes tienen un MUY ALTO poder energético, así como un ALTO PODER CONTAMINANTE. Un esquema de funcionamiento es el de la figura 1.

La energía eléctrica obtenida en estos casos puede ser muy importante, incluso se podría estudiar desde el punto de vista del aprovechamiento energético un escalón posterior y es que aún se podría utilizar la temperatura de los humos y/o el vapor de agua final a baja presión para el calentamiento del agua sanitaria.

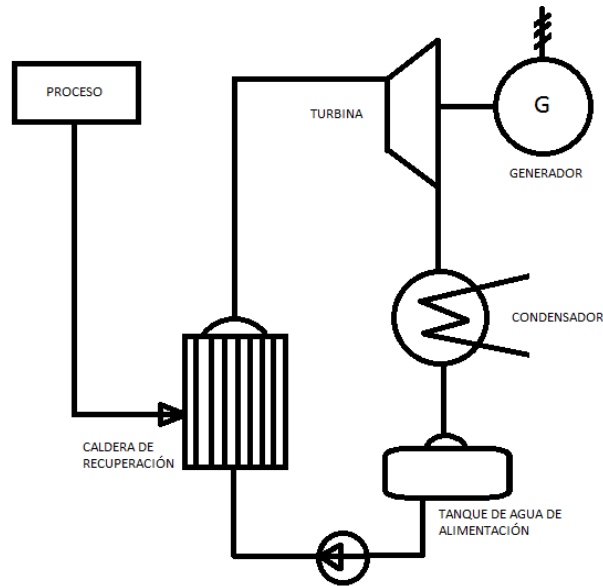


Figura 1. Esquema de instalación de generación en cola.

#### 4.2.- Generación de energía eléctrica “en cabeza”.

Cuando las variables de la producción requieren un vapor de agua sin un excesivo valor energético (temperaturas no muy altas), tal como son las fabricas de pienso, lavaderos de vehículos (o similares) con agua caliente a presiones no altas, etc.), se puede utilizar el alto poder energético de los derivados del petróleo (gas, fuel oil) para directamente calentar agua a muy alta temperatura y presión (recuérdese la ecuación de estado de los gases), este alto poder energético se utiliza para la generación de energía eléctrica y el sobrante se utiliza para el proceso productivo, ver figura 2.

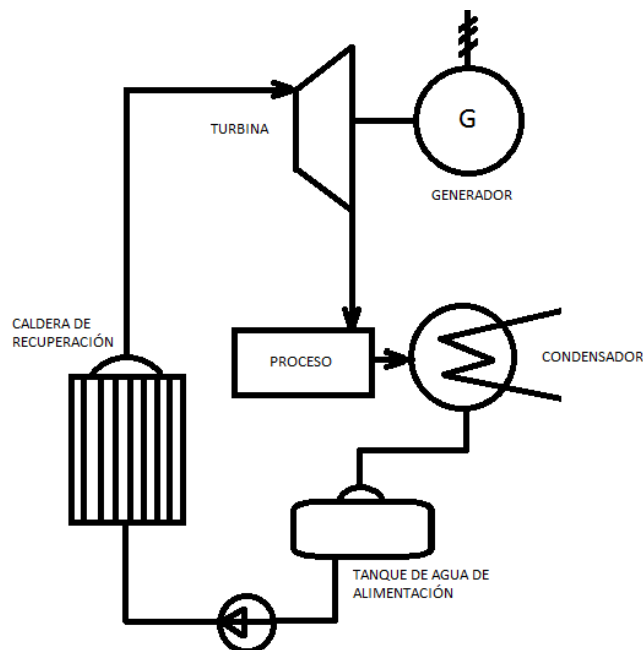


Figura 2. Esquema de instalación de generación en cabeza.

En este caso se puede de nuevo estudiar el aprovechamiento de los humos sobrantes, con bajo poder energético para el agua sanitaria.

En ambos casos, se consigue un aprovechamiento energético y una contaminación térmica baja o muy baja, por estos motivos las entidades públicas han potenciado este tipo de aplicaciones por medio de subvenciones o ayudas tanto a la instalación como a la explotación. Para la obtención de estas ayudas es necesario justificar adecuadamente la aplicación.

