aven

GUÍA DE AHORRO ENERGÉTICO EN EL SECTOR DE BALDOSAS CERÁMICAS DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

PLAN DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

GENERALITAT VALENCIANA

aven
Agencia Valenciana de la Energía

GUÍA DE AHORRO ENERGÉTICO EN EL SECTOR DE BALDOSAS CERÁMICAS

PLAN DE AHORRO Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA

TÍTULO DE LA PUBLICACIÓN

"Guía de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas"

La presente Guía práctica de ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas, ha sido editada por la Agencia Valenciana de la Energía y forma parte de una serie de publicaciones dirigidas a diferentes sectores ....

ELABORACIÓN
Esta Guía ha sido elaborada por el Instituto de tecnología Cerámica (ITC), con la colaboración de ASCER.

AUTORES
Eliseo Monfort, Ana Mezquita, Gustavo Mallol, Rocio Granel y Eva Vaquer

AVEN
Agencia Valenciana de la Energía
Calle Colón, 1, 4ª planta
46004 Valencia

Teléfono: 963 427 900
Fax: 963 427 901

e-mail: info_aven@gva.es
web: http://www.aven.es

Diseño gráfico: Jorge Riquelme Grau
Fotomecánica e impresión: LAIMPRENTA CG
www.laimprentacg.com
Deposito Legal: V-2078-2011

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

1. Introducción 9

2. El sector de fabricación de baldosas cerámicas en la Comunitat Valenciana 15

3. Descripción del proceso productivo 25

3.1 Preparación de materias primas 26

3.2 Conformado de las piezas 30

3.3 Secado 32

3.4 Esmaltado 33

3.5 Cocción 34

4. Consumos de energía y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas 39

4.1 Consumo de energía y emisiones de CO_2 sectoriales 43

4.1.1 Consumos energéticos 43

4.1.2 Emisiones de dióxido de carbono 45

4.2 Consumo de energía en el sector cerámico 48

4.3 Consumo de energía y emisiones de CO_2 en las etapas del proceso de fabricación de baldosas cerámicas 51

5. Descripción de los equipos de proceso 55

5.1 Secaderos por atomización 57

5.2 Secaderos de baldosas 59

5.2.1 Secaderos verticales 59

5.2.2 Secaderos horizontales 61

5.2.3 Secaderos situados antes del horno 62

5.3 Hornos de cocción de baldosas 63

5.4 Otras instalaciones de combustión 69

5.4.1 Secaderos de producto rectificado *69*

5.4.2 Hornos de cocción de piezas especiales y hornos de tercer fuego *70*

6. La combustión en la industria cerámica 73

6.1 Comparación del uso de los diferentes combustibles 75

6.1.1 Aspectos tecnológicos *75*

6.1.2 Aspectos medioambientales *76*

6.2 Poder calorífico de un combustible 77

6.3 Combustión de combustibles gaseosos 78

6.4 Características del propano y del gas natural 79

6.4.1 Propano comercial *79*

6.4.2 Gas natural *80*

7. Medidas de ahorro energético en los equipos de proceso 83

7.1 Secaderos por atomización 85

7.1.1 Aumento del contenido en sólidos de la suspensión *85*

7.1.2 Incremento de la temperatura de los gases de secado *87*

7.1.3 Influencia de la temperatura de la suspensión *89*

7.1.4 Sustitución de la molienda en discontinuo por la molienda en continuo *91*

7.1.5 Instalaciones de recuperación de calor en los atomizadores *92*

7.1.6 Refrigeración del aire de combustión de las turbinas de cogeneración *94*

7.2 Secaderos de baldosas 101

7.2.1 Optimización del caudal de gases de secado *101*

7.2.2 Optimización del caudal de gases de chimenea *103*

7.2.3 Instalaciones de recuperación de calor en los secaderos *105*

7.3 Hornos de cocción de baldosas 105

7.3.1 Optimización de la composición de los soportes de las baldosas *105*

7.3.2 Reducción del espesor de las baldosas *108*

7.3.3 Optimización de la superficie útil de cocción en hornos de rodillos *111*

7.3.4 Reducción de las pérdidas de energía a través de las superficies de los hornos *113*

7.3.5 Optimización de los perfiles de presión estática y contenido en oxígeno *118*

7.3.6 Reducción del caudal de aire de combustión *120*

7.3.7 Instalaciones de recuperación de calor en los hornos *121*

8. Descripción de tecnologías horizontales 129

8.1 Motores eléctricos 131

8.2 Bombas 135

8.3 Soplantes o ventiladores 138

8.4 Compresores y aire comprimido 139

8.5 Sistemas de iluminación 140

9. Medidas de ahorro energético aplicables en tecnologías horizontales 145

9.1 Control, gestión y mantenimiento de las instalaciones 148

9.2 Ahorro energético en motores eléctricos 148

9.2.1 Selección correcta del motor *149*

9.2.2 Motores de alto rendimiento *151*

9.3 Uso de variadores de frecuencia 154

9.3.1 Conceptos básicos y aplicaciones *155*

9.3.2 Aplicación de variadores de frecuencia en bombas *155*

9.3.3 Aplicación de variadores de frecuencia en soplantes *158*

9.3.4 Aplicación de variadores de frecuencia en compresores *159*

9.3.5 Aplicación de variadores de frecuencia en molinos *160*

9.4 Ahorro energético en sistemas de aire comprimido 161

9.4.1 Recuperación de calor en la refrigeración *161*

9.4.2 Eliminación de fugas *162*

9.4.3 Control y gestión *163*

9.4.4 Mantenimiento *164*

9.5 Ahorro energético en sistemas de iluminación 165

9.5.1 Aprovechamiento de la iluminación natural *165*

9.5.2 Adaptación del nivel de iluminación *167*

9.5.3 Sustitución de lámparas o luminarias *168*

9.5.4 Utilización de balastos electrónicos *171*

9.5.5 Control, gestión y mantenimiento de los sistemas de iluminación *174*

9.6 Compensación de energía reactiva 176

9.6.1 Concepto de energía reactiva *176*

9.6.2 Ventajas de la compensación de energía reactiva *178*

9.6.3 Métodos de compensación de energía reactiva *179*

10. La cogeneración en la industria cerámica 183

10.1 Introducción a los sistemas de cogeneración 185

10.2 Sistemas de cogeneración 188

10.2.1 Cogeneración con turbina de gas *188*

10.2.2 Cogeneración con turbina de vapor *189*

10.2.3 Cogeneración en ciclo combinado *190*

10.2.4 Cogeneración con motor alternativo de combustión interna *191*

10.2.5 Otras tecnologías de cogeneración *194*

10.3 Situación actual de la cogeneración en España y en la Comunitat Valenciana 196

10.4 La cogeneración en la industria cerámica 198

10.4.1 Empleo de turbinas de cogeneración en las instalaciones de atomización *200*

10.4.2 Empleo de motores de cogeneración en las instalaciones de secado de baldosas *202*

10.5 Estudio de viabilidad de un proyecto de cogeneración 205

11. Acciones de futuro 211

11.1 Sustitución de la molienda vía húmeda por molienda vía seca 213

11.2 Empleo de la energía solar en el proceso de fabricación de baldosas 216

11.2.1 Radiación solar en la Comunitat Valenciana *216*

11.2.2 Tipos de instalaciones de energía solar *218*

11.2.3 Instalaciones de energía solar térmica *218*

11.2.4 Instalaciones de energía solar fotovoltaica *221*

11.3 Empleo de microondas en el procesado de baldosas cerámicas 225

11.3.1 Secado de baldosas cerámicas *226*

11.3.2 Cocción de baldosas cerámicas *226*

11.4 Empleo de hidrógeno como vector energético en el sector cerámico 227

11.4.1 Empleo de hidrógeno como combustible 229

11.4.2 Empleo de hidrógeno como generador de energía eléctrica 230

12. Anexos 233

12.1 Anexo 1: Glosario de términos técnicos 235

12.2 Anexo 2: Expresiones utilizadas en el cálculo de entalpías 236

12.2.1 Energía térmica 236

12.2.2 Energía eléctrica 238

12.3 Anexo 3: Unidades de conversión 239

12.4 Anexo 4: Fuentes de información 240

1.

Introducción

1 Introducción

La cerámica es uno de los sectores industriales más importantes de la Comunitat Valenciana, siendo tradicionalmente uno de los motores económicos de determinadas comarcas.

En los últimos años, el sector ha experimentado un importante crecimiento, destacándose el desarrollo del subsector de fabricación de baldosas cerámicas, cuyo crecimiento productivo en el periodo 1988 - 2008 ha sido del 154 %, siendo España el segundo país productor europeo y el cuarto a nivel mundial (en 2008). En la Comunitat Valenciana se fabrica aproximadamente el 95 % de la producción nacional.

Figura 1 Baldosas cerámicas, en un ambiente interior.

Figura 2 Baldosas cerámicas, en un ambiente exterior.

Un sector muy ligado a la fabricación de baldosas cerámicas es el de fabricación de fritas. Una frita es un material de naturaleza vítrea, insoluble en agua, obtenido por fusión de una mezcla de materias primas cristalinas a temperaturas del orden de los 1.500 ºC y posterior enfriamiento súbito. En la actualidad existen un total de 25 empresas asociadas a ANFFECC (Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores cerámicos), la mayoría de las cuales se encuentran en la provincia de Castellón.

Además del subsector de baldosas, el sector cerámico engloba otros subsectores, como son:

- Tejas y ladrillos.
- Cerámica sanitaria.
- Vajilla.
- Cerámica artística (o decorativa).
- Cerámicas técnicas.

Una de las características del sector cerámico es el elevado consumo de energía térmica que se requiere en la obtención de los diferentes productos. En efecto, el proceso de fabricación de materiales cerámicos consta de diversas etapas en las que el consumo de energía en forma de gases calientes es muy alto. Estas etapas son, principalmente, el secado de las piezas ya moldeadas y crudas, y su posterior cocción.

Dependiendo del producto fabricado, la cocción puede realizarse en un único paso, o deben realizarse varias cocciones hasta la obtención del producto final. En este último caso, el consumo de energía por unidad de producto es mayor.

Los combustibles utilizados en las industrias dependen del subsector cerámico analizado.

La tendencia generalizada en el proceso de fabricación de baldosas, en cuanto al uso de combustibles, ha sido ir sustituyendo los combustibles líquidos y sólidos por gas natural. Las principales razones que justifican esta importante modificación en el proceso productivo son la mejora de la calidad del producto, el incremento de la eficiencia energética de los procesos y la reducción de las emisiones contaminantes al aire ambiente.

En el caso concreto del subsector de baldosas cerámicas, en la mayoría de los procesos industriales la energía térmica necesaria se obtiene mediante la combustión de gas natural en quemadores. El precio del gas natural ha experimentado un importante aumento en los últimos años, y la tendencia sigue siendo ascendente. Los costes energéticos totales (térmico y eléctrico) suponen entre el 17 y el 20 % de los costes directos medios de fabricación, por lo que cualquier acción encaminada a reducir el consumo de energía en las instalaciones industriales conducirá a un aumento de la competitividad de las empresas.

Es necesario pues, aunar esfuerzos encaminados a realizar un uso eficiente de la energía, que además de suponer una reducción de la factura energética en las empresas conduzca a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyan a cumplir los objetivos del Protocolo de Kioto. Estos objetivos suponen el compromiso por parte de los países con mayor nivel de desarrollo (incluidos en el anexo I del citado Protocolo) de reducir en el periodo 2008 – 2012 el nivel de emisión de los GEI, al menos en un 5,2 % respecto al nivel de 1990.

Esta guía de ahorro y eficiencia energética se centra en el sector de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos, analizando las tecnologías empleadas en la actualidad, las posibles mejoras a introducir en las mismas y las posibilidades de recuperación de calor entre instalaciones.

En primer lugar, se realiza una descripción del sector industrial, abarcando diferentes aspectos como son su situación económica y comercial, las tecnologías empleadas en el proceso de fabricación, los combustibles utilizados y el carácter innovador de esta industria, patente en la evolución sufrida en los últimos 25 años.

A continuación, se lleva a cabo una descripción de los equipos de proceso con mayor consumo de energía, abarcando las diferentes tecnologías empleadas y valorando, principalmente desde el punto de vista energético, sus ventajas e inconvenientes.

Finalmente, se plantean las acciones de ahorro energético aplicables en los diferentes equipos de proceso, así como en las tecnologías horizontales utilizadas en las instalaciones.

Esta publicación se suma a la serie de Guías de Ahorro editadas por la Agencia Valenciana de la Energía (AVEN) en el marco del Plan de Ahorro y Eficiencia Energética de la Comunitat Valenciana.

2.

El sector de fabricación de baldosas cerámicas en la Comunitat Valenciana

2. El sector de fabricación de baldosas cerámicas en la Comunitat Valenciana

Según las normas UNE-EN y las recientes normas ISO, las baldosas cerámicas son placas de poco grosor, generalmente utilizadas para revestimiento de suelos y paredes, fabricadas a partir de composiciones de arcillas y otras materias primas inorgánicas, que se someten a la molienda y/o amasado, se moldean y seguidamente son secadas y cocidas a temperatura suficiente para que adquieran establemente las propiedades requeridas (definición de baldosa cerámica según la Guía de la baldosa cerámica, 2006).

Actualmente hay una amplia variedad de baldosas cerámicas. Esta diversidad se debe tanto a sus formas (cuadrada, rectangular, octogonal, etc.) y tamaños (entre 10x10 y 60x120 cm x cm), como a sus propiedades estéticas (liso, con relieve, brillante, mate, blanco, coloreado, serigrafiado, etc.) y características técnicas (absorción de agua, resistencia mecánica, resistencia a la helada, a la abrasión, etc.).

Los pavimentos y revestimientos cerámicos tienen múltiples aplicaciones, y pueden instalarse en diferentes lugares. Citar, por ejemplo:

- Revestimiento y pavimento interior de viviendas (cocinas, baños, etc.).
- Revestimiento exterior (fachadas, equipamiento urbano, etc.).
- Pavimento exterior (terrazas, piscinas, etc.).
- Pavimentos y revestimientos en lugares públicos (hospitales, colegios, centros deportivos, etc.).

Figura 3 Aplicación de cerámica en la fachada de un edificio (fachada ventilada).

El uso al que se destinan las baldosas cerámicas condiciona sus características técnicas. Los soportes porosos se destinan al revestimiento de paredes, por su mayor adherencia y estabilidad dimensional. Las baldosas de pavimento cuentan con un soporte de menor porosidad, para conseguir mejores propiedades mecánicas, y un recubrimiento con propiedades antideslizantes.

Según datos proporcionados por ASCER (2008) el sector español está constituido por más de 215 empresas, dedicadas a la fabricación de baldosas cerámicas, de las cuales 13 empresas son productoras de polvo atomizado.

El sector de fabricación de baldosas cerámicas proporciona empleo directo a unos 22.300 trabajadores, e indirecto a más de 5.000 (extracción de arcillas, transporte, construcción, maquinaria y producción de fritas, esmaltes y colores).

La localización de las empresas se sitúa principalmente en la Comunitat Valenciana, donde están ubicadas el 87 % del total, con una cuota de producción sobre el total nacional de aproximadamente el 95 %. El resto, se distribuyen en el territorio nacional del modo que muestra la figura 4.

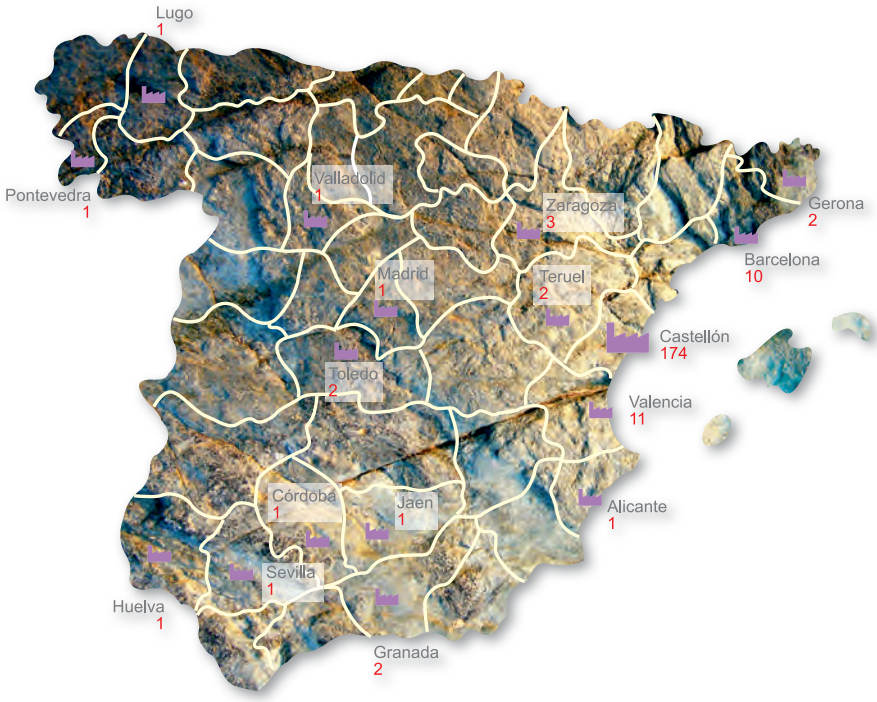


Figura 4 Distribución geográfica de las empresas fabricantes de baldosas cerámicas por provincia (Fuente: ASCER, 2008)

En la Comunitat Valenciana, el mayor número de empresas está en la provincia de Castellón. La producción se encuentra muy localizada en una pequeña zona geográfica, delimitada al norte por Vilafamés y la Pobla Tornesa, al sur por Nules, al este por la ciudad de Castellón y al oeste por las poblaciones de l'Alcora y Onda.

En la figura 5 se muestra un mapa de la provincia de Castellón, en el que se indican las poblaciones donde se localizan un mayor número de factorías.

Figura 5 Distribución geográfica de las empresas fabricantes de baldosas cerámicas en la provincia de Castellón.

La mayoría de las empresas del sector cerámico son pequeñas y medianas empresas. Tal y como se muestra en la figura 6, casi el 90 % de las empresas del sector poseen un volumen de facturación inferior a 50 millones de euros, en el año 2008.

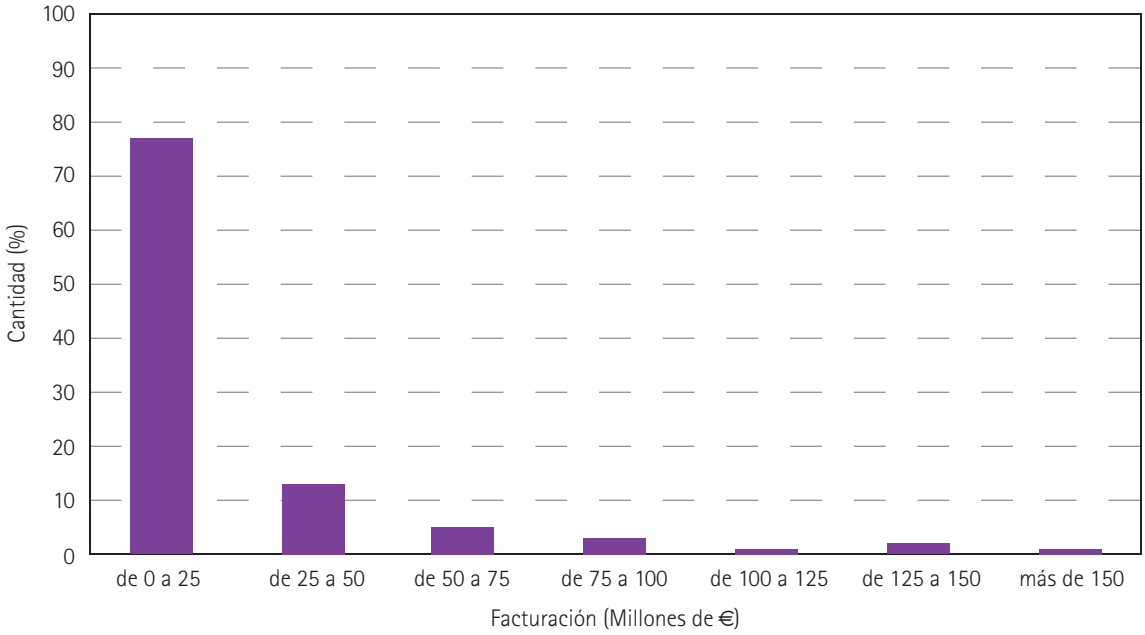


Figura 6 Distribución porcentual del volumen de facturación de las empresas del sector cerámico (Fuente: ASCER 2008).

En el año 2008, el sector español de baldosas cerámicas produjo 495 millones de metros cuadrados, por valor de cerca de 3.700 millones de euros. Cerca del 58 % de la producción se destina a la exportación, a 180 países. En el gráfico mostrado en la figura 7 se muestra la evolución de la producción de baldosas cerámicas en España en los últimos 23 años.

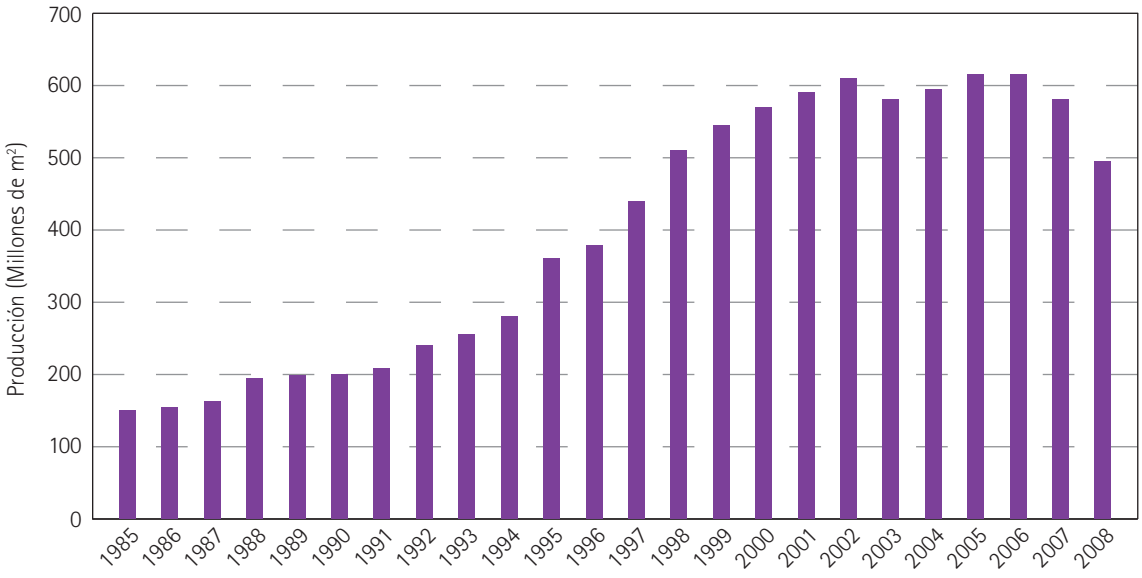


Figura 7 Evolución de la producción española de baldosas cerámicas (Fuente: ASCER)

Los productos fabricados por el sector cerámico de baldosas comprenden:

- Azulejos. Se denominan azulejos a las baldosas cerámicas esmaltadas que han sido prensadas en seco y que presentan elevada absorción de agua. Sus características las hacen especialmente adecuadas para el revestimiento de paredes interiores.
- Gres esmaltado. También se conoce como pavimento gresificado o simplemente pavimento cerámico. Este producto se fabrica mediante prensado en seco, y a diferencia de los azulejos, presenta una baja absorción de agua. Es adecuado para suelos tanto interiores como exteriores, por su elevada resistencia a la helada y a la abrasión.
- Baldosas extrudidas. Llamado también gres rústico. Se trata de baldosas fabricadas mediante extrusión, con absorción de agua baja o media baja. Pueden ser tanto esmaltadas como no esmaltadas.
- Gres porcelánico, esmaltado y sin esmaltar. Se conoce como gres porcelánico las baldosas cerámicas que presentan muy baja absorción de agua. Éstas suelen fabricarse mediante prensado en seco, aunque también puede obtenerse gres porcelánico mediante extrusión. Se utiliza tanto para suelos como para fachadas, interiores o exteriores, y se fabrica tanto pulido como sin pulir (ver figura 8).

Tanto los azulejos como los pavimentos esmaltados y extrudidos pueden obtenerse a partir de arcillas de color de cocción rojo o blanco.

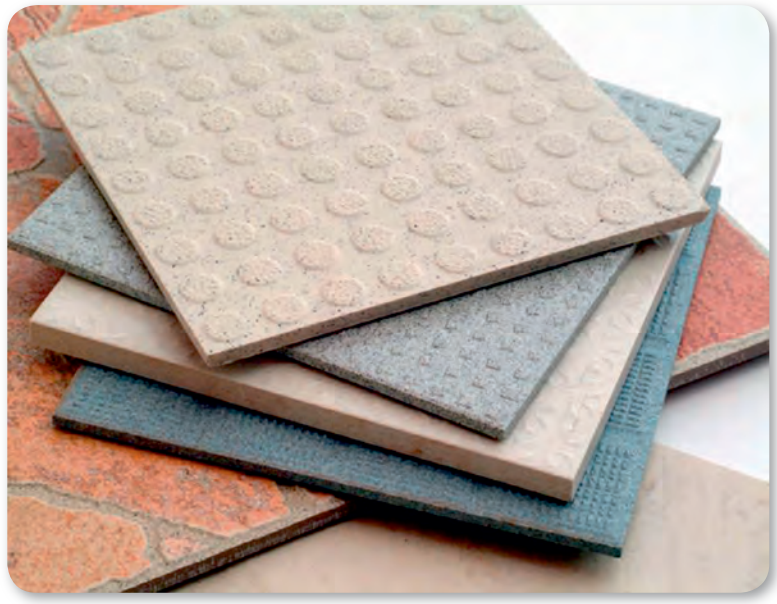


Figura 8 Baldosas cerámicas de gres porcelánico.

La producción mundial de baldosas cerámicas ascendió a 8.495 millones de m^2 en el año 2008, siendo la cuota española de producción del 5,8 %. En la tabla 1 se muestra una lista de los cinco primeros países productores de baldosas, en la que España ocupa el cuarto lugar.

País	Producción (millones de m^2)	% sobre la producción mundial
China	3.400	40,0
Brasil	713	8,4
Italia	513	6,0
España	495	5,8
India	390	4,6
Total mundo	8.495	100

Tabla 1 Producción de baldosas por países (Giacomini, 2008).

3.

Descripción del proceso productivo

3. Descripción del proceso productivo

El proceso de fabricación de baldosas cerámicas consta de diversas etapas. Las etapas del proceso dependen del producto a fabricar, aunque existen una serie de transformaciones que son comunes, como son:

- **Preparación de las materias primas.** Se realiza una selección de las materias primas a utilizar, las cuales se dosifican de la manera adecuada para obtener las características deseadas en el producto. Para obtener productos moldeados por prensado, la mezcla de materias primas se somete a una molienda, que puede realizarse vía húmeda o vía seca, siendo la preparación vía húmeda la más extendida debido a las propiedades del gránulo final obtenido. En el caso de productos moldeados por extrusión, la preparación de las materias primas consiste en mezclar y amasar las materias primas con agua, para obtener una masa plástica moldeable.
- **Conformado de la pieza.** Puede realizarse por prensado, colado o extrusión, aunque el proceso más implantado actualmente es el prensado unidireccional en prensas hidráulicas.
- **Secado.** Los soportes ya conformados se someten a un ciclo de secado, para eliminar la humedad que contienen. Dependiendo del proceso de conformado, las piezas tienen un mayor o menor contenido en humedad.
- **Esmaltado y decoración.** Una vez secas, las piezas se suelen esmaltar y decorar. Este proceso está formado por diversas aplicaciones, que dependen del modelo final deseado.
- **Cocción.** La etapa final siempre es una etapa de cocción en la que el producto crudo se somete a un ciclo térmico en el que se alcanzan temperaturas entre 1.100 y 1.200 ºC, dependiendo del producto fabricado.

Cuando la cocción del soporte y del esmalte se produce simultáneamente, el proceso de fabricación se denomina monococción.

Si por el contrario se producen por separado, el proceso se denomina bicocción. En este caso, se cuece primero el soporte, posteriormente se decora, y finalmente se somete a un segundo ciclo térmico para cocer el esmalte.

La fabricación de piezas especiales sigue el proceso descrito, aunque en algunos casos, una vez cocido el esmalte, se incorporan determinadas aplicaciones para lograr las propiedades estéticas deseadas en las piezas. Estas nuevas aplicaciones decorativas hacen necesaria una tercera cocción de las piezas (estas piezas se denominan habitualmente de tercer fuego).

En la figura 9 se muestra esquemáticamente el proceso de fabricación de baldosas cerámicas.

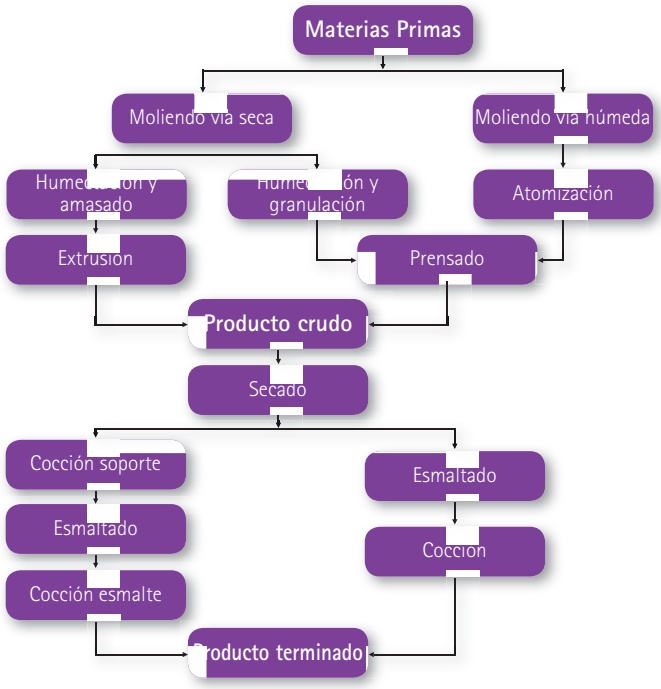


Figura 9 Diagrama de flujo para la fabricación de baldosas cerámicas.

3.1 Preparación de materias primas

Las baldosas cerámicas están formadas por un soporte, de naturaleza principalmente arcillosa. La selección de las materias primas que conforman dicho soporte, y su dosificación en la composición final, debe ser elegida en función de las características de la pieza cerámica que se desea obtener y del proceso de fabricación a emplear.

Figura 10 Fotografía de una cantera para la extracción de arcillas de coloración roja (Fuente: ITC).

Las empresas suelen disponer de acopios más o menos importantes de materias primas para el soporte. Tradicionalmente este almacenamiento se realizaba en el exterior, en instalaciones abiertas (eras), pero la normativa medioambiental está obligando paulatinamente a realizar este almacenamiento en instalaciones cerradas o semicerradas.

En la figura 11 se muestra una fotografía de una nave cubierta de almacenamiento de materias primas de coloración blanca.

Figura 11 Nave cubierta para el almacenamiento de materias primas (Por cortesía de NPC, S.A.).

El proceso de preparación de las materias primas depende de la tecnología empleada posteriormente para moldear las piezas. Así, si el moldeo se va a realizar por prensado, las materias primas se transforman en un sólido granulado con un contenido en humedad aproximado del 6 %. Por el contrario, si el moldeo se realiza por extrusión, el producto obtenido es una masa moldeable con una humedad cercana al 20 %.

En el caso del moldeo por prensado, el proceso de obtención del sólido granulado puede realizarse de dos maneras: vía húmeda o vía seca.

En la preparación vía seca los materiales se molturan hasta el tamaño final de partícula deseado en molinos pendulares y de martillos, donde en ocasiones, simultáneamente se aporta calor para eliminar el agua contenida en el material.

Posteriormente, las partículas obtenidas se someten a un proceso de granulado mediante la pulverización de agua. Con el granulado, se logra la obtención de formas más redondeadas y se facilita el movimiento del gránulo final obtenido. Dependiendo de la cantidad de agua añadida durante la granulación, a veces es necesario secar los aglomerados hasta la humedad deseada.

En algunos casos, al sólido finamente molido se le añade una determinada cantidad de agua, y el granulado se realiza mediante la eliminación progresiva del agua en exceso añadida. El aporte de calor al proceso se produce mediante un quemador.

Figura 12 Molinos de bolas para la molienda de materias primas cerámicas (Fuente: ITC).

La molienda en la preparación vía húmeda se realiza en molinos de bolas, donde se introducen, además de las materias primas, agua y aditivos para facilitar el desleído de los sólidos en el agua.

El proceso de molienda puede realizarse en continuo o en discontinuo. En los molinos discontinuos, se cargan las materias primas, el agua y los aditivos, y tras unas horas de molienda, el molino se para y se descarga. La densidad y viscosidad de la suspensión obtenida debe ser la adecuada para que pueda descargarse el molino por gravedad, por lo que debe efectuarse un control estricto de estas variables. La puesta en marcha del molino requiere de un gran aporte de energía eléctrica, pues los motores deben tener suficiente potencia para vencer la inercia del molino, cuya masa total está compuesta por el propio molino, los elementos molturantes y la carga.

En el proceso de molienda continua, la entrada de agua, materias primas y aditivos, se produce en continuo, así como la descarga de la suspensión. El proceso es más eficiente desde el punto de vista energético, pues se eliminan los tiempos muertos de carga y descarga del molino. Además, el estado de movimiento continuo de la suspensión facilita su descarga, por lo que, en algunos casos, es posible trabajar con suspensiones más densas.

La suspensión obtenida tras la molienda vía húmeda posee aproximadamente entre un 60 y un 70 % de sólidos. El exceso de agua de la suspensión se elimina mediante un proceso de secado por atomización, obteniéndose finalmente un granulado con un 6 % de humedad.

Desde que se descarga de los molinos hasta que es bombeada al atomizador, la suspensión, denominada comúnmente barbotina, se almacena en balsas donde permanece en agitación para evitar la sedimentación de los sólidos y mantener su viscosidad entre los límites adecuados que permitan su trasiego por las conducciones.

El secado por atomización consiste en poner en contacto la suspensión finamente pulverizada con gases calientes a elevada temperatura. Las gotas de barbotina secan rápidamente, y los sólidos caen por gravedad a la base del atomizador, donde se recogen mediante una cinta transportadora que los conduce a los silos de almacenamiento. Los gases húmedos salen del atomizador, y tras un proceso de depuración para eliminar las partículas en suspensión que arrastran, son vertidos al exterior. En la figura 13 se muestra una fotografía de un atomizador de tamaño medio.

Figura 13 Atomizador empleado en el secado de la barbotina (Por cortesía de NPC, S.A.).

Este proceso requiere una gran cantidad de energía, pues los gases calientes para el secado de la suspensión deben tener una temperatura cercana a los 500 ºC. El sólido granulado obtenido mediante el proceso vía húmeda posee una distribución de tamaño de partícula amplia, y gránulos de forma casi esféricas, propiedades que hacen que el polvo tenga una gran fluidez. Esta característica es muy importante en la etapa de moldeo por prensado, pues una fluidez adecuada facilita el llenado uniforme de los moldes en las prensas y por tanto la obtención de piezas de espesor y densidad aparente uniformes.

El sólido granulado obtenido en la etapa de preparación de las materas primas es un producto semielaborado, a partir del cual se moldean las baldosas. Algunas empresas centran su actividad en esta parte inicial del proceso productivo, siendo el producto final obtenido en sus instalaciones dicho sólido pulverulento.

En la figura 14 se muestra esquemáticamente el proceso de preparación de las materias primas vía húmeda.

Cuando el moldeo de las piezas se realiza por extrusión, las materias primas se molturan en molinos de martillos y posteriormente se mezclan con agua en una amasadora. El producto obtenido es una masa moldeable homogénea con un contenido elevado en agua (hasta un 20 %), con la plasticidad adecuada para su moldeo por extrusión.

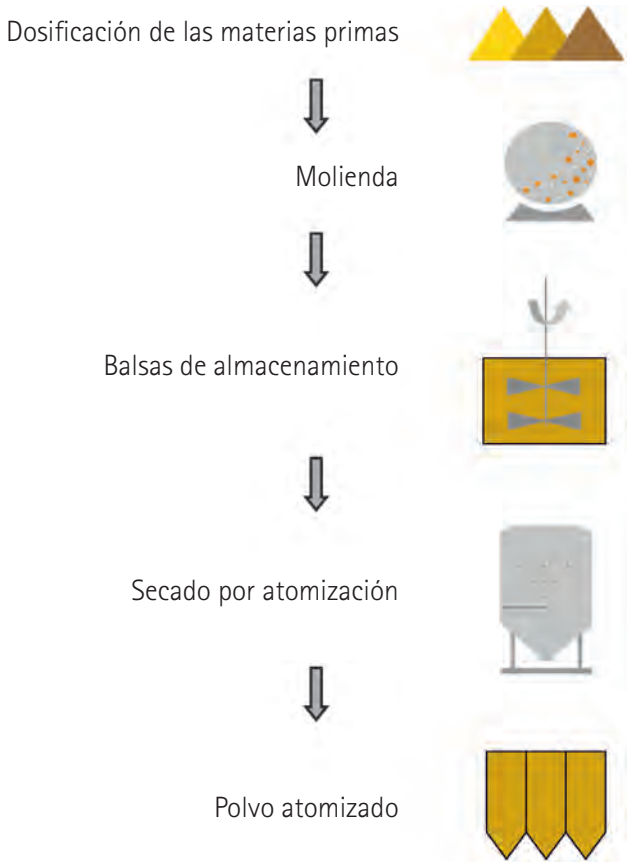


Figura 14 Proceso de preparación de materias primas vía húmeda.

En la actualidad, el proceso empleado mayoritariamente en la preparación de las materias primas consiste en una molienda vía húmeda y posterior secado por atomización, para la obtención de un sólido granulado.

Únicamente unas pocas empresas del sector utilizan el proceso de preparación del sólido vía seca, o el proceso de amasado para obtener una masa moldeable, adecuada para la extrusión.

Durante la preparación de las materias primas se produce un importante consumo de energía eléctrica en las etapas de molienda y extrusión, además de la consumida por bombas, motores eléctricos, etc. Cuando la molienda se realiza vía húmeda, existe además un gran consumo de energía térmica en el proceso de secado por atomización de la suspensión arcillosa.

3.2 Conformado de las piezas

Una vez preparadas las materias primas, el siguiente paso en la obtención de las baldosas es la etapa de moldeo. El método más extendido es el prensado unidireccional en prensas hidráulicas.

Este método consiste en introducir el polvo granulado en un molde y aplicar presión en una dirección, hasta lograr la densidad deseada en el sólido. Las presiones aplicadas dependen, tanto de la humedad que

contenga el polvo atomizado, como de la densidad aparente final deseada en el soporte. Habitualmente, la humedad del atomizado oscila entre un 5 y un 7 % (en base seca), y las presiones aplicadas se sitúan en el rango 250 – 500 kg/cm^2, en función del producto final deseado.

Figura 15 Prensa hidráulica para el conformado de baldosas cerámicas (Por cortesía de: SITI-B&T GROUP S.p.A.).

La densidad obtenida en el soporte se sitúa en torno a 1.970 kg/m^3, dependiendo del producto que se esté fabricando: azulejo, pavimento gresificado o gres porcelánico. El valor de densidad en crudo es un parámetro importante dentro del proceso de obtención de las baldosas pues, junto con la temperatura máxima de cocción, determina la porosidad final de la baldosa y sus dimensiones.

Otro método de conformado menos utilizado es la extrusión. Consiste en hacer pasar mediante la aplicación de presión una masa arcillosa húmeda por una boquilla, que le confiere la forma deseada. La humedad de la masa se sitúa en torno al 18 %.

La extrusión requiere que el producto a fabricar tenga una sección constante. El producto se obtiene de forma continua, y mediante la introducción de elementos de corte en la línea de producción se corta para obtener las piezas de la longitud deseada. En esta etapa el consumo de energía es mayoritariamente eléctrico. La figura 16 muestra una pieza (peldaño) obtenida por extrusión.

Figura 16 Pieza cerámica moldeada por extrusión.

3.3 Secado

La eliminación del agua en una composición arcillosa conlleva una contracción de la masa, mayor cuanta más agua contenga la composición. Así, el proceso de secado debe realizarse de manera controlada para evitar la aparición de defectos de secado.

La contracción de secado es, por tanto, muy importante en el secado de piezas obtenidas por extrusión, y menos determinante en el secado de las baldosas obtenidas por prensado, pues su humedad es baja, entre el 5 y el 7 % en base seca.

Las baldosas crudas recién moldeadas por prensado se someten al proceso de secado con un doble objetivo: eliminar la humedad que contienen y aumentar su temperatura. La eliminación del agua incrementa su resistencia mecánica, de modo que se logra que las piezas soporten sin romperse las tensiones aplicadas durante las etapas posteriores. El incremento de temperatura contribuye a que el esmaltado y la decoración de las piezas se realicen adecuadamente, pues el esmalte seca inmediatamente tras su aplicación y la baldosa no incrementa excesivamente su contenido en agua.

Los secaderos utilizados en el secado de baldosas prensadas son secaderos continuos verticales u horizontales:

- En los secaderos verticales, las piezas se disponen sobre planos de rodillos, que giran como una noria. La carga y descarga de piezas se realiza de forma automática, de modo que al finalizar el ciclo de secado, se descargan las piezas secas de un plano y éste simultáneamente vuelve a llenarse de piezas húmedas, que inician de nuevo el ciclo de secado.

Figura 17 Secadero vertical para el secado de baldosas cerámicas (Por cortesía de SITI-B&T GROUP, S.p.A.).

- En los secaderos horizontales, las piezas avanzan por el interior del secadero situadas sobre unos rodillos, que giran para permitir el avance de las piezas en un sentido. Su estructura es la

de un túnel, en el que por un lado se introducen las piezas húmedas y por el otro se descargan las secas. Habitualmente, los secaderos horizontales poseen más de un plano de rodillos.

Los ciclos de secado tienen una duración cercana a una hora si se realizan en secaderos verticales, y la temperatura de los gases de secado se sitúa en torno a 200 ºC. En los secaderos horizontales, el ciclo de cocción se reduce a unos 25 minutos, y la temperatura máxima es algo mayor, en torno a 250 ºC.

Las baldosas obtenidas por extrusión se secan en hornos túnel dispuestas en vagonetas. Los ciclos de secado tienen varias horas de duración, siendo la temperatura máxima inferior a 100 ºC.

La etapa de secado consume principalmente energía térmica, pues los gases calientes de secado se obtienen por combustión de gas natural en quemadores. El consumo eléctrico se produce en los motores eléctricos y en el cuadro de control del secadero.

3.4 Esmaltado

La operación de esmaltado persigue un doble objetivo: impermeabilizar la superficie del producto acabado y proporcionarle el aspecto estético deseado.

Esta etapa se realiza en líneas de esmaltado por donde las baldosas van avanzando. En estas líneas se sitúan todos los elementos necesarios para proporcionar a las piezas el acabado requerido.

Los esmaltes cerámicos son una mezcla de fritas, materias primas y aditivos que se molturan vía húmeda en molinos discontinuos. El esmalte en suspensión obtenido se deposita sobre las piezas en las líneas de esmaltado mediante la aplicación en cortina (véase figura 18). Tras la aplicación del esmalte, en la mayoría de ocasiones se aplican serigrafías o granillas, en función del acabado estético buscado y de las prestaciones que se requieran en el producto final.

La energía consumida durante el proceso de esmaltado es energía eléctrica, y el consumo es debido a la molienda realizada durante la preparación del esmalte y al consumo de los motores que permiten el movimiento de las piezas, el bombeo de los esmaltes, etc.

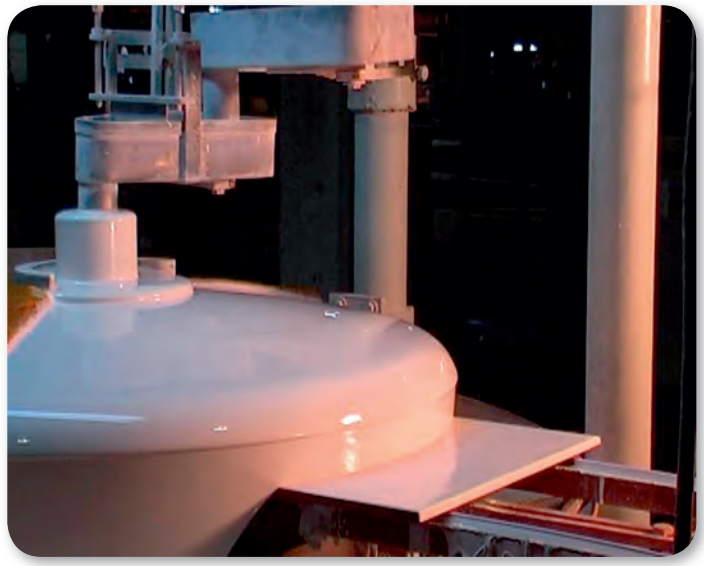


Figura 18 Aplicación a campana del esmalte
(Por cortesía de Zirconio, S.A.)

3.5 Cocción

La etapa de cocción es la más importante del proceso productivo. El proceso de cocción es un proceso complejo, en el que se producen diversas transformaciones, tanto físicas como químicas, que dan lugar a un producto final con las propiedades mecánicas y estéticas deseadas.

Cuando la cocción del soporte y el esmalte se realizan simultáneamente, el proceso recibe el nombre de monococción. Si por el contrario, se cuece primero el soporte y después el esmalte, el proceso se denomina bicocción.

En el proceso de monococción, el soporte obtenido por prensado, ya esmaltado y decorado, se cuece en hornos continuos de rodillos. La duración del ciclo de cocción depende del tamaño de las baldosas, de la producción del horno, de la naturaleza del soporte y del recubrimiento, etc., pero en general, se sitúa entre 40 y 70 minutos. La temperatura máxima de cocción también depende de todos estos factores, y está entre 1.100 y 1.200 ºC.

En el proceso de bicocción, tanto el soporte primero como las piezas esmaltadas después, se cuecen en hornos continuos de rodillos, similares a los utilizados en el proceso de monococción.

En ocasiones, cuando el producto fabricado se moldea por extrusión, los hornos utilizados en la cocción son hornos túnel, en los que el material avanza por su interior apilado en vagonetas. Son hornos de funcionamiento en continuo, como los empleados en la fabricación de tejas y ladrillos.

La energía consumida durante la cocción es principalmente energía térmica. El aporte de calor al proceso se realiza, de manera mayoritaria en el sector, por la combustión de gas natural en quemadores de alta velocidad.

En la figura 19 se muestra un esquema del proceso de fabricación de las baldosas cerámicas, considerando que las materias primas se molturan vía húmeda, la etapa de moldeo se realiza por prensado y la cocción de soporte y esmalte es simultánea. Este es el proceso de fabricación más extendido en la actualidad en la fabricación de baldosas cerámicas esmaltadas.

Figura 19 Esquema del proceso de fabricación de baldosas cerámicas por monococción.

En la fabricación de baldosas de gres porcelánico, tras la etapa de cocción puede existir una etapa de pulido, que confiere a las piezas un acabado brillante. En la figura 20 se muestra un esquema del proceso de obtención de gres porcelánico.

Figura 20 Esquema del proceso de fabricación de gres porcelánico.

La operación de pulido consume únicamente energía eléctrica. En algunas ocasiones, dado que el pulido se realiza utilizando agua como refrigerante, tras esta fase existe una etapa de secado para que las baldosas se embalen totalmente secas. Lo mismo ocurre con productos que tras la cocción sufren un proceso de rectificado o de corte, pues estas operaciones también se realizan utilizando agua.

Figura 21 Sección de pulido de baldosas cerámicas (Fuente: ITC).

Estos secaderos de piezas mecanizadas pueden operar con un quemador de gas o bien recuperar gases residuales del horno como aporte energético al equipo. En este último caso, no se requiere un incremento del consumo energético global del proceso de fabricación.

Finalmente, se muestra un esquema del proceso de obtención de pavimento rústico.

Figura 22 Esquema del proceso de fabricación de gres rústico.

4.

Consumos de energía y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas

4. Consumos de energía y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas

El sector de fabricación de baldosas cerámicas está englobado dentro del sector industrial. Éste es uno de los sectores con mayor consumo de energía en la Comunitat Valenciana, sólo superado por el sector transporte. En la tabla 2 se muestra el consumo de energía final por sectores en la Comunitat Valenciana en el año 2008 (Fuente: AVEN, 2008).

Según se observa, el consumo final de energía ascendió a 9.499 ktep, de las cuales 3.087 ktep fueron consumidas por el sector industrial. Este sector, por tanto, representa el 33 % del consumo de energía en la Comunitat Valenciana.

Sector	Consumo (ktep)	Consumo (%)
Transporte	3.785	40
Industria	**3.087**	**32**
Doméstico	1.189	13
Servicios	932	10
Agricultura y pesca	506	5
TOTAL	9.499	100

Tabla 2 Consumo de energía final por sectores en la Comunitat Valenciana (Fuente: AVEN, 2008).

Si se desglosa el consumo de energía del sector industrial por provincias (ver figura 23) se aprecia cómo el consumo energético en Castellón supone el 51 % del total, ascendiendo a 1.588 ktep.

Centrándonos en la provincia de Castellón (figura 24), si se analiza el origen de la energía consumida, se observa que el 83 % de la energía consumida se genera a partir del gas natural. Esto es debido a la gran concentración de empresas del sector cerámico en esta provincia, cuya principal fuente de energía térmica es este combustible gaseoso y a la central térmica ubicada en el polígono El Serrallo.