### 4.3.- Requerimientos eléctricos mínimos a tener en cuenta en la cogeneración.

Desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía eléctrica, lo usual es utilizar esta energía con las mayores ventajas posibles, y tal como se ha indicado se puede contar con ayudas económicas durante la explotación, esto significa que se pone la energía al servicio de las empresas de distribución y por lo tanto se debe de conectar los generadores del usuario a la red pública de alimentación de energía eléctrica. También puede ser utilizada como energía de autoconsumo, aunque en esos casos puede resultar menos atractivo desde el punto de vista económico.

Las redes a las que hay que conectarse funcionan bajo unas determinadas características, y cualquier usuario (en este caso que aporte energía eléctrica) no puede provocar variaciones de estas características, fundamentalmente se debe de respetar los parámetros que definen a esta redes que se conocen como "**redes de potencia infinita**", esto viene a decir que en el punto de conexión del cogenerador y la red, la tensión de esta última y la frecuencia se consideran invariables, es decir la red ( $U=cte.$ ) y la frecuencia ( $f=cte.$ ) es prácticamente invariable [3].

Como las redes de distribución eléctrica están formadas por sistemas trifásicos alternos de 50 hercios, con ondas de tensión senoidales, los potenciales cogeneradores deben cumplir estos requisitos, la representación gráfica de estos sistemas de distribución tanto de forma real como de forma fasorial es la de la figura 3.

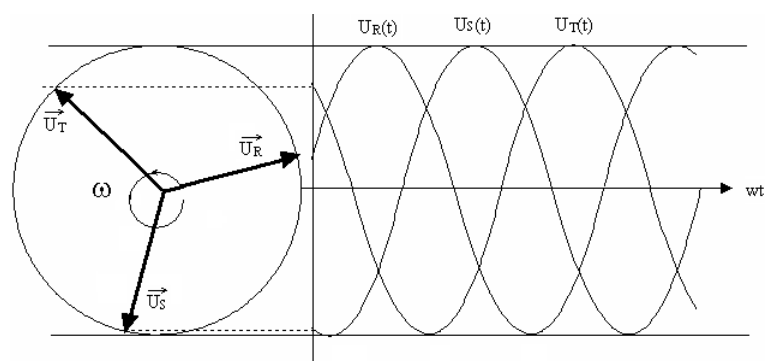


Figura 3. Esquema del sistema de distribución de energía eléctrica.

Según la representación del sistema de la figura 3, hay varias variables que se deben de respetar para poder acoplar un elemento de de cogeneración a una red convencional, estas son:

- "**Igualdad de tensiones**", es decir la tensión eficaz (o módulo de tensiones) de ambos sistemas debe ser la misma. En baja tensión suele ser usual 400 V.,

aunque para grupos de cogeneración con medianas potencias, ya se condiciona la conexión a redes de media tensión (20 kV.).

- **“Igualdad de frecuencia”** en Europa, la frecuencia es de 50 hercios.
- **“Igualdad de secuencia de fases”**, es decir, que siguiendo la secuencia representada en la figura 3, en el tiempo pulse (obtener la máxima tensión) la denominada fase “R”, seguidamente la fase “S” y posteriormente la fase “T”.
- **“Que se encuentre ambos sistemas en fase”** es decir que en una doble representación de ambos sistemas se pudiesen superponer y no existiese diferencias entre ellos, ni de forma instantánea ni en el tiempo.

Pero como ocurre en cualquier otro ámbito de la vida, no existen dos cosas exactamente iguales, por tanto se permite la conexión entre sistemas si la diferencia entre ambos es MUY pequeña. Intentar desde este trabajo fijar unas condiciones invariables para una legislación variable en el tiempo no es viable, pero se indican a modo orientativo la variación admisible, desde el punto de vista técnico y que en cada instante hay que contrastar con lo que en ese momento esté vigente. Así pues la variabilidad podría ser la recogida en la tabla 1, donde  **$\Omega_s$  es la velocidad de sincronismo**.

Tipo y potencia de la máquina	Parámetro y su variabilidad
Asíncronos ( $S \leq 1$ MVA)	Velocidad rotórica $90 \% \leq \Omega_s \leq 100 \%$
Asíncronos ( $S > 1$ MVA)	Velocidad rotórica $90 \% \leq \Omega_s \leq 100 \%$
Síncronos ( $S \leq 1$ MVA)	Diferencias: Módulo de tensión 10 %; Frecuencia: 0,2 Hz; Fase: 20°
Síncronos ( $S \leq 1$ MVA)	Diferencias: Módulo de tensión 10 %; Frecuencia: 0,2 Hz; Fase: 20°

Tabla 1. Diferencia entre red y máquina cogeneradora.

En este trabajo se toma como máquina generadora la síncrona, que para su funcionamiento en régimen permanente como generador o motor tiene que girar a la velocidad de sincronismo. Si se tratase de una asíncrona, lo importante es la velocidad de giro del rotor, que en modo generador debe ser siempre superior a la velocidad de sincronismo, la conexión se hace siempre como motor y por tanto el rotor debe de girar a una velocidad inferior a la del campo giratorio (velocidad de sincronismo ( $\Omega_s$ )). Una vez conectada a la red como motor solo hay que incrementar la velocidad del accionamiento mecánico (turbina), de forma que supere la de sincronismo [1].

#### 4.4.- Requerimientos energéticos a tener en cuenta en la cogeneración.

Desde el punto de vista energético también las posibles instalaciones tiene que cumplir con unos mínimos imprescindibles, que al igual que en el caso anterior, los valores que aquí se recogen deben ser actualizados en el instante que el lector quisiera plantearse una posibles aplicación.

En cuanto al tipo de máquina a emplear, los valores de tensión de generación y el factor de potencia, en la tabla 2 se recogen los valores más representativos, donde:

- "**S**" es límite de la potencia máxima que se puede generar.
- "**CT**" hace referencia al centro de transformación, y su potencia que limita la máxima a poder generar.
- "**cosφ**" factor de potencia mínimo al que se puede generar.
- "**Línea**" hace referencia al límite de potencia que puede transportar la citada línea eléctrica por donde se evacua la energía generada.

Nivel de tensión	Tipo de máquina	Potencias y cosφ
BAJA TENSIÓN 400 V.	Asíncronos (no autoexcitados)	$S \leq 100 \text{ kVA}$ $S \leq 50 \% \text{ C.T.}$ $\text{cos}\phi > 0,86 \text{ (ind)}$
	Síncronos	$S \leq 100 \text{ kVA}$ $S \leq 50 \% \text{ C.T.}$ $\text{cos}\phi > 0,86 \text{ (ind-cap)}$
ALTA TENSIÓN	síncronos	$S \leq 5 \text{ MVA}$ $S \leq 50 \% \text{ Línea}$ $\text{cos}\phi > 0,86 \text{ (ind)}$
	Síncronos	$S \leq 5 \text{ MVA}$ $S \leq 50 \% \text{ Línea}$ $\text{cos}\phi > 0,86 \text{ (ind)}$

Tabla 2. Límites con relación al tipo de máquina y tensión de generación.

Desde el punto de vista de la rentabilidad del sistema de cogeneración también se tiene que cumplir unos requerimientos que se exponen en la tabla 3. Que de forma análoga se deben de contrastar en tiempo y forma, pero que puede ser, en todo caso valores representativos que proporcionen el lector un ejemplo claro de funcionamiento.



$$\eta_{Equiv.} = \frac{E}{Q - \frac{U}{0,9}}$$

Ecuación 1. Rendimiento energético de una instalación.

Combustible y tipo de equipo	$\eta_{Equiv}$ (%) mínimo
Líquido y con caldera	49
Líquido con motor térmico	56
Sólido	49
Gas con motor térmico	55
Gas con turbina	59

Tabla 3. Límites de rendimiento energético de la instalación.

Los parámetros de la ecuación 1 que determina el  $\eta_{Equiv}$  (%) mínimo, son:

- **Q** Energía química requerida.
- **U** Energía térmica aprovechada.
- **E** Energía eléctrica obtenida.

En la tabla 3, se hace mención a líquidos y sólidos tanto en calderas de calentamiento de agua como dentro de posibles motores de combustión interna (motores convencionales de vehículos) que utilicen gas o cualquier otro carburante como energía primaria.