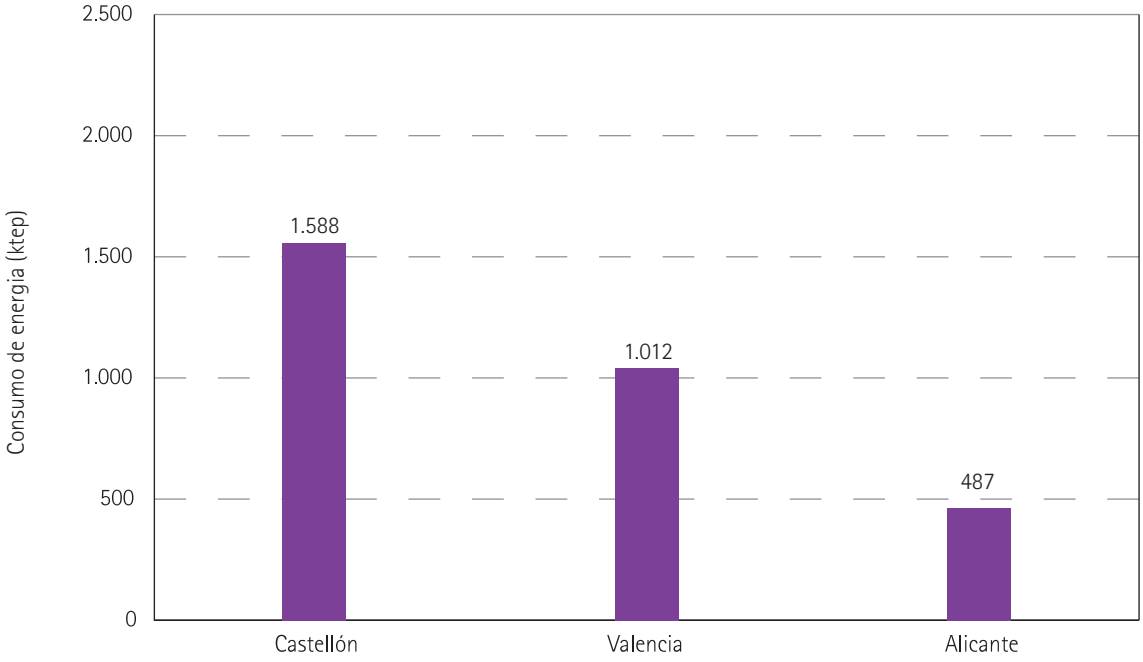


Figura 23 Consumo de energía final en el sector industrial por provincias (AVEN, 2008).

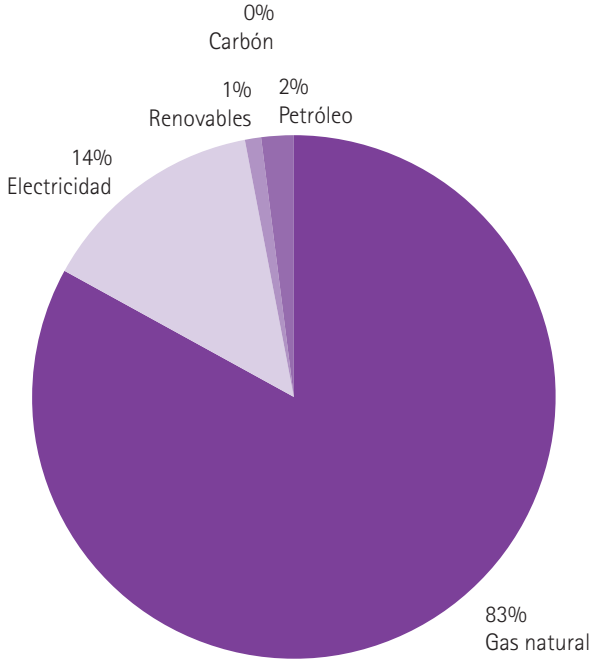


Figura 24 Origen de la energía consumida en la provincia de Castellón (AVEN, 2008).

El uso generalizado de gas natural en el sector de fabricación de baldosas cerámicas se debe a la extensión de las redes de distribución de este combustible en las zonas en las que se encuentran implantadas mayoritariamente las empresas (polígonos industriales).

4.1 Consumo de energía y emisiones de CO_2 sectoriales

4.1.1 Consumos energéticos

En el sector de fabricación de baldosas cerámicas y gránulo atomizado, se consume energía eléctrica en todas las etapas, y energía térmica en las etapas de atomización, secado y cocción, principalmente, y en las instalaciones de cogeneración. Puede existir consumo de energía térmica de otra naturaleza como puede ser, por ejemplo, en la etapa de paletización y flejado, en algunas aplicaciones decorativas de la etapa de esmaltado, en secaderos de producto rectificado o pulido, calefacción de algunas zonas o en la obtención de agua caliente sanitaria, pero la cantidad de energía empleada en estos usos es mucho menor que la empleada en las principales etapas de fabricación mencionadas anteriormente.

En la tabla 3 se muestra la distribución de consumos energéticos en el sector en el año 2008.

		Consumo energético final (GWh/año)
Energía eléctrica		1.187
Energía térmica*	Proceso de fabricación	11.089
	Gases de escape de la cogeneración	3.252
	Total	14.341
Consumo de energía total		**15.528**

*referido al Poder Calorífico Superior del combustible.

Tabla 3 Demanda de energía final en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas en 2008.

En esta tabla no se ha incluido el consumo de gas natural en los sistemas de cogeneración destinado a la generación de energía eléctrica, ni las pérdidas energéticas en los sistemas de cogeneración. La suma de estos dos términos se estima en torno a 1.500 GWh/año. Este valor se ha obtenido considerando que el rendimiento térmico de los sistemas de cogeneración es, aproximadamente, del 68 %.

El consumo total de gas natural en el sector, considerando tanto el que se consume en el proceso de fabricación como el utilizado en los sistemas de cogeneración, es de 15.842 GWh/año (PCS).

En la figura 25 se ha representado gráficamente la distribución del consumo final de energía del sector de fabricación de baldosas cerámicas en España, en el año 2008.

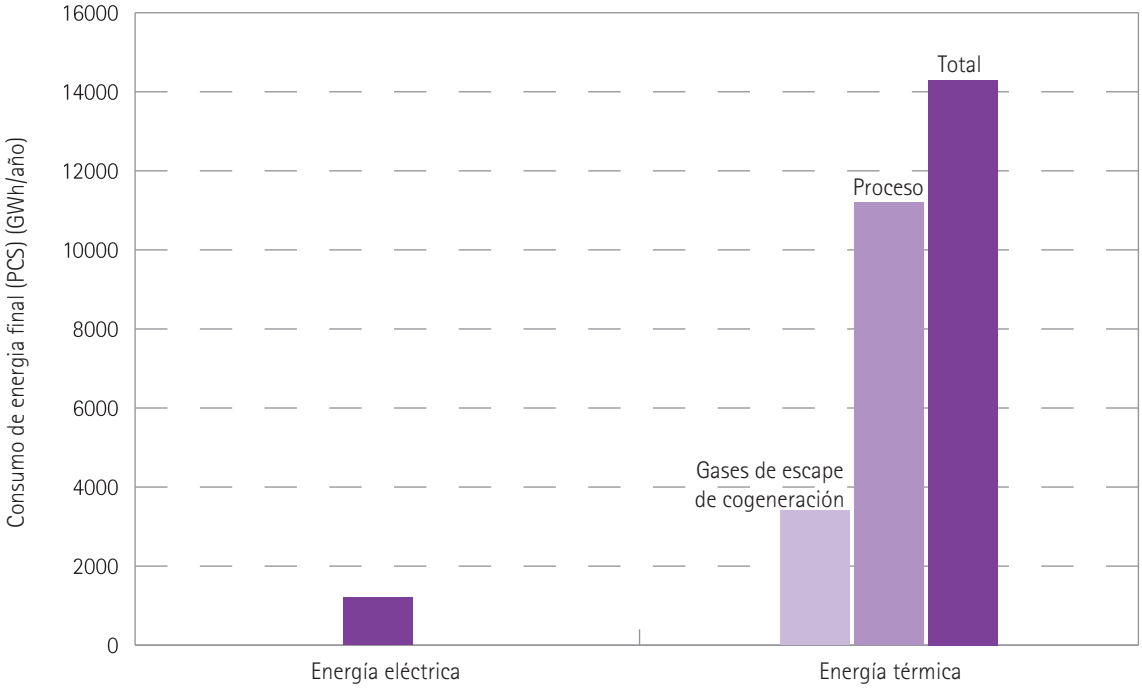


Figura 25 Consumo de energía eléctrica y térmica (demanda de energía final) en el sector de fabricación de baldosas cerámicas en el año 2008 (Fuente: ASCER).

Los valores mostrados anteriormente se han representado porcentualmente en la figura 26.

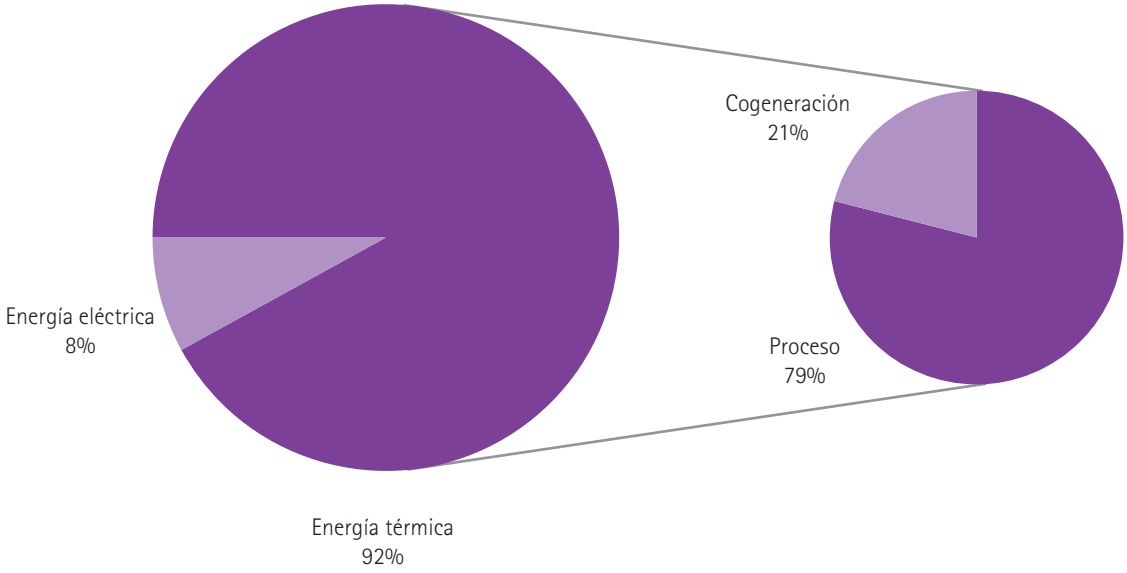


Figura 26 Distribución de la demanda de energía final en el sector de fabricación de baldosas cerámicas en el año 2008 (Fuente: ASCER).

El consumo energético en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas (demanda de energía final) asciende a 15.528 GWh/año, lo que equivale a 1.338,62 ktep/año. Por tanto, el consumo energético de este sector productivo supone el 43 % del consumo de los sectores industriales de la Comunitat Valenciana, en 2008.

4.1.2 Emisiones de dióxido de carbono

Las emisiones de dióxido de carbono generadas durante la fabricación de baldosas cerámicas se dividen en dos grupos (según la Decisión 2007/589/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establecen las directrices para el seguimiento y la notificación de emisiones de gases de efecto invernadero):

- Emisiones de combustión: son las emisiones producidas durante la reacción exotérmica de combustión entre un combustible fósil y oxígeno.
- Emisiones de proceso: son las emisiones que se producen como resultado de las reacciones de descomposición de los carbonatos presentes en las materias primas durante la etapa de cocción.

La cantidad de carbonatos presente en las materias primas es función del tipo de composición cerámica. Así, las composiciones de azulejo suelen presentar contenidos en carbonatos situados entre el 10 % y el 15 % en peso, mientras que las de gres tienen un contenido en carbonatos inferior al 5 %. Las composiciones de gres porcelánico presentan un contenido en carbonatos inferior al 0,5 %.

La distribución de la producción por tipo de producto y el contenido medio en carbonatos de la composición de cada producto, se muestran en la tabla 4. Los carbonatos presentes en las composiciones utilizadas en la fabricación de baldosas son carbonatos de calcio (calcita), de magnesio (magnesita) o de calcio y magnesio (dolomita).

Producto	Producción (millones m^2)(*)	Contenido en carbonatos (%)
Azulejos	204,2	13
Pavimento esmaltado	175,1	3,2
Gres porcelánico	97,9	< 0,5
Baldosas extrudidas	17,6	0,5
TOTAL	494,7	-----

(*) Estimada a partir de los datos de 2007.

Tabla 4 Producción por tipo de producto en 2008 y contenido medio en carbonatos.

En la tabla 5 se muestran las emisiones de CO_2 totales en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, en España, en el año 2008, distinguiendo entre emisiones debidas a la combustión del gas natural y las debidas a las reacciones de descomposición de carbonatos. Las emisiones debidas a la combustión se

han dividido a su vez en emisiones procedentes del gas natural consumido destinado a la producción de energía térmica en forma de gases calientes.

En la realización de los cálculos se ha considerado el factor de emisión (56 tCO_2/TJ y el poder calorífico del gas natural (38,79 MJ_{PCI}/m^3_N) indicados en el Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero (1990 – 2005).

En la tabla 5 no se han incluido las emisiones de dióxido de carbono asociadas al consumo de gas natural de los sistemas de cogeneración no destinado a la generación de energía térmica, que se estiman en torno a 274.000 t CO_2/año. Este valor se obtiene considerando un rendimiento térmico medio de los sistemas de cogeneración del 68 %.

		Emisiones de CO_2 (miles de t CO_2)
Combustión	Etapas del proceso	2.020
	Cogeneración	592
	Total	2.612
Proceso		277
TOTAL		2.889

Tabla 5 Distribución de las emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, en el año 2008.

La distribución de las emisiones de dióxido de carbono que se muestra en la tabla anterior se ha representado gráficamente en la figura 27.

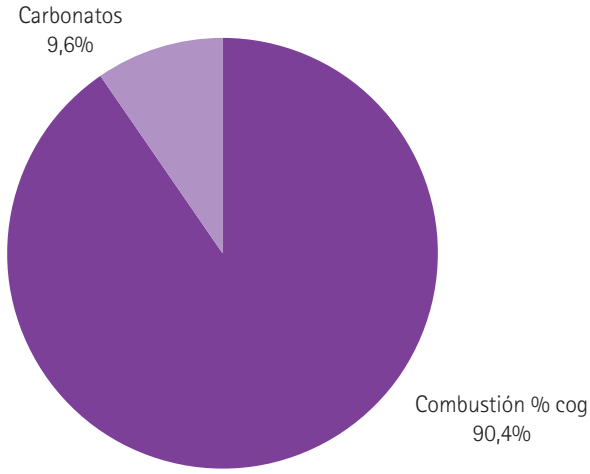


Figura 27 Distribución de las emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas (Año 2008).

Como puede observarse en la figura anterior, el 90 % de las emisiones de dióxido de carbono generadas en el sector cerámico se deben a la combustión de gas natural, utilizado para la generación de energía térmica y para la cogeneración. El restante 10 % corresponde a las emisiones debidas a la descomposición de los carbonatos durante la etapa de cocción. De estas emisiones, la mayor parte se deben a la fabricación de azulejos, por ser el tipo de composición con mayor contenido en carbonatos.

Las emisiones de dióxido de carbono debidas a la fabricación de baldosas cerámicas en España han aumentado considerablemente en los últimos años. Desde 1985 hasta el año 2008, las emisiones totales han aumentado un 58 %, como se observa en la figura 28, debido al incremento de producción que ha tenido lugar en este mismo periodo de tiempo.

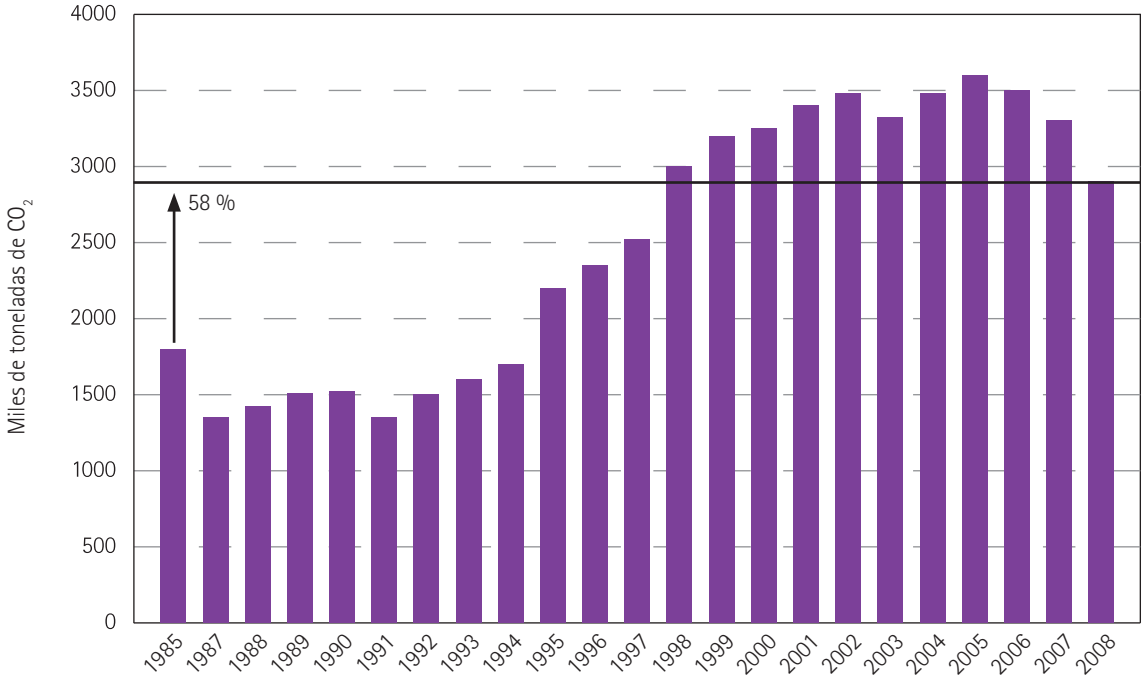


Figura 28 Evolución de las emisiones de dióxido de carbono.

Sin embargo, las emisiones específicas de dióxido de carbono, es decir, la cantidad (kg) de CO_2 emitida por cada metro cuadrado de baldosa fabricada, se ha reducido en un 52 % en el mismo periodo de tiempo, como se muestra en la figura 29.

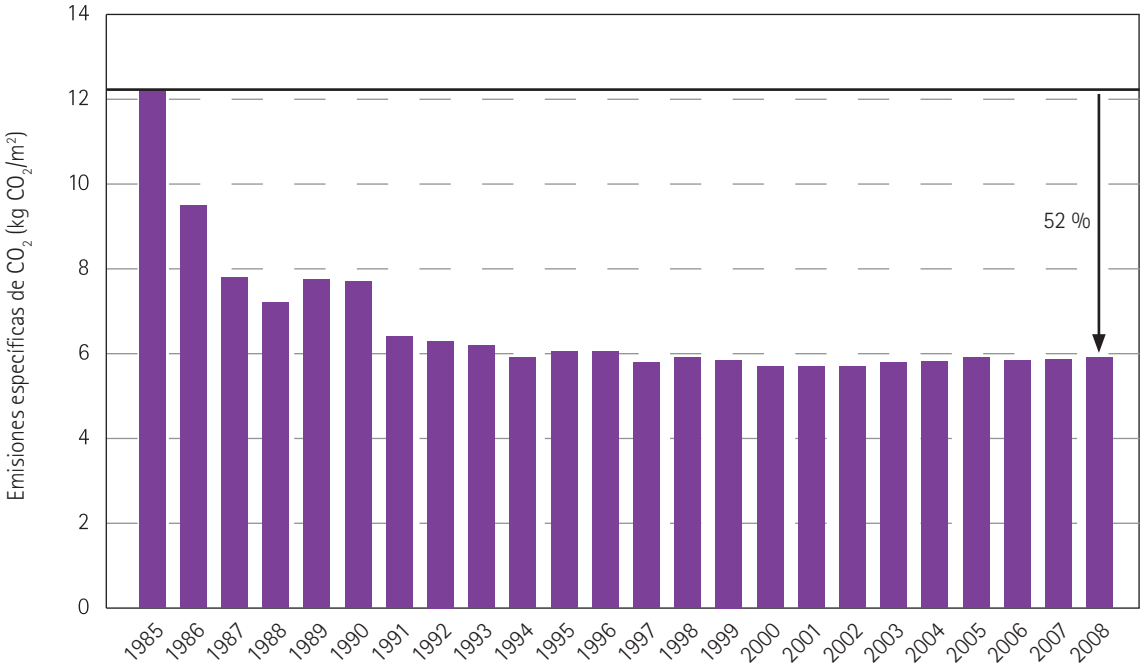


Figura 29 Evolución de las emisiones específicas de dióxido de carbono.

Esta reducción ha sido posible debido a los cambios tecnológicos que se han producido en el sector en las dos últimas décadas, orientados a realizar un uso más eficiente de la energía.

4.2 Consumo de energía en el sector cerámico

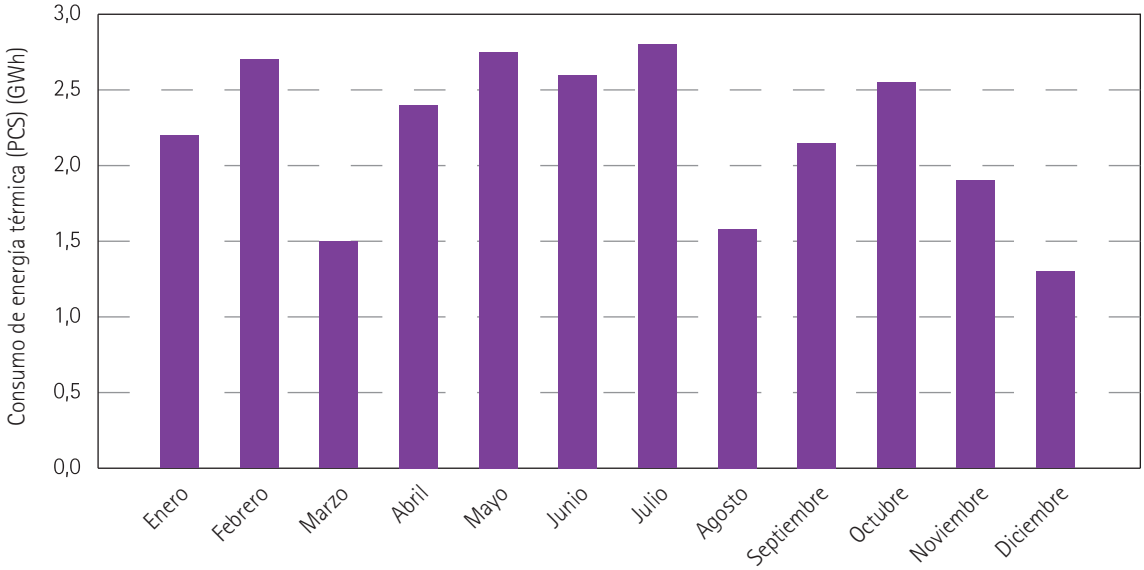
La cantidad de energía eléctrica y térmica consumida por las empresas depende del tamaño y de la producción de cada empresa. Así, las empresas que tengan una producción mayor consumirán, por lo general, más energía. Sin embargo, el consumo energético depende también del producto fabricado, de la tecnología utilizada en cada caso, del grado de automatización del proceso productivo, y de la gestión de la producción llevada a cabo por la empresa.

A modo de ejemplo, en la figura 30 se muestra el consumo mensual de energía térmica y eléctrica de una empresa de tamaño medio, cuya actividad es la fabricación de baldosas cerámicas. La producción total anual de esta empresa es de aproximadamente 1,5 millones de m2 de baldosas cerámicas conformadas por prensado.

El funcionamiento de las empresas fabricantes de baldosas cerámicas suele ser continuo a lo largo del año, con cortas paradas de producción, que coinciden generalmente con las vacaciones de Semana Santa, verano y Navidad.

El consumo energético de las empresas del sector cerámico depende de la tecnología utilizada, de su grado de automatización y de la gestión que se realice de la producción (pocos lotes grandes o muchos lotes pequeños, paradas en fin de semana, etc.). A continuación se indican los valores medios de consumos energéticos por unidad de producto fabricado para tres tipologías de empresas diferentes:

- Empresas fabricantes de gránulo atomizado como producto único.
- Empresas fabricantes de baldosas cerámicas conformadas mediante prensado, que no disponen de sistemas de cogeneración.
- Empresas fabricantes de baldosas cerámicas conformadas mediante extrusión, que no disponen de sistemas de cogeneración.



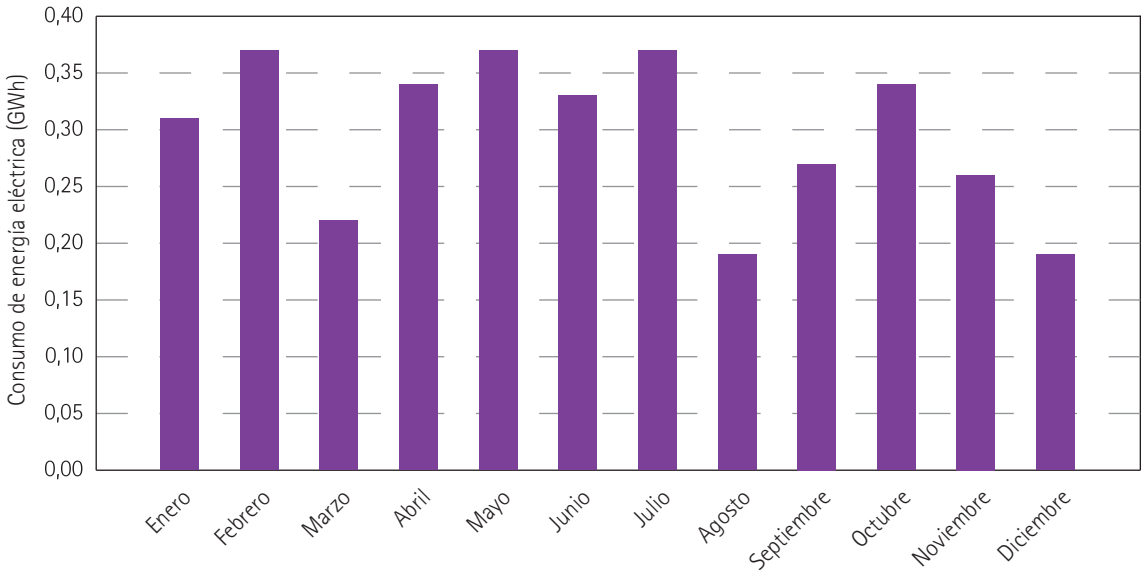


Figura 30 Distribución mensual del consumo de energía térmica y eléctrica en una empresa fabricante de baldosas cerámicas de tamaño medio.

Tipo de empresa	Consumo energía eléctrica		Consumo energía térmica (PCS)	
Fabricante de gránulo atomizado	51,8 kWh/t sólido seco		452 kWh/t sólido seco	
Fabricante de baldosas cerámicas prensadas	109 kWh/t cocido	2,13 kWh/m^2 cocido	960 kWh/t cocido	18,8 kWh/m^2 cocido
Fabricante de baldosas cerámicas extrudidas	160 kWh/t cocido		2.109 kWh/t cocido	

Tabla 6 Consumos específicos medios de energía en empresas del sector cerámico.

En general, el proceso de fabricación de baldosas cerámicas consume más energía térmica que eléctrica. Los valores medios obtenidos en los tres tipos de empresas del sector cerámico consideradas indican que el 90 % de la energía consumida corresponde a energía térmica (en forma de gas natural) y el restante 10 %, corresponde al consumo de energía eléctrica.

Debido a que el coste de la energía eléctrica es superior al coste de la energía témica, la distribución de los costes energéticos difiere de la distribución de consumos indicada anteriormente, tal y como se muestra en la figura 31 y en la figura 32.

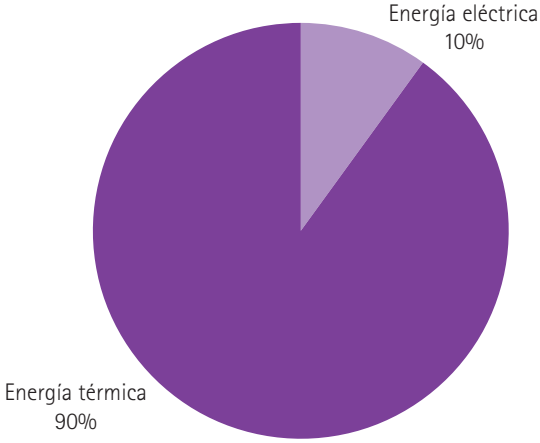


Figura 31 Distribución del consumo de energía eléctrica y térmica en empresas del sector cerámico.

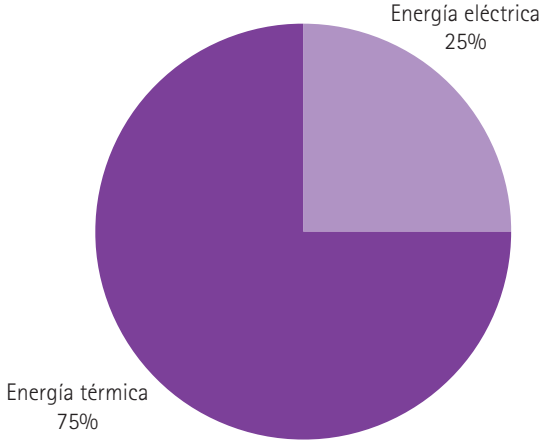


Figura 32 Distribución del coste de energía eléctrica y térmica en empresas del sector cerámico.

Para calcular la distribución de los costes, se han considerado las tarifas de energía eléctrica y térmica del año 2008, que se muestran en la tabla 7.

	Coste de la energía (€/kWh)
Energía eléctrica	0,08962
Energía térmica (PCS)	0,03118

Tabla 7 Coste de la energía térmica y eléctrica considerada en los cálculos.

4.3 Consumo de energía y emisiones de CO_2 en las etapas del proceso de fabricación de baldosas cerámicas

Todas las etapas del proceso de fabricación de baldosas consumen energía eléctrica, así como las instalaciones auxiliares: compresores, sistemas de depuración, iluminación, etc. El consumo de energía térmica sólo se produce en las etapas que comprenden el secado del producto o la cocción.

El consumo específico medio de energía desglosado por etapas del proceso de fabricación de baldosas prensadas, se muestra en la tabla 8, referido a la masa de producto cocido. El consumo térmico se ha calculado considerando el Poder Calorífico Superior del combustible, y que los equipos funcionan en estado estacionario.

Etapa del proceso	Consumo eléctrico (kWh/t)	Consumo térmico (PCS) (kWh/t) (*)
Atomización	7,3 ± 0,3	510 ± 23
Prensado	15,0 ± 1,3	-
Secado	11,2 ± 0,9	125 ± 12
Molienda esmaltes	4,1 ± 0,4	-
Esmaltado	9,2 ± 0,9	-
Cocción	20,7 ± 1,2	793 ± 14
Pulido y rectificado	46,4± 8,6	-
Clasificación	3,0 ± 0,4	-
Sistemas de depuración	14,4 ± 1,0	-
Alumbrado	6,5 ± 0,5	-
Generación de aire comprimido	12,6 ± 1,2	-
Oficinas	3,1 ± 0,6	-

(*) Funcionamiento en estado estacionario

Tabla 8 Consumos específicos medios de energía por etapas, en el proceso de fabricación de baldosas prensadas (kWh/t).

El consumo específico medio de energía térmica desglosado por etapas del proceso de fabricación de baldosas extrudidas, se muestra en la tabla 9, referido a la masa de producto cocido. El consumo térmico se ha calculado considerando el Poder Calorífico Superior del combustible, y que los equipos funcionan en estado estacionario.

Etapa del proceso		Consumo térmico (PCS) (kWh/t) (*)
Secado		67 ± 14
Cocción	En horno túnel	777 ± 61
	En horno de rodillos	1.145 ± 132

(*) Funcionamiento en estado estacionario

Tabla 9 Consumo específico medio de energía térmica por etapas en el proceso de fabricación de baldosas extrudidas (kWh/t).

En la tabla 10 se muestran los valores medios de emisiones de dióxido de carbono generadas en las etapas de atomización, secado y cocción de baldosas cerámicas conformadas mediante prensado, distinguiendo en el caso de las emisiones de cocción, entre las emisiones generadas durante la combustión y las emisiones de proceso.

Etapa del proceso	Emisiones de combustión (*)	Emisiones de proceso (*)	TOTAL
Atomización	93 ± 4	-	93 ± 4
Secado	23 ± 2	-	23 ± 2
Cocción	145 ± 3	25 ± 4	170 ± 5
TOTAL	261 ± 9	25 ± 4	286 ± 11

(*) Funcionamiento en estado estacionario

Tabla 10 Emisiones medias de dióxido de carbono desglosadas por etapas, en la fabricación de baldosas prensadas (kg CO_2/t cocido).

En la tabla 11 se muestran los valores medios de emisiones de dióxido de carbono generadas en las etapas de secado y cocción de baldosas cerámicas conformadas mediante extrusión.

Etapa del proceso		Emisiones (*)
Secado		12 ± 2
Cocción	En horno túnel	142 ± 11
	En horno de rodillos	209 ± 24

(*) Funcionamiento en estado estacionario

Tabla 11 Emisiones medias de dióxido de carbono desglosadas por etapas, en la fabricación de baldosas extrudidas (kg CO_2/t cocido).

En las figuras 33 y 34 se muestra la distribución del consumo de energía térmica y de las emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas.

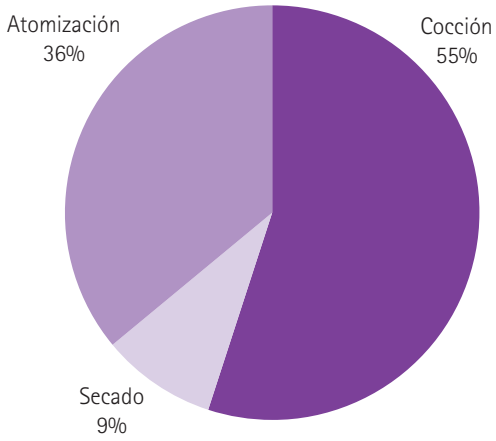


Figura 33 Distribución del consumo de energía térmica en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas.

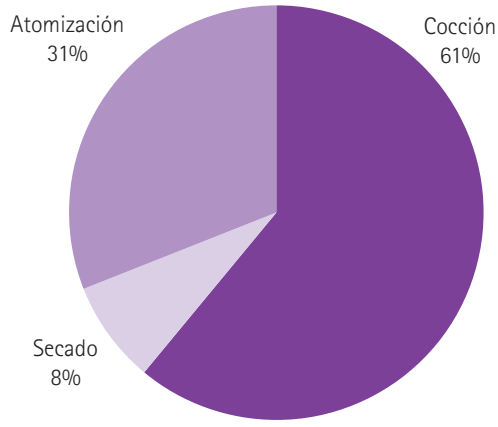


Figura 34 Distribución de las emisiones de CO_2 en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas.

En la figura 35 se muestra la distribución del consumo de energía eléctrica en las principales etapas del proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas.

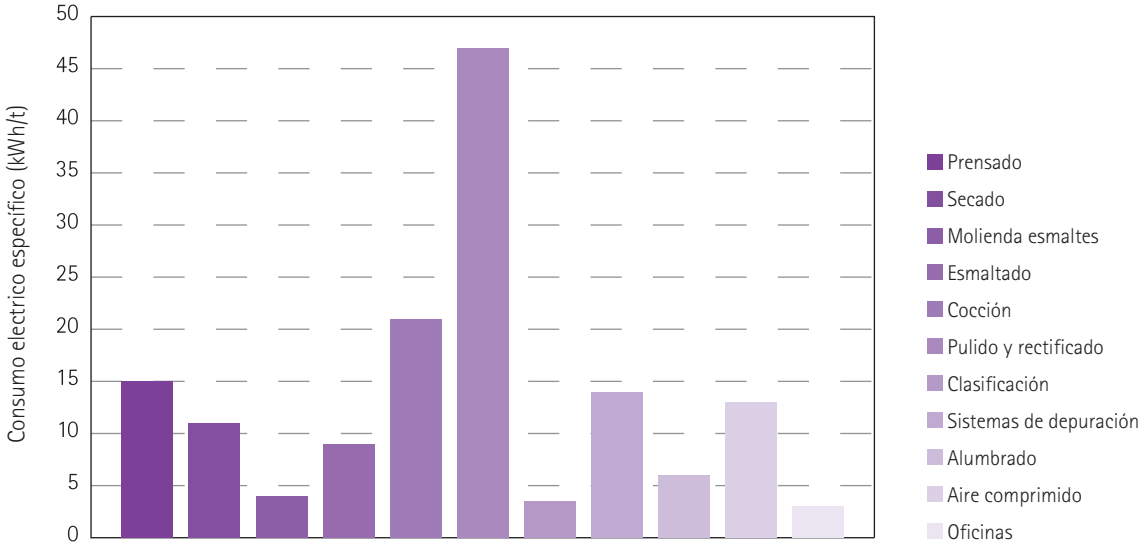


Figura 35. Consumo específico eléctrico medio por etapas.

5.

Descripción de los equipos de proceso

5 Descripción de los equipos de proceso

Desde el punto de vista del consumo de energía térmica, los equipos más relevantes en el proceso productivo de baldosas cerámicas son los secaderos y el horno.

El proceso más implantado en la actualidad, como ya se ha comentado anteriormente, es el de preparación de las materias primas vía húmeda, conformado por prensado y cocción del soporte y el esmalte en una única etapa, es decir, por monococción.

Por esta razón, en esta guía se centrará la atención principalmente en tres tipos de instalaciones: los secaderos de suspensiones cerámicas por atomización, los secaderos de soportes de baldosas, y los hornos monoestrato de rodillos.

5.1 Secaderos por atomización

Cuando en la etapa de preparación de las materias primas la molienda se realiza en molinos vía húmeda, la suspensión obtenida se seca en secaderos por atomización. Mediante este sistema se consigue reducir la humedad de la suspensión de materias primas en agua (barbotina) desde aproximadamente un 40 % a un 6 %, obteniéndose unos gránulos más o menos esféricos, huecos en su interior. Estas propiedades le confieren al producto atomizado una elevada fluidez, facilitando la operación posterior de llenado de los moldes de las prensas.

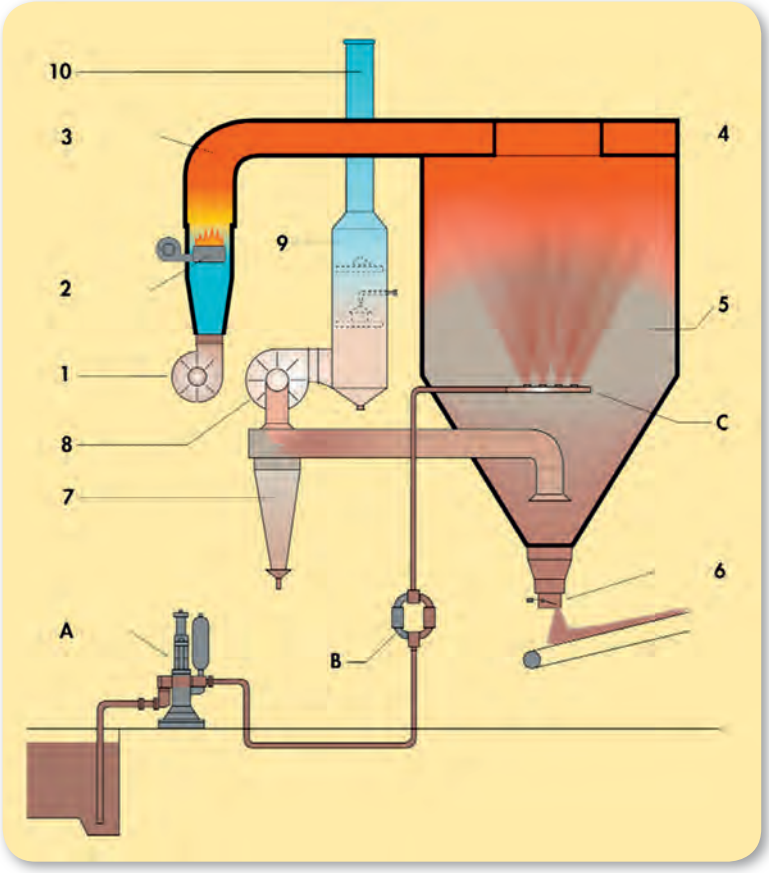
Los gases calientes de secado pueden provenir de un quemador o ser los gases de escape de una turbina de cogeneración. La temperatura de secado requerida está entre 500 °C y 600 °C. Si se utilizan los gases de escape de un sistema de cogeneración, se utiliza un quemador de post-combustión que permita satisfacer las necesidades térmicas del atomizador. La corriente de gases calientes se introduce en el atomizador por la parte superior impulsada por un ventilador y se pone en contacto en contracorriente con la barbotina.

La barbotina, procedente de las balsas de almacenamiento de las plantas de molienda, es impulsada mediante bombas y, tras pasar por una serie de filtros, es pulverizada en el interior del atomizador por una serie de boquillas y lanzas radiales.

Las finas gotas obtenidas se secan muy rápidamente al entrar en contacto con los gases a alta temperatura, y se obtiene un sólido granulado que, por gravedad, cae en el fondo de la torre donde se descarga en una cinta que lo transporta a los silos de almacenamiento. En la figura 36 puede verse un esquema de la instalación.

Los gases húmedos salen del atomizador y son conducidos hacia un sistema de depuración de gases para eliminar las partículas en suspensión que arrastran. El sistema de depuración suele consistir en una serie de ciclones separadores, cuyo número depende de la potencia de la instalación. En estos equipos se consigue abatir la parte gruesa del polvo en suspensión. La corriente de aire que sale de los ciclones se hace circular por otro sistema de depuración que separa las partículas más finas. Éste puede ser un sistema de depuración vía húmeda o un filtro de mangas, siendo la primera opción la más frecuente, puesto que permite depurar corrientes con una mayor cantidad

de partículas. Finalmente, la corriente de gases depurada es expulsada al exterior a través de la chimenea.



1.- Ventilador
2.- Quemador de vena de aire
3.- Conducción aislada
4.- Entrada de gases calientes
5.- Torre de secado
6.- Punto de descarga
7.- Ciclones separadores
8.- Ventilador
9.- Abatidor vía húmeda
10.- Chimenea salida al exterior
A.- Bombas de alimentación
B.- Filtros
C.- Boquillas de pulverización

Figura 36 Esquema de un atomizador
(Fuente: www.sacmi.com).

La producción de polvo atomizado de un atomizador es muy variable y depende tanto del tamaño como del diseño de éste. En el mercado existen atomizadores con un rango de capacidades productivas entre 5.000 kg/h y 50.000 kg/h.

La capacidad de un atomizador suele expresarse mediante la capacidad evaporativa, es decir, la cantidad de agua máxima que puede evaporarse en un periodo de tiempo. El rango de capacidades evaporativas es muy amplio, desde 4.000 l/h hasta 20.000 l/h, para los atomizadores más grandes.

Las necesidades térmicas del proceso de atomización son muy elevadas, puesto que se requiere una corriente de gases a alta temperatura. En el sector cerámico, tanto si los gases calientes provienen de un quemador convencional como de una turbina de cogeneración, el combustible utilizado es gas natural.

El consumo específico medio para el proceso de atomización es de 476 kWh/tonelada atomizado seco (PCS).

La atomización suele realizarse en continuo durante 24 horas al día, sobre todo si los gases calientes de secado provienen de una turbina de cogeneración, puesto que las paradas y arrancadas acortan la vida de ésta.

5.2 Secaderos de baldosas

El polvo granulado obtenido en los atomizadores contiene entre un 5 y un 7 % de agua, para facilitar la posterior etapa de conformado por prensado. Una vez prensados los soportes de las piezas, y antes de la etapa de decoración, es necesario someterlos a un proceso de secado con dos objetivos: dotarlos de la suficiente resistencia mecánica para que la etapa de decoración pueda realizarse sin problemas de roturas, y aumentar su temperatura para que el esmaltado se realice correctamente. Una temperatura de los soportes demasiado baja reduce la capacidad del soporte de eliminar el agua del esmalte, tanto por succión como por evaporación, dando lugar a problemas de curvaturas en crudo, encharcamiento de las piezas, balsas, pegados en las decoraciones, etc. Por el contrario, si la temperatura es demasiado alta pueden aparecer grietas o pinchados en el vidriado.

A continuación se resumen las principales características de los secaderos más utilizados en el sector cerámico.

5.2.1 Secaderos verticales

En la actualidad, el 75 % de los procesos de secado de soportes de baldosas se realiza en secaderos verticales. En estos secaderos una corriente de gases calientes procedentes, generalmente, de la combustión de gas natural, se pone en contacto directo con las piezas prensadas para evaporar el agua que contienen.

En la figura 37 se muestra la fotografía de un secadero vertical.

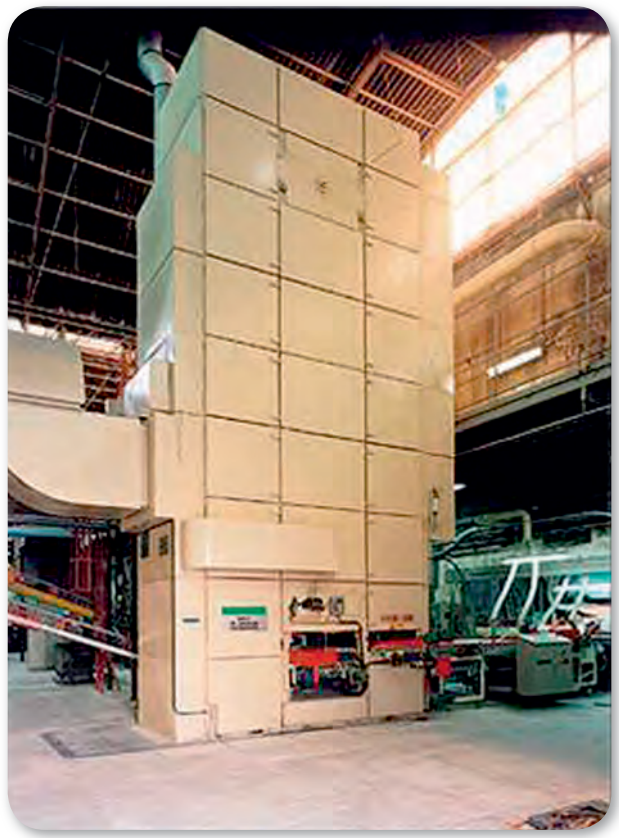


Figura 37 Secadero vertical (Fuente: www.sacmi.com).

En los secaderos verticales, las piezas se colocan sobre planos de rodillos metálicos, formando entre ellos unidades denominadas habitualmente "cestones". Los cestones se mueven por el interior del secadero verticalmente, entrando el conjunto cestón-pieza en contacto con los gases calientes en contracorriente. La carga y descarga de las piezas se realiza automáticamente: las piezas secas se descargan, dejando un plano de rodillos libre que vuelve a llenarse de piezas recién prensadas. Este plano sube como una noria, iniciando así su ciclo de secado.

La duración del ciclo de secado en secaderos verticales es de unos 60 minutos, y la temperatura de los gases suele ser entre 100 y 200 ºC. En cualquier caso, las condiciones de secado deben ajustarse en cada momento a las características del producto: grosor, tipo de soporte, tipo de esmalte, etc.

En algunos casos, se emplean motores de gas como sistemas de cogeneración y los gases calientes de escape se introducen en el secadero. Sin embargo, las relativamente bajas necesidades térmicas de este proceso, si lo comparamos con las etapas de cocción y atomización, hacen que ésta no sea una práctica habitual. La situación más común es que parte de los gases de secado se recirculen en el mismo proceso, y alcancen la temperatura de secado requerida mediante la instalación en la propia conducción de uno o dos quemadores de tipo vena de aire. Una parte de los gases de secado húmedos salen del secadero a través de la chimenea y se vierten al exterior.

En las figuras 39 y 40 se observa de manera esquemática el funcionamiento de un secadero vertical.

El consumo específico medio de la operación de secado de baldosas cerámicas en un secadero vertical es de unos 116 kWh/t de producto seco (PCS).

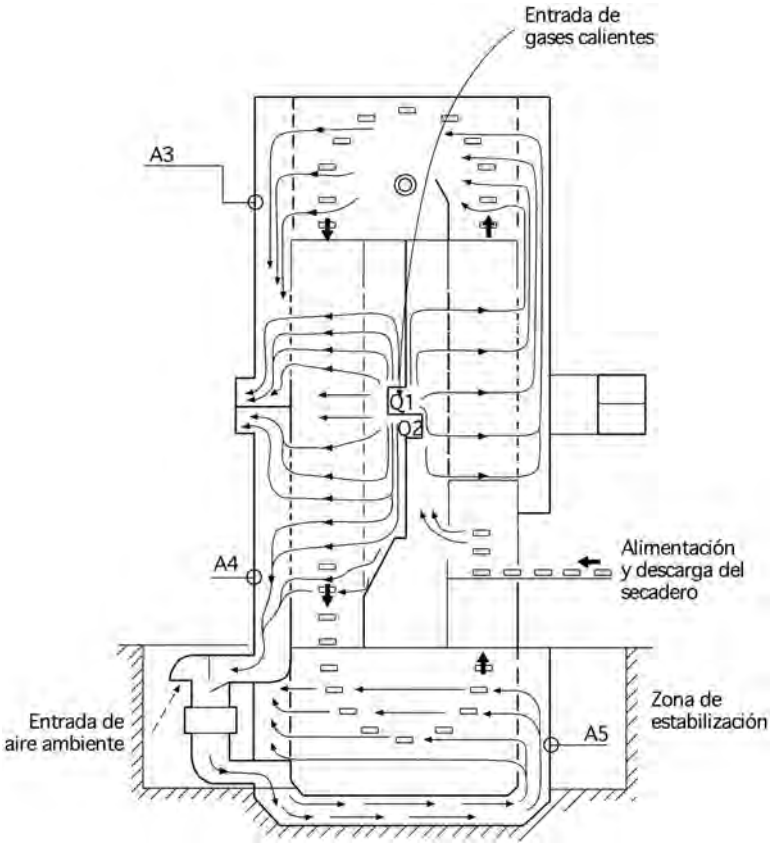


Figura 38 Esquema de un secadero vertical (Por cortesía de Sacmi Imola S.C.).

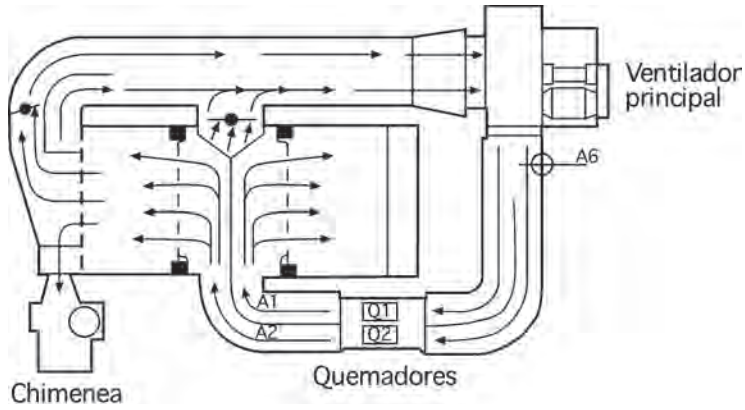


Figura 39 Vista en planta de un secadero vertical, mostrando en detalle el esquema de recirculación de los gases (Fuente: www.sacmi.com).

5.2.2 Secaderos horizontales

La estructura de los secaderos horizontales es similar a la de los hornos de rodillos. Las piezas se introducen en uno o varios planos en el interior del secadero y se mueven horizontalmente en su interior por encima de los rodillos metálicos. Una serie de quemadores laterales calientan una corriente de gases hasta unos 350 ºC, y ésta se hace circular en contracorriente con las piezas.

Figura 40 Secadero horizontal de cinco canales (Fuente: www.sacmi.com).

Figura 41 Secadero horizontal de un único canal (Fuente: www.sacmi.com).

El secado de baldosas cerámicas es menos frecuente que se realice en secaderos horizontales, puesto que el espacio que ocupa un secadero horizontal es mayor que el que ocupa uno vertical. Sin embargo, los secaderos horizontales permiten un mejor control de las curvas de temperatura y humedad de secado de las piezas. Con los secaderos horizontales se consigue una importante reducción del ciclo de secado (de aproximadamente 1 hora a unos 25 minutos), a costa de trabajar a temperaturas más elevadas, de modo que el secado se realiza de manera más brusca (Mallol, G. et al, 2001).

En ambos secaderos es posible la recuperación de aire caliente procedente de instalaciones de cogeneración.

El ritmo productivo de los secaderos de baldosas, tanto horizontales como verticales, está ligado al de las prensas y al de las líneas de esmaltado.

5.2.3 Secaderos situados antes del horno

Una situación muy frecuente en las empresas es disponer de un secadero a la entrada del horno de rodillos para eliminar el agua higroscópica residual de las piezas. El objetivo es reducir la humedad de las piezas y aumentar su temperatura, para facilitar el calentamiento de las piezas en la primera fase del ciclo de cocción.

En la figura 42 se muestra una fotografía de un secadero en la entrada de un horno.

El secadero consiste en un armazón metálico a través del cual circulan las piezas colocadas en vagonetas. El aporte de energía térmica es una corriente de gases calientes, que normalmente procede de la chimenea de enfriamiento del horno. El secadero, también llamado prehorno, trabaja habitualmente a temperaturas cercanas a 100 ºC.

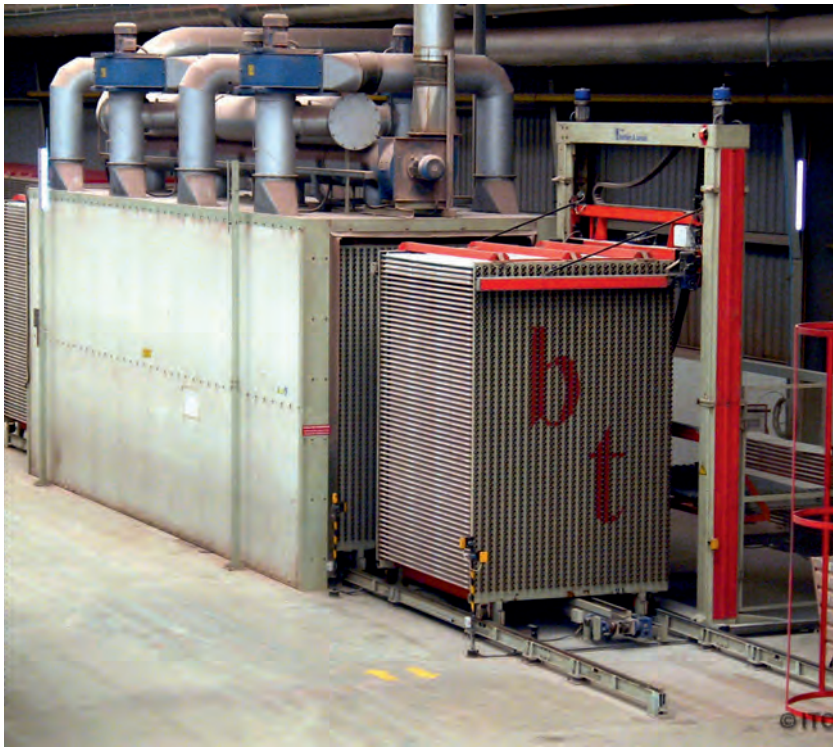


Figura 42 Secadero prehorno (Por cortesía de Cerámica l'Alcalatén, S.A.).

5.3 Hornos de cocción de baldosas

La mayoría de las baldosas cerámicas se cuecen en la actualidad en hornos continuos de rodillos. Estos hornos están constituidos por una cámara con uno o dos planos de rodillos de material refractario por el que circulan las piezas desde un extremo al otro. La longitud del horno es variable y depende de la capacidad productiva de éste, aunque suelen medir alrededor de 100 metros.

La temperatura de cocción y la duración del ciclo son muy variables y dependen del tipo de soporte, de la composición, del formato de las baldosas, de la producción del horno, del tipo de esmalte, etc. En general puede decirse que la temperatura máxima de cocción se sitúa entre 1.100 y 1.200 ºC, y la duración del ciclo de cocción entre 40 y 70 minutos.

La etapa de cocción es determinante en la fabricación de baldosas cerámicas, pues de las reacciones que se producen durante la cocción dependen en gran medida las características finales del producto. Para evitar defectos en el producto final, es necesario que las reacciones de cocción se produzcan de forma gradual, de acuerdo con un plan previamente establecido que se conoce con el nombre de "curva de cocción" o "diagrama de cocción", en el que se establece la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

La forma típica de una curva de cocción es la que aparece en la figura 43.

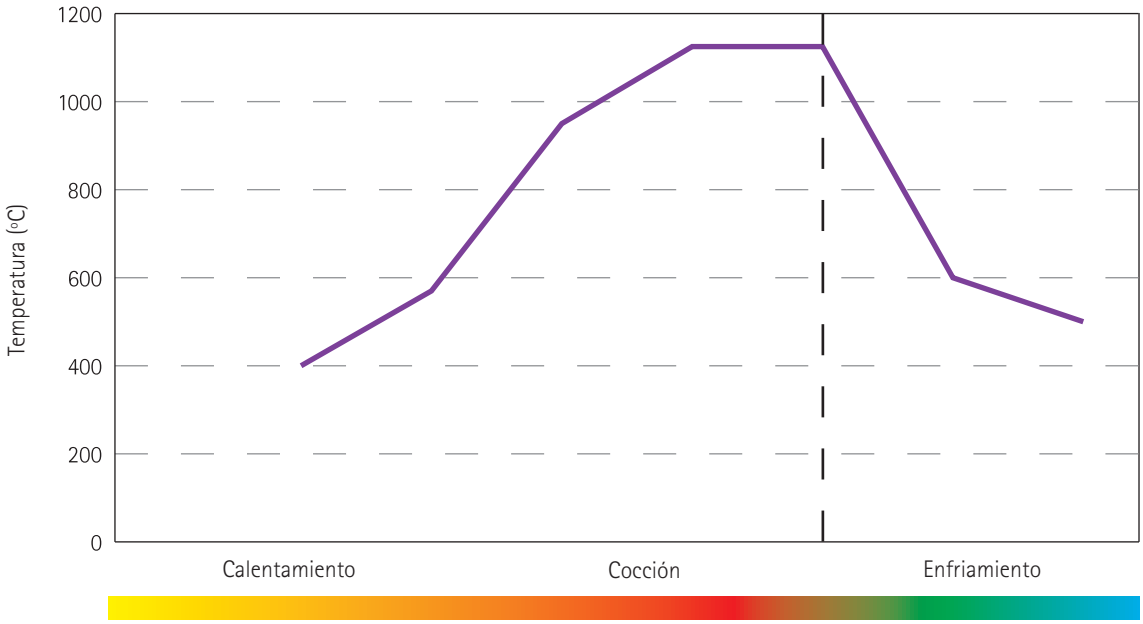


Figura 43 Diagrama temperatura-tiempo de un ciclo típico de cocción.

Sobre esta curva general de cocción se producen modificaciones en función del producto que se desee fabricar, el tipo de esmalte aplicado, las decoraciones incorporadas, el espesor y formato de las piezas, etc, pero la cocción de materiales cerámicos siempre presenta unas etapas comunes:

- Calentamiento, también llamado precalentamiento en el argot industrial. En esta primera etapa se elimina la humedad residual de las piezas procedente del proceso de esmaltado, se oxida la materia orgánica presente, se desarrolla la deshidroxilación de los minerales arcillosos, y se produce la descomposición de los carbonatos en las piezas de azulejo.

- Cocción. En esta fase se producen las principales transformaciones físico-químicas, en un intervalo que va desde los 800 – 900 ºC hasta la temperatura máxima de cocción; se produce una reducción de la porosidad y por lo tanto, la contracción de las piezas gresificadas y la formación de silicoaluminatos de calcio en el caso de las piezas con soporte poroso.
- Enfriamiento. Este periodo se inicia cuando finaliza el aporte de calor. La rapidez del enfriamiento viene limitada por la transformación del cuarzo a los 573 ºC, que da lugar a un importante cambio de volumen que puede originar grietas.

Cada una de las etapas descritas anteriormente se realiza en una zona del horno con unas condiciones de temperatura, presión, y contenido en oxígeno determinadas, para garantizar que todas las reacciones se produzcan correctamente y se obtenga un producto final sin defectos y con las características finales requeridas.

En la figura 44 se muestra una fotografía del cuadro de control de un horno de rodillos, y de la salida de las baldosas cerámicas. El cuadro de control es el sistema que permite realizar las regulaciones necesarias en las condiciones de funcionamiento del equipo.

En un horno monoestrato de rodillos pueden distinguirse, por tanto, las siguientes zonas:

- Zona de calentamiento

  A la salida del prehorno o secadero de boxes, las piezas se introducen inmediatamente en el horno de rodillos de manera automática. Es durante esta etapa cuando se produce la desgasificación del cuerpo cerámico, para que luego en la fase de máxima temperatura o de cocción no aparezcan defectos en el producto como hinchamientos, burbujas, pinchados, porosidad del esmalte, tonos, etc.

  El intervalo habitual de temperatura que comprende esta etapa es desde temperatura ambiente hasta 900 ºC, aunque depende del tipo de soporte a cocer y del tipo de esmalte.

  Durante el calentamiento tienen lugar diversas transformaciones en el material, como son la transformación alotrópica del cuarzo "en cuarzo", la pérdida de grupos OH en las arcillas, y

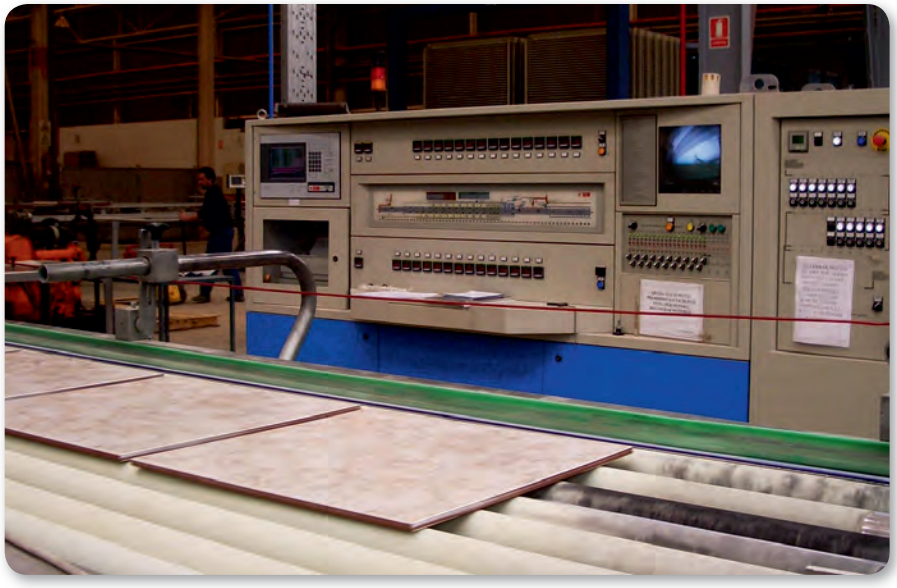


Figura 44 Cuadro de control de un horno de rodillos para la cocción de baldosas cerámicas (Por cortesía de Roig Cerámica, S.A.).

la descomposición de los carbonatos, cuando están presentes en la composición. Todas estas reacciones químicas hacen que las piezas tengan que soportar una serie de tensiones internas debido a los desprendimientos de gases, cambios de volumen, etc., que en caso de superar la resistencia mecánica del material, ocasionarían su rotura.

- Zona de máxima temperatura o zona de cocción

  Esta etapa comprende desde 900 ºC hasta la temperatura máxima de cocción. Es principalmente en esta zona donde la baldosa adquiere las características físicas y estéticas finales (dimensiones, planaridad, tono, etc.).

  Esta zona, al igual que la de calentamiento, está dotada de quemadores alojados en las paredes laterales del horno.

  El final de la zona de cocción está delimitado por una barrera física, constituida por un muro transversal que secciona el canal de cocción por encima y por debajo del plano de rodillos. De este modo se controla la influencia sobre la zona de cocción de la posterior zona de enfriamiento.

- Zona de enfriamiento rápido

  En el enfriamiento rápido, un conjunto de conducciones con numerosas perforaciones introducen aire frío por encima y por debajo del plano de los rodillos. El objetivo es disminuir la temperatura de las piezas una vez se ha completado la cocción, desde la temperatura máxima hasta unos 600 ºC, justo por encima de la temperatura a la que se produce la transformación alotrópica del cuarzo.

  En esta zona es donde se produce el acoplamiento entre el esmalte y el soporte, que incide especialmente sobre la planaridad de las piezas.

Figura 45 Zona de cocción de un horno de rodillos (Por cortesía de Zirconio, S.A.).

Figura 46 Zona en enfriamiento rápido en un horno de rodillos.

- Zona de enfriamiento lento

  Es la zona en la que se produce la transformación del cuarzo β a cuarzo α a 573 °C. Con esta transformación se produce una contracción de la baldosa cerámica, por lo que es necesario que se produzca de forma homogénea para evitar tensiones que podrían derivar en roturas.

  El intervalo de temperaturas correspondientes a la zona de enfriamiento lento está comprendido entre 600 y 450 °C.

  El intercambio de calor se produce de manera indirecta, es decir, el aire frio no entra en contacto con las piezas sino que circula a través de unos tubos ubicados en esta zona del horno.

- Zona de enfriamiento final

  En esta última zona del horno el objetivo es reducir al máximo la temperatura del producto, una vez superado el punto crítico de la transformación del cuarzo.

  Un sistema de soplado de aire frío introduce, de nuevo, aire ambiente por encima y por debajo del plano de los rodillos.

Los gases calientes resultantes de la operación de cocción se emiten a la atmósfera por dos focos emisores. Los humos procedentes de la zona de precalentamiento y cocción, se emiten al exterior por una chimenea que se encuentra a la entrada del horno y los de las zonas de enfriamiento, por una chimenea que se encuentra a la salida del horno. En algunos casos existen dos chimeneas de enfriamiento.

En la figura 48 se ha representado de forma esquemática un horno de rodillos:

Además de la curva de temperatura, la determinación de los perfiles de presión estática y contenido en oxígeno en la cámara de cocción es fundamental para establecer las condiciones de funcionamiento de un horno.

Figura 47 Zona de enfriamiento final y conducciones de extracción.

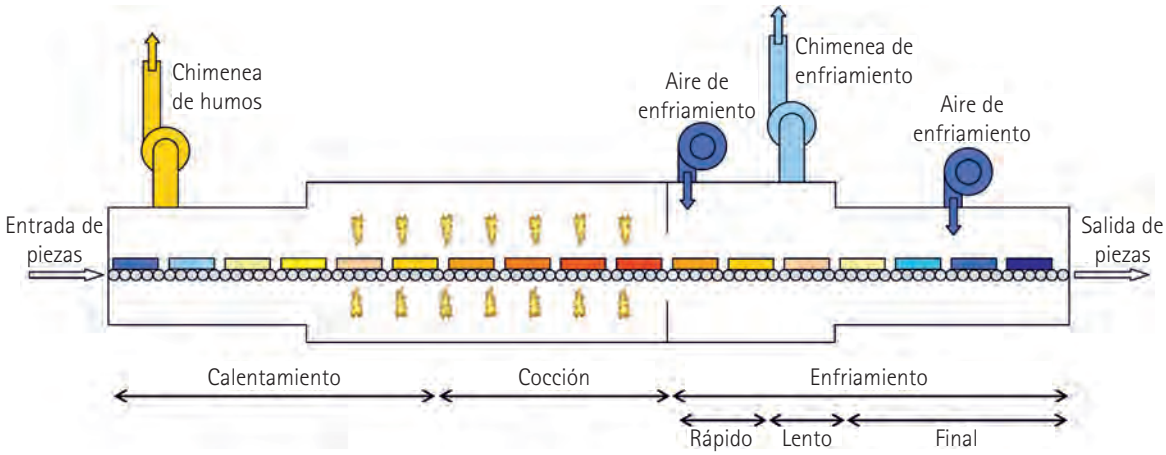


Figura 48 Esquema de un horno de rodillos.

En los perfiles de presión estática se observa siempre un punto de presión máxima que separa las zonas de influencia de los ventiladores de aspiración de humos y de enfriamiento, y por tanto, determina dos sentidos de circulación de los gases en el horno. Los cambios de presión modifican las condiciones de circulación de los gases en el interior del horno, y por tanto, las temperaturas. Unos valores de presión estática elevados indican mayor homogeneidad de temperatura en el interior del horno, pero también menor tiempo de vida del material refractario debido al ataque de elementos volátiles.

Por el contrario, si la presión estática es demasiado baja, por cualquier orificio o grieta del horno se producirá la entrada de aire parásito, lo cual provocará un cambio en la atmósfera del horno (temperatura y contenido en oxígeno) en el punto donde se produzca esta entrada.

El punto de presión máxima se sitúa habitualmente al inicio de la zona de enfriamiento. De este modo se produce el paso de una pequeña cantidad de gases de enfriamiento, ya calentados, a la zona

de cocción, con lo que se aprovecha su contenido energético. Si la cantidad de gases que pasan de enfriamiento a cocción es excesiva, puede desestabilizar a los quemadores de cocción.

La curva de contenido en oxígeno está asociada a la curva de temperatura y al perfil de presiones estáticas. La determinación del porcentaje de oxígeno en un lugar de la zona de enfriamiento próximo a la zona de cocción, informa acerca del sentido de flujo de los gases.

En la figura 49 se observa una curva de contenido en oxígeno, junto con la curva de temperatura.

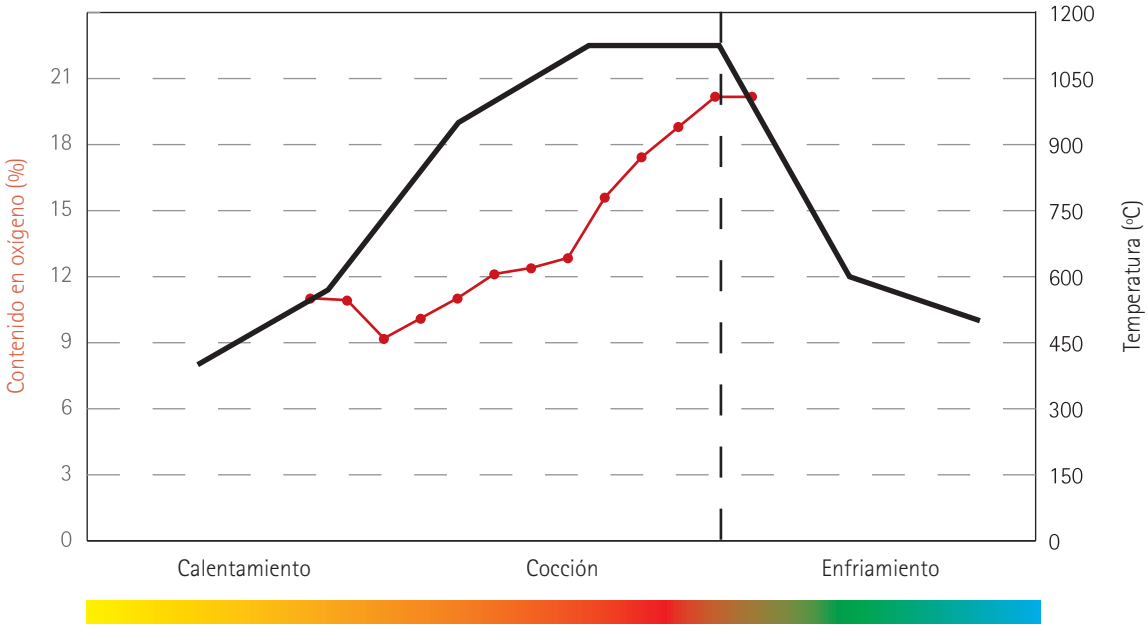


Figura 49 Curva de temperatura y curva de contenido en oxígeno.

En la zona de enfriamiento circula aire ambiente, por lo que el contenido en oxígeno debe ser 20,9 %. Un porcentaje en oxígeno menor, indicaría que parte de los gases de cocción están pasando a la zona de enfriamiento.

La situación óptima sería que justo al final de la zona de cocción, el contenido en oxígeno fuese también del 20,9 %, pues esto sería indicativo de que la máxima presión está en la zona de enfriamiento, y una parte del aire de enfriamiento está pasando a la zona de cocción.

El punto de menor contenido en oxígeno se encuentra en la zona de precalentamiento y coincide con la zona donde los quemadores trabajan a mayor potencia.

En general, se aconseja que el contenido en oxígeno mínimo en la atmósfera del horno no sea inferior al 8 %, pues un contenido menor dificultaría la completa oxidación de la materia orgánica y podría dar lugar a defectos como el "corazón negro". No obstante, y en función del producto procesado, es posible operar con un contenido en oxígeno mínimo inferior. La reducción del contenido en oxígeno se logra disminuyendo la cantidad de aire comburente en los quemadores, es decir, reduciendo el exceso de aire en la combustión. Esto conlleva un ahorro energético, pues los quemadores deben calentar menos volumen de aire.

El calor necesario para realizar la cocción de las piezas es aportado por quemadores repartidos a lo largo de las paredes laterales del horno. Estos quemadores suelen ser quemadores de alta velocidad, de

mezcla en cabeza, y funcionan con gas natural como combustible y aire como comburente. Disponen de un sistema de regulación de la cantidad de aire y gas que llega al quemador, que permite alcanzar la temperatura de consigna en cada caso.

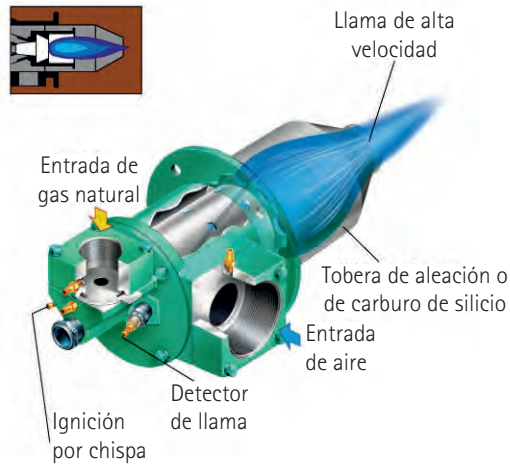


Figura 50 Quemador jet o de alta velocidad (Fuente: www.eclipsenet.com).

Al tratarse de hornos no muflados, el contacto de los gases de combustión con el producto es directo, lo cual mejora la transmisión de calor por convección. Esto hace que se reduzca el consumo energético, disminuya la duración del ciclo de cocción y aumente la flexibilidad de los hornos, en relación a los utilizados anteriormente en la fabricación de baldosas cerámicas.

La producción aproximada de un horno de tamaño medio es de 4.000 kg/h (unos 5.000 m^2/día), aunque existen en el mercado hornos de capacidades productivas muy diversas. El consumo específico medio de la operación de cocción de baldosas cerámicas en un horno de rodillos es de unos 793 kWh/t de producto cocido (PCS).

5.4 Otras instalaciones de combustión

Aunque los principales equipos consumidores de energía térmica empleados en la fabricación de baldosas cerámicas son los descritos anteriormente, en ocasiones se utilizan también otras instalaciones que también consumen energía térmica. A continuación se describen brevemente estas instalaciones.

5.4.1 Secaderos de producto rectificado

La tendencia actual en algunos productos es realizar una última etapa de corte, pulido y/o rectificado. En algunos casos, se realiza un pulido de la superficie de las baldosas para lograr un acabado brillante, en otros, se procede a rectificar los bordes para conseguir baldosas de un mismo calibre y eliminar el bisel, y a veces se realizan ambas operaciones sobre el mismo producto. Estas operaciones se realizan mediante el uso de abrasivos y de fresas diamantadas y en el proceso se utiliza agua como refrigerante.

Como consecuencia del empleo de agua, las baldosas absorben cierta humedad que debe ser eliminada antes del empaquetado. Los secaderos utilizados pueden ser tanto horizontales como verticales, y presentan características similares a los secaderos utilizados para secar los soportes crudos.

Los gases calientes necesarios para el secado pueden provenir de la combustión de gas natural en quemadores, o ser una corriente recuperada del aire de enfriamiento de los hornos de cocción. En este último caso, el consumo térmico del secadero es nulo.

Las temperaturas de secado dependen del tipo de material a secar, pero oscilan entre 120 ºC y 200 ºC.

5.4.2 Hornos de cocción de piezas especiales y hornos de tercer fuego

La cocción de piezas especiales y piezas decoradas en segundo, tercer y cuarto fuego, se realiza en hornos de rodillos de características similares a los utilizados en la cocción de baldosas cerámicas.

Los ciclos de cocción y las temperaturas a las que se someten las piezas deben estar acordes con las tecnologías de decoración aplicadas. Por lo general, los ciclos son más cortos y las temperaturas menores que durante la primera cocción conjunta del soporte con el esmalte.

6.

La combustión en la industria cerámica

6 La combustión en la industria cerámica

Hasta finales de los años 70, los combustibles líquidos como el fuelóleo fueron los empleados mayoritariamente en la fabricación de baldosas cerámicas. Posteriormente empezó a introducirse en el sector el gasóleo y los gases licuados de petróleo (GLP), por las ventajas tecnológicas y medioambientales que presentan frente al fuelóleo.

A principios de la década de los 80, debido a la entrada en servicio de los primeros tramos de gasoducto en la zona de Castellón, se empezó a utilizar gas natural como combustible en los sectores de fabricación de baldosas y fritas cerámicas. En pocos años el uso del gas natural se extendió a casi todas las empresas de fabricación de productos cerámicos de la zona.

En la actualidad, con una red de distribución de gas natural en España muy extensa, la gran mayoría de las industrias de fabricación de baldosas y fritas cerámicas utilizan gas natural como combustible. No obstante, en las empresas en las cuales no existe distribución canalizada de gas natural se sigue utilizando GLP (butano y propano, principalmente). En algunas industrias cerámicas españolas, sobre todo de fabricación de ladrillos o tejas, se utilizan combustibles líquidos tipo fuelóleo o gasóleo, e incluso combustibles sólidos como biomasa, carbón o coque de petróleo, pero en la fabricación de baldosas cerámicas el uso de estos combustibles líquidos y sólidos es insignificante.

6.1 Comparación del uso de los diferentes combustibles

A continuación se resumen los principales aspectos de la utilización de los distintos tipos de combustibles en la fabricación de baldosas cerámicas.

6.1.1 Aspectos tecnológicos

Las principales modificaciones tecnológicas introducidas con la utilización de combustibles gaseosos frente a los líquidos en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas son:

- Cambios en la tecnología de secado y cocción de baldosas cerámicas, permitiendo el uso de equipos de llama directa sin comprometer la calidad del producto final y favoreciendo la transmisión de calor.
- Cambio del tipo de hornos, reduciendo la duración y el número de ciclos de cocción y aumentando la productividad de las instalaciones.
- Reducción del consumo energético, asociado al cambio de tecnología: sustitución de la bicocción tradicional por monococción.
- Posibilidad de usar instalaciones de cogeneración utilizando gas natural como combustible, lo que disminuye el consumo de energía primaria.

6.1.2 Aspectos medioambientales

El comportamiento medioambiental de los diferentes combustibles puede compararse mediante los factores de emisión obtenidos por unidad energética utilizando aire como comburente. Estos factores pueden calcularse fácilmente a partir de la composición en peso o molar del combustible.

En la tabla 12 se recogen los factores de emisión por unidad energética (MJ), de CO_2 y SO_2, para dos combustibles líquidos utilizados anteriormente en el sector, (fuelóleo y gasóleo), y para los utilizados en la actualidad, propano y gas natural.

	Factor de emisión (g/MJ)	
	CO_2	SO_2
Fuelóleo nº1	79	1,244
Gasóleo C	74	0,093
Propano	60	0,022
Gas natural	51	0,002

Tabla 12 Factores de emisión por unidad energética (Fuente: Mallol, G. et al., 2001).

La sustitución de combustibles líquidos, sobre todo fuelóleo, por combustibles gaseosos, propano o gas natural, redujo drásticamente las emisiones de óxidos de azufre y de forma importante (sobre el 30 %) las emisiones de dióxido de carbono.

El comportamiento medioambiental del propano y del gas natural es bastante similar, aunque el gas natural debido a su mayor proporción de hidrógeno/carbono y a su menor contenido en azufre presenta una menor emisión específica de CO_2 y de SO_2.

La emisión de SO_x y de partículas no sólo depende de la composición del combustible, también depende del tipo de comburente (aire u oxígeno), tipo de quemador, temperatura del proceso, etc. En líneas generales:

- Los combustibles gaseosos (propano y gas natural) reducen prácticamente en un 100 % la emisión de partículas sólidas en los gases de combustión.
- La emisión relativa de NO_x se reduce notablemente al utilizar gas natural en sustitución de los combustibles líquidos, especialmente con respecto al fuelóleo.

Además de los aspectos medioambientales comentados anteriormente, las mejoras tecnológicas derivadas de la sustitución de combustibles líquidos por gaseosos, tienen como consecuencia las siguientes mejoras medioambientales adicionales:

- Disminución de las emisiones de compuestos de flúor.

  La disminución de la duración y número de los ciclos de cocción reduce las emisiones de aquellas

sustancias cuya emisión depende del tiempo de permanencia del producto a una temperatura determinada, como son algunos compuestos de flúor.

- Disminución del volumen de gases de combustión.

  La disminución del consumo energético que conlleva el cambio de tecnología también tiene como efecto indirecto una reducción del caudal de gases de combustión. En caso de requerirse un sistema de depuración de los gases de combustión, los equipos necesarios serían de menor tamaño.

- Disminución de la temperatura de rocío de los gases de combustión.

  La disminución de la temperatura de rocío evita los problemas de corrosión en las instalaciones y favorece la posibilidad de recuperación energética de los gases de combustión de los hornos y secaderos.

- Disminución de las emisiones de CO_2 por metro cuadrado producido en la cocción.

  La emisión de CO_2 ha disminuido desde una media de 12 kg de CO_2/m^2 en los años 80 utilizando la técnica de bicocción tradicional y fuelóleo como combustible, hasta valores en torno a 5,8 kg de CO_2/m^2 en la actualidad, utilizando hornos de rodillos, monococción y gas natural, lo que implica una reducción de las emisiones gaseosas del 52 % (ver figura 29).

6.2 Poder calorífico de un combustible

El poder calorífico de un combustible es la energía desprendida en su combustión referida a la unidad de masa o volumen.

La determinación del poder calorífico se lleva a cabo en una bomba calorimétrica, o en un equipo similar. Los métodos calorimétricos consisten en quemar una cantidad conocida de combustible y determinar de forma experimental la cantidad de calor producida a través de la energía térmica ganada por un líquido, generalmente agua, que dependiendo del método utilizado, puede estar contenida en un recipiente o permanecer en continua circulación durante el proceso.

Figura 51 Calorímetro isoperibólico y detalle de la bomba calorimétrica para la determinación del poder calorífico de un combustible (Fuente: ITC).

En estos equipos, los productos de la combustión quedan a temperatura ambiente, y por tanto el vapor de agua formado durante la reacción de combustión condensa, cediendo su calor latente de condensación al agua del calorímetro. No obstante, generalmente en los procesos industriales el agua no se condensa, por tanto el poder calorífico en estas condiciones es menor que el determinado en el calorímetro.

Por esa razón se establecen los conceptos de:

- Poder calorífico superior (PCS): calor de combustión incluyendo el calor latente de vaporización del agua.
- Poder calorífico inferior (PCI): calor de combustión no incluyendo el calor latente de vaporización del agua.

El poder calorífico inferior es, desde el punto de vista técnico, el que mejor representa las condiciones de operación industriales, es decir, el valor real de la energía involucrada en el proceso. Sin embargo, desde el punto de vista económico el precio por unidad energética se suele asignar al poder calorífico superior, por lo que en los cálculos económicos, habitualmente, el consumo se refiere a este concepto.

6.3 Combustión de combustibles gaseosos

En la combustión industrial es fundamental conocer la mezcla de comburente y combustible a utilizar para poder controlar y optimizar el proceso según los requisitos exigidos en cada momento.

En la práctica industrial, el tipo de combustión más habitual es la combustión completa, perfecta u oxidante, donde la reacción de combustión se produce con exceso de comburente, bien sea oxígeno o aire. Cuando la combustión se realiza sin exceso de comburente, ésta se denomina estequiométrica. Por el contrario, la reacción es incompleta o reductora cuando en los gases de combustión existen compuestos parcialmente oxidados (CO, H_2, C, etc.).

En cerámica, en ocasiones, se realiza la combustión reductora de forma intencionada para conseguir determinados efectos especiales en los materiales, aunque su uso intenta evitarse para evitar problemas ambientales (emisiones de CO a la atmósfera, por ejemplo) y problemas en el ambiente laboral, ya que el CO es un gas tóxico por inhalación.

Conociendo la composición del combustible y el porcentaje de oxígeno en el comburente, puede calcularse el aire mínimo estequiométrico, es decir, el volumen de aire necesario por unidad de volumen de combustible para que se produzca la combustión de forma estequiométrica.

Habitualmente se suele trabajar con un exceso de comburente para asegurar la completa combustión del combustible en el corto espacio de tiempo en que la mezcla permanece en los quemadores.

La relación entre el volumen de aire realmente aportado y el volumen de aire estequiométricamente necesario, se conoce como índice de exceso de aire (n). Esta relación puede calcularse a partir de la determinación experimental del contenido en oxígeno de los humos de combustión y de las características del tipo de combustible empleado.

La determinación del índice de exceso de aire es fundamental para determinar la composición y el volumen de los humos de combustión. El volumen de humos mínimo es la cantidad de humos

generada en la reacción de combustión cuando ésta se produce en condiciones estequiométricas, es decir, cuando no hay defecto ni exceso de aire. Si la reacción se produce con exceso de aire, en la cantidad de humos de combustión hay que tener en cuenta el volumen de comburente en exceso que no ha reaccionado.

6.4 Características del propano y del gas natural

En la actualidad, prácticamente la totalidad de las empresas fabricantes de baldosas cerámicas utiliza gas natural como combustible, aunque el propano sigue siendo el combustible utilizado en aquellas empresas que no tienen acceso a la red de gas natural. A continuación se resumen las principales características de ambos combustibles.

6.4.1 Propano comercial

El propano y el butano son los dos gases más empleados en la industria bajo la denominación de GLP (gases licuados del petróleo), ambos gases se pueden encontrar de forma natural en los yacimientos de petróleo crudo o de gas natural, aunque mayoritariamente se obtienen del petróleo mediante la operación de refino.

El GLP más utilizado en la industria es el denominado propano comercial o simplemente propano. Aunque está compuesto fundamentalmente por dicho hidrocarburo, presenta otros compuestos en su composición como butano, etano, etc., además de los llamados mercaptanos, compuestos con un fuerte olor, introducidos artificialmente para detectar posibles fugas.

El propano comercial puede suministrarse canalizado, aunque normalmente se hace mediante camiones cisterna, almacenándose posteriormente en tanques aéreos o enterrados donde se encuentra a la presión de vapor correspondiente a la temperatura ambiente, y por tanto parcialmente licuado. Al consumir propano del tanque de la fase gaseosa, la fase líquida tiende a restablecer el equilibrio vaporizando una cantidad de líquido igual al gas que se ha extraído del recipiente, absorbiendo el calor de vaporización de la fase líquida. Por tanto, la cantidad de calor que llega a un tanque determina su denominada capacidad de vaporización natural. Para el consumo en industrias cerámicas en muchas ocasiones el caudal de gas requerido supera la capacidad de vaporización natural del tanque, y se requiere un sistema de vaporización adicional, para garantizar un caudal y una presión de suministro constante.

Para las empresas cerámicas la principal ventaja con respecto al gas natural es la posibilidad de disponer de un combustible gaseoso en puntos donde no se dispone de gasoducto de gas natural. Sin embargo, el precio del propano es mayor que el del gas natural.

En la tabla 13 se recogen las características químicas y físicas medias de un propano comercializado en España, aunque hay que tener en cuenta que la composición de los combustibles puede variar por diferentes razones como el origen, empresa que lo transforma y comercializa, etc.

		PROPANO COMERCIAL
Composición media (% en volumen)	Etano	0,4 %
	Propano	93,0 %
	Butano	6,2 %
	Isobutano	0,5 %
	Mercaptanos (odorizante)	1,5 g/m^3
Propiedades del líquido	Tensión de vapor a 2ºC	9 kg/cm^2
	Densidad a 20ºC	50,6 kg/m^3_N
Densidad del gas	Real	2,06 kg/ m^3_N
	Relativa al aire	1,59
Poder Calorífico	Superior	24.760 kcal/ m^3_N
		12.020 kcal/kg
	Inferior	22.760 kcal/ m^3_N
		11.050 kcal/kg
Combustión estequiométrica (m^3_N/ m^3_N gas)	Aire	24,2
	Humos secos	22,2
	Humos húmedos	26,3
Límites de inflamabilidad	Superior	10,0 %
	Inferior	2,2 %

Tabla 13 Características medias de un propano comercial (Fuente: Mallol, G. et al., 2001).

6.4.2 Gas natural

Se denomina gas natural al conjunto de hidrocarburos gaseosos formados principalmente por metano, que se obtiene de la naturaleza en los campos petrolíferos acompañando al crudo del petróleo (gas natural asociado) o acompañado únicamente por pequeñas cantidades de otros hidrocarburos o gases (gas natural no asociado). Los componentes que suelen acompañar al metano son etano, propano, butano y pequeñas proporciones de gases inertes como por ejemplo el nitrógeno. Aunque en origen la composición del gas natural puede ser bastante variable, las empresas suministradoras de gas natural deben realizar las mezclas y/o tratamientos apropiados (como por ejemplo desulfuración), para garantizar que el destinatario disponga de un gas con una composición dentro de unos márgenes relativamente estrechos.

El gas natural se suministra normalmente canalizado en fase gaseosa, ya que a temperatura ambiente no puede licuarse por tener una temperatura crítica muy inferior a la temperatura ambiente. El hecho de que el gas natural no se pueda licuar a temperatura ambiente dificulta el suministro a empresas que se encuentren ubicadas en las zonas donde no llega la red de distribución.

En estos casos, una alternativa al suministro de gas natural canalizado es el gas natural licuado (GNL), el cual se distribuye mediante camiones cisterna manteniendo el GNL a una temperatura de -160 ºC y a presión atmosférica, requiriéndose para su uso unas instalaciones de vaporización similares a las utilizadas cuando se consume propano. Este sistema de suministro sólo es viable cuando existen en las proximidades de los puntos de consumo plantas de almacenamiento de GNL.

En 2006 el gas natural supuso el 24 % del consumo de energía primaria en la UE; en 2008, el 24,3 % del consumo de energía primaria en España procedió del gas natural. En este mismo año, en la Comunitat Valenciana este valor ascendió al 32,4 % (AVEN, 2008).

		GAS NATURAL
Composición media (% en volumen)	Metano	90,0 %
	Etano	7,5 %
	Propano	1,5 %
	Butano	0,40 %
	Nitrógeno	0,60 %
	Azufre en el odorizante	6,0 mg/ m^3_N
Densidad del gas	Real	0,7955 kg/ m^3_N
	Relativa al aire	0,6153
Poder Calorífico	Superior	10.316 kcal/ m^3_N
	Inferior	9.317 kcal/ m^3_N
Combustión estequiométrica (m^3_N / m^3_N gas)	Aire	10,4
	Humos secos	9,3
	Humos húmedos	11,4
Límites de inflamabilidad	Superior	14,7 %
	Inferior	4,6 %

Tabla 14 Características medias del gas natural distribuido en la zona de Castellón (Fuente: Mallol, G. et al., 2001).

7.

Medidas de ahorro energético en los equipos de proceso

7 Medidas de ahorro energético en los equipos de proceso

7.1 Secaderos por atomización

7.1.1 Aumento del contenido en sólidos de la suspensión

Incrementar el contenido en sólidos de una suspensión implica reducir su contenido en agua. Si esta suspensión, como ocurre en el caso de las barbotinas cerámicas, va a ser sometida a un proceso de secado, interesa, desde el punto de vista energético, aumentar al máximo su densidad y reducir de este modo la cantidad de agua a evaporar.

Al aumentar el contenido en sólidos de una suspensión, no sólo aumenta su densidad, sino que también se incrementa la viscosidad y la tixotropía de la misma. La viscosidad de una suspensión es un parámetro que mide la facilidad con la que esta suspensión fluye al aplicar una fuerza sobre ella. La tixotropía es una medida del aumento de la viscosidad de una suspensión con el tiempo de reposo.

La viscosidad es una variable muy importante en la operación de descarga de los molinos discontinuos donde se preparan las suspensiones, pues si es excesiva puede llegar a impedir la descarga de los mismos. Además, la viscosidad debe ser adecuada para que el trasiego de la suspensión de las balsas al atomizador pueda realizarse sin problemas de bombeo.

Una tixotropía elevada provoca que la viscosidad de la barbotina aumente mucho cuando permanece un tiempo en las balsas de almacenamiento, dificultando posteriormente su bombeo hacia el atomizador.

El incremento del contenido en sólidos de la suspensión suele llevarse a cabo utilizando desfloculantes. Los desfloculantes son aditivos que facilitan la separación de las partículas de la suspensión, incrementando la fuerza eléctrica de repulsión entre ellas.

En la figura 52 se observa una curva donde se ha representado la variación de la viscosidad aparente de una suspensión con el contenido en desfloculante, así como la misma curva tras mantener la suspensión cinco minutos en reposo (línea discontinua). La figura 53 muestra las curvas de desfloculación de una suspensión preparada con diferentes contenidos en sólidos.

Del análisis de ambas figuras se desprende que el punto óptimo de trabajo se sitúa en el punto de mínima viscosidad de la curva de desfloculación, a un contenido en sólidos tan alto como nos permita el valor de viscosidad mínima de la curva.

Además de estudiar y optimizar el estado de desfloculación de una composición, si se busca aumentar el contenido en sólidos de la suspensión a atomizar es conveniente considerar también otras alternativas, como por ejemplo:

- Recuperar el material atomizado perdido en cintas transportadoras, vibrotamices, prensas, etc., así como el tiesto crudo, y adicionarlo a las balsas de barbotina tras un proceso de trituración y desleído. En este punto del proceso, donde el molino ya se ha descargado, pequeños incrementos de viscosidad no suponen un problema, siempre y cuando el bombeo de la barbotina pueda realizarse adecuadamente.
- Modificar la composición de las materias primas. Las arcillas más plásticas, con mayor superficie específica, son más difíciles de desflocular, de modo que si las sustituimos por otras menos

plásticas será posible trabajar con el mismo contenido en desfloculante a un mayor contenido en sólidos. Esta medida hay que considerarla con cuidado, pues afectará no sólo a la etapa de atomización, sino también al resto del proceso.

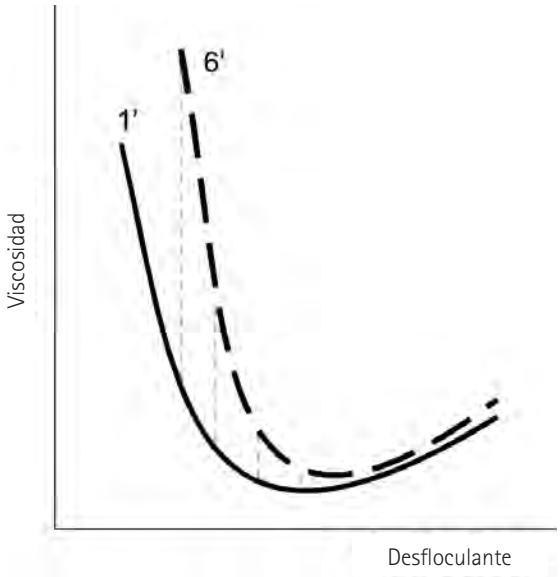


Figura 52 Curva de desfloculación y tixotropía de una suspensión cerámica.

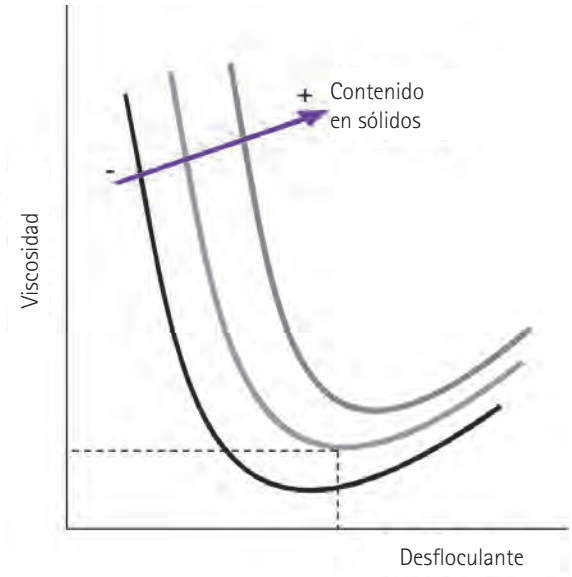


Figura 53 Influencia del contenido en sólidos en la curva de desfloculación.

El ahorro económico derivado del aumento del contenido en sólidos es consecuencia de la reducción de la cantidad de agua a evaporar. Además, al aumentar la densidad de la suspensión aumenta la producción de la instalación, pues se procesan más sólidos en el mismo periodo de tiempo.

En la tabla 15 se muestra el ahorro alcanzado al aumentar el contenido en sólidos de una suspensión. El consumo de energía se ha expresado respecto a la cantidad de producto atomizado producido (kWh/kg atomizado), referido al PCI del combustible. Para realizar la tabla se ha supuesto que el consumo inicial del atomizador, con un 58 % de contenido en sólidos, es de 0,657 kWh/kg atomizado, y que la humedad del polvo atomizado obtenido es del 6 %.

Contenido en sólidos (%)	Producción (kg atom./ kg agua evap.)	Consumo energético (PCI) (kWh/kg atom.)	Ahorro energético (%)
58	1,596	0,657	----
60	1,747	0,601	8,5
62	1,917	0,549	16,4
64	2,110	0,501	23,7
66	2,329	0,455	30,7
68	2,581	0,413	37,1
70	2,876	0,372	43,4
72	3,223	0,337	48,7

Tabla 15 Ahorro energético en un atomizador al incrementar el contenido en sólidos.

En la tabla 15 se observa la importancia del ahorro energético alcanzado, pues con un aumento del 2 % en el contenido en sólidos se logra un ahorro energético del 8,5 %.

El ahorro económico dependerá tanto del aumento del contenido en sólidos, como del aumento de consumo de desfloculante y del incremento de producción. En caso de que la empresa esté afectada por el Plan Nacional de Asignación de Emisiones, la reducción en el consumo energético repercutirá en una reducción de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, con la consiguiente repercusión en el balance económico derivado del comercio de derechos de emisión.

7.1.2 Incremento de la temperatura de los gases de secado

La energía de los gases calientes de secado viene determinada por el caudal de gases y por la temperatura de los mismos. Si se desea mantener constante el aporte energético al secadero, un aumento de la temperatura de los gases de entrada al atomizador implica una reducción de su caudal.

En la ecuación 1 se muestra el cálculo de la energía contenida en los gases calientes que entran al atomizador.

$$\Delta H_e = Q^0_{VC} \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \cdot (T_e - T_0) \qquad [1]$$

Donde:

ΔH_e: entalpía del aire caliente de entrada al atomizador (W)

Q^0_{VC}: caudal volumétrico de gases (m^3_N /s)

ρ_a: densidad de los gases (aire, 1,285 kg/m^3_N)

c_{pa}: capacidad calorífica de los gases (aire, 1.000 J/kgK)

T_e: temperatura de los gases calientes (K)

T_0: temperatura de referencia (273 K)

Si se reduce el caudal de entrada de los gases de secado, se reduce el caudal de gases en la chimenea del atomizador, para una misma cantidad de agua evaporada, de modo que las pérdidas de energía a través de la conducción de salida se reducen. Esto se cumple siempre que se mantenga constante la temperatura de salida de los gases del atomizador.

Así, el aumento de la temperatura de los gases de secado y la reducción de su caudal repercute en una reducción de las pérdidas de energía por la chimenea, de modo que aumenta el rendimiento del atomizador. Este aumento de rendimiento se puede utilizar bien para evaporar mayor cantidad de agua, es decir, para aumentar la producción, o bien para reducir el aporte de energía en la entrada del atomizador, manteniendo constante la producción.