Ahora faltaría concretar el rendimiento energético que tiene una máquina eléctrica en la transformación desde la energía mecánica a la energía eléctrica, pero observando los valores de rendimiento de los otros equipos a utilizar y dado que las máquinas eléctricas tienen rendimientos muy altos entre el 85 y el 98 %, dependiendo de la potencia, no son ningún tipo de restricción.

#### **4.5.- Otros parámetros a tener en cuenta para optimizar la amortización.**

Según lo expuesto anteriormente, son al menos dos las ventajas (menor contaminación y aprovechamiento energético) que representa la cogeneración de energía eléctrica desde otras energías más básicas. Pero a veces estas dos cuestiones que justifica la instalación, pueden no generar los recursos económicos suficientes que amorticen en tiempo y forma la instalación. Pero si se le añaden otras posibles fuentes de ingresos económicos, la instalación acaba siendo más viable o sencillamente más rentable.

Si se dispusiese como máquina generadora, una de tipo síncrono, se puede asegurar que la gestión del factor de potencia (componente de energía reactiva) en la industria e incluso de las propias redes de alimentación, pueden provocar un ahorro tanto energético como económico en el recibo de la factura eléctrica muy importante y que no es causa de esta trabajo, pero que sin duda puede, casi por si mismo justificar la instalación de este tipo de máquinas evitando o limitando la instalación de condensadores para compensar el factor de potencia, por los posibles beneficios que podría a llega a representar [2] y [3].

## 5 Cierre

Aunque hoy en día solo se contemplen la reutilización de energía primaria (tal como se ha planteado en este trabajo) en las instalaciones industriales y con una determinada "alta potencia", no cabe la menor duda que en dado el coste que representa la adquisición de los productos energéticos, así como la sensibilización acerca de la posible escasez de estos productos, la sociedad está adquiriendo una sensibilización de necesidad de una optimización de recursos muy importante.

En base a ello, se está en disposición asegurar que existe una cierta cantidad de energía desaprovechada, y que de forma fácil puede dar lugar a un ahorro energético importante, y en muchas de ocasiones, estas energías que se "tiran" podrían representar un porcentaje alto de autoconsumo.

Dado entonces el actual interés de la sociedad por estos temas se considera imprescindible que los técnicos cualificados, conozcan las posibilidades que le presenta el sector energético. Con este trabajo se ha querido enfatizar en las posibilidades, límites y requerimientos, de una forma global sin entrar en los detalles necesarios para una instalación completa, pero que pueda abrir un mercado de trabajo a estos técnicos. Aquellos que se encuentre motivados con esta técnicas deberán consecuentemente profundizar en el estudio de estas técnicas y aspectos legislativos para poder diseñar una instalación y su acople a una red convencional.

Para remarcar las situaciones en las que sean aplicables estas técnicas, anteriormente se ha descendido hasta las instalaciones de viviendas, dejando claro que aunque hoy en día no se llegue hasta este tipo de aplicaciones, si que pueden ser tenidos en cuenta y que solo se establece límite en aquello que resulte rentable, tanto económico como desde el punto de vista energético y del medio ambiente.

## 6 Bibliografía

[1] Elías Castells, X. "La recuperación de la energía. Cogeneración, intercambiadores y regeneradores de energía: Tratamiento y valorización energética de residuos". Díaz de Santos, S.A. 2012.

[2] Lobosco, O.S, Pereira da Costa Dias, J.L, Oliver, D. "Selección y aplicación de motores eléctricos". Marcombo. 1989.

- [3] Pecharromán, R., Pilo, E., López, A. "Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red". Fundación de los Ferrocarriles Españoles. 2012.
- [4] Simón Rodríguez, M.A, González Rosales, A., De la Peña Esteban, F.D, Egidio Marcos, J.L. "*Electrotecnia Aplicada Circuitos, Transformadores Y Motores Trifásicos*". Visión Libros. 2007.
- [5] Guasch Pesquer, L., Ciumbulea, G.E. "Máquinas y accionamientos eléctricos". Marcombo. 2004.
- [6] Wildi, T. "Máquinas eléctricas y sistemas de potencia". Pearson educación. 2007.