Otra forma de evaluar el rendimiento del atomizador es calcularlo a partir de las temperaturas de entrada y salida de los gases, como muestra la ecuación 2.

$$\eta = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_{amb}} \cdot 100 \qquad [2]$$

Siendo:

η: rendimiento del atomizador (%)

T_s: temperatura de salida de los gases del atomizador (ºC)

T_{amb}: temperatura ambiente (ºC)

En esta ecuación se observa como al aumentar la temperatura de entrada, y mantener constante la de salida, aumenta el rendimiento del atomizador.

En la figura 54 se muestra el ahorro energético alcanzado en un atomizador al aumentar la temperatura de entrada de los gases, así como el rendimiento del mismo. La capacidad evaporativa de la instalación considerada es de 17.600 l/h. Se ha considerado que la cantidad de agua evaporada se mantiene constante, así como la temperatura de salida de los gases.

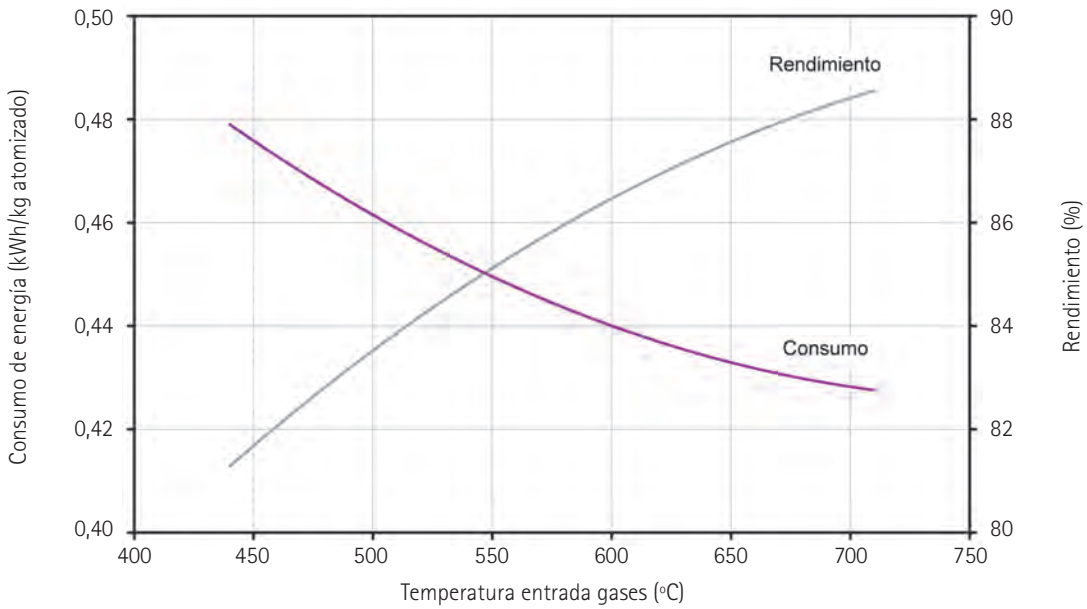


Figura 54 Ahorro energético y rendimiento del atomizador al aumentar la temperatura de entrada de los gases de secado.

El aumento de la temperatura de los gases de secado del atomizador tiene dos limitaciones. Por un lado, los materiales constructivos de la conducción y del atomizador tienen un límite para soportar elevadas temperaturas, de modo que es conveniente revisar la instalación si se plantea un incremento importante de la temperatura de trabajo.

Por otro lado, si se reduce el caudal de gases de secado al aumentar su temperatura, y se mantiene la cantidad de agua evaporada, los gases de salida están más húmedos, por lo que existe un mayor riesgo de condensaciones en las conducciones de salida, especialmente si se usan filtros de mangas como sistema de depuración de los gases.

7.1.3 Influencia de la temperatura de la suspensión

La energía total aportada a un atomizador proviene de los gases calientes y de la suspensión que se desea secar. Cuanta más energía contenga la suspensión, menor aporte de energía será necesario realizar con los gases calientes.

La energía de la barbotina depende tanto de su caudal como de su temperatura. El caudal viene fijado por la producción de la instalación, y la temperatura viene dada por las condiciones de trabajo en la etapa de molienda.

Incrementar la temperatura de la barbotina no es tarea fácil, pues se trata de un fluido denso que se procesa en grandes cantidades. Lo que sí parece más viable es aprovechar al máximo la temperatura de salida de la barbotina de los molinos, y evitar que se enfríe.

A igualdad del resto de parámetros, cuanto mayor sea la temperatura de la suspensión, menor será el consumo de energía en gases calientes de la instalación. En la tabla 16 se muestra el ahorro energético en un atomizador al incrementar en 5, 10 o 15 ºC la temperatura de la barbotina que se alimenta al mismo.

ΔT (ºC)	Ahorro (kcal/kg atomizado)	Ahorro·10^3 (kWh/kg atomizado)	Ahorro (%)
5	3,256	3,78	0,83
10	6,523	7,58	1,66
15	9,789	11,38	2,50

Tabla 16 Ahorro energético en función del incremento de temperatura de la barbotina.

CASO PRÁCTICO Nº 1:
Cálculo del ahorro energético y económico obtenido al incrementar la temperatura de la barbotina

La entalpía de la barbotina que se procesa en un atomizador se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta H_b = (m_b \cdot C_{pS} \cdot w_S) \cdot (T_b - T_0) + (m_b \cdot C_{pw} \ (1 - w_S)) \cdot (T_b - T_0)$$

Donde:

ΔH_b: *entalpía de la barbotina en la entrada del atomizador (W)*

m_b: *caudal másico de barbotina (kg barb/s)*

C_{pS}: *capacidad calorífica del sólido seco crudo (752 J/kg K)*

w_S: *contenido en sólidos de la barbotina (kg ss/kg barb)*

T_b: *temperatura de la barbotina (K)*

C_{pw}: *capacidad calorífica del agua (4.182 J/kg K)*

Al aumentar la temperatura de la barbotina desde T_1 hasta T_2, manteniendo el resto de parámetros constantes, aumenta su entalpía (desde ΔH_{b1} hasta ΔH_{b2}), de modo que se puede reducir el contenido en energía de los gases de secado en este mismo valor. El ahorro energético será:

$$A_{energía} = \Delta H_{b2} - \Delta H_{b1}$$

El ahorro económico se calcula a partir del ahorro en energía, el coste de la energía y el periodo de funcionamiento de la instalación, con la siguiente ecuación:

$$A_{económico} = A_{energía} \cdot P_{energía} \cdot t$$

Siendo:

$P_{energía}$, *la tarifa térmica (€/kWh)*

t, tiempo de funcionamiento de la instalación.

En la tabla 17 se muestra el ahorro energético obtenido utilizando las expresiones anteriores en una instalación de atomización. Los datos considerados son los siguientes:

Incremento de temperatura de la barbotina..... Desde 33 hasta 43 ºC

Capacidad evaporativa del atomizador..... 17.600 l/h

Caudal de barbotina..... 16,3 kg/s

Contenido en sólidos.....66,1 %

	T_b (ºC)	ΔH_b (kW)	$Ahorro_{energía}$ (kW)
Situación inicial	33	1.019	----
Situación final	43	1.331	312

Tabla 17 Ahorro energético en la instalación al calentar la suspensión.

En la tabla 18 se muestra el ahorro económico alcanzado para distintos costes de la energía térmica y periodos de funcionamiento.

Ahorro económico (€/año)		Tiempo de funcionamiento (h/año)		
		4.000	6.000	7.500
Coste energía térmica (€/kWh)	0,025	31.200	46.800	58.500
	0,030	37.440	56.160	70.200
	0,035	43.680	65.520	81.900
	0,040	49.920	74.880	93.600

Tabla 18 Ahorro económico obtenido en diferentes situaciones.

7.1.4 Sustitución de la molienda en discontinuo por la molienda en continuo

La preparación de las materias primas en molinos discontinuos consta de varias fases: carga del molino, molienda, y descarga de la suspensión obtenida.

Este modo de operación conlleva tiempos muertos de trabajo, pues mientras se carga y descarga el molino no se están molturando las materias primas.

La descarga de la suspensión se ha de realizar con el molino parado, lo cual conlleva que la barbotina permanezca en reposo durante unos minutos. Durante este tiempo, si la barbotina no está bien desfloculada, su viscosidad puede aumentar, pudiendo incluso impedir la descarga del molino, pues ésta se efectúa por gravedad.

En los molinos continuos, hay un movimiento constante de materia, tanto de entrada de materias primas como de salida de barbotina. La suspensión permanece durante todo el ciclo de molienda en movimiento, y se descarga sin necesidad de parar el molino, de modo que se puede trabajar con mayores viscosidades sin que ello repercuta en el trasiego de la barbotina.

En realidad, este aumento de viscosidad se realiza aumentando la densidad de la suspensión sin modificar el contenido en desfloculante. Este incremento de densidad lleva consigo no sólo un aumento de viscosidad sino también un aumento de la tixotropía de la barbotina. Si la tixotropía es excesiva, podría dificultarse en exceso el bombeo de la suspensión desde las balsas de almacenamiento hacia el atomizador.

En resumen, se trabaja con suspensiones bien desfloculadas, con el mayor contenido en sólidos posible que proporcione una viscosidad adecuada para su procesado.

El empleo de molienda continua en la preparación de las materias primas conlleva una reducción del consumo energético en el atomizador, pues se puede trabajar con suspensiones más densas. No obstante, esto siempre dependerá de la composición a molturar, de la calidad del agua de molienda, y del grado de molienda que se desee obtener.

Este modo de trabajo conlleva también otras ventajas, como son el aumento de la productividad de la instalación, y la mayor homogeneidad en las propiedades de la suspensión obtenida, consecuencia de la automatización del pesaje y dosificación de las materias primas en la entrada del molino.

En la figura 55 se muestra un molino continuo de preparación de materias primas.

Figura 55 Molino de materias primas de funcionamiento continuo.

Respecto al consumo de energía eléctrica, tan importante en esta sección del proceso productivo, destacar que es mayor en los molinos discontinuos que en los continuos, por las continuas paradas y arrancadas de los molinos, aunque depende del producto procesado, ya que no todos requieren el mismo tiempo de molienda.

7.1.5 Instalaciones de recuperación de calor en los atomizadores

El secado por atomización es una etapa que, como ya se ha comentado, requiere un gran aporte de energía térmica.

Habitualmente, estos gases provienen de un quemador de gas natural, que eleva la temperatura del aire ambiente hasta la de trabajo, pero existen alternativas para recuperar gases calientes procedentes de otras instalaciones del proceso que permiten un ahorro en el consumo de gas en el atomizador, pues sustituyen total o parcialmente al aire ambiente como comburente.

La recuperación de gases calientes procedentes de otros equipos del proceso permite la sustitución del aire ambiente empleado como comburente en el quemador por gases a mayor temperatura, siempre que éstos tengan un contenido en oxígeno superior al 16 %.

Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y los gases recuperados, y la proporción de aire sustituido, mayor será el ahorro de combustible en el quemador del atomizador.

Los gases residuales del proceso productivo de baldosas cerámicas con mayor temperatura proceden de las chimeneas de los hornos. La recuperación de los gases de la chimenea de enfriamiento puede realizarse de forma sencilla, dado que normalmente es una corriente constituida por aire caliente (20,9 % oxígeno) prácticamente exento de compuestos contaminantes. Esta situación se da siempre que la distribución de la presión estática de los gases en el interior del horno o curva de presiones sea la adecuada, como se verá más adelante.

Sin embargo, los gases de la chimenea de combustión pueden contener ciertos compuestos ácidos (ácido fluorhídrico [HF], ácido clorhídrico [HCl], óxidos de azufre [SO_x], etc.) u otros compuestos que pueden ocasionar problemas de corrosión en las conducciones, bien cuando baje la temperatura en momentos de parada, bien durante el funcionamiento habitual de las instalaciones.

Para poder aprovechar su contenido energético sin tener problemas de corrosión, existe la opción de realizar un intercambio indirecto entre los gases de combustión y aire ambiente, de modo que aunque la temperatura final de los gases a recuperar en el atomizador sea inferior, se evitan los problemas de corrosión. En la figura 56 se muestra un intercambiador de gases empleado en la recuperación del calor sensible de los humos.

El diseño de estos intercambiadores de calor debe ser adecuado para evitar condensaciones ácidas que provoquen el deterioro rápido del propio intercambiador. En cualquier caso, serán las características de los gases de cada instalación (caudal, temperatura y composición) las que determinen si es posible o no la recuperación del calor sensible de los mismos.

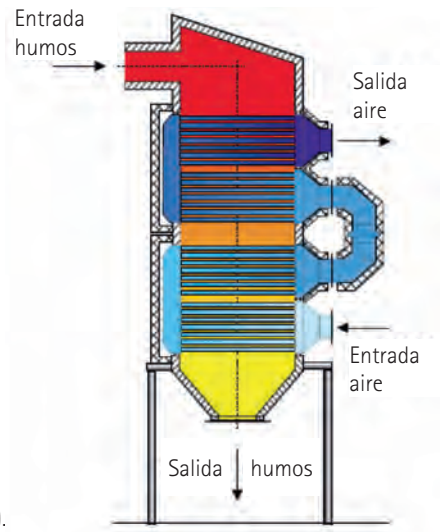


Figura 56 Intercambiador de calor entre gases (Fuente: www.kalfrisa.com).

Además de los gases procedentes de la chimenea de combustión, en los hornos de cocción de baldosas existe una salida de gases procedente de la zona de enfriamiento. Estos gases están limpios, pues son aire ambiente calentado al enfriar las piezas. La recuperación de estos gases es directa hacia el atomizador, sin necesidad de utilizar un intercambiador de calor.

Considerando que se sustituye todo el aire ambiente por gases recuperados del horno, en la tabla 19 se muestra el ahorro obtenido en función tanto de la temperatura de trabajo del atomizador como de la temperatura de los gases recuperados.

T de trabajo del atomizador (ºC) / T de recuperación (ºC)	450	550	650
150	30,2	24,5	20,6
200	41,9	34,0	28,6
250	53,5	43,4	36,5
300	65,1	52,8	44,4

Tabla 19 Ahorro obtenido al recuperar gases calientes en el atomizador (%).

Si no se puede sustituir todo el aire de combustión por gases recuperados, el ahorro obtenido será proporcional a la cantidad sustituida.

7.1.6 Refrigeración del aire de combustión de las turbinas de cogeneración

El empleo de turbinas de cogeneración permite aportar una parte importante de la energía térmica necesaria en el proceso de atomización, así como producir energía eléctrica para el propio consumo en la empresa o para vender a la red de distribución.

La rentabilidad del sistema de cogeneración es mayor cuanta más energía eléctrica produzca. Una forma de incrementar el rendimiento eléctrico de una turbina de gas es reducir la temperatura del aire ambiente empleado como comburente.

Cuando se reduce la temperatura del aire, aumenta su densidad, de modo que en el mismo volumen hay más masa de aire. Para mantener la proporción másica aire/gas en la cámara de combustión de la turbina, el consumo de gas natural aumenta. En la figura 57 se observa el aumento de la potencia eléctrica de una turbina de gas y el incremento en el consumo de gas natural, al reducir la temperatura del aire de admisión.

Del mismo modo, al haber introducido más masa de gas y de aire, el caudal másico de gases de escape aumenta, aunque se reduce su temperatura. El resultado es un aumento de la energía térmica contenida en los gases de escape (ver figura 58).

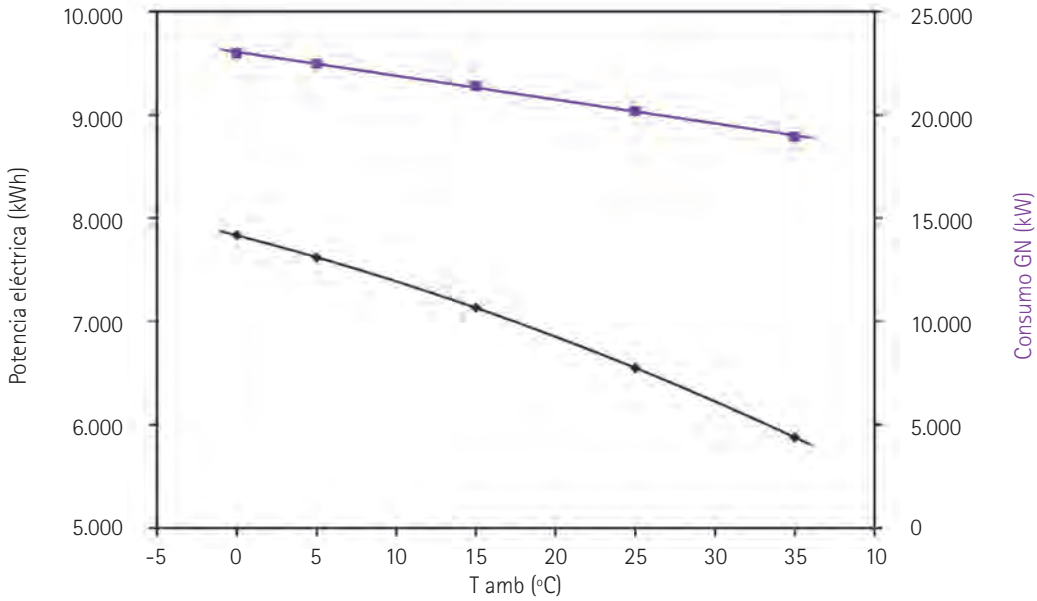


Figura 57 Relación entre la temperatura del aire de admisión, la potencia eléctrica y el consumo de gas de la turbina.

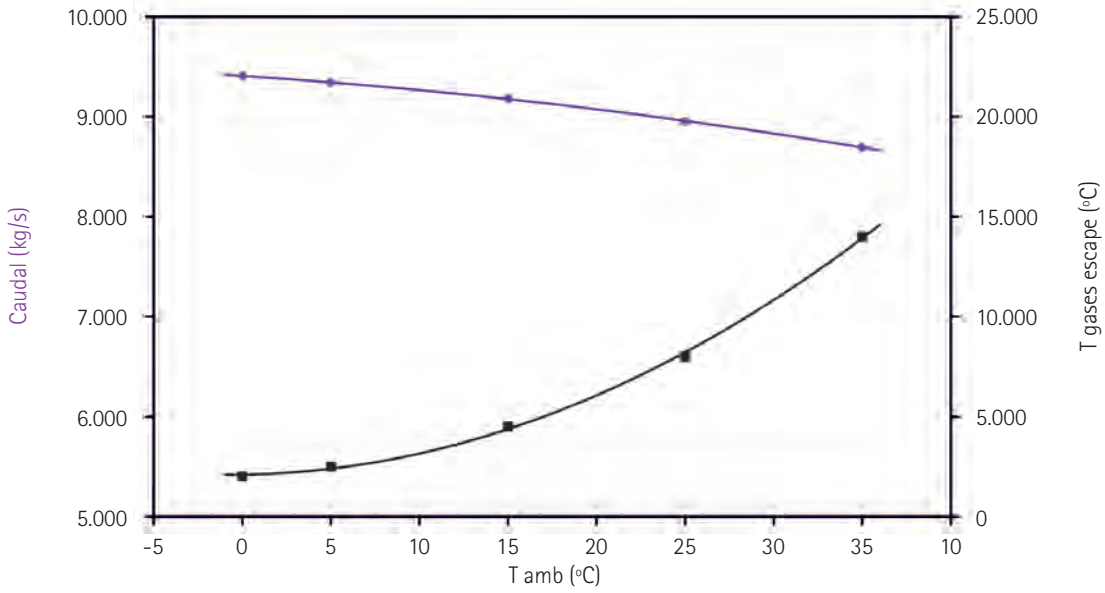


Figura 58 Relación entre la temperatura del aire de admisión, el caudal y la temperatura de los gases de escape.

El sistema empleado para refrigerar el aire puede ser un sistema de enfriamiento convencional por compresión, o un equipo de refrigeración por absorción de calor.

Para realizar esta función, los primeros, consumen gran cantidad de energía eléctrica, mientras que los segundos hacen uso de la energía térmica residual del proceso de atomización para enfriar el aire de combustión de la turbina y aumentar la energía eléctrica producida.

El funcionamiento de los sistemas de refrigeración por absorción de calor se basa en dos principios: la absorción de vapor de agua por parte de una disolución concentrada de una sal, que suele ser bromuro de litio, y la ebullición del agua a baja temperatura cuando la presión absoluta es baja. Haciendo uso de estos dos principios, es posible usar como elemento refrigerante agua. Esta agua fría se empleará, mediante un intercambiador de calor agua/aire, para enfriar el aire ambiente que se utilizará como aire de combustión de la turbina de cogeneración.

En la figura 59 se ha representado esquemáticamente el ciclo de absorción.

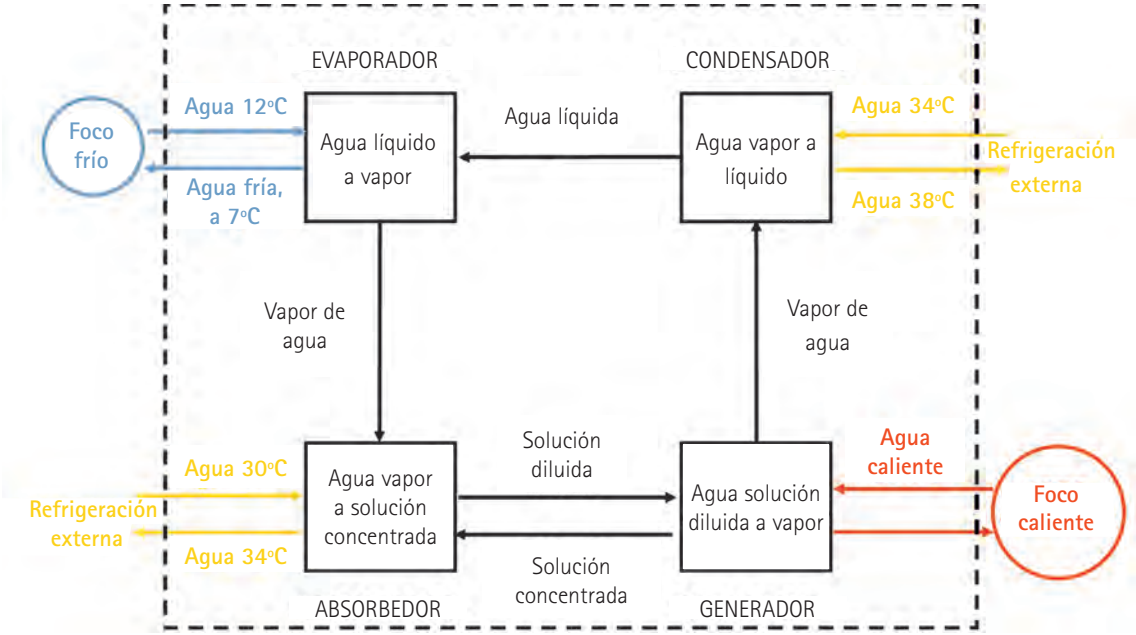


Figura 59 Esquema del funcionamiento de una máquina de absorción simple.

El ciclo de absorción se inicia en el generador al cual se bombea una solución diluida de bromuro de litio procedente del absorbedor. En el generador se produce la evaporación de parte del agua contenida en la solución mediante agua caliente, obtenida por intercambio de calor con los gases del atomizador (foco caliente). Esta agua se condensa en el condensador y es alimentada en fase líquida al evaporador.

El evaporador y el absorbedor constituyen un único equipo en el que la presión es muy baja. Este vacío se crea debido a la gran afinidad que tiene el bromuro de litio por el agua. A esta presión el agua pasa a fase vapor a baja temperatura (4 ºC) en el evaporador, creando el efecto refrigerante sobre una corriente de agua (foco frío).

En el absorbedor el vapor de agua entra en contacto con bromuro de litio, siendo atraída por éste y creando el vacío casi total en el evaporador.

La absorción del vapor de agua por parte de la solución de bromuro de litio, y la condensación del vapor de agua son dos etapas del ciclo de absorción que generan calor. Éste es eliminado del sistema por una corriente de agua que, una vez enfriada en una torre de refrigeración, vuelve al equipo de absorción.

En la figura 60 se muestra una fotografía de una máquina de absorción simple.

Figura 60 Imagen de una enfriadora por ciclo de absorción (Fuente: www.doc.trane-eur.com).

Tal y como se desprende de la descripción del funcionamiento de un equipo de absorción de calor, además de la máquina de absorción propiamente dicha son necesarios una serie de equipos auxiliares. Son los siguientes:

- Intercambiador de calor en la salida del atomizador, en el que los gases calientes ceden energía térmica a una corriente de agua, que es la fuente térmica de la máquina de absorción.
- Torre de refrigeración, que enfría el agua que circula por el absorbedor y el condensador eliminando el calor que se genera en estas dos etapas.
- Intercambiador de calor en la entrada de la turbina, en el que el agua fría obtenida en la máquina de absorción reduce la temperatura del aire ambiente de entrada a la turbina.

La instalación completa, por tanto, consta de diversos equipos, relacionados del modo que muestra la figura 61.

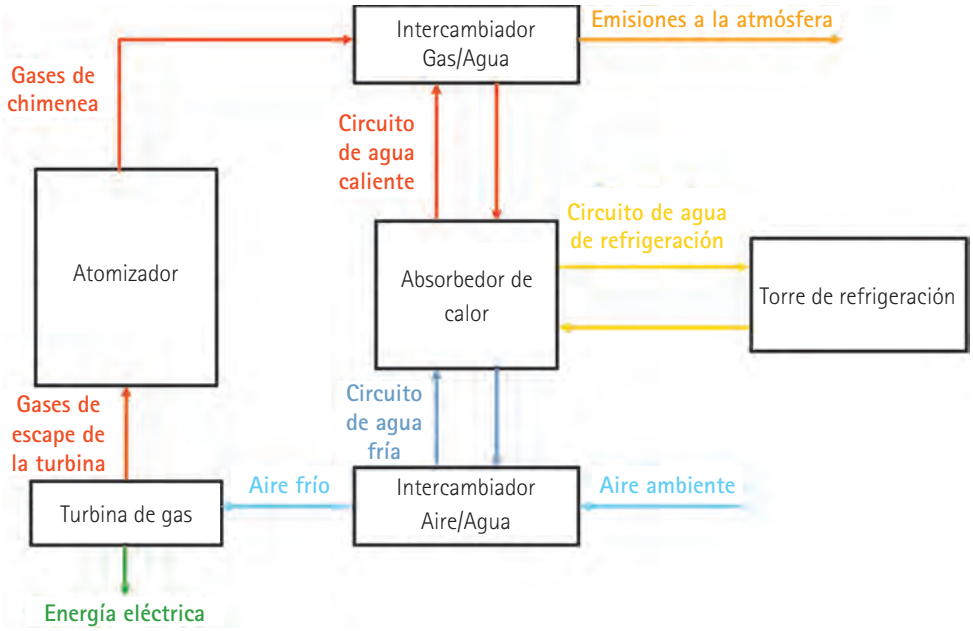


Figura 61 Esquema general de la instalación completa.

La rentabilidad de esta medida depende en gran medida de las condiciones ambientales de la zona donde esté ubicada la turbina, pues cuanto mayor sea la temperatura ambiente mayor aprovechamiento del sistema de enfriamiento y por tanto mayor incremento de la potencia eléctrica de la turbina.

En líneas generales, debido al clima de la provincia de Castellón, el sistema es rentable durante los meses más calurosos (de Mayo a Octubre), cuando es posible aprovechar la capacidad de enfriamiento del absorbedor, pero deja de serlo durante los meses más fríos, debido a que no puede aprovecharse toda la potencia de enfriamiento de la instalación, lo que compromete la rentabilidad global de la instalación para esta aplicación.

CASO PRÁCTICO Nº 2:
Incremento de la potencia eléctrica de una turbina de gas por enfriamiento del aire de combustión mediante un sistema de refrigeración por absorción

Una empresa de fabricación de gránulo atomizado posee en sus instalaciones una turbina de gas de 7 MW de potencia. Se plantea la opción de incrementar el rendimiento eléctrico de la turbina mediante el enfriamiento del aire comburente con un sistema de refrigeración por absorción.

El incremento de la potencia eléctrica de una turbina de cogeneración dependerá de la reducción de la temperatura que se realice en el aire de combustión. Esta reducción de temperatura viene dada por la capacidad de enfriamiento del sistema de refrigeración seleccionado, y por las condiciones ambientales de la zona donde esté ubicada la turbina. Además, según los fabricantes de turbinas, no es recomendable que la temperatura de entrada del aire comburente sea permanentemente inferior a 5 ºC.

Como parámetros de diseño, se considera que el sistema de enfriamiento tenga capacidad para enfriar 10 ºC el aire, y que la temperatura del aire enfriado nunca sea inferior a 10 ºC.

En la figura 62 se muestra una simulación de cuál sería la temperatura del aire durante un mes frío (Enero), y un mes caluroso (Julio). La línea negra representa la temperatura del aire ambiente, y la línea azul representa la temperatura que tendría el aire, tras ser enfriado. Los datos ambientales corresponden al año 2005, en la provincia de Castellón.

Se observa en las gráficas cómo el aire se enfría hasta 10 ºC, si la temperatura ambiente está situada entre 10 y 20 ºC. Si la temperatura ambiental es igual o inferior a 10 ºC, el sistema de enfriamiento no actúa y el aire entra a la turbina sin sufrir ninguna modificación. Cuando la temperatura supera los 20 ºC, el aire se enfría un máximo de 10 ºC.

Por tanto, se deduce fácilmente que el sistema de enfriamiento funcionará a la máxima potencia durante el mes de Julio, ya que la temperatura ambiente es prácticamente durante todo el mes superior a 20 ºC, mientras que en Enero funcionará únicamente durante algunas horas al día, y no a la máxima capacidad, pues la temperatura ambiente no suele superar los 20 ºC.

Como consecuencia de las variaciones de temperatura ambiente mostradas, las necesidades de enfriamiento serán variables en el tiempo. En la figura 63 se ha representado la capacidad frigorífica necesaria para enfriar 10 ºC el aire de combustión de la turbina de cogeneración considerada, hasta un valor mínimo de 10 ºC, a lo largo de un año.

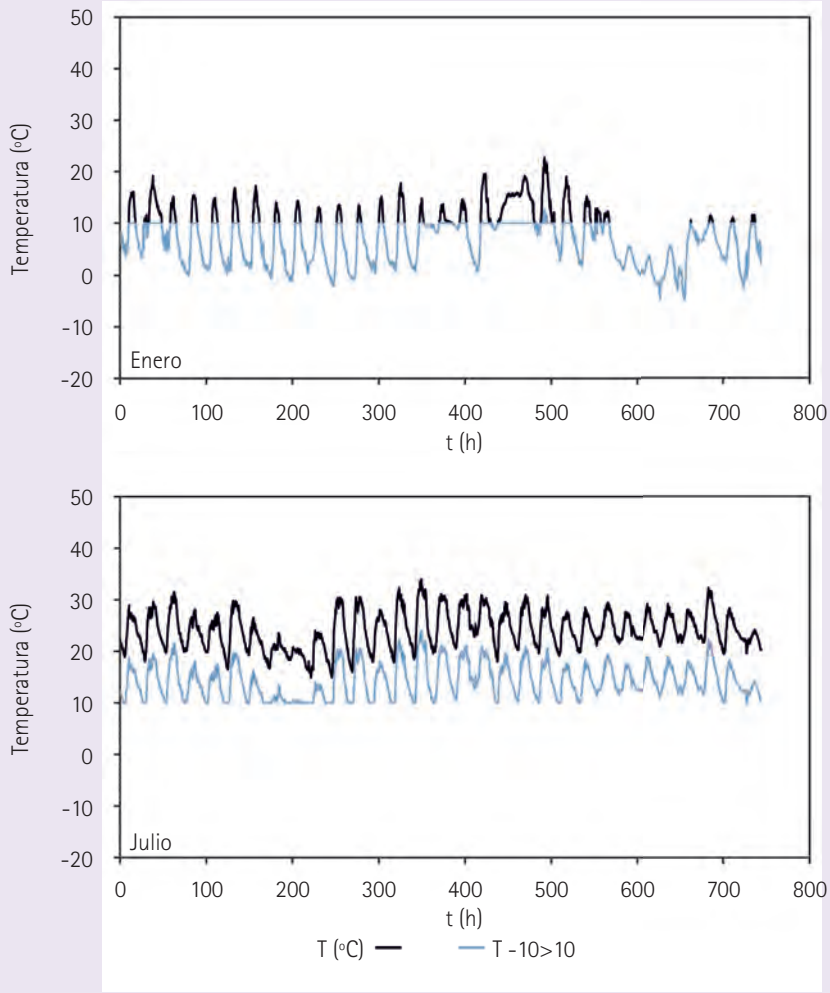


Figura 62 Evolución de la temperatura del aire de combustión con y sin enfriamiento durante dos meses diferentes.

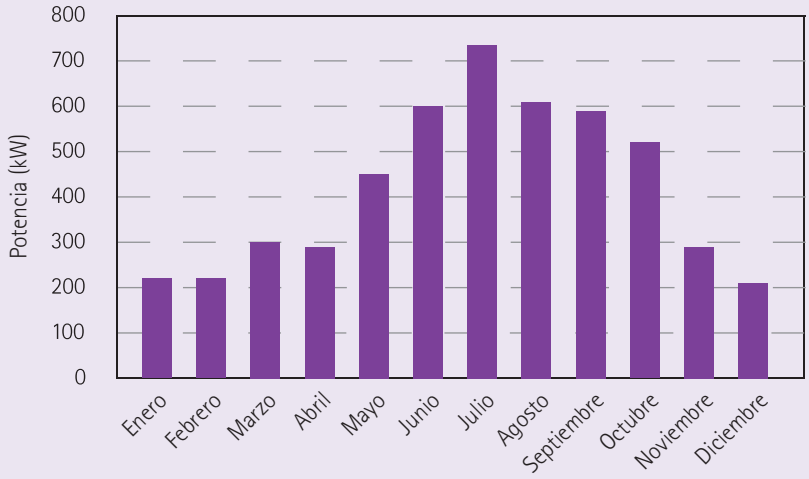


Figura 63 Potencia frigorífica necesaria a lo largo de un año.

Las necesidades de refrigeración del sistema de absorción son de 643 kW. Una vez dimensionado el sistema de absorción, se completa la instalación con los equipos auxiliares oportunos (intercambiadores de calor y torre de refrigeración).

Una vez decidida cuál es la instalación más adecuada, y conocidos los consumos de agua y electricidad de la misma, se calcula, para un año completo de funcionamiento, cuál sería el incremento de energía eléctrica producida por la turbina, así como el incremento en el consumo de gas natural.

Con estos datos, es posible calcular el ahorro de energía primaria que se obtendría al poner en funcionamiento una instalación de estas características, así como la reducción en las emisiones de dióxido de carbono que se alcanzaría. A continuación se muestran todos estos resultados, considerando que el equipo de absorción está en funcionamiento siempre que la temperatura del aire ambiente sea superior a 10 ºC.

Energía eléctrica generada..... 2.251 MWh/año

Consumo gas natural..... 3.809 MWh/año

Ahorro de energía primaria.....241 tep/año

Reducción de emisiones de CO_2..... 511 t CO_2/año

Para el cálculo del ahorro de energía primaria se ha considerado que el rendimiento eléctrico de una central térmica convencional es del 32 %, y el rendimiento térmico de un quemador del 90 %.

La rentabilidad económica de la instalación depende del coste de la energía térmica, del precio de venta de la energía eléctrica, del precio del agua, del coste del mantenimiento de la instalación, y por supuesto, de la inversión necesaria y de las horas de funcionamiento de la instalación.

En el caso concreto analizado, la inversión asciende a 560.000 €. Con las tarifas correspondientes a 2008, el periodo de retorno de la inversión es superior a 20 años.

La rentabilidad del proyecto es baja debido a que durante los meses fríos del año, el sistema de refrigeración funciona durante poco tiempo, y además no a plena potencia, de modo que no se obtiene todo el rendimiento posible de la instalación. Esto sí ocurre en verano, cuando la temperatura ambiente es elevada y el sistema trabaja a plena potencia durante todo el tiempo.

En resumen, el rendimiento de este tipo de instalaciones depende de las condiciones climáticas de la zona de trabajo, siendo mayor en zonas cálidas y menor en áreas más frías. En el caso de la provincia de Castellón, las condiciones climáticas conducen a que el sistema permanezca parado durante varios meses al año (ya que los costes de operación superan los beneficios obtenidos), reduciendo de este modo el tiempo de funcionamiento de sistema de refrigeración.

7.2 Secaderos de baldosas

7.2.1 Optimización del caudal de gases de secado

El aporte de calor en los secaderos se realiza habitualmente mediante quemadores de gas natural. Los gases calientes, una vez han entrado en contacto con las piezas, se extraen del secadero y se expulsan a la atmósfera a través de la chimenea. En muchos casos, una parte del caudal de gases de secado no se elimina por la chimenea, sino que se recircula de nuevo hacia el secadero, para aprovechar mejor sus propiedades como agente secante.

Estos gases recirculados pueden ser utilizados como comburente en los quemadores, pues poseen una temperatura elevada y un contenido en oxígeno superior al 15 %. Los restantes son eliminados por la chimenea, que de este modo actúa como purga del sistema.

En los secaderos verticales empleados habitualmente en el secado de baldosas cerámicas, el aporte de aire comburente a los quemadores se realiza a través de dos corrientes de gases: una de ellas, es aire ambiente, y la otra, son gases recirculados del propio secadero. La cantidad de aire ambiente introducido como comburente a los quemadores, en estos secaderos, suele ser constante, por lo que una reducción del caudal de gases recirculados reduce el caudal total de aire comburente.

La cantidad de gases que se pueden recircular como comburente depende de cada instalación en particular, pues en general, al reducir el caudal de gases en un secadero aumenta la humedad residual de las piezas, disminuye su temperatura y el consumo de gas natural del secadero. Es decir, la reducción del caudal de gases disminuye el consumo del secadero a costa de reducir la temperatura y de aumentar la humedad residual de las piezas a la salida. Al disminuir el caudal de gases, dado que se reduce el caudal total de aire comburente, se reduce la cantidad de calor que se introduce en el secadero y la velocidad de los gases, con lo cual disminuye la velocidad de secado.

La reducción de caudal puede hacerse efectiva instalando un variador de frecuencia en el ventilador que impulsa los gases, de modo que al reducir la velocidad de giro de las aspas del ventilador (rpm) se reduce el caudal de gases impulsado.

La principal limitación de esta maniobra es que al reducir el caudal de gases de secado, aumenta su humedad relativa, lo que tiene como consecuencia un incremento de la humedad residual de las piezas y una reducción de su temperatura. Además, al estar secando con gases más húmedos, el proceso de secado se ralentiza.

En los procesos de fabricación de baldosas esmaltadas por monococción, el esmaltado se realiza sobre el soporte crudo. Por esta razón, la temperatura y la humedad de las piezas en la salida del secadero son variables importantes, que dependen de la secuencia de aplicaciones decorativas en la línea de esmaltado, del formato de las piezas, composición del soporte, etc.

Habitualmente el rango de variación de la temperatura se encuentra entre 75 y 125 ºC. El valor óptimo de la humedad residual de las piezas a la salida del secadero es difícil de precisar, puesto que depende de cada composición. Los valores habituales de humedad residual suelen estar comprendidos entre 0,2 y 0,5 %. De este modo, se logra que las piezas no tengan una excesiva fragilidad (como ocurre si se secan por completo) y posean una resistencia mecánica a la flexión suficiente para soportar los esfuerzos mecánicos producidos durante las etapas del proceso posteriores.

A modo de resumen, se puede decir que la reducción del caudal de los gases de secado conduce a una disminución del consumo de gas natural, mayor o menor dependiendo de las condiciones de las piezas a la salida del secadero.

CASO PRÁCTICO Nº 3: Cálculo del ahorro energético obtenido al reducir el caudal de gases en un secadero vertical

En un secadero vertical industrial como el mostrado en la figura 37 se realizan maniobras para estudiar su funcionamiento al reducir el caudal de gases de secado. Se presta especial atención al consumo de energía, y a las propiedades de las piezas en la salida del secado (temperatura y humedad residual).

El secadero posee dos quemadores: el quemador nº 1, situado en la zona de entrada de las piezas al secadero, y el quemador nº 2, situado en una zona cercana a la salida de las piezas del secadero. El quemador nº 2 es el que más influencia tiene sobre la temperatura de salida de las piezas.

Se definen dos situaciones:

- *Situación A: reducción del caudal de gases manteniendo constante la temperatura de consigna de los dos quemadores.*
- *Situación B: reducción del caudal de gases aumentando en 10 ºC la temperatura de consigna del quemador nº 2 cada vez que se reduce el caudal de gases de secado en un 10 %.*

En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos en la Situación A. Se observa que a medida que se reduce el caudal de gases aumenta la humedad residual de las piezas en la salida del secadero un 0,3 % y se reduce su temperatura 15 ºC.

	Caudal de gases 100 %	Caudal de gases 90 %	Caudal de gases 80 %
$T_{quemador\ nº\ 2}$ (ºC)	170	170	170
$T_{salida\ piezas}$ (ºC)	90	82	75
$H_{salida\ piezas}$ (%)	0,20	0,36	0,50
Ahorro energético (%)	----	9,6	19,2

Tabla 20 Resultados obtenidos en la situación A.

Para evitar esta reducción en la temperatura de las piezas, se propone ir aumentando la temperatura del quemador nº 2, más próximo a la salida de las piezas del secadero, a medida que se reduce el caudal de gases. En la tabla 21 se reflejan los resultados alcanzados en esta nueva situación.

Se observa como con las modificaciones coordinadas en el secadero aumenta la humedad residual de las piezas en la salida del secadero (0,3 %) pero se mantiene su temperatura constante.

Como se aprecia en este caso práctico, la posibilidad de modificar el caudal de los gases permite, dentro de ciertos límites, controlar por separado la humedad residual de las piezas y su temperatura.

	Caudal de gases 100 %	Caudal de gases 90 %	Caudal de gases 80 %
$T_{quemador\ nº\ 2}$ (ºC)	215	225	235
$T_{salida\ piezas}$ (ºC)	113	113	112
$H_{salida\ piezas}$ (%)	0,20	0,37	0,50
Ahorro energético (%)	----	5,6	11,3

Tabla 21 Resultados obtenidos en la situación B.

Este hecho es especialmente interesante cuando, por razones de las aplicaciones en la línea de esmaltado, la temperatura requerida por las piezas a la salida del secadero es alta. Como el caudal volumétrico de los gases recirculados es constante, en estas condiciones la humedad residual de la pieza es muy baja, pudiendo en ocasiones ser nula, aumentando su fragilidad. Si se reduce el caudal de gases de secado y se compensa la disminución de temperatura aumentando la consigna del segundo quemador es posible mantener la temperatura de las piezas aumentando su humedad residual y por lo tanto su resistencia a la rotura (Mallol, G. et al, 2002).

7.2.2 Optimización del caudal de gases de chimenea

La realización de balances de energía en secaderos de baldosas, ha puesto de manifiesto que la mayor parte de las pérdidas de energía se producen a través de la chimenea del secadero.

Por tanto, una de las opciones para aumentar el rendimiento energético del secadero, consiste en reducir la entalpía de los gases en la chimenea.

Para disminuir la entalpía de la corriente de gases en la chimenea se puede reducir su caudal actuando sobre la válvula de la chimenea o sobre el ventilador que extrae los gases del secadero, haciendo uso de un variador de frecuencia. La reducción del caudal de los gases en la chimenea provoca una disminución de su temperatura y un aumento de su humedad. Al disminuir la temperatura y el caudal de los gases de chimenea, se reducen las pérdidas energéticas, y por tanto el consumo de gas natural en los quemadores.

Las características de las piezas en la salida del secadero se modifican al reducir el caudal de gases en la chimenea. La temperatura media de las piezas a la salida se reduce como consecuencia, probablemente, del aumento de la humedad de los gases recirculados y de la reducción en su temperatura. Ello comporta también un aumento de la humedad residual de las mismas a la salida del secadero.

El cierre de la válvula de la chimenea provoca un aumento de la presión en el interior del secadero, por lo que la diferencia máxima de temperatura entre las piezas de un mismo plano se reduce ligeramente.

Cabe esperar que reducciones excesivas del caudal de gases calientes en la chimenea provoquen que las piezas salgan demasiado húmedas y frías, con el consiguiente peligro de tener problemas de roturas, falta de succión, etc. durante su decoración. Por tanto, es conveniente alcanzar una situación de equilibrio entre todos los factores implicados, pérdidas de energía y propiedades de las piezas en la salida (Mallol, G. et al, 2002).

CASO PRÁCTICO Nº 4:
Cálculo del ahorro energético obtenido al reducir el caudal de gases de chimenea en un secadero vertical

En un secadero vertical industrial, como el mostrado en la figura 37, se realizan maniobras para estudiar su funcionamiento al reducir el caudal de gases en la chimenea. Se presta especial atención al consumo de energía, a las características de los gases en la chimenea y a las propiedades de las piezas en la salida del secado (temperatura y humedad residual).

El caudal de gases se reduce mediante un variador de frecuencia instalado en el ventilador que extrae los gases del secadero, y se mide experimentalmente con un tubo de Pitot.

En la tabla 22 se muestran las variaciones obtenidas en la corriente gaseosa al reducir en casi un 40 % el caudal de gases en la chimenea. Se observa cómo al reducir el caudal aumenta la humedad de los gases y se reduce su temperatura.

	Situación inicial	Reducción del caudal de chimenea
Caudal de gases (m^3_N /h)	*4.900*	*3.000*
Humedad gases (g agua/kg aire seco)	*75*	*85*
Temperatura de los gases (ºC)	*130*	*125*
Entalpía de los gases (kW)	*234*	*138*

Tabla 22 Características de los gases de chimenea.

En la tabla 23 se muestran las propiedades de las piezas y el ahorro energético obtenido al realizar la reducción en el caudal de chimenea mostrada en la tabla A.

	Situación inicial	Reducción del caudal de chimenea
Temperatura piezas (ºC)	*112*	*105*
Humedad piezas (%)	*0,15*	*0,30*
Ahorro energético (%)	*----*	*13*

Tabla 23 Características de las piezas y ahorro energético.

La reducción del caudal de chimenea provoca una reducción en la temperatura de las piezas de 7 ºC y un incremento de su humedad residual. El ahorro de energía logrado en los quemadores del secadero es del 13 %, causado por la reducción de las pérdidas de energía por la chimenea del secadero.

La aplicación de esta maniobra a una instalación determinada está condicionada por las características requeridas en las piezas secas, dado que aunque se produzca un ahorro energético, la temperatura de las piezas y su humedad en la salida del secadero se modifican.

7.2.3 Instalaciones de recuperación de calor en los secaderos

El aporte de calor en los secaderos se realiza, habitualmente, mediante quemadores de gas natural. El aire empleado como comburente está constituido, bien por aire ambiente, bien por mezclas de aire ambiente con gases recirculados del propio secadero.

El consumo de gas natural se produce al elevar la temperatura del comburente hasta la de consigna fijada en los quemadores.

Las instalaciones de recuperación en los secaderos consisten en sustituir parte del aire de combustión por gases a mayor temperatura procedentes de otras instalaciones del proceso productivo.

El equipo de proceso que genera gases residuales a mayor temperatura es el horno. En caso de querer aprovechar los humos de combustión, es conveniente emplear un intercambiador de gases para evitar problemas de corrosión en las conducciones.

El aprovechamiento de los gases de enfriamiento es directo, siempre que la curva de presiones en el horno sea la adecuada ya que, en ese caso, se trata de aire ambiente que se ha calentado por intercambio de calor con las piezas que se enfrían en el horno.

El ahorro energético logrado con esta medida depende del porcentaje de gases sustituidos, de la temperatura de consigna de los quemadores y de la temperatura alcanzada al sustituir el comburente por gases recuperados.

7.3 Hornos de cocción de baldosas

7.3.1 Optimización de la composición de los soportes de las baldosas

La cocción de los materiales cerámicos requiere un gran aporte de energía, en forma de gases calientes. Algunos de los parámetros de cocción que más influencia tienen sobre el consumo energético del horno son la temperatura máxima de cocción, y la duración del ciclo de cocción, así como la curva temperatura-tiempo programada en el horno.

La temperatura máxima de cocción viene determinada por la composición del soporte arcilloso y las características del producto acabado, por lo que interesa optimizar la composición para evitar trabajar a temperaturas de cocción excesivamente elevadas.

Asimismo, la composición del soporte determina las reacciones químicas que ocurren durante la cocción, de modo que es conveniente reducir en la medida de lo posible la presencia de aquellas

reacciones que ralenticen la cocción del material, como por ejemplo la oxidación de la materia orgánica o la descomposición de los carbonatos.

En la cocción de productos cerámicos preparados con materias primas arcillosas es importante conocer el intervalo de cocción, es decir, el margen de temperaturas en el que la contracción y la porosidad de la pieza no varían excesivamente. Dicho intervalo depende de las características de la composición y debe ser lo más amplio posible. En caso contrario, pequeñas variaciones de la temperatura de cocción pueden producir una deformación de la pieza o una cocción insuficiente de la misma, con lo que los valores de porosidad y resistencia mecánica del producto acabado no serán los deseados.

Las composiciones con una temperatura máxima de cocción más baja y que permiten una mayor velocidad de calentamiento, son las más adecuadas, desde el punto de vista del consumo energético, a igualdad del resto de variables (dimensiones de las piezas, características del horno, etc), pues tienen ciclos de cocción de menor duración.

Las composiciones formuladas con arcillas rojas naturales, de tipo illítico-caolinítico, presentan en su composición mayor proporción de óxidos fundentes (K_2O) y óxido de hierro, que las arcillas caoliníticas y las arcillas blancas. Por tanto, presentan una temperatura máxima de cocción más baja (ver figura 64 y figura 65).

Además de materias primas arcillosas, las composiciones cerámicas contienen otros componentes, de naturaleza no arcillosa, denominados desgrasantes.

Los desgrasantes más comunes empleados en la fabricación de baldosas cerámicas son carbonatos, cuarzo, feldespatos y talco. La presencia de estos minerales modifica el comportamiento de las composiciones durante la cocción, ya que actúan como formadores de fases cristalinas, como formadores de fases líquidas (fundentes) o como inertes.

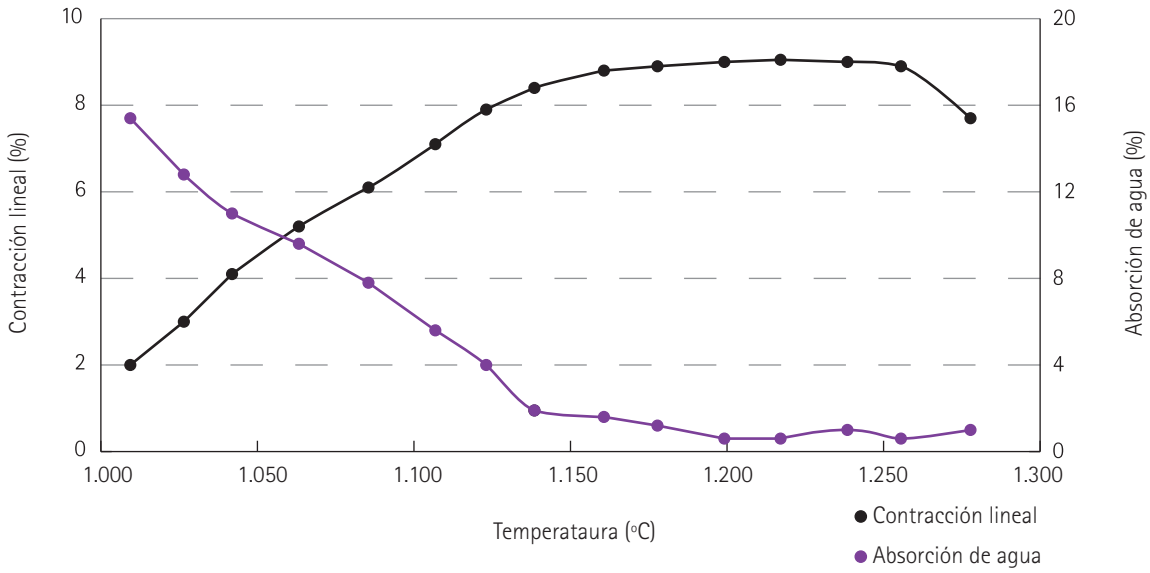


Figura 64 Diagrama de variación de la contracción lineal y la absorción de agua con la temperatura de cocción de una arcilla caolinítica.

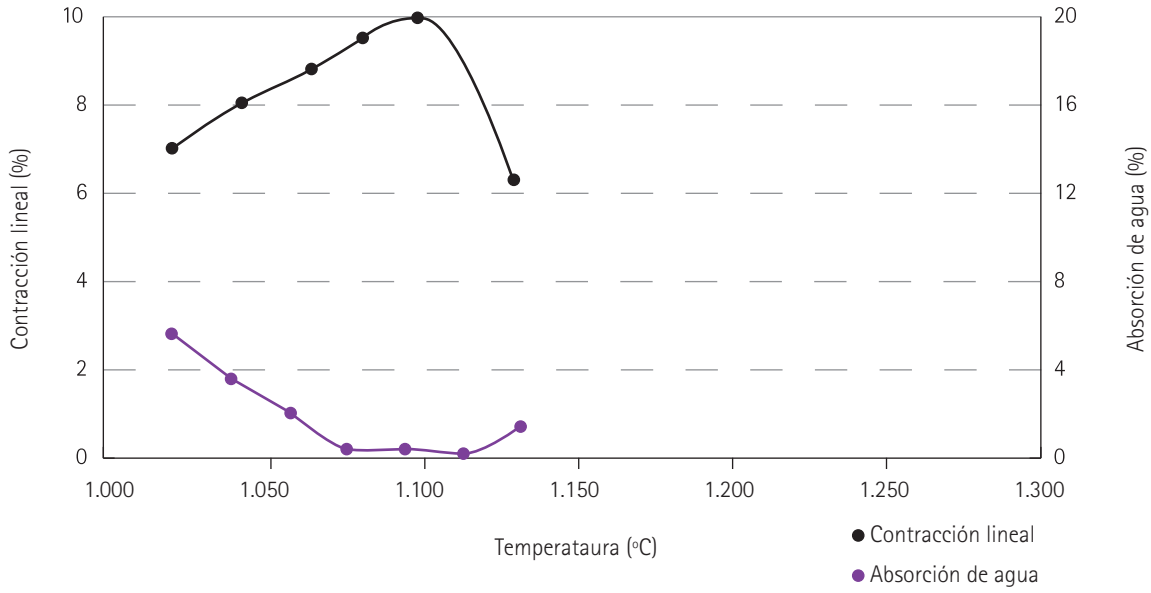


Figura 65 Diagrama de variación de la contracción lineal y la absorción de agua con la temperatura de cocción de una arcilla illítica.

La adición de cuarzo en las composiciones arcillosas conduce a mezclas más refractarias, en las que la temperatura de gresificación es mayor. Por el contrario, la adición de feldespatos conduce a una composición más fundente. En la figura 66 se aprecia el efecto de la adición, por separado, de estos dos componentes a una arcilla caolinítica.

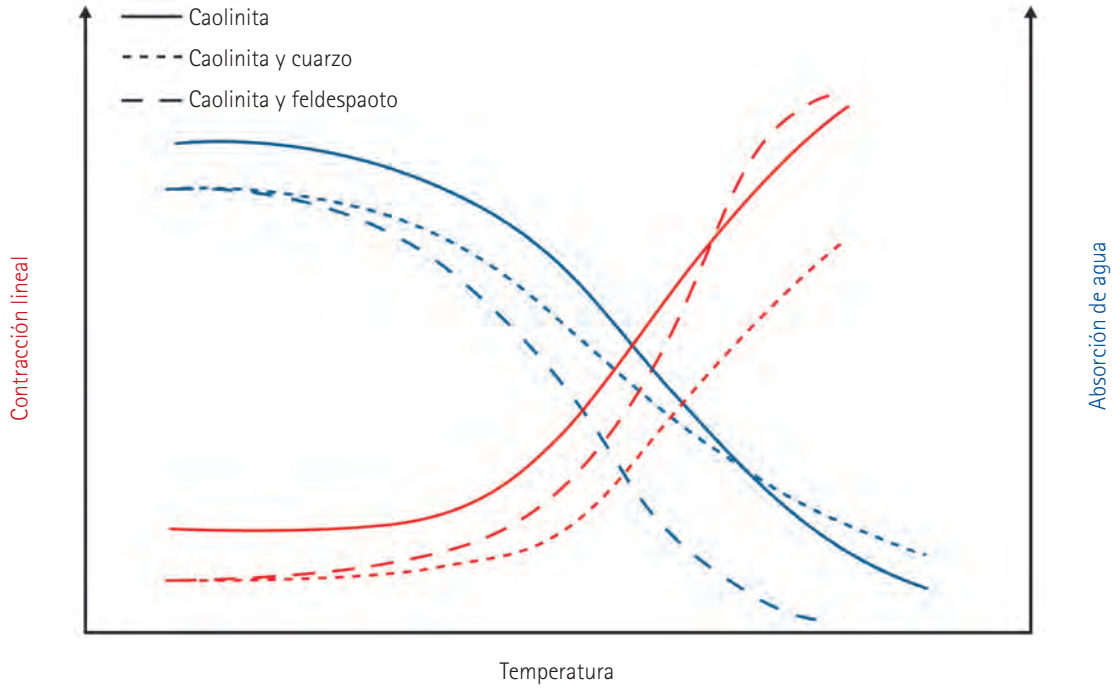


Figura 66 Diagrama de variación de la contracción lineal y la absorción de agua con la temperatura de cocción.

La presencia de materia orgánica en la composición conduce a ciclos de cocción más largos, pues la materia orgánica necesita un tiempo para descomponerse adecuadamente y no producir corazón negro en la pieza cocida. Esto se traduce en que las composiciones con mayor contenido en materia orgánica consuman más energía en la cocción y den producciones más bajas, pese a que la reacción de descomposición de la materia orgánica sea una reacción que se produce con desprendimiento de energía.

La presencia de carbonatos en una composición conduce a ciclos de cocción más largos, pues la reacción de descomposición de los carbonatos debe completarse antes de que el esmalte funda sobre el soporte. Además, las necesidades de energía para la cocer una composición con carbonatos son mayores, dado el carácter endotérmico de la reacción de descomposición.

En la tabla 24 se muestra la entalpía de reacción media de tres tipos de composiciones utilizadas habitualmente en la fabricación de baldosas: azulejo rojo, gres rojo y gres porcelánico. Se observa que el valor de la entalpía de reacción es mayor a medida que aumenta el contenido en carbonatos de la composición; esto es debido, fundamentalmente, a la naturaleza endotérmica de la reacción de descomposición de los carbonatos.

Composición	Entalpía de reacción (kJ/kg)
Azulejo rojo	370
Gres rojo	250
Gres porcelánico	180

Tabla 24 Entalpía de reacción de tres composiciones de baldosas.

7.3.2 Reducción del espesor de las baldosas

La reducción del espesor de las baldosas conlleva a un ahorro energético no sólo en la etapa de cocción, sino a lo largo de todo el proceso productivo.

En primer lugar, se reduce la cantidad de materias primas (arcillas, desgrasantes, desfloculantes, etc) necesarias, y por tanto, en el atomizador, se produce un ahorro de energía al reducir la producción necesaria para obtener los mismos metros superficiales de producto final.

Asimismo, en el secadero se reducen los tiempos de secado al disminuir la masa de material a secar por metro cuadrado de producto. Hay que considerar, sin embargo, que una reducción de espesor en el material crudo produce una disminución de la resistencia mecánica de las piezas, propiedad que en procesos de monococción es muy importante dado que las piezas crudas deben soportar esfuerzos mecánicos durante el proceso desde el secadero hasta el horno.

En el horno, una reducción en el espesor de las piezas supone menos masa de material a cocer por metro cuadrado, y por lo tanto un ahorro energético. En este caso, hay que prestar atención a que una reducción de espesor puede afectar a la planaridad de las piezas y en algunos casos será necesario efectuar un reajuste de la curva de cocción.

CASO PRÁCTICO Nº 5:
Ahorro energético obtenido al reducir el espesor de las baldosas cerámicas

Una empresa de fabricación de baldosas cerámicas ha realizado una modificación en la composición utilizada en la fabricación de pavimentos y revestimientos porcelánicos, que le ha permitido reducir el espesor de sus piezas sin disminuir sus propiedades mecánicas.

Las baldosas de menor espesor pueden fabricarse con la tecnología utilizada actualmente en el proceso productivo.

La reducción del espesor de las piezas conlleva múltiples ventajas, entre las que cabe destacar:

- *Una reducción del consumo de materias primas.*
- *Una reducción del consumo de gas natural en todas las etapas del proceso, por unidad de superficie de producto (m^2), pues se reduce el peso específico de las piezas.*
- *Una reducción de las emisiones de dióxido de carbono y de flúor.*

Para una reducción de espesor del 48 %, de 11,3 mm, a 5,8 mm, en la tabla 25 *se muestra comparativamente el consumo energético de un horno, las emisiones de CO_2 y la producción, durante la fabricación de las baldosas de espesor estándar, y de las baldosas de espesor reducido.*

Parámetro	Espesor estándar	Espesor reducido	Variación (%)
Peso específico (kg/m^2)	17	12,45	- 48 %
Producción (m^2/día)	4.903	6.336	+ 29 %
Producción (kg/día)	83.351	78.883	- 5,4 %
Consumo energético (*) (kWh/m^2)	16,27	10,34	- 36,4 %
Consumo energético (*) (kWh/kg)	0,9566	0,8295	- 13 %
Consumo energético (*) (kWh/día)	79.770	65.510	- 18 %
Emisiones (kg CO_2/día)	14.560	12.000	- 18 %

(*) Consumos específicos referidos al PCI del combustible

Tabla 25 Parámetros del producto y del horno con baldosas de diferente espesor.

A continuación se muestra un detalle de la pieza de espesor reducido, comparándola con una pieza de gres porcelánico de espesor estándar.

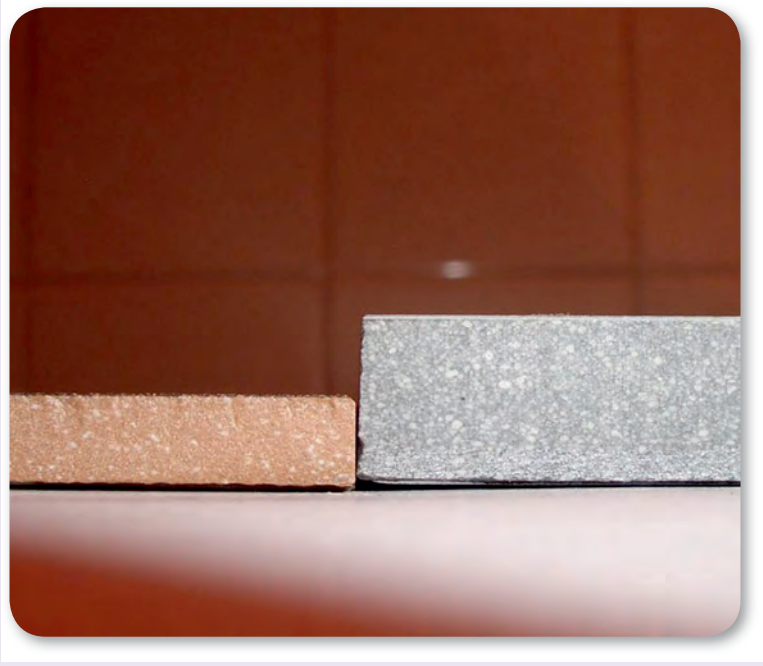


Figura 67 Detalle del espesor de una pieza de gres porcelánico estándar y de una de las piezas de espesor reducido (por cortesía de Neos Additives, S.L. y Revigres, Lda.)

Una tendencia que está implantándose en los últimos años en el sector es la incorporación en el proceso de decoración de las piezas de impresoras por chorro de tinta. Son muchos los sistemas de decoración que dotan a las superficies de determinadas propiedades estéticas: serigrafía, flexografía, huecograbado, estampación, impresión por chorro de tinta (inkjet), etc., sin embargo son numerosas las características de la tecnología de impresión por chorro de tinta que la hacen interesante para la decoración de productos cerámicos. En concreto, en cuanto a las imágenes de alta resolución, el hecho de que la tecnología de chorro de tinta implica volúmenes de gotas más pequeños, comparados con otras tecnologías de decoración, permite un mejor control de la calidad de la imagen. Además, los productos personalizados pueden obtenerse a costes razonables; de hecho, el cambio de la imagen impresa se obtiene sin ninguna sustitución de las partes mecánicas, como sucede con el resto de las tecnologías de decoración, sino solamente a través del cambio de la alimentación del software.

Una de las principales ventajas que aporta esta tecnología podría considerarse la ausencia de contacto entre el aplicador y la superficie a decorar, evitando de esta forma roturas y defectos de impresión por fricciones. Como consecuencia de esta ausencia de contacto, así como la poca cantidad de esmalte necesaria, los problemas de fractura de las piezas en crudo disminuyen durante su tratamiento, ya que es justo en este momento cuando su resistencia mecánica es más baja. De esta manera se puede decir que la resistencia se encuentra limitada únicamente por la adecuada manipulación de las mismas, por lo que el espesor de la pieza puede también reducirse y abarcar un mayor rango de formatos.

En consecuencia, es posible reducir el espesor de las baldosas, con el consiguiente ahorro en materias primas, consumos de energía, aditivos, agua, etc. Por tanto, sin ser una medida de ahorro energético en sí, la sustitución de los sistemas tradicionales de decoración por los sistemas de impresión digital conlleva un ahorro energético en el proceso de fabricación de baldosas, tanto en el consumo de energía eléctrica como en el consumo de gas natural en las etapas de secado y cocción, y una reducción de las emisiones de dióxido de carbono en el proceso de fabricación.

7.3.3 Optimización de la superficie útil de cocción en hornos de rodillos

La optimización de la superficie útil de cocción de hornos de rodillos implica una reducción del consumo energético por unidad de producto procesado, puesto que se consigue un aumento de la producción del horno.

Los fabricantes de baldosas disponen cada vez de un mayor número de formatos y modelos, para lograr una mayor adaptación a las distintas aplicaciones y a los gustos de los consumidores.

En la etapa de cocción es de gran importancia estudiar el aprovechamiento de la superficie de los hornos y optimizarla, de manera que se consiga ocupar la mayor superficie de "tapete" posible. Las factorías que dispongan de varios hornos pueden gestionar los modelos procesados de manera que la cocción de éstos se realice en el horno que resulte más ventajoso, según el caso.

Cuando se trata de piezas rectangulares, en ocasiones es posible cambiar la forma de introducir las piezas en el horno, para evitar separaciones excesivas entre las piezas. En el caso práctico nº 6 se muestra un ejemplo real de un horno de rodillos del sector en el que se modificó la orientación de entrada de piezas rectangulares, con el objetivo de optimizar el aprovechamiento del "tapete" y por tanto, reducir el consumo específico de energía.

CASO PRÁCTICO Nº 6:
Ahorro energético obtenido al modificar la orientación de las piezas en un horno de rodillos

En una empresa de fabricación de baldosas cerámicas, durante la cocción de baldosas de gres porcelánico con formato rectangular, se modificó la orientación de las mismas en la entrada del horno con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de la superficie de cocción del horno. Algunos parámetros del producto y de la cocción se muestran en la tabla 26.

Orientación de las piezas		↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑ ↑ ↑
Material		*Gres porcelánico*	*Gres porcelánico*
Formato (cm x cm)		*45 x 67,5*	*45 x 67,5*
Peso específico (kg/m²)		*23,3*	*23,3*
Piezas/fila		*3*	*5*
Producción	*Piezas/h*	*572*	*704*
	kg/h	*4.048*	*4.982*
Duración del ciclo (min)		*58*	*58*
Aprovechamiento del tapete (%)		81	99
Consumo de gas natural (m^3_N/h)		*271*	*308*
Consumo específico de energía térmica (PCI) (kWh/kg cocido)		*721*	*666*
Ahorro energético (%)		7,7	

Tabla 26 Parámetros del horno al modificar la orientación de las piezas en la entrada.

En este ejemplo se observa que, aunque el consumo absoluto de gas natural es mayor tras la modificación de la orientación de las piezas, el consumo energético por unidad de masa de producto fabricado es menor, consiguiendo un ahorro del 7,7 %.

7.3.4 Reducción de las pérdidas de energía a través de las superficies de los hornos

Entre un 10 % y un 30 % de la energía aportada para la realización de la cocción de baldosas cerámicas en hornos de rodillos se disipa a través de las paredes, superficies de ventiladores, conducciones y otras superficies del horno.

La cantidad de energía que se pierde a través de las superficies de los hornos depende de varios factores:

- Diseño del horno: las pérdidas de energía de un horno serán menores cuanto mejor sea el aislamiento térmico.
- Aislamiento de orificios o aberturas: es aconsejable utilizar algún tipo de material aislante, como lana de vidrio, para cubrir las aberturas presentes en las superficies del horno (mirillas, juntas entre rodillos, etc.)
- Presión estática en el interior del horno: si la presión estática en las cámaras del horno es demasiado elevada, la degradación del material refractario de las paredes del horno en la zona de cocción se acelera, y las pérdidas de energía aumentan.
- Temperatura ambiente: las pérdidas de energía son mayores en los meses más fríos del año.

En la figura 68 se muestra una termografía y una fotografía de la vista general de un horno de rodillos. En la parte derecha de la termografía se observa la escala que relaciona los colores de la imagen con las temperaturas de las superficies calientes.

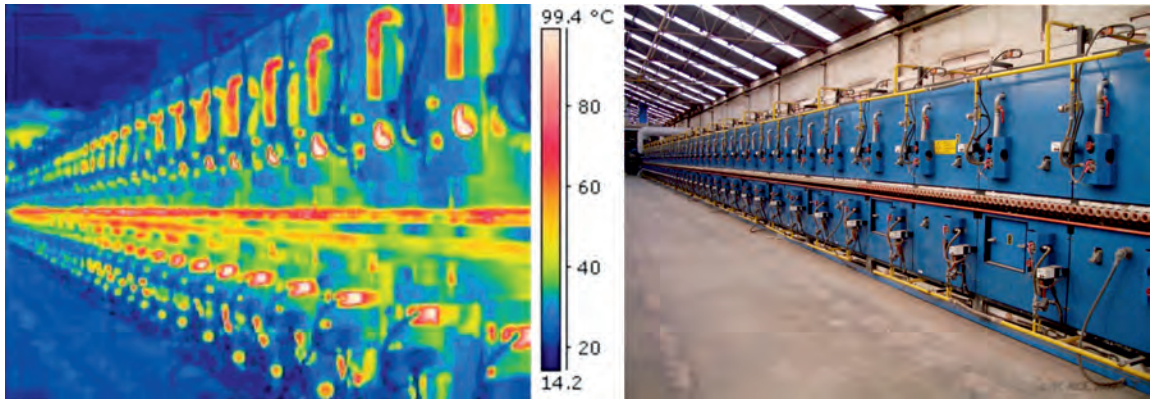


Figura 68 Termografía y vista general de un horno monoestrato de rodillos.

En la imagen anterior se observa que las zonas más calientes del horno son las superficies de los quemadores y el plano donde se encuentran los rodillos. Éstas son, por tanto, las superficies a través de las cuales suelen producirse las mayores pérdidas de energía.

En la figura 69 se muestra una termografía junto a la fotografía de un quemador de un horno de rodillos.

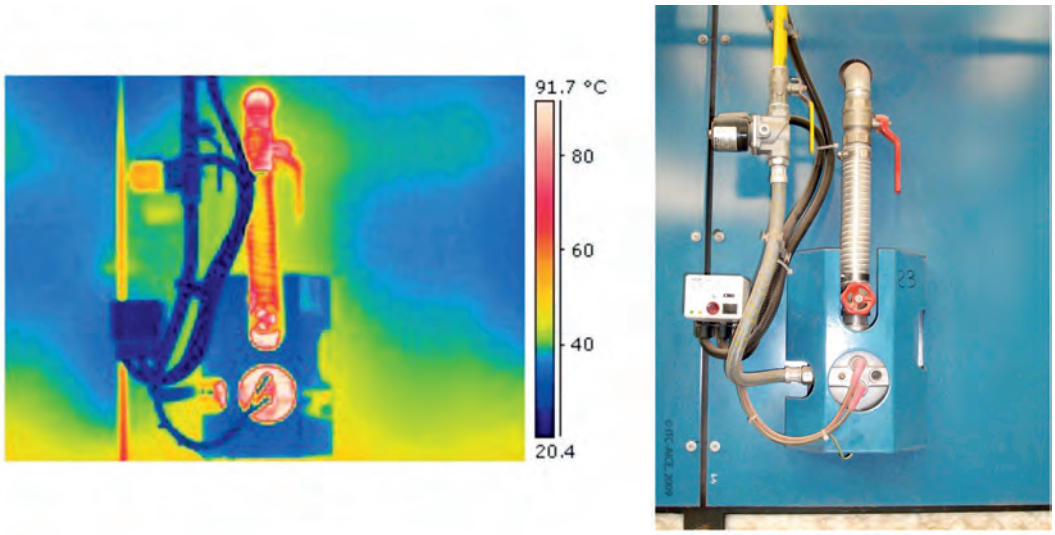


Figura 69 Termografía y fotografía de un quemador de un horno monoestrato de rodillos.

Una parte de la energía aportada para la realización de la cocción de baldosas se pierde a través de las chimeneas en forma de gases calientes. Además, las superficies de los ventiladores y las conducciones de extracción de los gases calientes a la atmósfera no suelen estar calorifugadas, con lo que las pérdidas energéticas a través de estas superficies suelen ser significativas.

En la figura 70 se muestra la termografía y la fotografía de una chimenea de extracción de humos de un horno de rodillos, donde puede apreciarse las elevadas temperaturas de la superficie del ventilador y de la conducción de extracción.

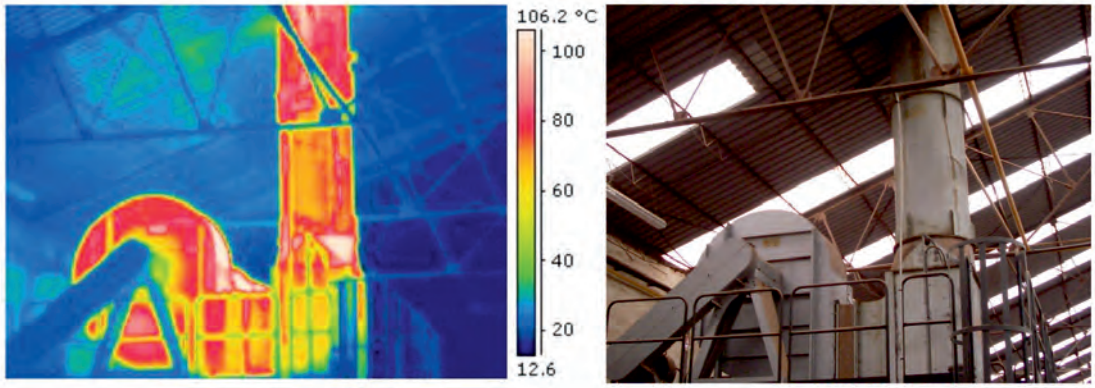


Figura 70 Termografía y fotografía de la chimenea de extracción de humos de un horno monoestrato de rodillos.

La reducción de las pérdidas de energía a través de las conducciones de las chimeneas es importante cuando existe una recuperación posterior de la energía contenida en estos gases, pues de este modo se puede aprovechar mayor cantidad de energía.

A continuación se muestra un ejemplo del ahorro energético obtenido al sustituir parte del refractario de un horno monoestrato de rodillos para la cocción de baldosas cerámicas.

CASO PRÁCTICO Nº 7:
Ahorro energético obtenido al sustituir parte del refractario de la bóveda y solera de un horno de rodillos

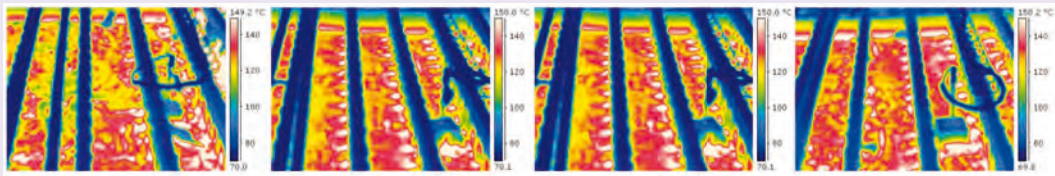
Se determinaron de forma experimental las pérdidas de energía a través de la superficie de un horno antes y después de realizar una serie de operaciones de mantenimiento en el refractario de la bóveda y la solera.

Las operaciones de mantenimiento consistieron en la sustitución del material refractario de la bóveda y la solera de siete módulos de la zona de cocción del horno.

Las condiciones de funcionamiento del horno se mantuvieron constantes antes y después del mantenimiento (composición del material procesado, formato de las baldosas, producción, duración del ciclo y temperatura máxima de cocción).

En la figura 71 *se muestran algunas termografías de la bóveda del horno correspondientes a los módulos donde se realizaron las operaciones de mantenimiento. En estas imágenes se observa claramente la disminución de temperatura de las zonas reparadas.*

Termografías de la bóveda antes de la sustitución del refractario



Termografías de la bóveda después de la sustitución del refractario

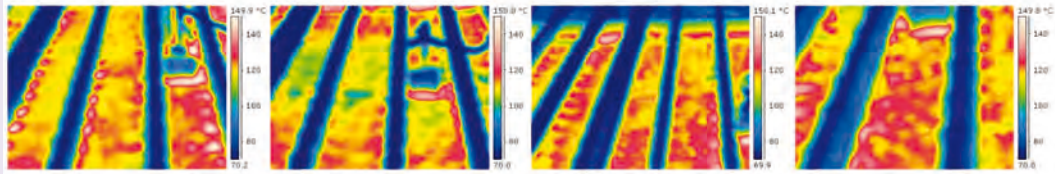


Figura 71 Termografías de la bóveda del horno, antes y después de la sustitución del refractario.

A partir de los valores de temperatura determinados de forma experimental, en la bóveda y solera del horno, se calcularon las pérdidas de energía a través de las superficies del horno.

En las siguientes figuras se muestran de forma gráfica las pérdidas de energía (expresadas como W/m² de superficie del horno) a través de la bóveda y la solera del horno. En estas gráficas se ha señalado, mediante líneas verticales discontinuas, los módulos en los que se produjo la sustitución del material refractario.

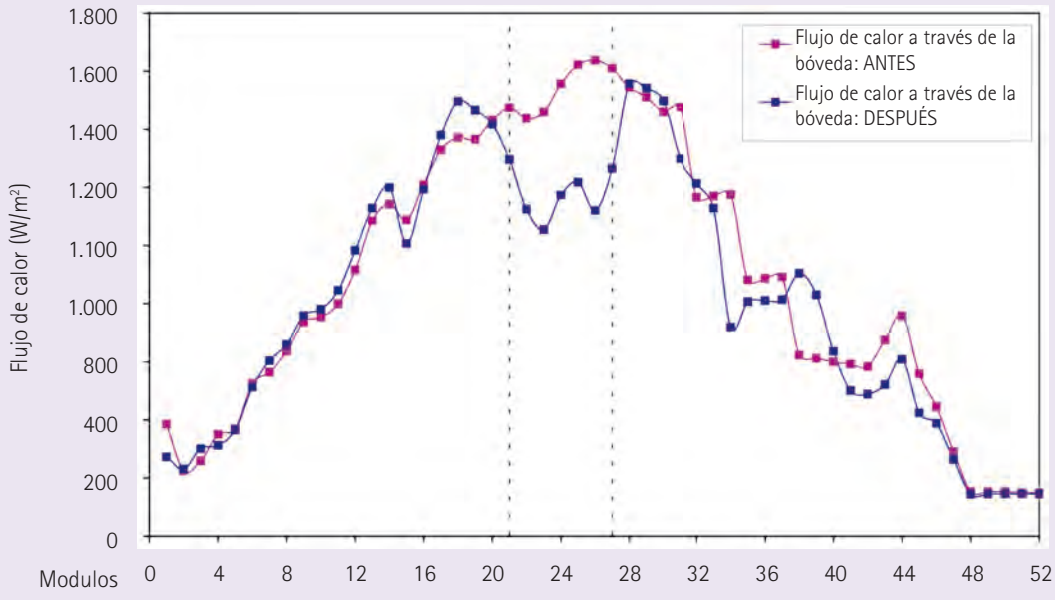


Figura 72 Flujo de calor (W/m²) a través de la bóveda, antes y después de la sustitución del material aislante.

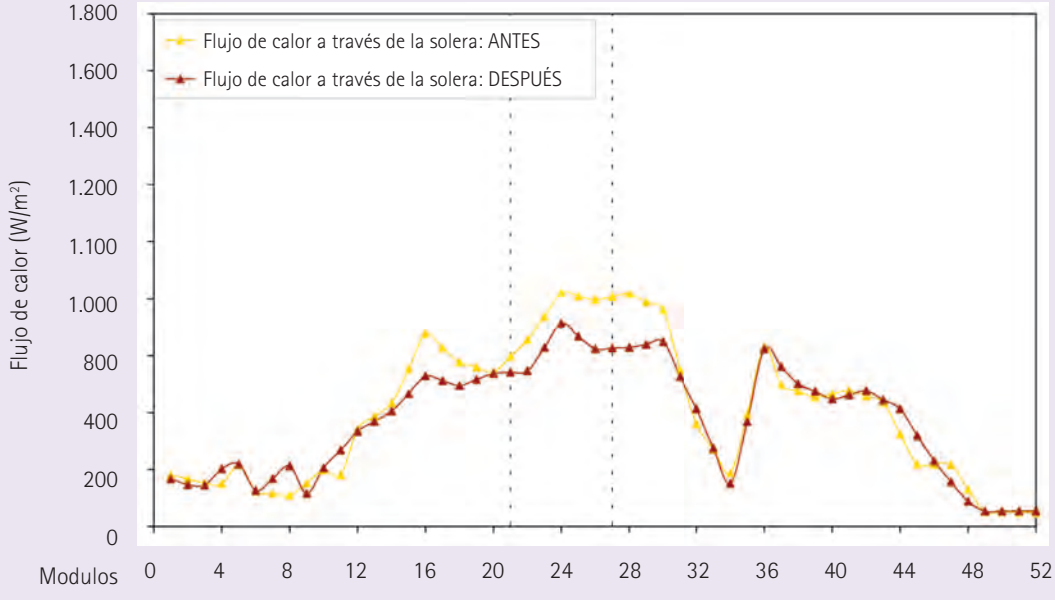


Figura 73 Flujo de calor (W/m²) a través de la solera, antes y después de la sustitución del material aislante.

Como se observa en las representaciones anteriores, la sustitución del refractario provoca una disminución de las pérdidas de energía en la bóveda y solera de los módulos indicados.

En la tabla 27 se indica el ahorro energético obtenido al realizar las operaciones de mantenimiento descritas en este caso práctico.

		BÓVEDA	SOLERA	TOTAL
Antes del mantenimiento	kW	307	139	446
	W/m²	885	405	-
Después del mantenimiento	kW	286	129	415
	W/m²	825	375	-
Diferencia	kW	21	10	31
	W/m²	60	30	-

Tabla 27 Ahorro energético obtenido al sustituir parte del refractario del horno (referido al PCI).

En la tabla 28 se indican el ahorro económico obtenido y el periodo de retorno simple de la inversión necesaria para sustituir el refractario, para distintos costes de la energía térmica.

Coste del gas natural (€/kWh, PCS)	Ahorro económico (€/año)	Periodo de retorno simple (años)
0,025	6.800	4,4
0,030	8.200	3,7
0,035	9.500	3,1
0,040	10.900	2,8

Tabla 28 Ahorro económico y periodo de retorno simple.

En la realización de los cálculos anteriores se ha considerado un tiempo de funcionamiento del horno de 330 días/año, y que la inversión necesaria para sustituir el refractario de la solera y la bóveda en los siete módulos reparados es, aproximadamente, de 30.000€.

7.3.5 Optimización de los perfiles de presión estática y contenido en oxígeno

Las condiciones de operación de un horno monoestrato de rodillos vienen dadas, entre otras variables, por el ciclo de cocción programado y por los perfiles de presión estática y de presión parcial de oxígeno en el interior del horno.

La curva de presiones estáticas establece el sentido de circulación de los gases por el interior del mismo. Es un parámetro importante en el consumo energético del horno, pues determina si existen pérdidas de gases de enfriamiento hacia la zona de cocción, o bien parte de los gases calientes pasan a la zona de enfriamiento.

En la figura 74 se muestra una curva de presión estática estándar, medida en la parte superior del plano de rodillos. La curva no presenta ningún cambio brusco de pendiente, puesto que no existen elementos en el interior de la cámara del horno que produzcan pérdidas de carga. Únicamente existe una separación física entre las zonas de cocción y enfriamiento, señalada con una línea vertical continua en la figura 74.

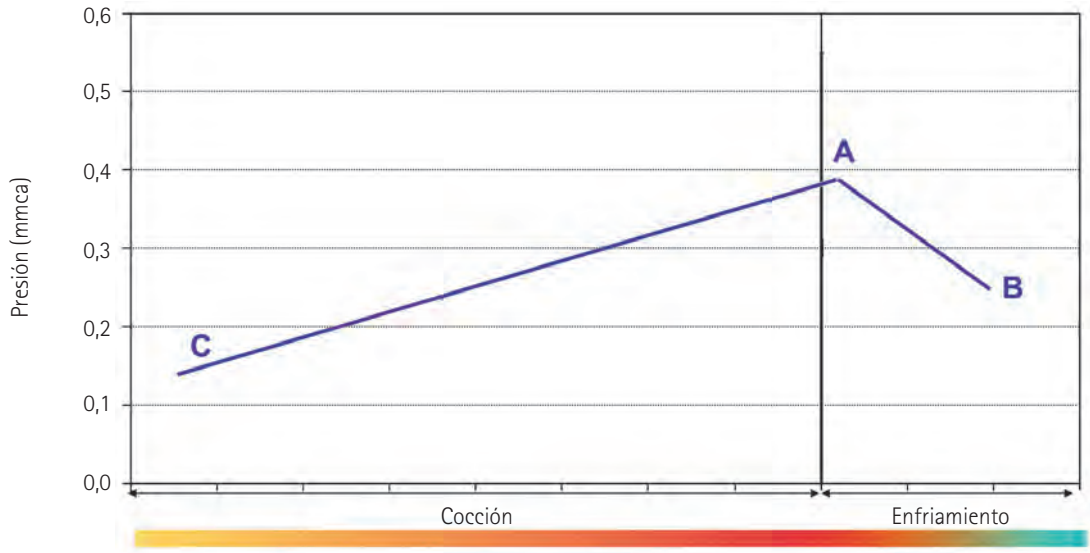


Figura 74 Curva de presión estática estándar.

Se observa un máximo de presión al inicio de la zona de enfriamiento. La existencia de este máximo produce dos sentidos de circulación de los gases: desde el punto A al C, y desde el punto A hacia B.

En el primer caso (del punto A hacia el punto C), parte de los gases procedentes de la zona de enfriamiento se dirigen a la zona de cocción, y se extraen por la chimenea de humos. Estos gases precalentados por intercambio de calor con las piezas que se desean enfriar, se aprovechan en la zona del horno donde más energía se necesita: en el calentamiento y la zona de máxima temperatura. La limitación más importante es que si la cantidad de gases de enfriamiento que pasan a cocción es excesiva, puede modificarse el perfil de temperaturas programado en esta zona por la reducción de temperatura en la última zona de cocción.

Los gases que circulan desde el punto A hacia el B salen del horno por la chimenea de enfriamiento, sin que se aproveche su energía en el interior del mismo.

En la figura 75 se han representado diferentes curvas de presión estática.

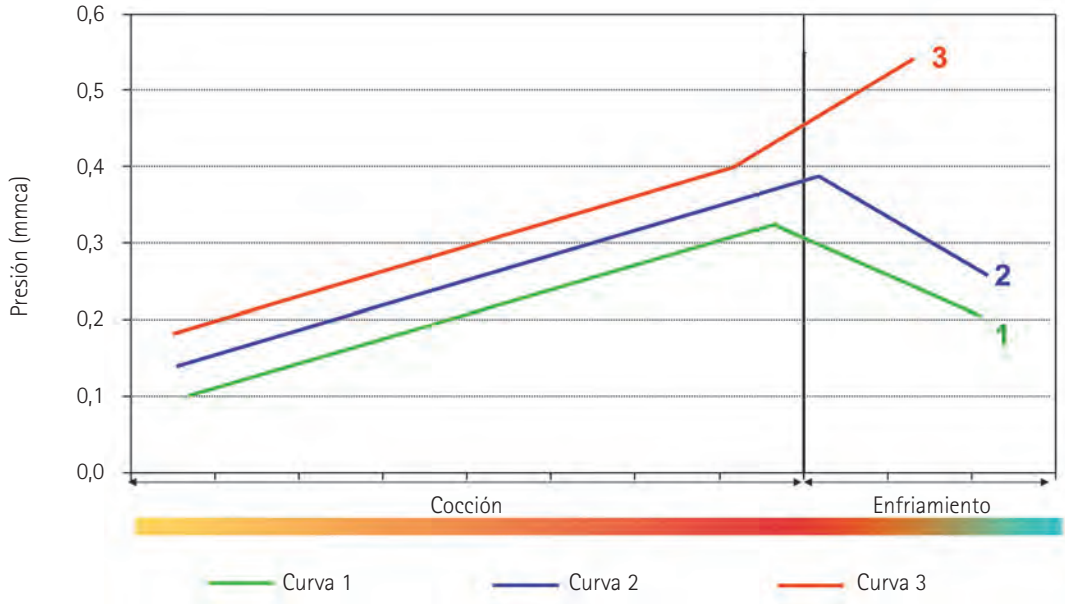


Figura 75 Diferentes curvas de presión estática.

En la curva 1 se observa el máximo de presión estática en la zona de cocción, y por tanto, parte de los gases calientes de cocción pasan a la zona de enfriamiento. Como consecuencia, el consumo energético aumenta y es necesario inyectar más aire en el enfriamiento.

El máximo de presiones en la curva 2 está en la zona de enfriamiento. Como ya se ha comentado, esta es la situación más favorable desde el punto de vista energético. Sin embargo, si el gradiente de presiones entre las zonas de enfriamiento y de cocción es demasiado elevado (curva 3), la estabilidad de funcionamiento del horno es baja, pues una gran parte del aire de enfriamiento estaría pasando a la zona de cocción.

Por lo tanto, una curva de presiones óptima debe favorecer el trasiego de gases desde la zona de enfriamiento a la de cocción, pero sin llegar a desestabilizar el funcionamiento de los quemadores del horno.

Por otra parte, con respecto al valor absoluto de la presión estática se puede indicar que en líneas generales, una presión estática elevada conduce a un mayor deterioro de los elementos refractarios del mismo, aunque contribuye a una mayor uniformidad transversal de temperaturas. Por el contrario, si la presión es demasiado baja, se favorece la entrada de aire parásito en el horno, con la consiguiente pérdida de homogeneidad en las temperaturas.

7.3.5.1 Modificación de la curva de presiones estáticas

La modificación de la curva de presiones estáticas en un horno se realiza actuando sobre el caudal de gases que sale por la chimenea de humos, sobre el caudal de gases de enfriamiento que se extrae del horno por la chimenea de enfriamiento, y sobre las diferentes válvulas de introducción, distribución y extracción del aire del interior de la cámara del horno.

La forma de modificar el caudal de humos depende de las características constructivas del horno. Habitualmente, se modifica la posición de las válvulas instaladas en la conducción de extracción de

los gases de combustión (chimenea de humos), o se actúa sobre las revoluciones del ventilador que extrae los gases. Respecto al caudal de gases de enfriamiento, la forma más habitual de modificarlo es actuando sobre la válvula de la chimenea de extracción de los mismos.

La reducción de la presión estática en todo el horno se logra aumentando el caudal de gases que se extraen del mismo. Esta maniobra no afecta a la posición del punto de máxima presión, pero sí a su valor absoluto, que se reduce.

Para situar la presión máxima en la zona inicial del enfriamiento hay que reducir el caudal de gases que se extraen por la chimenea de enfriamiento. De este modo aumenta la presión en esta zona del horno. Esta maniobra hay que realizarla con cuidado, pues si la presión máxima alcanzada en el enfriamiento es demasiado alta, el gradiente de presiones entre enfriamiento y cocción será excesivo y se puede llegar a desestabilizar el funcionamiento del horno (ver la curva 3 de la figura 75).

La circulación de gases desde la zona de enfriamiento hacia la de cocción, o al revés, puede verificarse analizando el contenido en oxígeno en las primeras zonas de enfriamiento. Dado que los gases de enfriamiento son aire ambiente, un contenido en oxígeno en las primeras zonas de enfriamiento del 20,9 % indica que no hay paso de gases desde el enfriamiento. Si en la zona de enfriamiento, por el contrario, se observa un contenido en oxígeno inferior a este valor, es que existe paso de gases de cocción hacia enfriamiento. En esta situación, el consumo energético del horno será mayor por la pérdida de energía en la zona de cocción, y el trabajo extra que ha de realizarse para enfriar adecuadamente las piezas (Blasco, A. et al, 1992).

7.3.6 Reducción del caudal de aire de combustión

La combustión del gas natural en los quemadores del horno se produce utilizando aire como elemento comburente. Habitualmente, se trabaja con un exceso importante de aire, para obtener un porcentaje de oxígeno adecuado en los gases de combustión que permita llevar a cabo de manera adecuada las reacciones de oxidación de la materia orgánica presente en la pieza.

Como se ha comentado en el apartado anterior, una curva de presiones adecuada es aquélla que favorece un trasiego de aire desde la zona de enfriamiento a la zona de cocción, sin llegar a desestabilizar el funcionamiento del horno.

Por tanto, si se produce un aporte de aire de enfriamiento a los gases de la zona de cocción, es posible plantearse una reducción del caudal de aire comburente en los quemadores, sin disminuir en exceso el porcentaje de oxígeno en la cámara del horno.

En los quemadores el aire comburente se calienta por la combustión del gas natural hasta la temperatura de consigna establecida en la curva de cocción del horno. Si se reduce el caudal de aire, se reducirá el consumo de gas natural, pues se tendrá que elevar la temperatura de menos aire.

Además, una reducción en el caudal de aire de combustión conlleva una reducción en el caudal de humos, de modo que las pérdidas de energía en el horno por la chimenea de humos se reducen.

La aplicación de esta medida de ahorro está condicionada a disponer de un aporte suficiente de aire de enfriamiento hacia la zona de cocción. Este aporte debe permitir que se consiga un contenido en oxígeno mínimo en el horno suficiente para mantener la calidad del producto final y la estabilidad del horno.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que al reducir el caudal de aire de combustión se modifican las características de la llama en el quemador, lo que podría ocasionar problemas de combustión en algunos casos (Blasco, A. et al, 1993).

CASO PRÁCTICO Nº 8: Ahorro energético obtenido al reducir el caudal de aire de combustión en un horno industrial

En un horno monoestrato de rodillos industrial para la cocción de baldosas cerámicas por bicocción, se realizaron pruebas industriales con el objetivo de reducir el caudal de aire de combustión. Durante las pruebas industriales se estaba realizando la cocción de soportes de azulejos de coloración roja.

La reducción del caudal se realizó disminuyendo la presión de aire comburente en algunos anillos del horno.

Durante la realización de estas pruebas se mantuvo constante la producción, el formato y el modelo procesado. Asimismo, se determinaron algunos parámetros de funcionamiento del horno (perfiles de presión estática y contenido en oxígeno) para verificar que se mantenía estable y que la calidad del producto era la misma.

En la tabla 29 se muestra el ahorro energético obtenido al reducir el caudal del aire comburente en el horno.

Caudal de aire (m^3_N/h)	Caudal de gas natural (m^3_N/h)	Consumo específico (PCI) (kWh/t)	Ahorro energético (%)
1.441	112	663	---
1.412	107	631	5

Tabla 29 Ahorro de energía alcanzado al reducir el caudal de comburente.

El ahorro energético alcanzado durante la realización de las pruebas fue del 5%, con una reducción del caudal de aire de combustión del 2%.

7.3.7 Instalaciones de recuperación de calor en los hornos

Los hornos de cocción de baldosas cerámicas disponen de dos corrientes gaseosas residuales cuyo contenido entálpico es importante: los gases de combustión y los gases de enfriamiento.

Este calor puede aprovecharse en las instalaciones industriales. Algunas de las posibilidades son:

- En el mismo horno, para precalentar el aire de combustión en quemadores.
- En otras etapas del proceso:
    - Secado por atomización de suspensiones
    - Secaderos de soportes prensados
    - Secadero de vagonetas en la entrada del horno
- Calefacción de la nave (es el caso menos conveniente, puesto que únicamente puede utilizarse algunos meses al año).

7.3.7.1 Gases de combustión

Los gases de combustión salen del horno por la chimenea de humos. El caudal de esta corriente oscila entre 10.000 y 20.000 m^3_N/h, y su temperatura ronda los 200 ºC.

La composición de esta corriente gaseosa es variable, pues contiene los productos de la combustión del gas natural, y de las reacciones químicas ocurridas en las piezas. Algunos elementos presentes son contaminantes como por ejemplo, flúor, cloro, boro, óxidos de nitrógeno, de azufre, etc.

La recuperación de esta corriente en el propio horno, o en otras etapas del proceso de fabricación de baldosas pasa por depurar previamente los gases, o por utilizar un intercambiador de calor donde parte de la energía térmica contenida en esta corriente se transfiere a una corriente de aire limpia, que ya puede ser utilizada directamente en otras etapas del proceso sin riesgo de condensación de ácidos.

El diseño del intercambiador de calor debe realizarse con cuidado, para evitar que los gases de combustión, al enfriarse, den lugar a condensaciones de ácidos que oxiden y corroan la instalación.

CASO PRÁCTICO Nº 9: Cálculo del ahorro energético obtenido al recuperar la energía de los humos de dos hornos de rodillos

En una empresa de fabricación de baldosas se planteó una recuperación del calor contenido en los gases de combustión.

La instalación proyectada consistió en recuperar la energía presente en los gases de combustión de dos hornos de rodillos. Los gases de las chimeneas de combustión se hicieron pasar a través de un intercambiador de calor en contracorriente con aire ambiente. Una vez intercambiada su energía, la corriente de humos se dirigió a un filtro de mangas para su depuración antes de ser vertida a la atmósfera. Por otro lado, la corriente de aire caliente obtenida se recuperó en los secaderos de baldosas.

En la figura 76 se muestra un esquema simplificado de la instalación.

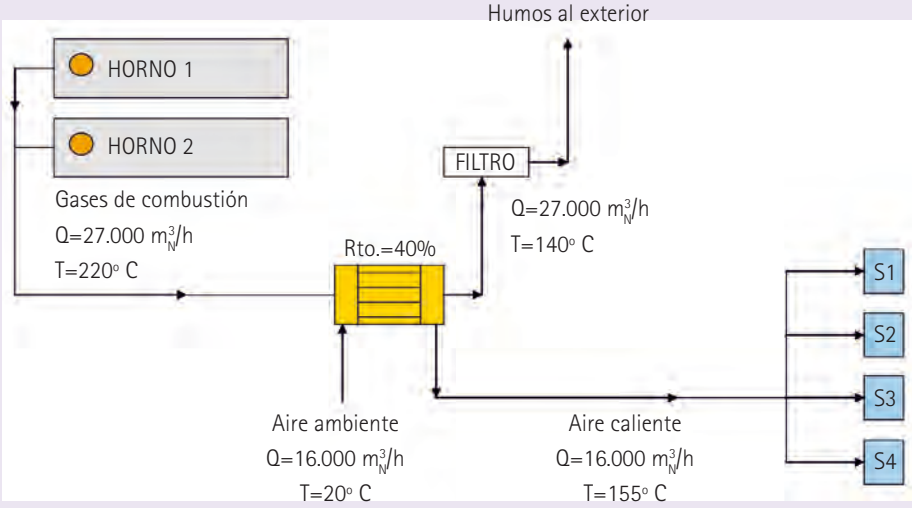


Figura 76 Esquema simplificado de la instalación.

Las principales características de la instalación se muestran a continuación:

- *Caudal total de gases de las chimeneas de humos de los hornos .....27.000 m^3_N/h*
- *Temperatura de los gases de las chimeneas de humos.....220 ºC*
- *Caudal de aire caliente a la salida del intercambiador .....16.000 m^3_N/h*
- *Temperatura del aire a la salida del intercambiador.....155 ºC*
- *Temperatura de los humos a la salida del intercambiador.....140 ºC*
- *Distancia entre el intercambiador y los secaderos.....130 metros*
- *Entalpía de los gases recuperados a los secaderos.....685 kW*
- *Rendimiento energético del intercambiador.....40 %*

En la tabla 30 se muestra el ahorro económico obtenido para distintos escenarios (tiempo de funcionamiento de la instalación de recuperación y coste de la energía térmica). En estos cálculos se ha tenido en cuenta el coste de la energía eléctrica que consumiría la instalación de recuperación.

Ahorro económico (€/año)		Tiempo de funcionamiento (h/año)		
		4.000	6.000	7.500
Coste energía térmica (€/kWh)	0,025	64.600	96.900	121.100
	0,030	78.300	117.400	146.800
	0,035	92.000	138.000	172.500
	0,040	105.700	158.500	198.200

Tabla 30 Ahorro económico obtenido en diversos escenarios.

En la tabla 31 se muestra el tiempo de retorno de la instalación para los escenarios señalados en la tabla 30. Además, se han considerado dos posibilidades de instalación:

- *Sistema de recuperación de energía e instalación del sistema de depuración de humos (opción con filtro)*
- *Sistema de recuperación de energía (opción sin filtro)*

Tiempo de retorno (años)		Tiempo de funcionamiento (h/año)					
		4.000		6.000		7.500	
		sin filtro	con filtro	sin filtro	con filtro	sin filtro	con filtro
Coste energía térmica (€/kWh)	0,025	3,9	5,9	2,6	3,9	2,1	3,1
	0,030	3,2	4,9	2,1	3,2	1,7	2,6
	0,035	2,7	4,1	1,8	2,8	1,4	2,2
	0,040	2,4	3,6	1,6	2,4	1,3	1,9

Tabla 31 Tiempo de retorno de la instalación para diversos escenarios.

A continuación se muestra una fotografía de la instalación descrita anteriormente.

Figura 77 Fotografía de una instalación de recuperación de energía en un horno de rodillos (Por cortesía de Poppi Clementino, s.r.l.).

7.3.7.2 Gases de enfriamiento

Los gases de enfriamiento suelen tener un caudal elevado, entre 20.000 y 40.000 m^3_N/h, y su temperatura se sitúa entre 100 y 250 ºC.

En algunos hornos existen dos chimeneas de enfriamiento, la primera extrae los gases procedentes de la zona de enfriamiento rápido inicial, y la segunda de la zona final de enfriamiento del horno. Esta configuración, aunque conlleva el uso de dos ventiladores de extracción, permite optimizar la recuperación de energía térmica. En efecto, la temperatura de la primera de estas chimeneas es más elevada (porque intercambian calor con las piezas cuando éstas están más calientes), lo que facilita las posibilidades de recuperación de la energía residual de los gases de enfriamiento.

Los gases procedentes del enfriamiento de los hornos, suelen aprovecharse como aire de combustión, y como aire de secado en el secadero de vagonetas situado en la entrada del horno. Si hay excedentes, pueden aprovecharse en otras etapas.

Para facilitar el calentamiento de las piezas en el horno, es común el empleo de un secadero antes de que las piezas entren al horno. De este modo se elimina la humedad residual, y se calientan ligeramente las piezas antes de iniciar el ciclo de cocción. Esta medida facilita mucho el precalentamiento del material, evitando explosiones de piezas, y permite ahorrar energía en el horno dado que el ciclo de cocción puede reducirse.

En la figura 78 se muestra una fotografía donde se pueden apreciar las dos chimeneas de enfriamiento de un horno de baldosas (la chimenea 1 es la de mayor temperatura), así como las conducciones de recuperación de calor desde la primera chimenea hacia los quemadores y el secadero situado en la entrada del horno.

Figura 78 Chimeneas de enfriamiento de un horno de baldosas (Por cortesía de Zirconio, S.A.).

En los quemadores se produce la combustión del gas natural. El calor desprendido en esta reacción de combustión se emplea en elevar la temperatura de los gases de combustión, desde la temperatura a la que se introduce el comburente en el quemador hasta la temperatura de consigna establecida.

Cuanto mayor sea la temperatura a la que se introduce el aire de combustión en los quemadores, menor será el consumo de gas. La limitación en la máxima temperatura admisible en la alimentación del aire primario de combustión viene dada por dos factores:

- La máxima temperatura que pueden soportar los elementos de distribución, regulación y control de la instalación.
- Defecto de aire (oxígeno) en la atmósfera del horno, e incluso la aparición de una atmósfera reductora por falta de aire primario. Al incrementar la temperatura del aire, disminuye su densidad, por lo que el mismo volumen contiene menos masa.

En la tabla 32 se muestra el ahorro energético obtenido al incrementar la temperatura del aire de combustión en diferentes valores. Se ha considerado que el consumo de aire es de 17,5 m^3_N por cada m^3_N de gas natural (Azara, M. et al, 1990).

ΔT (ºC)	Ahorro energético (%)
50	3,0
100	6,0
150	8,9
200	11,9
250	14,9
300	17,8

Tabla 32 Ahorro energético al aumentar la temperatura del aire de combustión.

Para elevar la temperatura del aire comburente existen varias posibilidades, todas ellas basadas en la recuperación de calor residual procedente del mismo horno. A continuación se comentan las formas más habituales de aportar aire caliente a los quemadores.

7.3.7.2.1 Calentamiento del aire de combustión en la zona de enfriamiento inicial del horno.

En esta parte del horno se desea reducir la temperatura de las piezas, y se logra inyectando aire ambiente que, tras intercambiar calor con las piezas, se extrae por la chimenea de enfriamiento.

Algunos hornos incorporan en su estructura un intercambiador de calor en la zona de enfriamiento, por el que circula aire ambiente. Este aire se calienta y se dirige, posteriormente, a los quemadores del horno.

La regulación de la temperatura se logra con una mezcla controlada de este aire caliente con aire ambiente. Las temperaturas que se alcanzan se sitúan alrededor de 100 ºC.

7.3.7.2.2 Aprovechamiento directo de los gases de enfriamiento como aire de combustión

Los gases de la chimenea de enfriamiento, si la curva de presiones en el interior del horno es adecuada, están limpios, pues no contienen productos de la combustión del gas natural ni de las reacciones químicas ocurridas en las piezas, y son adecuados para su introducción como aire primario en los quemadores.

El modo habitual de trabajo es realizar una mezcla de parte de los gases de enfriamiento con aire ambiente para alcanzar una temperatura de trabajo estable en el tiempo. Las temperaturas que se alcanzan se sitúan entre 100 y 150 ºC.

En ocasiones, los gases de la chimenea de enfriamiento, antes de dirigirse a los quemadores, se hacen pasar a través de un intercambiador de calor situado en la zona de enfriamiento rápido del horno, con el objetivo de incrementar en mayor medida su temperatura. De este modo se pueden alcanzar temperaturas cercanas a los 200 ºC.

8.

Descripción de tecnologías horizontales

8 Descripción de tecnologías horizontales

Las tecnologías horizontales son aquellas que no forman parte de un proceso productivo específico, sino que pueden encontrarse vinculadas simultáneamente a varios de ellos o estar presentes en los sistemas auxiliares asociados al funcionamiento general de la empresa.

En este apartado se realizará una breve descripción de las principales tecnologías horizontales existentes en la industria en general, aunque aplicables a la fabricación de baldosas cerámicas, caracterizando los equipos principalmente desde el punto de vista de su consumo energético. En la figura 79 se muestran los sistemas más comunes instalados en las plantas productivas del sector. Para una mejor comprensión del texto, se han considerado los motores eléctricos como un sistema independiente, aunque en la práctica estos equipos pueden emplearse para accionar otros dispositivos, como soplantes, bombas o compresores de aire.

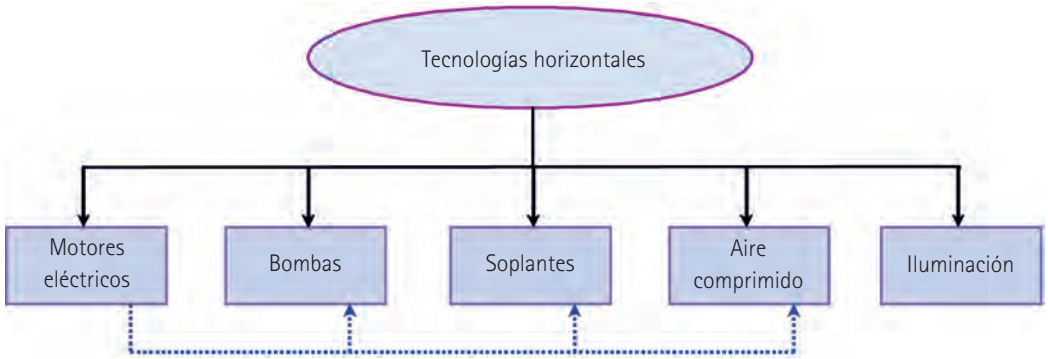


Figura 79 Tecnologías horizontales en el sector de fabricación de baldosas.

8.1 Motores eléctricos

El motor eléctrico es, posiblemente, el equipo de mayor uso en la industria, utilizándose en el sector cerámico para múltiples y muy variadas aplicaciones. En este sentido, es bastante habitual encontrar, en una planta de tamaño medio, hasta centenares de motores eléctricos, asociados a accionamiento de maquinaria de diversa naturaleza.

Los motores eléctricos son dispositivos que convierten energía eléctrica en mecánica. Como en cualquier sistema de conversión de energía, el rendimiento del proceso no es del 100 %, ya que aparecen pérdidas en forma de calor.

En el sector objeto de estudio existen motores eléctricos presentes en la práctica totalidad de procesos o subprocesos, y más específicamente en el accionamiento de sistemas como:

- Equipos de molturación (molinos de martillos, de bolas, etc).
- Extrusoras.
- Prensas.
- Cintas transportadoras.

- Trenes de rodillos o cintas en secaderos u hornos continuos.
- Soplantes o ventiladores en hornos y secaderos.
- Bombas de trasiego de aguas, barbotinas, etc.
- Sistemas de aire comprimido.
- Maquinaria auxiliar, etc.

De entre todos los tipos de motores eléctricos existentes, es sin duda el motor asíncrono trifásico (también llamado de inducción o con rotor de jaula de ardilla) el más generalizado en aplicaciones industriales. Ello se debe a su simplicidad constructiva, robustez y bajo coste (ver figura 80).

Figura 80 Motor asíncrono trifásico (Por cortesía de: Instituto Superior de Formación y Recursos en Red para el Profesorado. Ministerio de Educación, Política Social y Deporte).

Los motores eléctricos se caracterizan a través de sus parámetros nominales, los cuales suelen ir marcados en su placa de características (véase figura 81). Se debe señalar que la potencia nominal (o asignada, según la nomenclatura actual) que aparece en la placa de características se corresponde con la potencia útil en el eje cuando el motor se encuentra funcionando en régimen nominal. Nunca debe confundirse con la potencia absorbida de la red eléctrica a la que está conectado, que siempre será mayor. El rendimiento del motor se define como la relación entre ambas potencias, y siempre será inferior a la unidad.

El rendimiento de un motor, que es función tanto de sus características de diseño como de ciertos condicionantes económicos (o dicho de otro modo, de la calidad de los materiales empleados en su construcción), debe ser uno de los principales factores a tener en cuenta en el momento de la compra. Su valor en régimen nominal puede calcularse fácilmente a partir de la placa de características, según se muestra en el caso práctico nº 10. Para otros regímenes se puede solicitar información al fabricante o bien consultar la documentación técnica de la máquina.

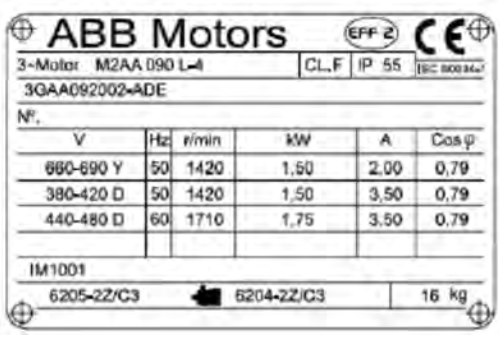


Figura 81 Placa de características de motores trifásicos de inducción (Por cortesía de ABB).

CASO PRÁCTICO Nº 10:
Rendimiento de un motor eléctrico funcionando en régimen nominal

Se va a proceder a calcular el rendimiento en régimen nominal de los motores trifásicos de inducción cuyas placas de características se mostraron en la figura 81. El rendimiento nominal puede calcularse fácilmente a partir de la expresión:

$$P_{abs} = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{1.000} \longrightarrow \eta_n = \frac{P_n \cdot 1.000}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}$$

siendo:

P_{abs} = *Potencia absorbida de la red [kW].*

P_n = *Potencia nominal (útil) [kW].*

η_n = *Rendimiento nominal.*

U_n = *Tensión de línea nominal [V].*

I_n = *Corriente de línea nominal [A].*

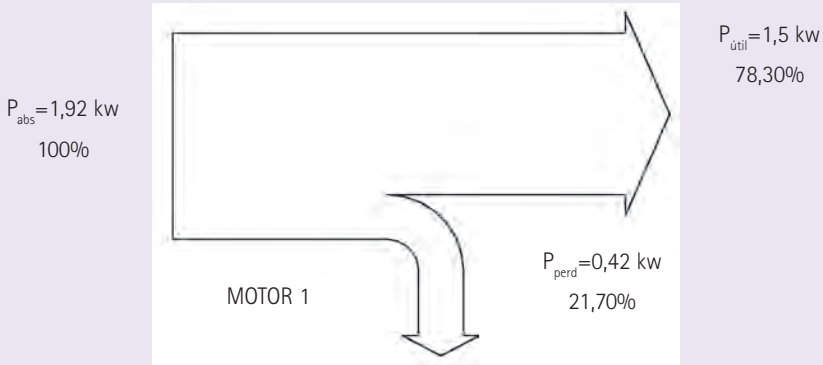
$\cos \varphi_n$ = *Factor de potencia del motor en régimen nominal.*

Aplicando la expresión a ambos casos se obtiene:

	P_n [kW]	U_n [V]	I_n [A]	$\cos \varphi_n$	P_{abs} [kW]	P_{perd} [kW]	η [%]
Motor 1	1,5	400	3,5	0,79	1,92	0,42	**78,30**
Motor 2	15	400	29	0,82	16,48	1,48	**91,05**

Tabla 33 Rendimiento de dos motores eléctricos.

El cálculo de la potencia de pérdidas indicada en la tabla 33 resulta trivial, sin más que restar a la potencia absorbida la potencia útil suministrada por el motor. A continuación se representan los diagramas de Sankey para cada equipo:



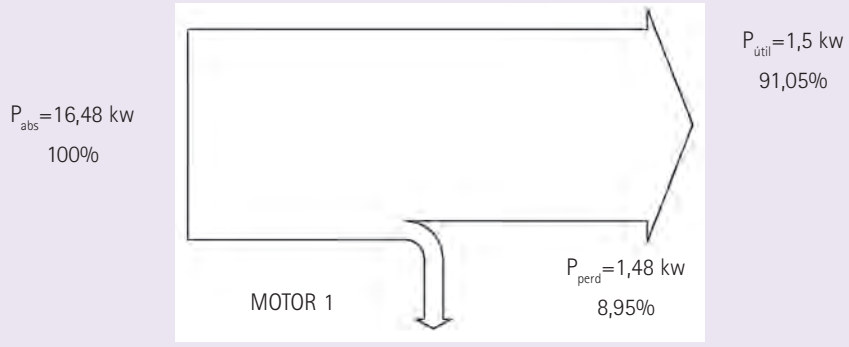


Figura 82 Diagrama de Sankey de los motores eléctricos

El rendimiento de un motor eléctrico no posee un valor fijo, sino que depende del grado de carga a que esté sometido el mismo. Como se observa en la figura 83, el rendimiento aumenta rápidamente desde 0, funcionando sin carga, a valores comparativamente altos a partir del 25 – 30 % de su carga nominal. En la zona del 50 al 100 % de su carga nominal los valores de rendimiento se mantienen relativamente constantes, con pequeñas variaciones. Por lo general, el rendimiento óptimo se encuentra en el rango del 75 % de su potencia nominal.

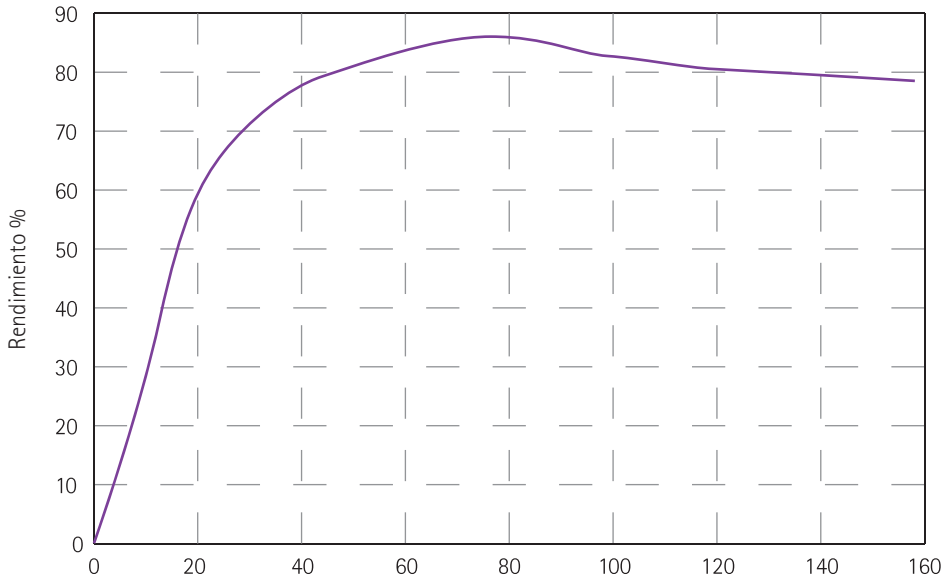


Figura 83 Curva de rendimiento genérica de un motor trifásico de inducción.

Otro aspecto a tener en cuenta es que, en los motores eléctricos industriales, el rendimiento suele mejorar a medida que aumenta su potencia nominal. Así, por ejemplo, para motores de potencia fraccionaria (inferior a 1 kW) es del orden del 50 – 70 %, en los motores de 1 – 10 kW del orden del 75 – 85 % y para motores de potencias mayores puede llegar a ser del 90 – 95 %.

8.2 Bombas

Las bombas son dispositivos empleados para elevar la presión de un líquido, e impulsarlo en una dirección determinada. Son generadores hidráulicos que transforman la energía mecánica en energía potencial (presión) y cinética del fluido transportado. Se trata de equipos con una presencia notable en la práctica totalidad de los sectores industriales.

En el sector de la fabricación de baldosas cerámicas suelen encontrarse bombas en diversos usos o aplicaciones, entre las que cabe citar:

- Circulación de agua en circuitos hidráulicos de propósito general.
- Circulación de la barbotina desde molinos a atomizadores (ver figura 84).
- Evacuación / depuración de aguas residuales.
- Usos auxiliares: circuitos de calefacción, grupos anti-incendio, etc.

Los principales tipos de bombas utilizados son:

- Bombas centrífugas, para el movimiento de agua limpia.
- Bombas neumáticas de membranas, para el movimiento de suspensiones.
- Bombas de pistones, para el bombeo de suspensiones concentradas.

Figura 84 Bombas neumáticas de membranas para bombeo de suspensiones (Cortesía de Zirconio, S.A.).

El accionamiento de las bombas se realiza mediante motores eléctricos asíncronos acoplados directamente a las mismas (ver figura 85), con lo que se consigue minimizar las pérdidas por transmisión.

Al conjunto formado por ambos equipos se le conoce como motobomba.

Al igual que sucede para los motores eléctricos, los parámetros nominales de una bomba se encuentran indicados en su placa de características. Dicha placa muestra detalles sobre el rango de diámetros para la aspiración y la descarga y, lo que es más importante, la altura y el caudal a los cuales la bomba debe trabajar.

Se debe señalar que puede existir una amplia gama de bombas que cumplan con las especificaciones de caudal y altura impuestas por la aplicación a la que se destinen. No obstante, la bomba seleccionada deberá ser aquella que cumpla con los condicionantes de diseño en el punto de mayor rendimiento o en una zona cercana al mismo.

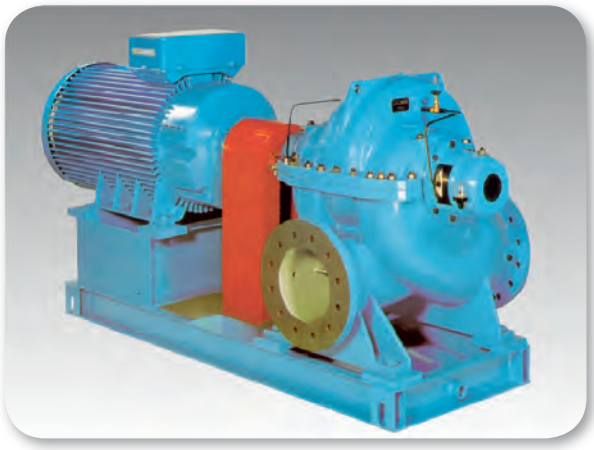


Figura 85 Grupo motor + bomba centrífuga para aplicaciones industriales (Ingersoll-Dresser Pumas).

Las bombas centrífugas industriales suelen caracterizarse por sus curvas de funcionamiento. Estas curvas son simplemente una representación gráfica de la variación, en función del caudal, de sus tres principales parámetros de operación: altura, potencia demandada y rendimiento. En la figura 86 se muestran las curvas características de una bomba centrífuga.

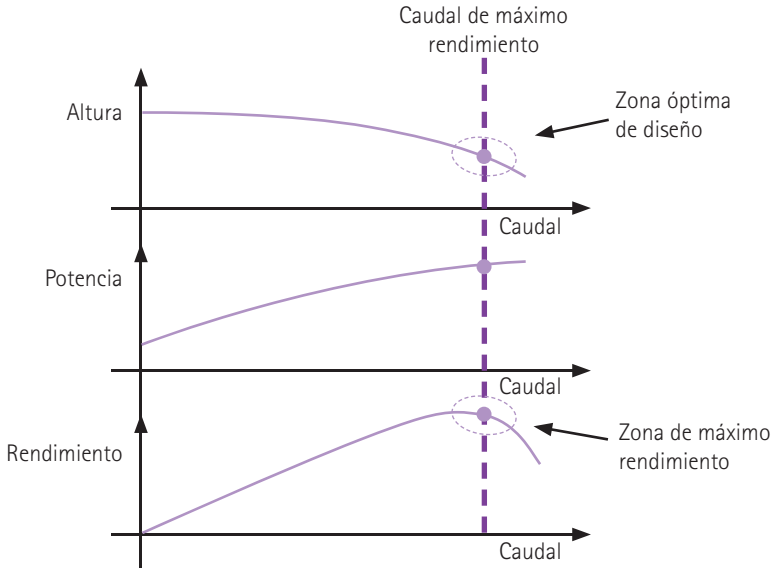


Figura 86 Curvas características de una bomba centrífuga.

Estos parámetros quedan directamente relacionados según la expresión que se muestra en el caso práctico nº 11.

CASO PRÁCTICO Nº 11:
Consumo energético y coste anual de operación de una bomba centrífuga

Una bomba centrífuga industrial entrega 150 m³/h de agua con un incremento de presión de 20 m.c.a. El rendimiento de la bomba en el punto de funcionamiento es del 80 % y es accionada por un motor eléctrico asíncrono con un rendimiento del 90 %. La bomba funciona a este régimen durante 12 h/día los 365 días del año. Se va a calcular el consumo energético y los costes anuales de funcionamiento suponiendo un coste unitario de la energía eléctrica de 0,09 €/kWh.

Las expresiones que relacionan los parámetros básicos de operación de una motobomba centrifuga son:

$$P_b = \frac{Q \cdot g \cdot h}{10 \cdot \eta_b} \longrightarrow P_{abs} = \frac{P_b}{\eta_m} \cdot 100$$

La energía consumida y los costes anuales de funcionamiento vendrán dados por:

$$E = P_{abs} \cdot t \longrightarrow C = E \cdot c$$

siendo:

P_b = *Potencia absorbida por la bomba [kW].*

P_{abs} = *Potencia absorbida de la red eléctrica [kW].*

Q = Caudal másico [kg/s].

g = Aceleración de la gravedad, constante de 9,81 [m/s²].

h = Incremento de presión generado por la bomba [mca].

η_b = *Rendimiento de la bomba [%].*

η_m = *Rendimiento del motor eléctrico [%].*

E = Consumo energético [kWh/año].

t = Nº de horas anuales de funcionamiento [h/año].

C = Coste anual de funcionamiento [€/año].

c = Coste unitario de la energía eléctrica [€/kWh].

Aplicando las expresiones se obtienen los parámetros de funcionamiento de la bomba.

Q [kg/s]	h [mmca]	η_b [%]	P_b [kW]	η_m [%]	P_{abs} [kW]	t [h/año]	E [kWh/año]	C [€/año]
42	20	80	10,3	90	11,5	4.380	**50.370**	**4.533**

Tabla 34 Parámetros de funcionamiento de una bomba.

El cálculo de la potencia de pérdidas en cada etapa de la transformación (bomba-motor y transmisión-red eléctrica) resulta trivial. A continuación se representa el diagrama de Sankey para la bomba estudiada:

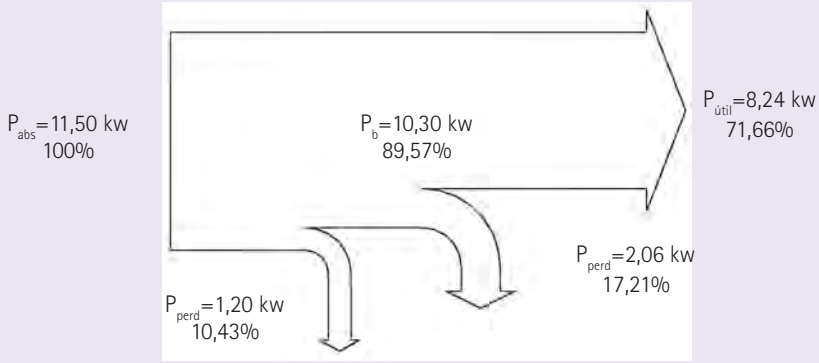


Figura 87 Diagrama de Sankey de una bomba centrífuga.

Nótese que en el diagrama están expresados los porcentajes de pérdidas con respecto de la potencia absorbida de la red eléctrica por el motor, por los que los valores resultantes están en perfecta armonía con los rendimientos de las distintas transformaciones. Como se puede observar, en este caso el rendimiento global del proceso de transformación de energía eléctrica en energía de presión y cinética del fluido es de un 71,66 %.

8.3 Soplantes o ventiladores

Una soplante es una máquina impulsora de grandes cantidades de aire o gas a una presión determinada (generalmente inferior a 1 bar). Se componen de una parte fija o voluta y una parte giratoria o rodete (ver figura 88).

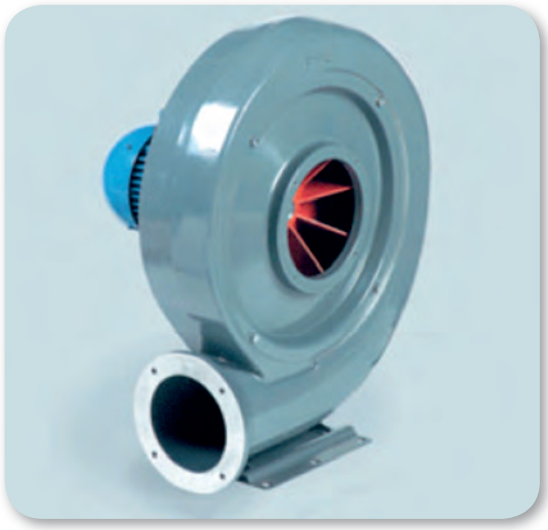


Figura 88 Ventilador centrífugo de uso industrial (Fuente: Soler&Palau).

Los ventiladores industriales se fabrican en una amplia gama de caudales, presiones y potencias, en función del uso a que se destinen. En el sector de fabricación de baldosas cerámicas los ventiladores encuentran su aplicación en:

- Impulsión de aire a quemadores en hornos y secaderos.
- Extracción de gases de combustión.
- Sistemas de recuperación de calores residuales.
- Aspiración de polvo o partículas de proceso.
- Sistemas de ventilación / calefacción / climatización.
- Refrigeración de compresores y otros equipos.

Con respecto a su accionamiento, al igual que ocurre en el caso de las bombas, se realiza en todos los casos mediante motores asíncronos de inducción. La caracterización de estos equipos se lleva a cabo mediante sus parámetros nominales. Como en las bombas, la selección se debe realizar empleando sus curvas características, en las que se relaciona caudal y presión, buscando siempre la adaptación a las condiciones de funcionamiento.

8.4 Compresores y aire comprimido

Los sistemas de aire comprimido tienen como función el suministro de un determinado caudal de aire a una presión superior a la atmosférica. Aunque estos sistemas no intervienen directamente en los procesos de producción del sector de fabricación de baldosas cerámicas, su empleo sí suele ser frecuente en aplicaciones complementarias, como accionamiento de herramientas neumáticas, limpieza, etc.

El elemento central de una instalación de aire comprimido es el compresor, equipo encargado de incrementar la presión del aire, que luego será distribuido por la planta a través de las correspondientes canalizaciones. Como puede observarse, la instalación tiene muchas similitudes con una instalación hidráulica.

Por lo que respecta a su accionamiento, los compresores industriales se encuentran accionados en la totalidad de los casos por motores eléctricos asíncronos de inducción (ver apartado 8.1).

La estructura básica de una red de aire comprimido se muestra en la figura 89. Según se observa, está compuesta por el elemento generador (compresor), un depósito de acumulación de aire y un circuito de distribución, a los que se unen otros elementos para regulación, control, medida y tratamiento del aire.

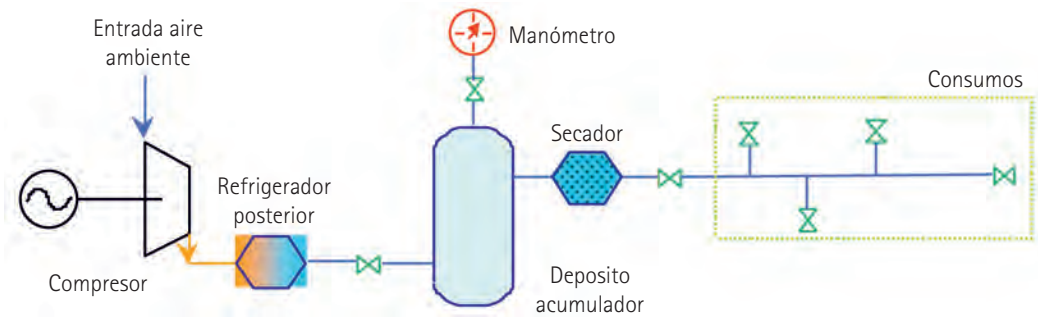


Figura 89 Estructura de la red de aire comprimido.

Un aspecto diferenciador con respecto a los sistemas hidráulicos basados en bombas, es que los sistemas de aire comprimido de cierta envergadura requieren de equipos de tratamiento de aire. Los aparatos con que se realiza este tratamiento son los refrigeradores finales y otros elementos complementarios (secadores, filtros, purgadores automáticos, etc.).

El refrigerador final es un intercambiador de calor que enfría el aire comprimido, rebajando su punto de rocío. Estos intercambiadores pueden ser aire – agua o aire – aire.

Finalmente, para el secado del aire se emplean equipos secadores, que pueden ser frigoríficos o de adsorción.

Como se puede deducir fácilmente, los sistemas de aire comprimido presentan posibilidades de ahorro energético, debido sobre todo a la presencia de los sistemas de tratamiento. Las medidas de ahorro aplicables serán estudiadas en el apartado 9.4.

8.5 Sistemas de iluminación

La luz es una manifestación de la energía que tiene lugar por transformación de energía primaria en energía lumínica. Según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el alumbrado representó en 2006 aproximadamente un 19 % de la demanda total de energía eléctrica a escala mundial.

En el caso concreto del alumbrado industrial, la participación de los sistemas de iluminación sobre la demanda total de energía eléctrica de una empresa depende, en gran medida, de las actividades desarrolladas por la misma.

Como en cualquier sistema de conversión de energía, durante el proceso se producen pérdidas, de forma que la energía útil obtenida (flujo luminoso) siempre será inferior a la energía eléctrica consumida de la red. Como se observa en la figura 90, en el caso de los sistemas de iluminación, las pérdidas se producen fundamentalmente en forma de calor, si bien en algunos tipos de lámparas se pueden generar igualmente pérdidas en forma de radiación de longitudes de onda no visibles (infrarrojo y ultravioleta).

Figura 90 Conversión energética en un sistema de iluminación.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, una lámpara será tanto más eficiente cuanta mayor cantidad de lúmenes (lm) produzca por vatio eléctrico. Si la lámpara necesita equipos auxiliares, hay que valorar los lm/W producidos incluyendo el consumo de dichos equipos auxiliares. Para un mismo tipo de lámparas, se puede afirmar que, en general, el rendimiento aumenta cuando aumenta la potencia de las mismas. Esta misma tendencia también se da en los motores eléctricos de inducción, según se indicó en el apartado 8.1.

Un sistema de iluminación no está formado por un elemento concreto, sino más bien por un conjunto de componentes con funciones bien definidas para lograr que el sistema cumpla eficazmente con su función. Estos elementos son: lámpara, luminaria y elementos auxiliares.

Evidentemente, la eficiencia energética global del sistema estará condicionada por la de cada uno de sus componentes, de forma que de nada serviría emplear una lámpara de alta eficiencia sobre una luminaria que no distribuya la luz con el ángulo adecuado.

En el mercado existe una extensa variedad de lámparas para cubrir la totalidad de usos o aplicaciones a las que pueden destinarse. En base a su principio de funcionamiento, las lámparas se clasifican en:

- Lámparas de incandescencia (o termorradiación).
- Lámparas de descarga (o de luminiscencia).
- Lámparas de inducción.
- Lámparas LED.

De entre todos los grupos, son las lámparas de descarga las que encuentran su mayor aplicación industrial, por lo que será en ellas en las que se centre este texto. La forma de las lámparas de descarga es variable, pudiendo ser tubulares, elipsoidales cilíndricas, etc.

No obstante, presentan una serie de elementos comunes, como el tubo de descarga, los electrodos, la ampolla exterior o el casquillo.

Dentro de este grupo se pueden encontrar diferentes tecnologías, siendo las de mayor uso en alumbrado de naves industriales las indicadas a continuación:

- Lámparas de vapor de sodio a alta presión
- Lámparas de vapor de mercurio a alta presión.
- Lámparas fluorescentes.
- Lámparas de halogenuros metálicos.

En las figuras 91 a 94 se pueden observar los diferentes tipos de lámparas.

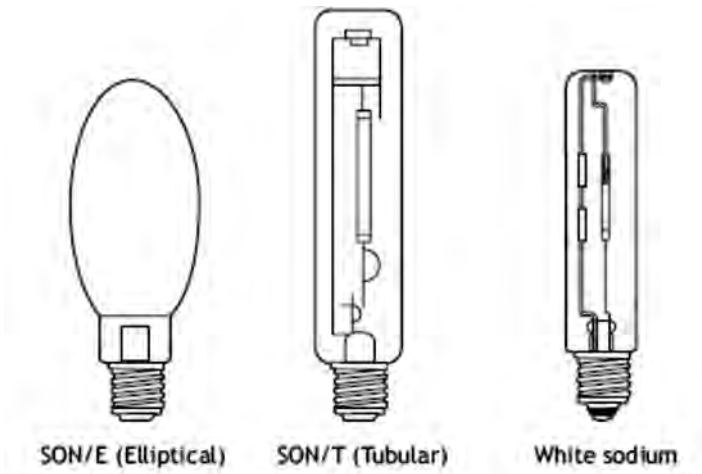


Figura 91 Lámparas de vapor de sodio de alta presión.

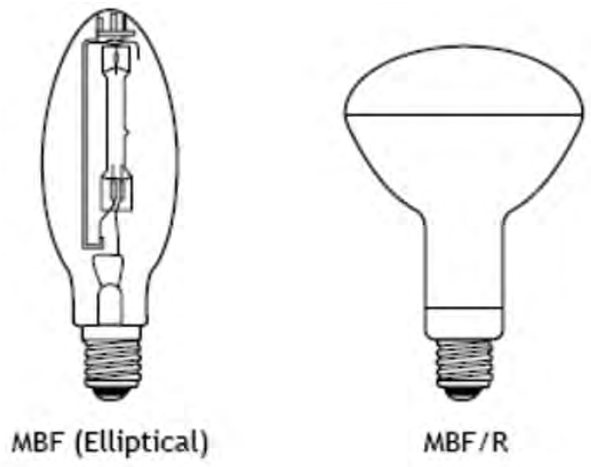


Figura 92 Lámparas de vapor de mercurio a alta presión.

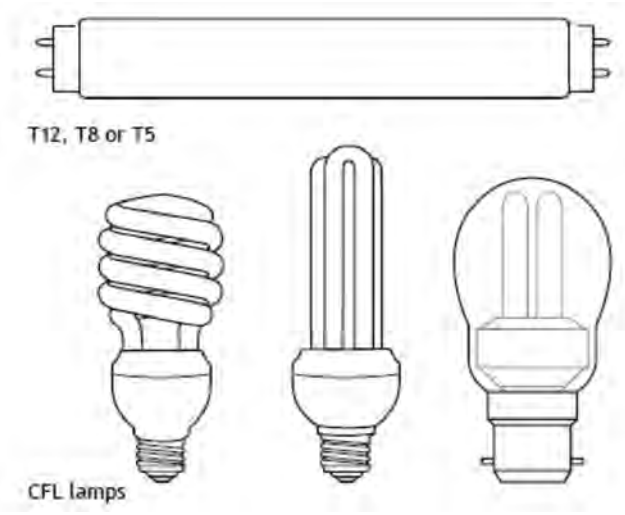


Figura 93 Lámparas fluorescentes.

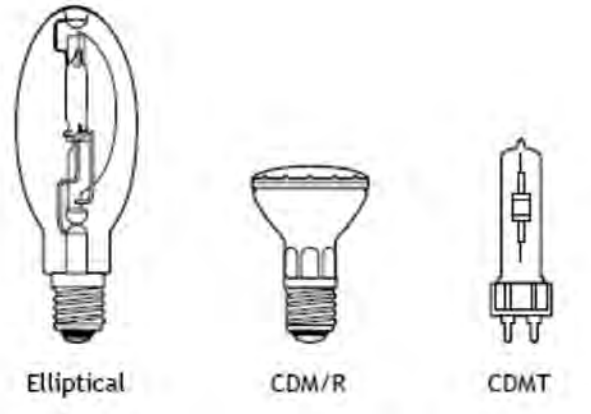


Figura 94 Lámparas de halogenuros metálicos.

En el apartado 9.5 se analiza de forma detallada las características de eficiencia energética de estos tipos de lámparas. Como ya se ha indicado, todas ellas presentan la característica de requerir equipos auxiliares y por tanto un cierto tiempo de encendido hasta alcanzar las condiciones nominales de funcionamiento. Además, presentan un factor de potencia inferior a la unidad que, en caso de no estar compensado internamente, deberá ser corregido mediante condensadores (ver apartado 9.6).

En cuanto a los requisitos que debe cumplir un buen sistema de iluminación, están fuertemente condicionados por la aplicación a que se destine el mismo. Así por ejemplo, según el tipo de uso, podrá primar la funcionalidad, la estética, la tonalidad, la eficiencia energética, la facilidad de mantenimiento, la robustez de los equipos, etc.

Los requisitos que debe cumplir un sistema de alumbrado industrial son:

- Buen rendimiento en color para optimizar las condiciones de trabajo.
- Ausencia de deslumbramientos.
- Alta eficiencia luminosa para ahorrar energía.
- Prolongada vida útil para minimizar la reposición de lámparas.
- Fiabilidad y robustez para reducir los costes de mantenimiento y las interrupciones.
- Posibilidad de reciclado y mínimo uso de sustancias peligrosas para proteger el medio ambiente.

9.

Medidas de ahorro energético aplicables en tecnologías horizontales

9 Medidas de ahorro energético aplicables en tecnologías horizontales

En este apartado se estudiarán las posibilidades de ahorro energético y económico en las tecnologías horizontales presentes en el sector de fabricación de baldosas cerámicas. Si para las tecnologías de proceso las medidas se centraban en el ahorro de energía térmica, en el caso de las tecnologías horizontales las actuaciones se basarán en el ahorro de energía eléctrica.

Las ventajas que conlleva el ahorro de energía eléctrica se pueden analizar desde un triple enfoque: autosuficiencia, economía y medio ambiente.

En primer lugar, es bien sabido que la energía eléctrica experimenta múltiples procesos de conversión, con sus consiguientes pérdidas, hasta que llega al usuario final. Por regla general, cada kilovatio-hora de energía final supone entre 2 y 3 kilovatio-hora en energía primaria, dependiendo de la tecnología empleada para su producción. Ello da una idea de las ventajas del ahorro en energía eléctrica para la autosuficiencia energética de una comunidad.

En segundo lugar, y debido igualmente a sus múltiples procesos de transformación, la energía eléctrica se considera una energía noble, con un coste elevado si se compara con otras fuentes energéticas. Cualquier ahorro energético se traduce por tanto en un ahorro económico que redunda en una mejora de la competitividad de las empresas.

Finalmente, desde el punto de vista medioambiental, puesto que las actividades relacionadas con la energía (generación, transformación y consumo) representan el 80% de las emisiones de CO_2 a escala mundial, la promoción y establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética supone una aportación valiosa al cumplimiento de los compromisos derivados de la ratificación del Protocolo de Kioto por parte de la Unión Europea.

La figura 95 recoge las principales estrategias de ahorro energético de aplicación a las tecnologías horizontales presentes en el sector, las cuales serán analizadas en este apartado. En el caso de la compensación de energía reactiva, si bien no se trata de una medida de ahorro energético propiamente dicha, sí puede suponer un considerable ahorro económico para la empresa, al reducir el importe anual de su factura eléctrica, lo que justifica su inclusión en este texto.

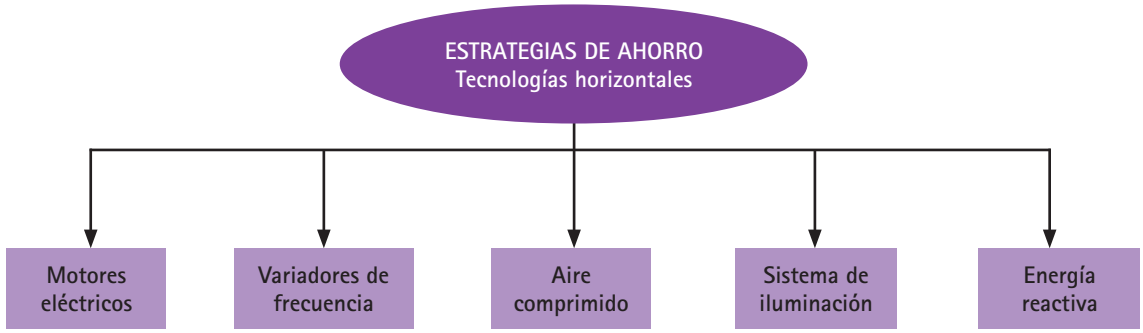


Figura 95 Estrategias de ahorro energético y económico en tecnologías horizontales.

9.1 Control, gestión y mantenimiento de las instalaciones

Las acciones encaminadas a mejorar la gestión de las instalaciones industriales y a mantener las diferentes tecnologías en buen estado no son acciones de ahorro energético en sí, pero contribuyen a que el consumo energético de las mismas no sea superior al esperado en condiciones nominales.

Así, un buen control de los diferentes dispositivos y una adecuada gestión de los mismos permitirá, por ejemplo, conocer cuál es su consumo energético habitual y por tanto, permitirá detectar y corregir posibles desviaciones que conduzcan a un consumo energético mayor.

En este sentido, realizar periódicamente un mantenimiento preventivo es muy conveniente para evitar paradas imprevistas, y periodos de funcionamiento en condiciones alejadas de las nominales, que habitualmente conllevan un mayor consumo eléctrico.

Estas actividades de control, gestión y mantenimiento pueden aplicarse a cualquier tecnología, como son motores eléctricos, soplantes y sistemas de aire comprimido e iluminación, tal y como se detalla en los siguientes apartados.

9.2 Ahorro energético en motores eléctricos

Aunque tradicionalmente se han considerado los motores eléctricos como equipos que ofrecen limitadas posibilidades de ahorro energético, existen diversas medidas, fácilmente aplicables, que conducen a ahorros sustanciales de su consumo, las cuales se describen en este apartado.

Si bien los ahorros obtenidos se pueden considerar reducidos en términos relativos, se debe tener en cuenta que se trata de sistemas que funcionan un gran número de horas, por lo que su repercusión en el consumo energético global puede ser muy significativa.

En este sentido, cabe señalar que la energía consumida por un motor en sus primeros 3 meses de funcionamiento puede representar un coste superior al del propio motor; o dicho de otro modo, durante su vida útil, un motor eléctrico puede gastar hasta cien veces más de lo que costó su compra.

Según diversos estudios llevados a cabo en el seno de la Unión Europea, los motores suponen alrededor del 65 % de la energía eléctrica consumida en aplicaciones industriales.

Considerando lo expuesto en el apartado 8.1, el consumo energético de un motor eléctrico depende de dos parámetros fundamentales: punto de funcionamiento y características del motor.

En consecuencia, cualquier medida de ahorro energético que se adopte deberá actuar, directa o indirectamente, sobre uno de estos dos términos (ver figura 96).

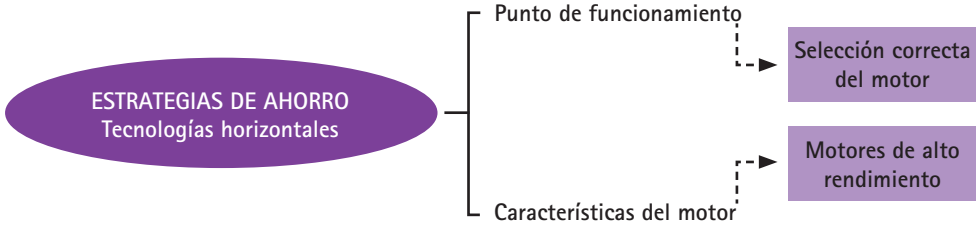


Figura 96 Estrategias de ahorro energético en motores eléctricos.

Existiría una tercera estrategia de ahorro aplicable a motores eléctricos, consistente en la modificación de su curva de funcionamiento mediante variadores de velocidad, optimizándola para la carga accionada. Por la importancia que merece, a esta estrategia se le dedica posteriormente un tratamiento específico (en el apartado 9.3).

9.2.1 Selección correcta del motor

Según se indicó en el apartado 8.1, los motores modernos están diseñados generalmente para ofrecer su rendimiento máximo a un 75 % de su carga nominal. Además, funcionando entre un 50 – 100 % de la misma solo existe una mínima variación de este parámetro. Sin embargo, a cargas menores del 25 % el rendimiento sufrirá una caída brusca (véase caso práctico nº 12) y debe ser tomada en consideración la sustitución del motor por uno de menor potencia nominal.

Es importante realizar ciertas consideraciones sobre el funcionamiento del motor cuando se encuentra accionando una carga determinada. En este sentido, se debe señalar que es la propia carga la que determina la potencia que absorberá un motor. Por ejemplo, una soplante que requiera 15 kW para funcionar bajo unas determinadas condiciones de caudal y velocidad podría ser accionada mediante un motor de 15 kW, en cuyo caso coincidirían ambas potencias.

Esa misma soplante podría accionarse igualmente mediante un motor de 55 kW, con la consecuente reducción de la eficiencia del sistema. Finalmente, la carga podría también accionarse con un motor de potencia menor que la requerida, aunque éste podría ver considerablemente reducida su vida útil.

Aunque las razones por las que los motores resultan habitualmente sobredimensionados pueden ser de distinta naturaleza, en la mayoría de los casos tienen su origen en márgenes de seguridad excesivos por parte de los proyectistas o en cambios de aplicación de los equipos.

CASO PRÁCTICO Nº 12:
Sustitución de un motor por otro de menor potencia nominal

Un motor eléctrico de 5,5 kW de potencia nominal se encuentra funcionando durante 16 h al día al 20 % de su carga nominal, con un rendimiento del 60 %. Se va a proceder a estudiar las posibilidades de sustitución del motor por otro de 1,5 kW, calculando el ahorro energético y económico obtenido.

A partir de las expresiones indicadas en el apartado 8.1 se puede calcular fácilmente la potencia absorbida por el motor. Suponiendo que opera 365 días al año y un coste de la energía eléctrica de 0,09€/kWh, se puede calcular su consumo energético así como el coste anual de funcionamiento:

$$P_{abs} = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{P_n \cdot FC}{\eta} \cdot 100 \longrightarrow E = P_{abs} \cdot t \longrightarrow C = E \cdot c$$

siendo:

P_{abs} *= Potencia absorbida de la red [kW].*

P_u *= Potencia útil en el eje [kW].*

P_n *= Potencia nominal [kW].*

FC = Fracción de la carga nominal a que funciona el motor (1, ¾, ½...).

η = Rendimiento del motor en el punto de carga [%].

E = Consumo energético [kWh/año].

t = Nº de horas anuales de funcionamiento [h/año].

C = Coste anual de funcionamiento [€/año].

c = Coste unitario de la energía eléctrica (sin IVA) [€/kWh].

Evidentemente, la carga seguirá demandando la misma potencia independientemente del motor empleado. Por tanto el factor de carga del nuevo motor será de 0,73 (1,1/1,5). De las curvas de catálogo del nuevo motor se deduce que a un régimen de carga del 73 % se obtiene un rendimiento del 77 %.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

SUSTITUCIÓN DE MOTORES 5,5 kW – 1,5 kW								
Motor	P_n [kW]	FC	P_u [kW]	η [%]	P_{abs} [kW]	t [h/año]	E [kWh/año]	C [€/año]
Motor 1	5,5	0,20	1,1	**60,0**	1,83	5840	**10.707**	**964**
Motor 2	1,5	0,73	1,1	**77,0**	1,43	5840	**8.343**	**751**

Tabla 35 Sustitución de motores.

En la siguiente gráfica se muestra visualmente cómo se desplaza el punto de funcionamiento al realizar el cambio de motor. Como se observa, a pesar de que los motores de menor potencia tienen una curva más desfavorable, el funcionamiento a un régimen de carga mayor mejora el rendimiento del equipo.

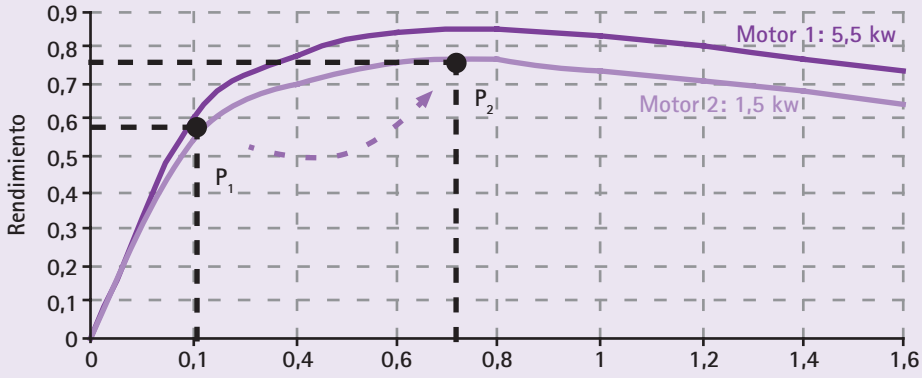


Figura 97 Rendimiento de dos motores con distinta potencia nominal.

Del análisis de los resultados se concluye que los ahorros obtenidos son del orden del 20 %. Aunque puedan parecer poco relevantes (2.364 kWh/año de ahorro energético y 213 €/año de ahorro

económico) hay que tener en cuenta que se trata de motores de potencia reducida. Además, no se han tenido en cuenta los ahorros económicos indirectos obtenidos por la mejora del factor de potencia, al funcionar el motor con un factor de carga mayor.

En general, los equipos compactos, como compresores o soplantes, que funcionen en condiciones cercanas a las nominales, suelen incluir un motor que ya ha sido correctamente seleccionado considerando la máquina accionada y el ciclo de funcionamiento, por lo que en estos casos normalmente existen reducidas posibilidades de ahorro por redimensionado del motor.

Sin embargo, sí podrían existir perspectivas de ahorro por redimensionado en motores destinados a las siguientes aplicaciones:

- Sistemas construidos a partir de elementos discretos, donde el ingeniero de proyectos toma a menudo factores de seguridad excesivamente amplios.
- Cambios en los sistemas productivos que hayan reducido la carga en el motor.
- Cambios de uso de los motores, donde se intenta aprovechar motores que venían siendo utilizados en otras aplicaciones.

Aunque los periodos de retorno de las inversiones a realizar no suelen justificarse si se atiende únicamente a criterios económicos, sí resultan interesantes en el caso de tener que sustituir o reparar un motor averiado o en el caso de compra o diseño de nuevos equipos.

9.2.2 Motores de alto rendimiento

En octubre de 1998, la Comisión Europea alcanzó un acuerdo con la CEMEP (European Comité of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) para introducir un nuevo sistema de clasificación sobre la base de tres niveles de eficiencia para motores eléctricos. Este acuerdo forma parte de las medidas de mejora de la eficiencia energética y reducción de las emisiones de CO_2 llevadas a cabo por la Unión Europea. Los resultados alcanzados ya son más que evidentes en la actualidad, resultando una considerable reducción en la venta de motores de menor rendimiento.

El nuevo sistema de clasificación establece el etiquetado de los motores eléctricos atendiendo a tres tipos o niveles de rendimiento (o eficiencia), definidos con sus respectivos logotipos normalizados:

EFF 1 Motores de alto rendimiento

EFF 2 Motores de rendimiento mejorada

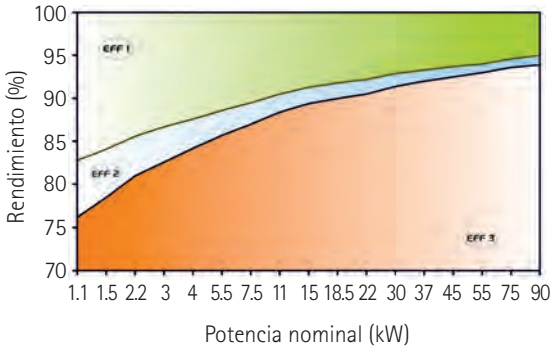
EFF 3 Motores de rendimiento estándar

Este marcado debe aparecer claramente visible en la placa de características de la máquina (véase figura 81, apartado 8.1). Aunque por el momento se trata de un acuerdo voluntario, la práctica totalidad de los fabricantes se han adherido al programa, por lo que la especificación o selección de un motor se realiza de una forma mucho más racional desde el punto de vista energético.

Figura 98 Motor asíncrono de inducción de 30 kW, clase energética EFF1 (Por cortesía de ABB).

MOTORES 2 POLOS			
Pn (kW)	EFF3	EFF2	EFF1
1,1	< 76,2	≥ 76,2	≥ 82,8
1,5	< 78,5	≥ 78,5	≥ 84,1
2,2	< 81,0	≥ 81,0	≥ 85,6
3	< 82,6	≥ 82,6	≥ 86,7
4	< 84,2	≥ 84,2	≥ 87,6
5,5	< 85,7	≥ 85,7	≥ 88,6
7,5	< 87,0	≥ 87,0	≥ 89,5
11	< 88,4	≥ 88,4	≥ 90,5
15	< 89,4	≥ 89,4	≥ 91,3
18,5	< 90,0	≥ 90,0	≥ 91,8
22	< 90,5	≥ 90,5	≥ 92,2
30	< 91,4	≥ 91,4	≥ 92,9
37	< 92,0	≥ 92,0	≥ 93,3
45	< 92,5	≥ 92,5	≥ 93,7
55	< 93,0	≥ 93,0	≥ 94,0
75	< 93,6	≥ 93,6	≥ 94,6
90	< 93,9	≥ 93,9	≥ 95,0

MOTORES 4 POLOS			
Pn (kW)	EFF3	EFF2	EFF1
1,1	< 76,2	≥ 76,2	≥ 83,8
1,5	< 78,5	≥ 78,5	≥ 85
2,2	< 81,0	≥ 81,0	≥ 86,4
3	< 82,6	≥ 82,6	≥ 87,4
4	< 84,2	≥ 84,2	≥ 88,3
5,5	< 85,7	≥ 85,7	≥ 89,2
7,5	< 87,0	≥ 87,0	≥ 90,1
11	< 88,4	≥ 88,4	≥ 91
15	< 89,4	≥ 89,4	≥ 91,8
18,5	< 90,0	≥ 90,0	≥ 92,2
22	< 90,5	≥ 90,5	≥ 92,6
30	< 91,4	≥ 91,4	≥ 93,2
37	< 92,0	≥ 92,0	≥ 93,6
45	< 92,5	≥ 92,5	≥ 93,9
55	< 93,0	≥ 93,0	≥ 94,2
75	< 93,6	≥ 93,6	≥ 94,7
90	< 93,9	≥ 93,9	≥ 95,0



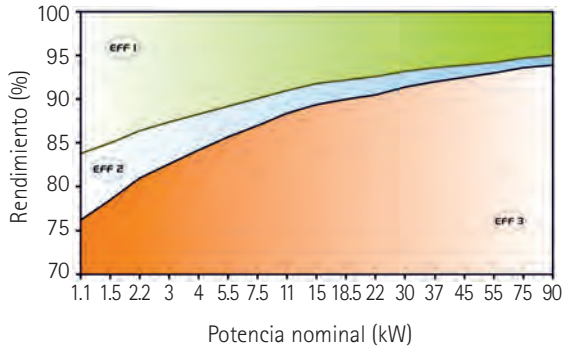


Figura 99 Clasificación energética de motores eléctricos de inducción.

En la figura 99 se muestran los datos de umbrales de rendimiento en función de la potencia nominal y del número de polos de los motores para cada uno de los niveles de eficiencia: EFF1, EFF2 y EFF3. Se debe señalar que los valores tabulados son de aplicación a motores de inducción trifásicos con rotor en jaula de ardilla, en la gama que va desde 1,1 a 90 kW, de 2 ó 4 polos, aptos para una tensión nominal de 400 V y 50 Hz. Aunque estos valores se refieren a condiciones de carga nominal, el fabricante suministrará también en sus catálogos los valores de rendimiento al 50 % y 75 % de la misma.

Como puede observarse en el caso práctico nº 13, la sustitución de motores estándar por motores de alto rendimiento supondría periodos de retorno considerables si se atiende únicamente al ahorro de energía eléctrica. Pero si se tiene en cuenta solo su sobrecoste respecto de un motor convencional, se podría amortizar en periodos de 2-3 años. En consecuencia, la instalación de motores de alto rendimiento resulta especialmente interesante en el caso de renovación o compra de nuevos equipos, ya sea por averías o por cambios en los requisitos de la máquina accionada.

Por otro lado, las ventajas de los motores de alto rendimiento no son solo energéticas. Estos equipos poseen sistemas de refrigeración más eficientes y menores cargas electromecánicas, por lo que son mucho más silenciosos. Adicionalmente, su factor de potencia es mayor que en los motores convencionales, con el consiguiente ahorro económico en la facturación eléctrica y en el tamaño de los dispositivos de compensación de energía reactiva necesarios (ver apartado 9.6).

CASO PRÁCTICO Nº 13:
Sustitución de motores estándar por alto rendimiento. Cálculo de ahorros

El ahorro energético y económico conseguido en la sustitución de un motor estándar (EFF3) por uno de alto rendimiento (EFF1 o EFF2) puede calcularse fácilmente a partir de las expresiones:

$$A_{ene} = P_n \cdot FC \cdot t \cdot \left(\frac{1}{\eta_{std}} - \frac{1}{\eta_{eff}} \right) \cdot 100 \longrightarrow A_{eco} = A_{ene} \cdot C$$

siendo:

A_{ene} = *Ahorro energético [kWh/año].*

A_{eco} = *Ahorro económico [€/año].*

P_n = *Potencia nominal (útil) [kW].*

FC = Fracción de la carga nominal a que funciona el motor (1, ¾, ½...).

t = Nº de horas anuales de funcionamiento [h/año].

η_{std} = *Rendimiento del motor estándar en el punto de carga [%].*

η_{eff} = *Rendimiento del motor de alta eficiencia en el punto de carga [%].*

C = Coste unitario de la energía eléctrica (sin IVA) [0,09 €/kWh].

A continuación se analizan varios casos de sustitución de motores estándar (EFF3) por otros de alto rendimiento (EFF1), calculando los ahorros obtenidos. Los datos de rendimiento utilizados han sido tomados de catálogos de motores de 4 polos comerciales, a diferentes regímenes de carga.

Situación	P_n (kW)	FC	t (h/año)	n_{std} (%)	n_{eff} (%)	A_{ene} (kWh/año)	A_{eco} (€/año)
1	2,2	0,5	5.000	77,1	85,5	700,8	63,1
2	2,2	1	5.000	79,2	86,4	1.157,4	104,2
3	15	0,75	4.500	86,9	91,8	3.109,6	279,9
4	15	0,75	7.000	86,9	91,8	4.837,1	435,3
5	75	1	8.000	93,2	94,8	10.865,4	977,9

Tabla 36 Sustitución de motores estándar por alto rendimiento.

A la vista de los resultados obtenidos se concluye que, como era de esperar, los ahorros energéticos y económicos son proporcionales a la potencia del motor, a su factor de carga y al número de horas de funcionamiento. De ahí la importancia de actuar sobre los motores de mayor potencia y que trabajen un mayor número de horas.

Del estudio del caso se deduce igualmente que los ahorros de energía eléctrica alcanzados oscilan entre un 2 y un 10 % del consumo de un motor estándar. Los mayores porcentajes de ahorro se producen para motores de pequeña potencia y reducidas horas de funcionamiento, en tanto que los menores porcentajes corresponden a los motores de mayor potencia con un uso más intensivo. Sin embargo, si se analizan los valores en términos absolutos, este comportamiento se invierte.

9.3 Uso de variadores de frecuencia

9.3.1 Conceptos básicos y aplicaciones

Según se expuso en el apartado 8.1, el motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asíncrono depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las compañías eléctricas es constante a 50 Hz, la velocidad de los motores asíncronos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia.

El método más eficiente para controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia (figura 100). No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes energéticamente que otros sistemas y tienen precios cada vez más competitivos.

Figura 100 Familia de variadores de frecuencia Sinamics g110 (Por cortesía de Siemens).

En el sector de fabricación de baldosas cerámicas, los variadores de frecuencia tienen sus principales aplicaciones en los siguientes tipos de máquinas:

- **Bombas y ventiladores**. Mediante el uso de variadores de frecuencia se logra controlar el caudal de fluido en sistemas de presión constante y volumen variable. En este caso se obtiene un gran ahorro de energía porque el consumo varía con el cubo de la velocidad del motor, o sea que para la mitad de la velocidad, el consumo es la octava parte de la nominal.
- **Compresores de aire**. Se obtienen arranques suaves con par máximo y menor consumo de energía en el funcionamiento.
- **Molinos**. Permiten el ajuste de la velocidad de rotación del molino en función de la curva de molturación de la materia prima.
- **Cintas transportadoras**. Controlan y sincronizan la velocidad de la cinta de acuerdo al tipo de producto que se transporta, para dosificar, para evitar ruidos y golpes en transporte de piezas, para arrancar suavemente y evitar la caída del producto que se transporta, etc.

El presente texto se centrará en las tres primeras aplicaciones, puesto que es en las mismas donde el uso de variadores de frecuencia está claramente justificado por sus indudables ventajas de ahorro energético.

9.3.2 Aplicación de variadores de frecuencia en bombas

Según lo expuesto en el apartado 8.1, el rendimiento de los motores de inducción, que son los que se utilizan en instalaciones de bombeo, disminuye cuando trabajan a cargas parciales, por lo que los motores excesivamente sobredimensionados trabajan permanentemente con bajos rendimientos.

Por otra parte, es bastante frecuente que las instalaciones de bombeo, por necesidades de servicio, tengan que trabajar durante periodos largos de tiempo, en condiciones distintas a las de diseño. En estas condiciones, los sistemas de bombeo tradicionales, que funcionan a velocidad fija, sufren una disminución importante de su eficiencia energética, ya que en estos equipos la regulación de caudal se realiza mediante sistemas poco eficientes, que generan un aumento de la pérdida de carga de la conducción. Por el contrario, la utilización de bombas accionadas por motores de velocidad variable permite modificar las características de funcionamiento de los sistemas de bombeo, adaptándolos a condiciones de utilización muy distintas de las especificadas en el diseño, sin que el rendimiento del sistema varíe sustancialmente.

A continuación se analizan las formas básicas de regulación de caudal en bombas que se muestran en la figura 101.

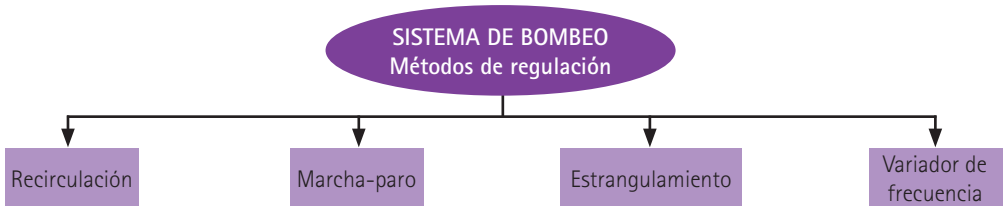


Figura 101 Métodos de regulación en sistemas de bombeo.

- Recirculación o by-pass. Es adecuada desde el punto de vista del mantenimiento, ya que ahorra arranques y paradas, sin embargo, presenta la gran desventaja de no reducir la potencia demandada al motor cuando se disminuye el caudal, presentándose como el método de regulación más pobre desde el punto de vista energético.
- Marcha – paro. Es poco atractiva, pues conlleva una regulación demasiado escalonada, y un número de averías y envejecimiento prematuro de la instalación.
- Válvula de estrangulamiento. Es la más extendida de todas en la industria, aunque está perdiendo esa supremacía frente a la regulación electrónica, debido fundamentalmente al ahorro que implica la instalación de este último método.
- Variadores electrónicos de velocidad. Se presenta como un método energéticamente eficiente para regular el caudal. Desde el punto de vista del mantenimiento es un buen sistema de regulación, pues evita golpes de ariete al disponer de rampas de frenado suaves, y evita las altas intensidades de arranque al efectuar arranques progresivos.

En la industria cerámica, cuando se bombean suspensiones, hay que tener en cuenta que muchas de ellas presentan un comportamiento reológico no newtoniano, por lo que pueden aparecer problemas de bombeo asociados a este comportamiento (tixotropía, pseudoplasticidad, etc).

Como resumen se puede decir que la regulación electrónica de velocidad, se presenta como la opción más atractiva, tanto desde la perspectiva del ahorro energético como de la fiabilidad, disponibilidad

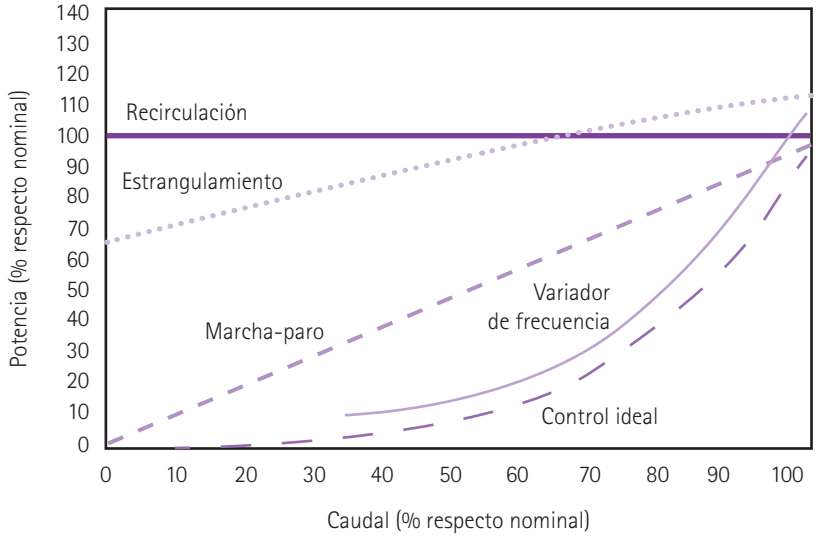


Figura 102 Consumo energético de las distintas opciones de regulación de bombas.

y mantenimiento. En la figura 102 se muestra el consumo energético de las diferentes opciones de regulación de las bombas.

Debido al amplio rango de regulación que puede requerirse en la instalación de bombeo, mediante la aplicación de reguladores de velocidad a los motores que accionan las bombas, se pueden conseguir ahorros de hasta el 40 – 50 % del consumo eléctrico de los mismos.

La rentabilidad de esta mejora depende del tamaño de los motores, ya que la inversión es comparativamente más elevada cuanto menor es el tamaño del motor y también depende de la curva anual de variación de caudal, por lo que se ha de analizar para cada caso.

En el caso práctico nº 14 se expone un ejemplo de la aplicación de un variador de frecuencia a una bomba de suministro de barbotina.

CASO PRÁCTICO Nº 14:
Incorporación de variador de velocidad en bombeo de barbotina

A continuación se llevará a cabo un estudio comparativo entre la regulación mediante estrangulamiento y la regulación mediante variación electrónica de velocidad en sistema de bombeo de barbotina, accionado por un motor de inducción de 7,5 kW de potencia nominal.

Situación inicial

Regulación mecánica:	*Válvula de estrangulamiento*
Régimen medio de carga:	*70 %*
Horas de trabajo:	*2.920 h/año*
Consumo eléctrico:	*19.864 kWh/año*
Coste energía eléctrica:	*0,09€/kWh*
Coste eléctrico anual:	*1.788€/año*

Situación final (con variador de frecuencia)

Consumo eléctrico:	*9.244 kWh/año*
Coste eléctrico anual:	*832€/año*

Cálculo económico

Ahorro energético:	*10.620 kWh/año*
% Ahorro:	*53,5 %*
Ahorro económico:	*956€/año*
Inversión:	*2.200€*
Periodo de Retorno Simple:	*2,3 años*

9.3.3 Aplicación de variadores de frecuencia en soplantes

Históricamente, el control de las soplantes se llevaba a cabo desde una perspectiva operativa, sin tener en cuenta su consumo energético.

Cuando es previsible que las soplantes operen de manera constante a su carga nominal, resulta interesante instalar motores de alto rendimiento, ya sea para instalaciones nuevas o bien cuando se prevea la sustitución de motores (apartado 9.2.2).

Sin embargo, las soplantes raramente operan en condiciones nominales durante largos periodos de tiempo, sino que sus parámetros de operación son variables. En este caso, para regular el flujo de aire, se ha utilizado tradicionalmente un motor de velocidad constante con una válvula de mariposa ajustable en el conducto de salida. Desde una óptica energética, el uso de válvulas para variar los flujos de aire, es extremadamente ineficiente.

Otro método que también se ha empleado en la industria es la reducción de la sección del conducto de aspiración, mediante guías orientables o rotativas que bloquean en parte la toma de aire de entrada. Este sistema presenta un mejor comportamiento energético que el anterior, aunque tampoco se trata de un método óptimo de regulación.

Los variadores de velocidad electrónicos son mucho más eficientes energéticamente (véase figura 103) y permiten un ajuste preciso y continuo de la velocidad a un precio relativamente reducido. Pueden ser usados tanto en secaderos u hornos intermitentes como continuos.

Cuando se considera la instalación de un variador de velocidad resulta importante comprobar que la soplante permite la operación a velocidad variable en el rango de cargas requerido.

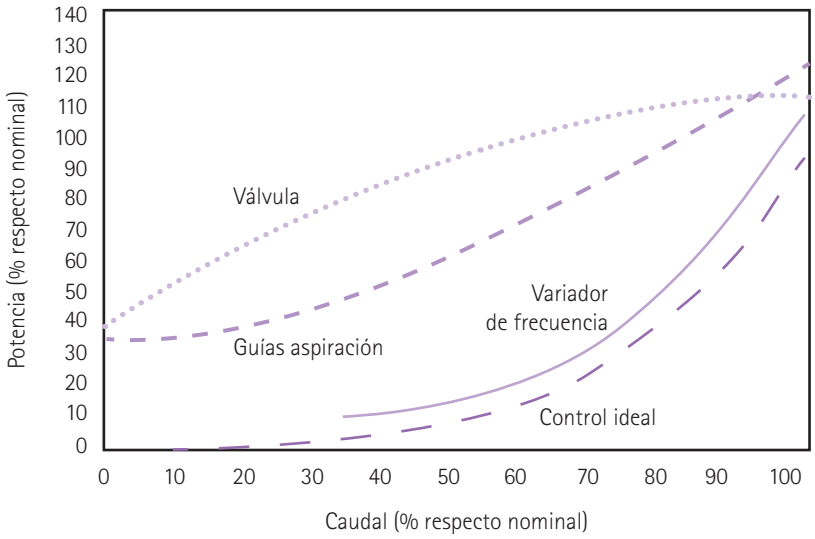


Figura 103 Consumo energético de las distintas opciones de regulación de soplantes.

Debido a las enormes similitudes entre el funcionamiento y métodos de regulación utilizados en bombas y soplantes, son de aplicación las consideraciones realizadas en el anterior apartado.

Finalmente, en el mercado también existen soplantes que operan con otros métodos de regulación, como por ejemplo la variación del ángulo de ataque de los álabes ("pitch"). Este sistema presenta un

comportamiento energético similar al que se obtiene empleando variadores de frecuencia, pero es poco operativo, ya que debe accionarse manualmente. Existe la alternativa de efectuar una regulación automática pero, al incrementarse el coste, solo se emplea en productos de alta gama y para aplicaciones muy concretas.

9.3.4 Aplicación de variadores de frecuencia en compresores

Tanto los compresores de aire rotativos como los alternativos presentan esencialmente un par constante, comportamiento que los diferencia de las bombas centrífugas y soplantes, cuya potencia absorbida obedece a una ley cúbica. Considerando este hecho, los ahorros energéticos obtenidos por aplicación de variadores de frecuencia en compresores serán, en principio, menores que en los sistemas indicados.

Al igual que en los equipos anteriores, los compresores no siempre operan en condiciones nominales, por lo que se requieren métodos de regulación que les permitan responder a las necesidades del proceso en cada momento. Los métodos clásicos de regulación han sido la modulación y la marcha – paro, cuyo comportamiento energético se muestra en la figura 104.

En los últimos años, los fabricantes están incorporando con notable éxito variadores de frecuencia de serie a sus equipos, sobre todo a los compresores de tornillo. Al ajustarse la velocidad de giro del tornillo a la demanda de aire, se puede mantener constante la presión del sistema, lo que minimiza el consumo eléctrico y también el desgaste del compresor. Los rangos de regulación son aproximadamente del 30 al 100 % de la velocidad de giro del compresor.

Adicionalmente se obtienen otras ventajas, como la reacción rápida a cambios de presión, la disminución de los gastos de mantenimiento, un alto factor de potencia y un arranque suave.

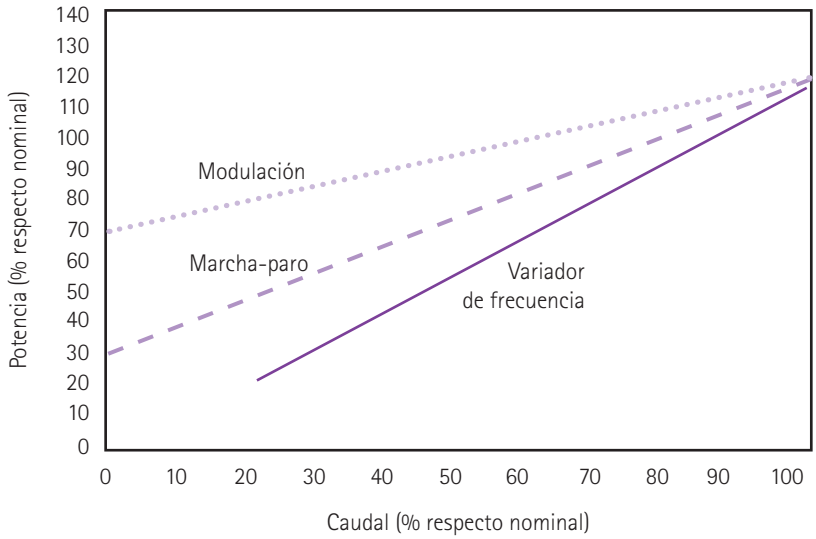


Figura 104 Consumo energético de las distintas opciones de regulación de compresores.

Desde el punto de vista energético, los variadores de frecuencia permiten obtener ahorros de energía del orden del 20 – 40 %, dependiendo de las condiciones de operación de los compresores.

Este hecho se hace más que evidente si se realiza un análisis de ciclo de vida, comparando los costes de inversión y operación de compresores estándar con los de compresores con variador de frecuencia incorporado (ver figura 105).

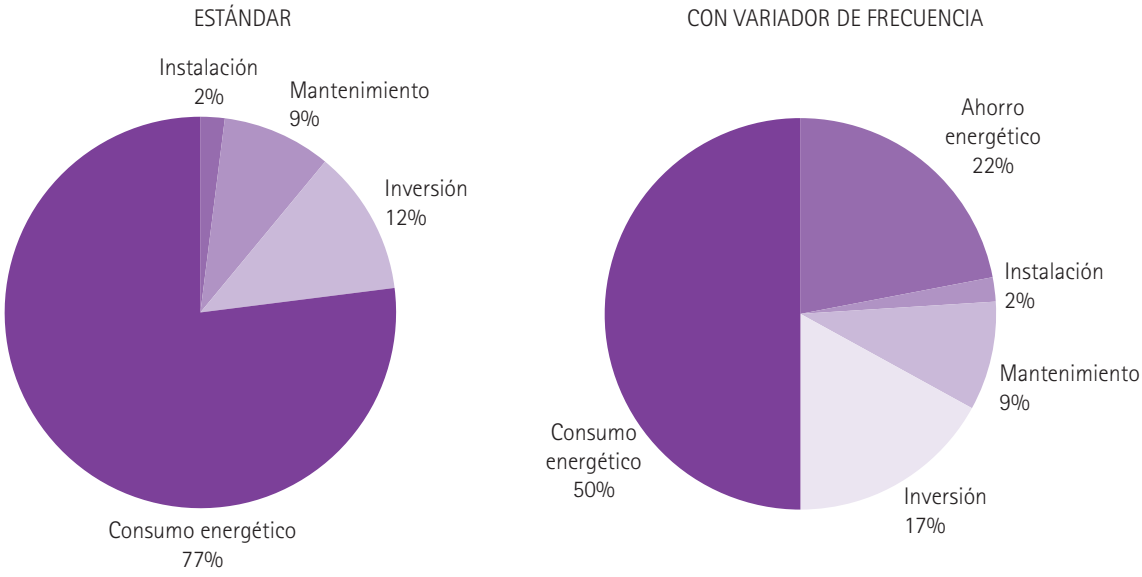


Figura 105 Comparación del coste del ciclo de vida entre compresores estándar y con variador de frecuencia.

La instalación de variadores de frecuencia en compresores ya existentes debe realizarse con prudencia y siempre consultando al fabricante, ya que se podrían producir problemas de lubricación a bajas velocidades.

9.3.5 Aplicación de variadores de frecuencia en molinos

Los variadores de frecuencia se están aplicando desde hace algunos años en los molinos de bolas discontinuos y en los continuos, al permitir el ajuste de la velocidad de rotación del molino en función de la curva de molturación de la materia prima.

Las principales ventajas que pueden obtenerse con la aplicación de un variador de frecuencia a un molino son:

- Puesta en marcha gradual del molino.
- Conexión del motor por medio de una junta rígida en lugar de mediante una junta flexible.
- Adecuación de la acción de molturación a las dimensiones que el material asume a medida que progresa la molienda.

La variación de la velocidad del molino a lo largo de la molienda permite obtener las mejores velocidades del molino para cada una de las zonas de la curva de molienda, optimizando de esta forma la molturación, reduciendo el consumo energético y el tiempo de molienda respecto a las condiciones iniciales.

Los ahorros energéticos y las reducciones en el tiempo de molienda oscilan entre el 15 % y el 25 %, dependiendo principalmente de las materias primas a moler y de la relación entre la carga de material

y la carga del agente molturante. Por ello, en la práctica la medida resulta rentable para molturación de materiales más difíciles de molturar y que por tanto, necesitan un elevado número de horas de proceso (como las composiciones de gres porcelánico).

9.4 Ahorro energético en sistemas de aire comprimido

Según se indicó en el apartado 8.4, los compresores de aire son equipos que no intervienen directamente en el proceso productivo. Este hecho, unido a que su uso no es continuado, hace que su consumo energético sea relativamente pequeño en el conjunto de los consumos energéticos de la empresa.

Por otro lado, ya se indicó igualmente que tanto los compresores de aire industriales como los sistemas de refrigeración asociados a los mismos, se encuentran accionados por motores eléctricos, por lo que son de aplicación las medidas ya expuestas en el apartado 9.2.

Aunque el empleo de variadores de frecuencia en compresores ya se ha estudiado con detalle en el apartado 9.3.4, los sistemas de aire comprimido presentan otras posibilidades de ahorro, las cuales se muestran en la figura 106.

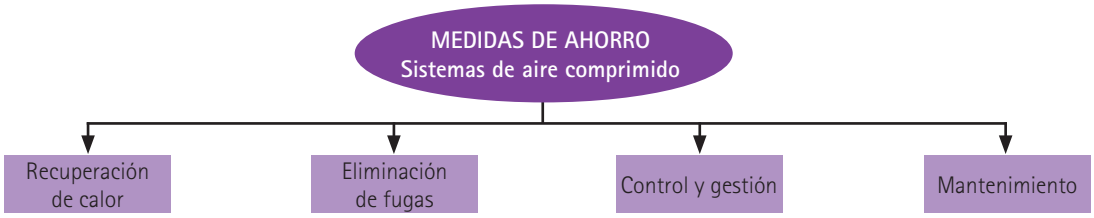


Figura 106 Estrategias de ahorro energético en sistemas de aire comprimido.

9.4.1 Recuperación de calor en la refrigeración

La recuperación del calor de sistemas de aire comprimido constituye una operación interesante desde el punto de vista energético, a partir de un cierto tamaño del compresor. Del 100 % de la energía eléctrica o mecánica que absorbe el compresor, solamente un 4 % queda asociada al aire comprimido, aumentando su entalpía. El resto pasa, de una forma u otra, al ambiente. La mayor parte de esta energía (el 96 % restante), se pierde con el fluido refrigerante en las etapas de refrigeración intermedia y post – refrigeración.

En los compresores refrigerados por aire, se dispone de mucho caudal de aire pero con poca temperatura, de forma que su utilización en el proceso es bastante limitada.

El aire caliente de refrigeración puede ser utilizado de forma directa para calefacción, aprovechando parte de las pérdidas térmicas del proceso. Evidentemente, esta solución presenta el inconveniente de que es estacional, puesto que solo existirá demanda durante los meses invernales. Una solución más apropiada en el sector de fabricación de baldosas podría ser el uso de esta corriente de aire caliente en otros equipos del proceso, disminuyendo así el consumo de combustible de estos equipos (ver figura 107), pero como ya se ha comentado, la baja temperatura de los gases hace que esta opción no sea una práctica adoptada por el sector como medida de ahorro energético.

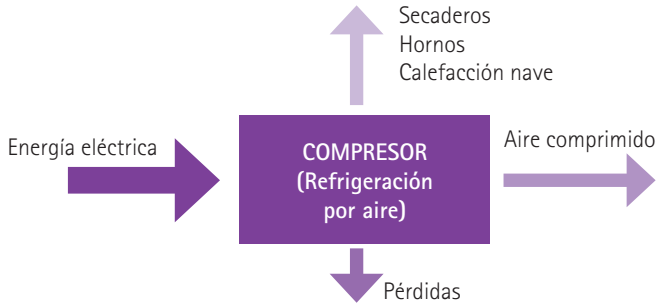


Figura 107 Recuperación de calor en compresores refrigerados por aire.

En cuanto a los compresores refrigerados por agua, en esencia, el sistema es el mismo que en la refrigeración por aire, a excepción del fluido que porta el calor. En este caso, se puede tomar el calor del agua por medio de un intercambiador (agua – aire) y cedérselo al aire de ventilación para calefactar la nave u otros espacios. Otra opción sería aprovechar directamente el agua para usos sanitarios, ya sea con un circuito simple (abierto) o, preferentemente, doble (cerrado, con interacumulador), pudiéndose almacenar en un acumulador en forma de agua caliente sanitaria (ACS), como ocurre en los sistemas solares. En la figura 108 se ha representado un sistema de aprovechamiento mixto de ambas soluciones.

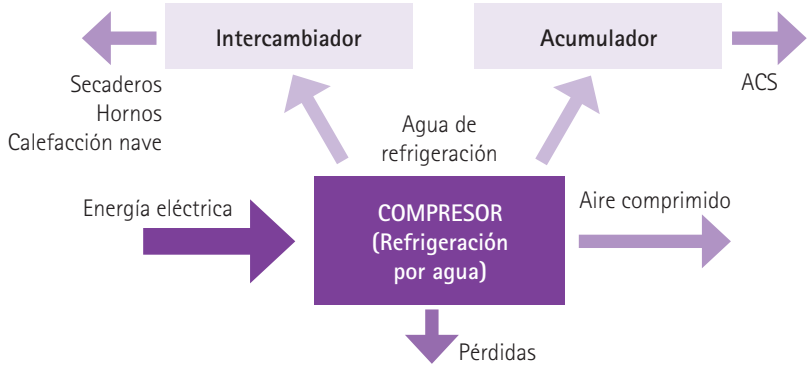


Figura 108 Recuperación de calor en compresores refrigerados por agua.

9.4.2 Eliminación de fugas

En líneas de aire comprimido en mal estado de conservación se pueden producir pérdidas muy elevadas por fugas, de hasta un 30 %. La eliminación total de las fugas es prácticamente imposible, pero con un mantenimiento adecuado dichas pérdidas pueden llegar a reducirse hasta aproximadamente un 5 %.

Normalmente, en las fábricas apenas se presta atención a las fugas de aire comprimido, sin embargo, el coste de mantenimiento para evitarlas es muy bajo en comparación con el ahorro que se consigue.

Finalmente, existen en el mercado dispositivos temporizadores que aíslan los tanques de aire del resto del sistema en los periodos de tiempo programados, por ejemplo, al finalizar la jornada laboral (ver figura 109). De este modo, se ahorra el aire contenido en el depósito en lugar de perderse a través de fugas en los conductos, con el consiguiente ahorro energético.

Figura 109 Sistema programable de ahorro de aire (Por cortesía de Centralair).

9.4.3 Control y gestión

Una primera estrategia de control para reducir el consumo de los compresores es la parada de aquéllos que trabajen en vacío. El trabajo en vacío supone unos consumos de energía innecesarios que se puede evaluar en un 20 – 25 %, en función de la potencia de los equipos. Por otra parte, el trabajar en vacío se traduce igualmente en un mayor consumo de energía reactiva, con la consiguiente incidencia en el coste de la energía eléctrica, a través de penalizaciones en la facturación (apartado 9.6).

Por ello, habría que analizar la posibilidad de desconectar los compresores cuando trabajen en vacío, teniendo en cuenta el número de arranques y paradas que tendría que soportar el motor.

Otra medida fácilmente aplicable es mantener la mínima presión posible en la red de aire comprimido, con lo que se consigue disminuir el consumo por una doble vía: reducción de la potencia necesaria para la compresión y disminución de las fugas. Como regla general, una reducción del 20 % en la presión de trabajo significa una disminución del 15 % en el consumo de energía del compresor.

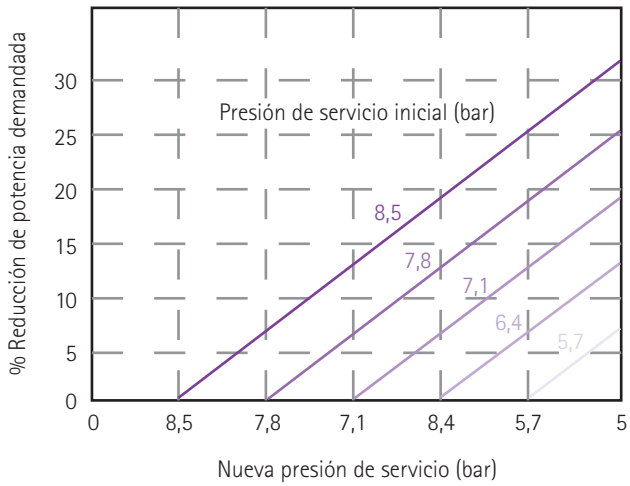


Figura 110 Reducción de la potencia demandada al disminuir la presión de servicio.

Según se observa en la figura 110, con esta medida se obtiene una considerable disminución de la potencia demandada por el compresor, y por tanto, de su consumo energético. Así, por ejemplo, si una empresa dispone de una red de aire comprimido que funcione a una presión de servicio de 7,8 bar y la

reduce a 5 bar, la potencia necesaria para la compresión será un 26 % menor. Ello supone un ahorro energético, pero también permitiría reducir la potencia contratada, con un ahorro económico adicional. Esta medida es extremadamente interesante ya que conlleva una inversión nula, siempre que exista la posibilidad de reducir la presión de trabajo sin afectar al funcionamiento de los equipos.

Finalmente, otra medida de aplicación sencilla es instalar la toma de aire en zonas frías. En muchas salas de máquinas suele ser habitual que se alcancen temperaturas del aire ambiente elevadas, como consecuencia del calor liberado por los equipos. Un aumento de la temperatura del aire supone una reducción de su densidad o, dicho de otro modo, un aumento de su volumen específico. Si el aire de aspiración de los compresores está a temperaturas elevadas, aumentará su consumo energético para un mismo caudal y presión de descarga. Por ello, es recomendable que los compresores siempre aspiren aire del exterior a la temperatura más baja posible.

Un aumento de la temperatura del aire de entrada de 4 ºC implica un aumento del consumo de energía del 1% para el mismo caudal. Cada 3 ºC de disminución de temperatura en el aire aspirado implica un 1 % más de aire comprimido para el mismo consumo de energía.

9.4.4 Mantenimiento

Al igual que ocurre con muchos equipos industriales, las acciones de mantenimiento y la frecuencia con que se realizan tienen una clara repercusión en su consumo energético.

En el caso de los compresores, puesto que son dispositivos que trabajan con un fluido en movimiento, cualquier tipo de resistencia al paso del aire implica pérdidas de energía que se disiparán en forma de calor.

A continuación se indican unas operaciones básicas de mantenimiento para compresores alternativos, aunque también son aplicables a otros tipos de compresores:

- **Reducir las pérdidas en la aspiración.** Para ello hay que elegir convenientemente el filtro, el diámetro de la tubería de aspiración y la longitud de la misma.
- **Revisar los filtros.** Las pérdidas en ellos no deben exceder el 0,5 % del volumen del compresor.
- **Comprobar la refrigeración.** Para un buen funcionamiento, el calor producido debe eliminarse tan rápidamente como se produzca. En el caso de refrigeración por agua, todo el sistema de refrigeración debe mantenerse en buen estado, no existiendo incrustaciones u otros problemas que puedan afectar al intercambio de calor. Si la refrigeración es por aire, deben evitarse obstrucciones al paso del aire y capas extrañas en las aletas de refrigeración.
- **Comprobar pérdidas por accionamiento mecánico**. Si el accionamiento es por correas se deberá comprobar la tensión y el estado de las mismas. Algunos compresores disponen de sistemas de tensado automático de correas.
- **Lubricar adecuadamente.**
- **Comprobar las válvulas de entrada y salida.** Durante la admisión debe cerrar perfectamente la válvula de salida, y durante la expulsión la de entrada.
- **Mantener la tubería de descarga en buenas condiciones.**
- **Eliminar tiempos muertos**. Hay momentos en los que el motor trabaja, pero el compresor no comprime el aire en las mejores condiciones, en función de la carga de su depósito.
- **Mantenimiento preventivo**. En cualquier caso, deberán seguirse las normas especificadas por el fabricante.

9.5 Ahorro energético en sistemas de iluminación

Un sistema de alumbrado será tanto más eficiente en cuanto consiga el mismo nivel de iluminación con el menor consumo energético posible, todo ello cumpliendo los requisitos de calidad exigibles.

A pesar de que la participación de los sistemas de iluminación sobre el consumo total de energía eléctrica de las empresas del sector de fabricación de baldosas cerámicas no es muy elevado, se trata de equipos que admiten múltiples y muy variadas posibilidades de ahorro, muchas de las cuales son de sencilla aplicación y ofrecen periodos de retorno muy interesantes.

En este apartado se llevará a cabo una descripción de las mismas, las cuales se indican en la figura 111.

Figura 111 Medidas de ahorro en sistemas de iluminación.

9.5.1 Aprovechamiento de la iluminación natural

El aprovechamiento de la iluminación natural es una de las medidas de aplicación más sencilla, siempre y cuando se haya tenido en cuenta este aspecto en el momento del diseño de la planta de fabricación.

Con esta medida se consigue reducir sustancialmente el consumo energético de los sistemas de alumbrado, pudiéndose obtener en algunos casos ahorros de hasta el 50 %. En este sentido, no hay que olvidar que, en el seno de la Unión Europea, se efectúa cada año el cambio horario verano/invierno, que tiene como principal objetivo la optimización de la jornada laboral para lograr un mejor aprovechamiento de la luz natural.

Aunque existen múltiples soluciones de diseño de edificios que tienen en cuenta estos aspectos, resulta especialmente destacable la tipología de nave industrial en "diente de sierra".

Como puede observarse en la figura 112, los lucernarios se sitúan sobre los planos verticales de la cubierta, con lo que se consigue que la luz natural penetre sin deslumbramientos desde el plano cenital, siempre que el edificio se encuentre orientado al sur.

Por lo que se refiere a edificios con cubierta plana o con ligera inclinación, los lucernarios suelen ubicarse en las bandas superiores de los cerramientos laterales, siempre que tengan suficiente altura.

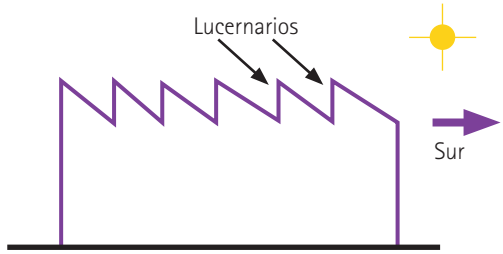


Figura 112 Diseño de naves industriales en "diente de sierra".

Figura 113 Aprovechamiento de la luz natural en una empresa de fabricación de baldosas (Por cortesía de Zirconio, S.A.).

De este modo se consigue que la luz natural penetre en ángulos superiores a los del plano de trabajo habitual de los operarios, evitando deslumbramientos.

En plantas de fabricación, la iluminación natural lateral a baja altura solo es aconsejable cuando la fachada en que se sitúen los lucernarios no esté afectada directamente por la radiación solar, o bien no se realicen tareas para las cuales el deslumbramiento suponga un riesgo. En caso contrario, deberá instalarse algún sistema difusor (por ejemplo cortinillas graduables) que impidan la entrada directa de la luz exterior.

Esta última afirmación no es de aplicación a los edificios de oficinas o laboratorios anexos a las naves de fabricación (ver figura 114). En este último caso, sí sería recomendable un acristalamiento total de la fachada, tanto por su ahorro energético en iluminación como en climatización, siempre que se hayan tenido en cuenta criterios bioclimáticos en el diseño del edificio.

Figura 114 Aprovechamiento de la iluminación natural en edificios de oficinas o laboratorios.

9.5.2 Adaptación del nivel de iluminación

En el momento de proyectar un sistema de alumbrado resulta de vital importancia ajustar el nivel luminoso a las necesidades reales de cada zona. Para lograr este objetivo, se debe tener en cuenta las recomendaciones publicadas por los organismos nacionales e internacionales acreditados en materia de iluminación.

Los niveles de iluminación recomendados para una nave industrial dependen de las actividades que se vayan a realizar en él. Tomando como base los valores recomendados en la norma NTE – IEI sobre Instalaciones de Alumbrado Interior, se puede distinguir entre tareas con requerimientos luminosos mínimos, normales o exigentes. En el primer caso están las zonas de paso (pasillos, vestíbulos, etc.) o locales poco utilizados (almacenes, cuartos de maquinaria, etc.) con niveles de iluminación de entre 50 y 200 lux. A continuación se tienen las zonas de trabajo y otras zonas o estancias de uso frecuente, con niveles de iluminación de entre 200 y 1.000 lux.

Por último, están los lugares donde son necesarios niveles de iluminación muy elevados (por encima de 1.000 lux), donde se realizan tareas visuales con un grado elevado de detalle (laboratorios, control de calidad, etc.).

En la tabla 37 se muestran los niveles de iluminación recomendados para usos industriales por el Comité Español de Iluminación (CEI). Como puede observarse, la mayor parte de las tareas que se llevan a cabo en el sector cerámico pueden asimilarse a niveles de iluminación de tipo ordinario, basto o muy basto, situándose por tanto en el rango de los 100 – 500 lux.

Mención especial merecen las secciones de clasificación de las baldosas y de desarrollo de modelos. En este caso, por ser tareas de precisión, es muy importante que tanto la iluminación como la orientación de la misma sean adecuadas para la detección de todo tipo de defectos superficiales.

	Nivel de iluminación (lux)	
Tipo de Actividad Industrial	Normal	Exigente
Precisión	1.000	2.000
Ordinario	400	800
Basto	150	380
Muy basto	80	150

Tabla 37 Niveles de iluminación recomendados según actividad (Fuente: CEI).

La medida del nivel de iluminación en una estancia puede llevarse a cabo de forma rápida mediante equipos electrónicos de manejo muy sencillo denominados luxómetros (ver figura 115). En instalaciones de alumbrado ya existentes deberían llevarse a cabo mediciones por zonas con el objetivo de determinar los niveles de iluminación y compararlos con los recomendados. En caso de discrepancias significativas

Figura 115 Luxómetro para medida del nivel luminoso.

se podrían diseñar medidas de ahorro energético, como apagado parcial de lámparas (por ejemplo al tresbolillo), regulación de su intensidad o sustitución de lámparas por otras de potencia inferior (apartados 9.5.3 y 9.5.4).

9.5.3 Sustitución de lámparas o luminarias

Según se indicó en el apartado 8.5, los tipos de lámparas que se suelen emplear en aplicaciones industriales son las de descarga, y más concretamente las siguientes: vapor de sodio a alta presión, vapor de mercurio a alta presión, fluorescentes y halogenuros metálicos.

En la tabla 38 se relacionan los principales parámetros que caracterizan a una lámpara industrial desde el punto de vista energético. Como puede observarse, las lámparas de vapor de sodio de alta presión destacan sobre todas las demás por su alto rendimiento y larga vida útil.

Le siguen las lámparas con halogenuros metálicos y las fluorescentes. En último lugar quedan las de mercurio de alta presión, con eficiencias ciertamente pobres con relación a las demás.

Tipo de lámpara	Gama de potencias (W)	Eficiencia luminosa lámpara (lm/W)	Eficiencia luminosa global (lm/W) (*)	Vida útil (horas)	Tiempo de encendido (minutos)
Vapor de sodio de alta presión	35 – 1.000	60 – 130	42 – 124	8.000 – 12.000	5 – 10
Vapor de mercurio de alta presión	50 – 2.000	40 – 63	30 – 60	8.000	4 – 5
Fluorescentes (balasto convencional)	18 – 58	56 – 96	40 - 79	7.500	Casi instantáneo
Fluorescentes (balasto electrónico)	16 – 50	91 – 104	78 – 94	10.000	Instantáneo
Halógenos metálicos	70 – 3.500	71 – 105	56 – 100	2.000 – 5.000	3 – 10

(*) Incluye tanto la lámpara como los equipos auxiliares

Tabla 38 Características principales de las lámparas de aplicación industrial.

De los datos anteriores se infieren cuales deben ser las estrategias de sustitución de lámparas en un entorno industrial. Evidentemente, la sustitución no debe estar basada únicamente en criterios energéticos, sino que habrá que tener en cuenta otros aspectos, como que las características mecánicas de las luminarias sean adecuadas para albergar la nueva lámpara o que los equipos auxiliares sean compatibles, lo cual no es habitual.

De este modo, las lámparas de sodio de alta presión deberían ser las instaladas en nuevas plantas con almacenes y habitáculos de techo alto (alturas superiores a 6 m), siempre que no se exija una reproducción cromática elevada. También se utilizarían para sustituir las de mercurio de alta presión, ya que en muchos modelos sus características mecánicas son similares.

Por lo que se refiere a las lámparas fluorescentes, encuentran su ámbito de aplicación en edificios de altura media (entre 3 y 6 m). Las lámparas con balastos electrónicos son adecuadas para nuevas plantas y para sustituir a las convencionales, ya sea en su conjunto o solo los equipos auxiliares (apartado 9.5.4). Si los sistemas de iluminación mediante lámparas fluorescentes no son satisfactorios, podrían sustituirse las luminarias fluorescentes gemelas de regleta por otras de mayor rendimiento fotométrico.

Finalmente, las lámparas con halogenuros metálicos encuentran su principal escollo en su elevado coste, por lo que solo estarían indicadas en aplicaciones que requirieran una muy buena reproducción de colores, requisito que, salvo en las secciones comentadas anteriormente, no suele ser imprescindible en muchos usos industriales.

Como resumen final, en la tabla 39 se indican las ventajas e inconvenientes de cada tipo de lámpara. Como puede observarse, no existe la lámpara "perfecta" sino que cada una de ellas tiene su ámbito de aplicación. Evidentemente, atendiendo únicamente al criterio energético, las lámparas de vapor de sodio a alta presión serían las más recomendables. No obstante, no solo se debe analizar el rendimiento, sino otros factores no menos importantes, como el coste, la capacidad de reproducción cromática, la vida útil, el factor de potencia, la facilidad de mantenimiento, etc.

Tipo de lámpara	Ventajas	Inconvenientes
Vapor de sodio alta presión	-Muy buena eficiencia luminosa. -Larga duración. -Aceptable rendimiento en color en tipos especiales. -Apariencia de color cálida-	-Estabilización no instantánea. -Mala reproducción cromática. -Coste de adquisición elevado.
Vapor de mercurio alta presión	-Buena eficiencia luminosa. -Larga duración. -Coste medio de adquisición -Buena reproducción de colores. -Variedad de potencias.	-Flujo luminoso no instantáneo. - Apariencia de color fría.
Fluorescentes	-Buena eficiencia luminosa, sobre todo si se incorporan balastros electrónicos. -Larga duración. -Bajo coste de adquisición. -Variedad de apariencias de color. -Mínima emisión de calor.	-Forma y tamaño en algunas aplicaciones. -Potencias bajas. -El coste aumenta si se incorporan balastros electrónicos.
Halogenuros metálicos	-Buena eficiencia luminosa. -Muy buena reproducción de colores. -Variedad de potencias.	-Coste de adquisición elevado. -Apariencia de color fría. -Duración media.

Tabla 39 Ventajas e inconvenientes de las lámparas de uso industrial.

Por lo que se refiere a las **luminarias**, ya se indicó que son los elementos donde van alojadas las lámparas. Su función principal es la de distribuir la luz producida por la fuente en la forma más adecuada a las necesidades. Muchas luminarias modernas contienen sistemas reflectores cuidadosamente diseñados para dirigir la luz en la dirección deseada (véase figura 116). Por ello, en instalaciones ya existentes, la sustitución de luminarias por otras de mayor rendimiento conlleva generalmente un sustancial ahorro energético, así como una mejora de las condiciones visuales.

Figura 116 Distribución del flujo luminoso para distintos ángulos de apertura de una luminaria de uso industrial (Por cortesía de Philips Lightning).

En la tabla 40 se comparan los rendimientos de distintos tipos de luminarias, considerando tanto el flujo luminoso en su totalidad como la fracción útil dirigida hacia el hemisferio inferior (plano de trabajo). A modo de ejemplo, se observa que la regleta sencilla tiene un rendimiento global del 95 %, pero solo un 60 % de rendimiento hacia el hemisferio inferior, por lo que se está perdiendo un 35 % del flujo, que se desvía hacia la parte superior de la estancia, donde no es aprovechable.

Tipo de luminaria	Rendimiento total	Rendimiento hemisferio inferior (%)
Regleta sencilla	95	60
Regleta con cubeta de plástico opal	70	45
Con reflector y lamas en V	65	65
Con reflector y rejilla de retícula fina	55	55
De baja luminancia con reflectores parabólicos y rejillas de lamas	70	70
De baja luminancia con reflectores parabólicos y rejilla de lamas para lámparas de 16mm	80	80

Tabla 40 Comparación de rendimientos de distintos tipos de luminarias.

9.5.4 Utilización de balastos electrónicos

Las lámparas fluorescentes son generalmente las más utilizadas para las zonas donde se necesita una luz de buena calidad y pocos encendidos. La vida media de los tubos fluorescentes es de 7.500 horas, y su depreciación del flujo luminoso, para esta vida media, es del 25 %. Este tipo de lámpara, como todas las lámparas de descarga, necesita de un elemento auxiliar que regule la intensidad de paso de la corriente, que es la reactancia o balasto.

El balasto convencional que se utiliza en la mayoría de luminarias de tubo fluorescente es de tipo electromagnético, que consiste en un gran número de espiras de hilo de cobre arrolladas sobre un núcleo y que, por su concepción, tiene elevadas pérdidas térmicas.

Los balastos electrónicos constituyen un sistema de alimentación de alta frecuencia para lámparas fluorescentes. Son equipos sustitutivos de la instalación convencional compuesta de reactancia electromagnética, cebador y, en su caso, condensador para mejorar el factor de potencia.

Básicamente, el sistema presenta una circuitería impresa y encapsulada de componentes electrónicos que hacen trabajar a las lámparas a frecuencias del orden de decenas de kHz (ver figura 117). Los balastos electrónicos no tienen pérdidas debidas a la inducción ni al núcleo, por lo que su consumo energético es notablemente inferior.

Figura 117 Balasto electrónico para lámparas fluorescentes (Por cortesía de Especialidades Luminotécnicas, S.A.).

Aunque por el momento sólo se aplican a lámparas fluorescentes, tanto tubulares como compactas, están apareciendo en el mercado nuevos desarrollos electrónicos para alimentación de lámparas de descarga de alta intensidad (sodio de alta presión, halogenuros metálicos, etc.).

Los balastos electrónicos de alta frecuencia para lámparas fluorescentes ofrecen las siguientes ventajas:

- Aumento de un 20 – 25 % en la eficiencia del conjunto de la lámpara con los equipos auxiliares.
- Mayor número de encendidos y mejor factor de conservación de las lámparas.
- Encendido prácticamente instantáneo.
- Menor tensión de encendido.
- Factor de potencia próximo a la unidad.
- Fácil regulación del flujo luminoso.
- Eliminación del efecto estroboscópico.

La menor potencia necesaria para el funcionamiento de los equipos electrónicos, unida a la menor potencia aplicada a las lámparas para la obtención del mismo flujo luminoso que con equipos electromagnéticos, hace que se pueda lograr un considerable ahorro energético con el empleo de balastos electrónicos. Este ahorro se puede cuantificar, tal y como se detalla en la tabla 41, para las luminarias y potencias de lámparas más habituales.

Como puede observarse, los ahorros medios se encuentran entre el 20 % y el 25 % del consumo del conjunto usando reactancias electromagnéticas. Cabe señalar que existen ciertas composiciones donde se obtienen ahorros menores, si bien en estos casos, por tratarse de equipos compartidos entre varias lámparas, los costes unitarios de inversión son también menores.

Nº y tipo de lámpara	Potencia absorbida (W) (con reactancia electromagnética)	Potencia absorbida (W) (con balastro electrónico)	Ahorro (%)
1 x 18 W	27	20	25
1 x 36 W	45	36	20
1 x 58 W	70	56	20
2 x 18 W	45	40	11
2 x 36 W	90	74	17
2 x 58 W	140	104	25
3 x 18 W	72	54	25
4 x 18 W	90	72	20
3 x 36 W	135	104	23
4 x 36 W	180	138	23

Tabla 41 Ahorro energético por el uso de balastos electrónicos.

Además, como consecuencia de la menor potencia absorbida por los equipos de iluminación, y dado que ésta se transforma íntegramente en calor, dicha disminución representará un ahorro indirecto de energía en los sistemas de calefacción.

Aunque existen en el mercado lámparas diseñadas exclusivamente para reactancias electrónicas (serie 16 – 32 – 50 W, con 26 mm de diámetro), los balastos electrónicos también son de aplicación a tubos fluorescentes convencionales de la gama 18 – 36 – 58 W (también con 26 mm de diámetro). No es posible en cambio su empleo en las lámparas de la antigua serie 20 – 40 – 65 W (38 mm de diámetro), prácticamente desaparecidas del mercado y que solo se utilizan en reposiciones.

Finalmente, las lámparas fluorescentes alimentadas con balastos electrónicos de alta frecuencia permiten regular su flujo luminoso entre márgenes muy amplios (del 1 al 100 % del flujo nominal de la lámpara), con la consecuente reducción de consumo del sistema. De este modo, se puede obtener una adaptación del nivel de iluminación acorde con las necesidades reales de cada instalación y en cada momento.

En el caso práctico nº 15 se expone un ejemplo de sustitución de balastos electromagnéticos por balastos electrónicos. Como puede observarse, los periodos de retorno de la inversión obtenidos son algo elevados, pero debe tenerse en cuenta que se está actuando sobre un equipo ya existente. En este sentido, si se tuviera en cuenta solo el sobrecoste de los balastos electrónicos respecto de los convencionales (caso de compra de equipos nuevos o reposición por avería), el periodo de retorno sería mucho más breve, del orden de 1 – 2 años, por lo que la inversión se recupera de forma inmediata. Además, no se han tenido en cuenta los ahorros obtenidos de forma indirecta, como mejora del factor de potencia de la instalación, reducción de la potencia contratada con la compañía eléctrica y mayor vida útil de las lámparas.

CASO PRÁCTICO Nº 15:
Sustitución de balastos electromagnéticos por balastos electrónicos

A continuación se llevará a cabo un estudio de viabilidad económica de la sustitución de balastos convencionales por balastos electrónicos. Se trata de una pequeña empresa cerámica, cuya zona de fabricación se encuentra iluminada mediante tubos fluorescentes.

Situación inicial (con balastos convencionales)

Nº de tubos:	*120*
Composición:	*2 x 58 W*
Potencia unitaria (lámpara + equipos) (W):	*70 W*
Horas de encendido:	*16 h/día*
Funcionamiento anual:	*230 días/año*
Coste energía eléctrica (sin IVA):	*0,09€/hWh*
Consumo eléctrico anual:	*30.912 kWh/año*
Coste eléctrico anual:	*2.782€/año*

Situación final (con balastos electrónicos)

Potencia unitaria (lámpara + equipos) (W):	*52 W*
Consumo eléctrico anual:	*22.963 kWh/año*
Coste eléctrico anual:	*2.067 kWh/año*

Cálculo económico

Ahorro energético:	*7.949 kWh/año*
% Ahorro energético:	*25 %*
Ahorro económico:	*715€/año*
Inversión:	*4.500€*
Periodo de Retorno Simple:	*6,3 años*

9.5.5 Control, gestión y mantenimiento de los sistemas de iluminación

Un buen sistema de control de alumbrado proporciona una iluminación de calidad sólo cuando es necesario y durante el tiempo que es preciso. Con un sistema de control apropiado pueden obtenerse sustanciales mejoras en la eficiencia energética de la iluminación de un edificio.

Un sistema de control de la iluminación completo combina sistemas de control de tiempo, sistemas de control de la ocupación, sistemas de aprovechamiento de la luz diurna y sistemas de gestión de la iluminación.

Los sistemas de control de tiempo permiten apagar las luces según un horario establecido, para evitar que las mismas estén encendidas más tiempo del necesario. En este punto cabe destacar la instalación de interruptores horarios para el control del alumbrado exterior y de zonas comunes con horarios de uso limitados.

Por otro lado, los sistemas de control de la ocupación permiten, mediante detectores de presencia, la conexión y desconexión de la iluminación en función de la existencia o no de usuarios en las estancias controladas. Estos sistemas se suelen instalar en los pasillos de acceso, zonas de servicio y mantenimiento, servicios, etc. Igualmente, resulta aconsejable disminuir el número de lámparas encendidas cuando los niveles de ocupación sean bajos.

Respecto a los sistemas de aprovechamiento de la luz diurna (apartado 9.5.1), se basan en la instalación de una serie de fotocélulas que se utilizan para apagar la iluminación cuando la luz natural es suficiente, y también, cuando las luminarias disponen de balastos electrónicos regulables, para ajustar la intensidad de las lámparas en función de la luz diurna disponible. Esto se puede aplicar tanto a la iluminación interior como a la exterior.

Otro elemento a considerar dentro de las estrategias de control del alumbrado es la instalación de interruptores localizados que permitan la desconexión de toda la iluminación de una zona cuando sólo es preciso en una pequeña parte de la misma y fraccionar los circuitos de alumbrado, de modo que puedan apagarse las zonas no utilizadas, por ejemplo: pasillos, lugares de paso, zonas desocupadas, etc. El fraccionamiento deberá realizarse teniendo en cuenta las zonas iluminadas de forma natural. También se deberán establecer circuitos parciales de alumbrado reducido para vigilancia, limpieza, etc.

Con la adopción de estas sencillas medidas de control se pueden llegar a obtener ahorros energéticos del orden del 10 % del consumo eléctrico en iluminación, con una inversión moderadamente reducida.

Ahora bien, el sistema se puede perfeccionar integrando todos los elementos anteriores en un sistema de gestión centralizado de iluminación controlado por ordenador que permita controlar todos los elementos anteriormente descritos, y de esta forma optimizar, si cabe, el consumo en iluminación. Para ello sería necesario realizar previamente un estudio de los siguientes aspectos:

- Horas de funcionamiento de las distintas áreas.
- Cálculo y medida del consumo de energía mediante contadores parciales (figura 118).
- Programación del funcionamiento del sistema de iluminación por distintas áreas.
- Realización de distintos grupos de encendido.
- Detección de luminarias en mal estado.
- Establecimiento de horas de funcionamiento.

Figura 118 Contador de consumos parciales (Por cortesía de Circutor, S.A.).

Incluso se podría integrar este sistema de control en un sistema de gestión energética global de la empresa que monitorice los consumos parciales por áreas o secciones (ver figura 119), controle además la maquinaria, sistemas de ventilación, etc. En este caso, los ahorros energéticos son más elevados, pero su implantación también es mucho más costosa, por lo que se suele recomendar su instalación en la etapa de proyecto de la planta, o cuando se acomete una reforma importante de la misma que suponga una reestructuración de las instalaciones.

Por lo que se refiere al alumbrado exterior, son igualmente de aplicación algunos de los conceptos expuestos anteriormente, si bien conviene señalar algunas medidas de ahorro específicas, como:

- Control automático del encendido/apagado de lámparas mediante interruptores astronómicos, crepusculares o fotocélulas.

- Detectores de movimiento para alumbrado de seguridad.
- Temporizadores de actuación para zonas poco frecuentadas.

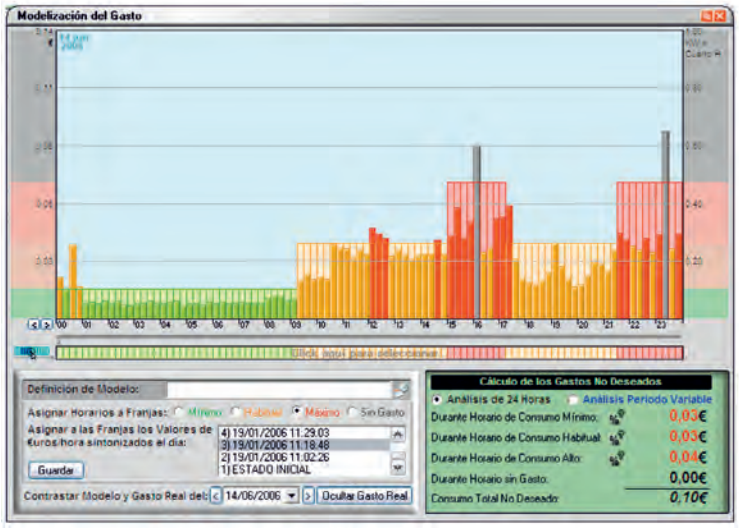


Figura 119. Software sistema de gestión (por cortesía de CYS domótica, S.L.)

Para un buen aprovechamiento de las instalaciones de alumbrado es necesario realizar un correcto mantenimiento de las mismas. Si las lámparas y luminarias no se encuentran suficientemente limpias disminuye en gran medida el flujo luminoso emitido, además de aumentar la temperatura de las lámparas, lo cual influye en su rendimiento luminoso y en su vida útil.

Deben realizarse limpiezas periódicas de las instalaciones, programando los intervalos de tiempo entre cada limpieza, en función del grado de suciedad de los locales. Estos intervalos deben ser más breves cuanto mayor sea dicho grado de suciedad.

En instalaciones de gran tamaño es aconsejable programar la sustitución de las lámparas, realizando el cambio de todas a un tiempo. Esta sustitución debe hacerse coincidir con una operación de limpieza programada. Asimismo, se debe eliminar de las instalaciones aquéllas cuyo flujo luminoso esté muy agotado por las horas de servicio, aún cuando no estén quemadas o fundidas.

Para programar la sustitución de las lámparas debe tenerse en cuenta la vida útil de las mismas y su régimen de funcionamiento, en función de las características de cada una. Por ejemplo, la vida de las lámparas de descarga está muy condicionada por el número de encendidos, disminuyendo si el número de horas de funcionamiento por cada encendido es bajo. En este sentido, la vida útil de las lámparas suele fijarse para periodos de funcionamiento de 3 horas por cada encendido.

9.6 Compensación de energía reactiva

9.6.1 Concepto de energía reactiva

Todas las máquinas eléctricas alimentadas en corriente alterna convierten la energía eléctrica suministrada en trabajo mecánico y calor. Esta energía se mide en kWh y se denomina energía activa. Los receptores que absorben únicamente este tipo de energía se denominan resistivos.

Ciertos receptores necesitan campos magnéticos para su funcionamiento (motores, transformadores, etc.) y consumen otro tipo de energía denominada energía reactiva. El motivo es que este tipo de cargas (denominadas inductivas) absorben energía de la red durante la creación de los campos magnéticos que necesitan para su funcionamiento y la entregan durante la destrucción de los mismos. Este trasiego de energía entre los receptores y la fuente provoca pérdidas en los conductores, caídas de tensión en los mismos, y un consumo de energía suplementario que no es aprovechable directamente por los receptores.

La conexión de cargas inductivas en una instalación provoca el desfase entre la onda de intensidad y la tensión. El ángulo ϕ mide este desfase e indica la relación entre la intensidad reactiva (inductiva) de una instalación y la intensidad activa de la misma. Esta misma relación se establece entre las potencias o energías activa y reactiva. El cos ϕ (factor de potencia) indicará por tanto la relación entre la potencia activa y la potencia aparente de la instalación (los kVA que se pueden consumir como máximo en la misma).

En la tabla 42 se muestran los factores de potencia de los receptores más habituales. También cabe señalar que, según se observa, en los motores asíncronos el factor de potencia empeora a medida que disminuye el grado de carga del mismo.

Aparato	Carga	cos ϕ	tan ϕ
Motor asíncrono ordinario	0 %	0,17	5,8
	25 %	0,55	1,52
	50 %	0,73	0,94
	75 %	0,8	0,75
	100 %	0,85	0,62
Lámparas de incandescencia		1	0
Lámparas de fluorescencia		0,5	1,73
Lámparas de descarga		0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
Hornos de resistencias		1	0
Hornos de calefacción dieléctrica		0,85	0,62
Máquinas de soldar por resistencias		0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
Centros estáticos monofásicos de soldadura al arco		0,5	1,73
Grupos rotativos de soldadura al arco		0,7 a 0 9	1,02
Transformadores-rectificadores de soldadura al arco		0,7 a 0 9	1,02 a 0,75

Tabla 42 Factor de potencia de algunos receptores (Fuente: Grupo Schneider).

9.6.2 Ventajas de la compensación de energía reactiva

La corrección del factor de potencia, o compensación de energía reactiva, de una instalación ofrece incuestionables ventajas, tanto desde un punto de vista técnico como económico. Aunque históricamente se han aplicado diferentes técnicas para lograr este objetivo, en la actualidad es la instalación de condensadores en paralelo con la instalación el método más empleado.

A continuación se realiza una descripción de las principales ventajas que un factor de potencia elevado supone para una empresa.

- **Reducción en el importe del recibo de electricidad**

En el caso de suministro en el mercado liberalizado se produce una penalización sobre los excesos de energía reactiva. La misma se aplicará sobre todos los periodos tarifarios, excepto periodo 3 (Tarifas de acceso 3.x) o 6 (Tarifas de acceso 6.x), siempre que el consumo de reactiva exceda del 33% de activa ($\cos \phi < 0{,}95$) y únicamente afectará a dichos excesos. En esta modalidad, el precio a pagar por los excesos es función del valor del factor de potencia, aumentando al disminuir el mismo, no existiendo la posibilidad de obtener una bonificación.

Los tramos de aplicación son:

- Tramo 1: $0{,}80 \leq \cos \phi < 0{,}95$
- Tramo 2: $\cos \phi < 0{,}80$

- **Aumento de la potencia disponible**

Un factor de potencia elevado optimiza los componentes de una instalación eléctrica mejorando su rendimiento eléctrico. La instalación de condensadores reduce el consumo de energía reactiva entre la fuente y los receptores. Los condensadores proporcionan la energía reactiva descargando a la instalación desde el punto de conexión de los condensadores aguas arriba. Como consecuencia, es posible aumentar la potencia disponible en el secundario de un transformador MT/BT, instalando en la parte de baja un equipo de corrección del factor de potencia.

- **Reducción de la sección de los conductores**

La instalación de un equipo de corrección del factor de potencia en una instalación permite reducir la sección de los conductores a nivel de proyecto, ya que para una misma potencia activa la intensidad resultante de la instalación compensada es menor.

- **Disminución de las pérdidas**

La instalación de condensadores permite la reducción de pérdidas por efecto Joule (calentamiento) en los conductores y transformadores. Estas pérdidas son contabilizadas como energía consumida (kWh) en el contador. Dichas pérdidas son proporcionales a la intensidad elevada al cuadrado. Se puede determinar, según la siguiente fórmula, la disminución de pérdidas en función del $\cos \phi$ de la instalación:

$$\frac{Pérdidas\ finales}{Pérdidas\ iniciales} = \left(\frac{\cos\ \varphi\ inicial}{\cos\ \varphi\ final} \right)^2$$

Así, por ejemplo, si un transformador de 630 kVA tiene unas pérdidas de 6.500 W funcionando con un $\cos \phi$ de 0,7 si se compensa hasta un $\cos \phi$ de 0,98 las nuevas pérdidas pasan a ser de 3.316 W.

- **Reducción de las caídas de tensión**

La instalación de condensadores permite la reducción de las caídas de tensión aguas arriba del punto de conexión del equipo de compensación.

9.6.3 Métodos de compensación de energía reactiva

La localización de los condensadores en una red eléctrica se determina según diferentes criterios, entre los que cabe citar: supresión de las penalizaciones económicas, descarga de las líneas y transformadores, aumento de la tensión en el final de la línea, régimen de carga, coste de la instalación, etc. En base a ello, la compensación puede ser global, parcial e individual.

En la práctica, la elección de uno u otro método de compensación depende del tipo y la potencia de los receptores instalados, régimen de carga y dimensiones de la instalación. En instalaciones de tamaño pequeño con regímenes de carga variables el sistema más habitual es la compensación global mediante un equipo automático de corrección del factor de potencia (ver figura 120).

Estos dispositivos presentan la ventaja de poseer varios escalones de compensación produciéndose su conexión o desconexión de forma automática en función de la demanda de energía reactiva de la instalación y del valor de consigna previamente programado, obteniéndose resultados más que satisfactorios, con ahorros económicos que garantizan periodos de retorno de la inversión muy reducidos.

Esta compensación se realiza en cabecera de la instalación (figura 121). Con este sistema se suprimen las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva, se ajusta la potencia aparente (S en kVA) a la necesidad real de la instalación y se descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW). Sin embargo, la corriente reactiva (Ir) está presente en la instalación desde el nivel principal hasta los receptores, por lo que las pérdidas por efecto Joule en los cables no quedan disminuidas.

Por el contrario, en instalaciones de gran tamaño, se suele optar por sistemas híbridos parciales–individuales. De esta forma, se compensa individualmente las cargas de mayor consumo de reactiva (motores) y adicionalmente se colocan baterías automáticas de condensadores en las secciones que lo requieran.

Figura 120 Batería de compensación automática de 12 kVAr (2,5 + 2 x 5)
(Por cortesía de Circutor, S.A.).

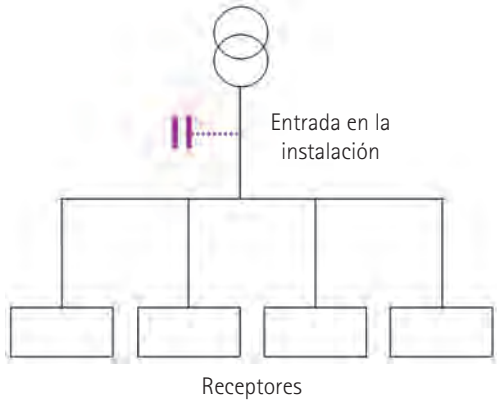


Figura 121 Compensación global de energía reactiva.

En cuanto al dimensionado de las baterías de condensadores necesarias, existen diferentes métodos cuya elección depende del grado de exactitud que se desee alcanzar. Así, por ejemplo, para receptores individuales, suelen utilizarse los valores recomendados por los fabricantes de los mismos. En el caso de baterías automáticas centralizadas, se puede realizar un diseño básico a partir de los recibos mensuales de la compañía eléctrica, si bien se obtiene un resultado más exacto mediante la medida de las curvas de carga horarias de energía activa y reactiva de la instalación, obtenidas mediante equipos analizadores de redes eléctricas (ver figura 122).

Figura 122 Analizador de redes para el registro de la curva de carga de la instalación.

10.

La cogeneración en la industria cerámica

10 La cogeneración en la industria cerámica

10.1 Introducción a los sistemas de cogeneración

La cogeneración se define como la producción conjunta, en proceso secuencial, de electricidad (o energía mecánica) y energía térmica útil, a partir de una única fuente de energía primaria (Sala, 1994).

La energía primaria utilizada puede provenir de un combustible fósil (en estado sólido, líquido o gaseoso), de la valorización energética de residuos o del aprovechamiento de energías residuales de procesos industriales.

El aprovechamiento conjunto de electricidad y calor en una misma instalación permite obtener valores elevados de rendimiento de la planta de cogeneración, y por tanto un ahorro de energía primaria.

Los sistemas de cogeneración son adecuados para trabajar conjuntamente en aquellos procesos en los que existe una demanda de calor útil, en forma de vapor, agua caliente, o gases calientes.

El ahorro energético alcanzado en un sistema de cogeneración, puede evaluarse al compararlo con el sistema convencional de generación de energía.

En la figura 123 se muestra de manera esquemática un sistema convencional de generación de energía eléctrica y térmica. La energía eléctrica se ha considerado que se obtiene en una central térmica convencional, con un rendimiento en la generación y transporte de la electricidad del 37 %, y la energía térmica mediante una caldera, cuyo rendimiento térmico es del 90 %.

El rendimiento eléctrico de una central térmica varía según la tecnología utilizada, siendo del orden del 37 % en las centrales térmicas convencionales de carbón, fuelóleo o gas natural, y del 58 % en las centrales de ciclo combinado de gas natural (Fuente: www.fundaciongasnatural.org).

Como puede observarse en la figura 123, para obtener 30 kW de electricidad y 55 kW de calor, se necesitan 153 kW de combustible, y las pérdidas de energía ascienden a 68 kW. Estas pérdidas de energía engloban también las pérdidas de energía eléctrica en el transporte.

En un sistema de cogeneración, representado en la figura 124, para obtener la misma cantidad de electricidad y de calor, la cantidad de combustible se reduce en un 35 %.

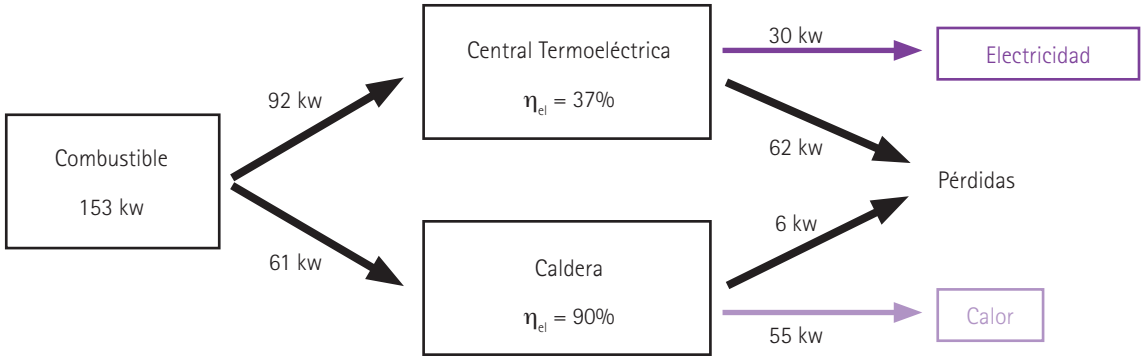


Figura 123 Sistema convencional de generación de energía.

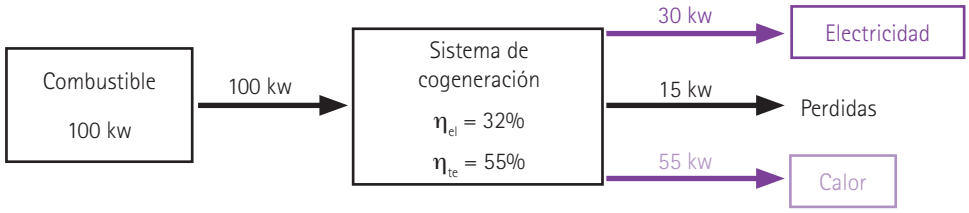


Figura 124 Sistema de cogeneración.

El rendimiento eléctrico y térmico de un sistema de cogeneración depende de la tecnología empleada, tal y como se comenta más adelante en el apartado 10.2. En este ejemplo se ha considerado que el sistema de cogeneración es una turbina de gas, y los rendimientos mostrados corresponden a valores medios de este tipo de instalaciones.

En la tabla 44 aparece esta comparativa, en cifras. Se observa que los sistemas de cogeneración ahorran energía primaria porque se reducen las pérdidas energéticas debido al mayor aprovechamiento de la energía producida en la instalación.

Parámetro	Sistema convencional	Sistema cogeneración
Rendimiento eléctrico (%)	33	32
Rendimiento térmico (%)	90	55
Rendimiento global (%)	55	87
Consumo de Energía Primaria (kW/kW energía útil generada)	1,8	1,18
Pérdidas de energía (kW/kW energía útil generada)	0,8	0,18

Tabla 44 Comparación del rendimiento entre un sistema convencional y un sistema de cogeneración (Sala, 1994).

El procedimiento secuencial de generación y consumo de calor útil y electricidad admite dos posibilidades tecnológicas dependiendo de la forma de energía generada en primer lugar (ver figura 125).

Se denominan ciclos de cabecera aquellos en los que, en primer lugar, se genera energía eléctrica a partir de la energía química contenida en un combustible, y la energía térmica resultante se suministra a un proceso industrial. Estos ciclos son los más habituales en los sistemas de cogeneración empleados en la industria cerámica.

Los ciclos de cola, utilizan la energía térmica residual de un proceso para producir electricidad. Suelen estar asociados a procesos industriales que presentan altas temperaturas.

Son muchas las ventajas de utilizar sistemas de cogeneración para la producción de energía, y afectan tanto al consumidor final, como a las compañías eléctricas y al país en su conjunto. A continuación se comentan algunas de ellas, junto con algunos inconvenientes:

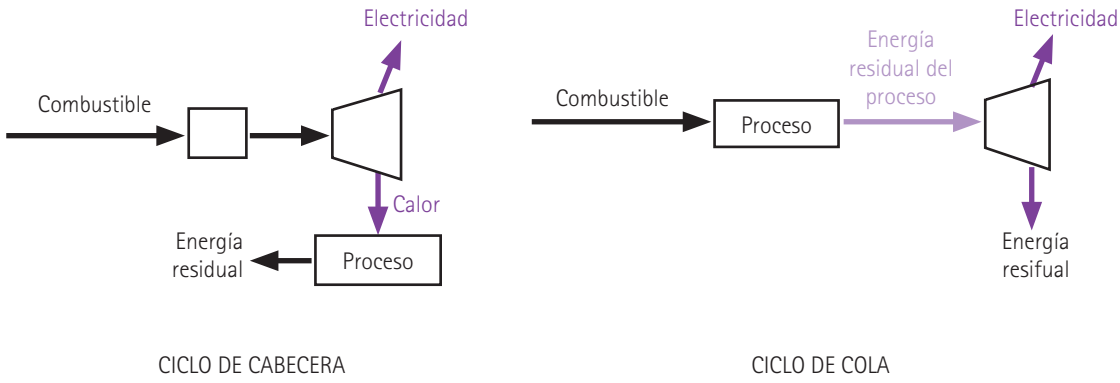


Figura 125 Posibilidades tecnológicas de los sistemas de cogeneración.

Para la sociedad:

- Ventajas
  - Ahorro de energía primaria. Este ahorro es consecuencia de la recuperación del calor residual y de la utilización de menor cantidad de combustible para la generación de electricidad.
  - Diversificación energética. La cogeneración permite utilizar el calor residual de procesos industriales para la generación eléctrica.
  - Disminución global de la contaminación, debido al uso de menor cantidad de combustible para obtener la misma energía que en un proceso convencional de generación eléctrica.
  - Ahorro económico global, debido a la reducción de los costes de distribución de la electricidad con respecto a los sistemas tradicionales.
- Inconvenientes
  - Necesidad de normativa específica, que regule las relaciones entre las instalaciones de cogeneración y las compañías eléctricas.
  - Necesidad de infraestructura adecuada para el correcto mantenimiento y funcionamiento de las instalaciones.

Para las compañías eléctricas:

- Ventajas
  - Incremento de la garantía de suministro.
  - Posibilidad de disminuir la potencia eléctrica reservada, como consecuencia del aumento de instalaciones generadoras.
  - Utilización más efectiva de los medios de producción de energía eléctrica, ya que la cogeneración reemplaza las centrales térmicas convencionales con elevados costes de generación.
- Inconvenientes
  - Problemas de regulación de redes. La conexión en paralelo de los equipos de cogeneración con la red eléctrica puede provocar problemas de regulación debido a los intercambios de energía entre las dos partes.
  - Reducción del mercado, debido al autoabastecimiento de energía eléctrica de las instalaciones con sistemas de cogeneración.

Para las empresas:

- Ventajas
  - Ahorro económico. Gracias a los menores costes de la energía autoconsumida y a los beneficios adicionales por la venta de energía eléctrica. Este ahorro dependerá, en todo caso, de las tarifas energéticas vigentes durante el tiempo de operación de la instalación de cogeneración.
  - Garantía de distribución eléctrica. Frente a un posible fallo en la red, el suministro eléctrico está asegurado en las instalaciones que cuentan con un equipo de cogeneración.
- Inconvenientes
  - Necesidad de realizar una inversión adicional, en equipos que no están relacionados con el proceso productivo.
  - Aumento de la contaminación local, en el caso de sistemas de cogeneración con ciclo de cabecera, como consecuencia del aumento en el consumo de combustible.

Dependiendo de la potencia eléctrica de la instalación de cogeneración, ésta puede estar afectada por la normativa vigente relativa al comercio de emisiones de dióxido de carbono. En caso de estar afectada, la instalación está obligada a declarar las emisiones producidas anualmente, para verificar si ha excedido o no las permitidas, según el Plan Nacional de Asignación vigente.

En caso de emitir más dióxido de carbono del permitido, la empresa debe comprar derechos de emisión en el mercado, lo cual supone un desembolso económico. En esta situación, estar afectado por la legislación relativa al comercio de emisiones supone un inconveniente para el consumidor.

Sin embargo, cuando la situación es la contraria, y las emisiones de dióxido de carbono son menores que las asignadas, el consumidor puede vender los derechos excedentes. En este caso, estar afectado por la legislación relativa al comercio de emisiones supone una ventaja económica para el consumidor.

10.2 Sistemas de cogeneración

Existe una gran variedad de equipos y tecnologías que pueden emplearse para una aplicación de cogeneración. Cada tecnología tiene unas características propias, lo que determina su aplicación en un proceso industrial concreto.

A continuación se describen brevemente las tecnologías de cogeneración más habituales, dependiendo de la máquina motriz responsable de la generación eléctrica.

10.2.1 Cogeneración con turbina de gas

El principio de funcionamiento de las turbinas de gas es el siguiente: el aire se aspira de la atmósfera, se comprime en el compresor y se introduce en la cámara de combustión, donde se mezcla con el combustible, produciéndose la ignición. Los gases calientes obtenidos en la combustión se hacen circular por la turbina o turbinas, y al expansionarse permiten accionar, demás del compresor, un alternador u otra máquina.

Las turbinas de gas funcionan con un exceso de aire muy elevado con objeto de evitar que la temperatura de los productos de la combustión sea demasiado alta y pueda afectar las características mecánicas de los alabes. Los excesos de aire habituales en estas máquinas varían entre el 275 y el 500 %.

Las características técnicas generales de las turbinas de gas son:

- Es posible aprovechar la energía térmica generada para aplicación directa en los procesos industriales como la cocción y el secado a temperaturas moderadas, y para la producción de vapor a baja presión, en una caldera de recuperación.
- El elevado contenido de oxígeno en los gases de escape permite la utilización de los mismos en quemadores de post-combustión.
- Habitualmente los gases de escape están muy limpios pudiendo ser utilizados directamente sin requerir un intercambiador de calor intermedio, alcanzando un mayor rendimiento térmico.

Se considerará la instalación de sistemas de cogeneración mediante turbinas de gas en los siguientes casos:

- Cuando exista una demanda de potencia continua.
- Cuando se disponga de gas natural (no es factor limitante).
- Cuando existe preferencia en la producción de energía térmica.
- Cuando el centro suministrador necesite cantidades importantes de vapor a alta presión.
- Si se requieren grandes potencias unitarias.
- Para ciclos combinados con turbinas de vapor.
- En centros en los que exista demanda de gases calientes a alta temperatura (400 – 500 ºC).

10.2.2 Cogeneración con turbina de vapor

En las turbinas de vapor la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional (Latorre y Cuñat, 1993).

El rendimiento eléctrico de las turbinas de vapor es menor que en las turbinas de gas, alrededor del 15 %, pero el rendimiento global es mayor (del orden del 85 – 90 %), debido al elevado rendimiento térmico (75 %).

Las turbinas de vapor se dividen en dos tipos, según cuál sea la presión del vapor a la salida.

En las turbinas de vapor a contrapresión, la presión del vapor a la salida de la turbina es superior a la atmosférica. Este vapor se envía directamente al proceso sin necesidad de contar con un condensador y equipo periférico, como las torres de refrigeración.

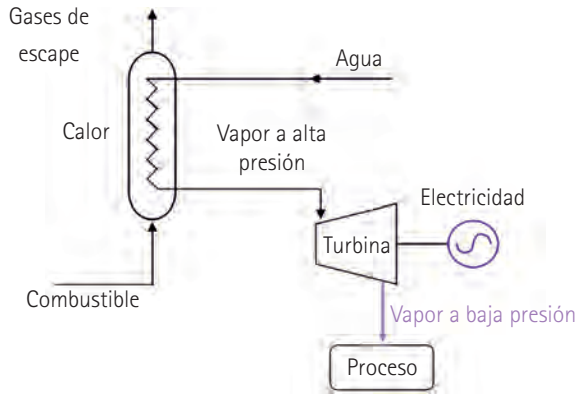


Figura 126 Esquema de cogeneración mediante turbina de vapor a contrapresión.

En las turbinas de vapor de condensación con extracción, la presión de salida es inferior a la atmosférica y están provistas de un condensador. Una parte del vapor puede extraerse en uno o varios puntos antes de la salida del condensador, obteniendo así, vapor para el proceso a varias presiones, mientras que el resto del vapor se expande hasta la salida del condensador. En la figura 127 se muestra un esquema de cogeneración con turbina de vapor de condensación con extracción.

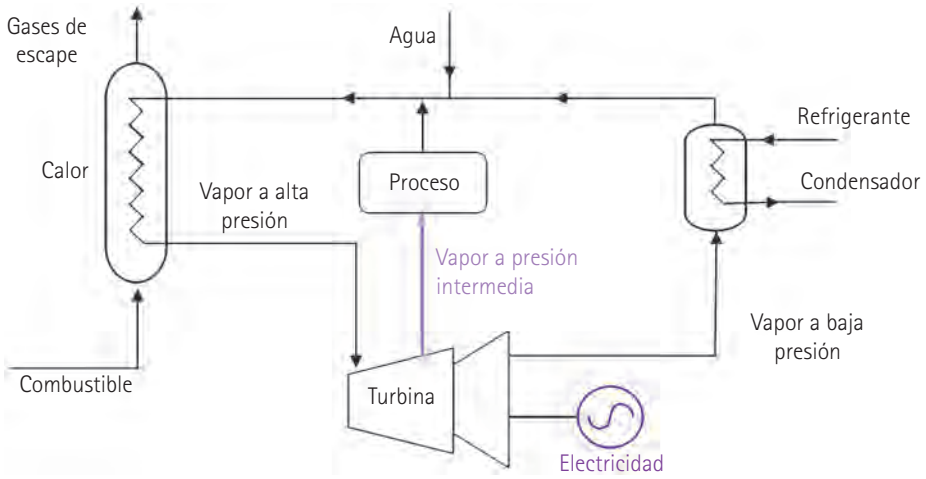


Figura 127 Esquema de cogeneración mediante turbina de vapor de condensación con extracción.

Si la demanda de vapor de proceso es elevada, la máquina funciona al 100 % de extracción y es básicamente una turbina de contrapresión. Si la demanda de proceso disminuye, el exceso de vapor se envía a la sección de condensación, donde se genera una potencia eléctrica adicional.

Las turbinas de vapor presentan la ventaja de que, al no trabajar con gases de combustión directos, es posible la utilización de cualquier tipo de combustible. Al igual que con las turbinas de gas con caldera de recuperación, esos sistemas proporcionan vapor a baja presión que es directamente útil para el proceso.

Se considerará viable la instalación de sistemas de cogeneración mediante turbinas de vapor en los siguientes casos:

- Cuando exista la posibilidad de aprovechamiento de combustibles residuales o efluentes de un nivel térmico suficiente.
- Como complemento a la turbina de gas en un ciclo combinado.
- Cuando la demanda de energía térmica respecto de la eléctrica sea de 4 a 1.

10.2.3 Cogeneración en ciclo combinado

Consiste en la aplicación conjunta de una turbina de gas y una turbina de vapor a contrapresión para la producción de energía eléctrica. Los gases de escape de la primera se utilizan para la producción de vapor a alta presión, en una caldera de recuperación o en una convencional. Este vapor es el que alimenta la turbina de vapor, obteniéndose vapor a baja presión directamente aprovechable por el usuario.

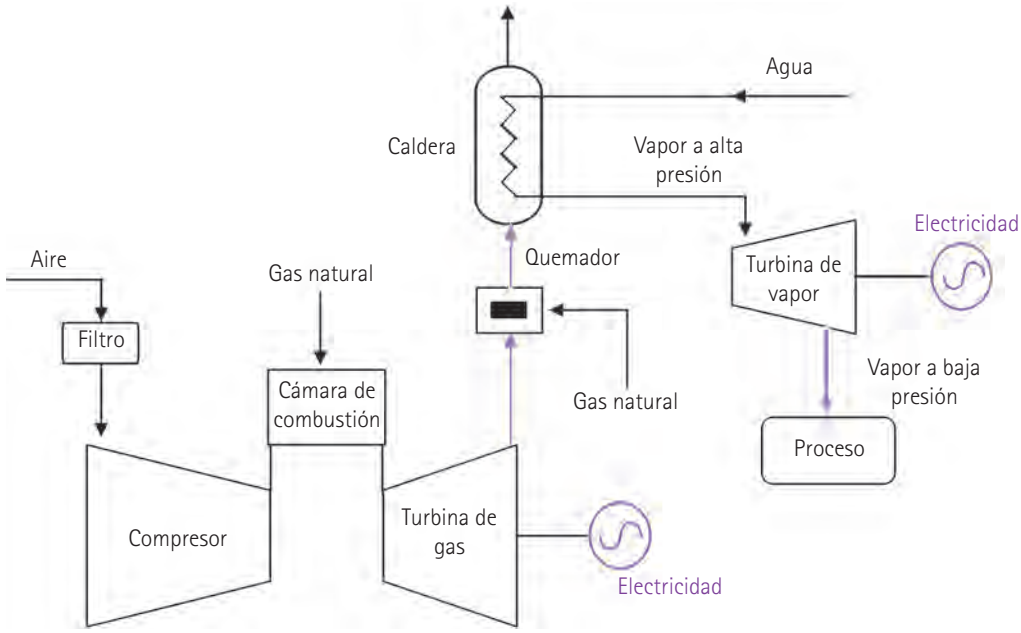


Figura 128 Esquema cogeneración ciclo combinado.

Este sistema presenta, como principal ventaja, un mayor rendimiento global en la producción de energía eléctrica en comparación con las alternativas anteriores, y resulta interesante para potencias eléctricas superiores a 3,5 MW.

10.2.4 Cogeneración con motor alternativo de combustión interna

Los motores alternativos de combustión interna son muy adecuados para emplearlos como sistemas de cogeneración. Pueden utilizar diferentes combustibles, y están disponibles en el mercado en un amplio rango de potencias.

Los motores alternativos tienen rendimientos eléctricos elevados, pero el aprovechamiento de la energía térmica es más difícil, pues se encuentra distribuida entre los gases de escape, y los circuitos de refrigeración del motor.

Según el tipo de ciclo termodinámico que se utilice, se pueden distinguir los motores de ciclo OTTO o de expansión y los de ciclo DIESEL. La diferencia básica entre estas tecnologías radica en que el primero necesita un elemento que inicie la combustión (bujía) mientras que en el segundo caso la ignición del combustible se produce como consecuencia de la compresión de la mezcla aire-combustible.

Con los gases residuales procedentes de los motores alternativos se puede producir vapor a baja presión (15 bar) o agua caliente a unos 90 ºC.

El motor alternativo es de una regulación mucho más simple y rápida que las turbinas, y el envejecimiento por arranques y paradas es mucho menor. En la figura 129 se muestra un esquema de una instalación de cogeneración mediante motor alternativo.

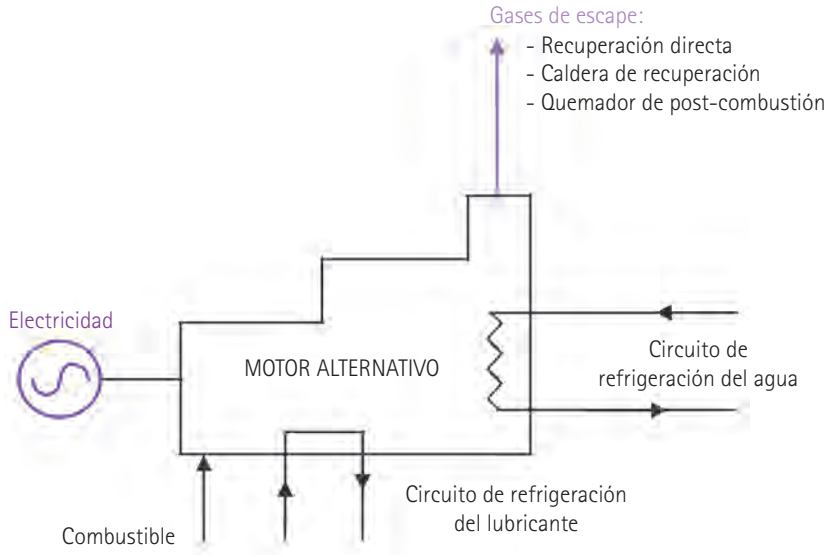


Figura 129 Esquema de cogeneración mediante motor alternativo.

La cogeneración mediante motores alternativos se considera viable en los siguientes casos:

- Cuando existan variaciones en la demanda de potencia del centro o bien no exista un funcionamiento continuo del mismo.
- Si se precisa de vapor a baja presión, agua caliente hasta 115 ºC o gases calientes a baja temperatura (90 – 150 ºC).
- Cuando el centro consumidor tenga un alto ratio eléctrico/térmico.
- Cuando sea preciso realizar un escalonamiento de potencias.

Las siguientes tablas muestran, de manera comparativa, las ventajas y desventajas, el rendimiento global y consumo energético de las diferentes tecnologías de cogeneración.

En la tabla 46 se ha considerado un consumo de energía primaria de 100 kWh en todos los casos.

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Turbina de gas	Amplia gama de aplicaciones Muy fiable Elevado rendimiento eléctrico Elevada temperatura de la energía térmica Rango de 0,5 a 100 MW Gases con alto contenido en oxígeno	Limitaciones en los combustibles Tiempo de vida relativamente corto Inversiones elevadas
Turbina de vapor	Elevado rendimiento térmico Instalaciones muy seguras Posibilidad de emplear todo tipo de combustibles Larga vida de servicio Amplia gama de potencias Coste elevado	Baja relación electricidad/calor No es posible alcanzar elevadas potencias eléctricas Puesta en marcha lenta Coste elevado
Motor alternativo	Elevada relación electricidad/calor Alto rendimiento eléctrico Bajo coste Tiempo de vida largo Capacidad de adaptación a variaciones de la demanda	Alto coste de mantenimiento Energía térmica muy distribuida y a baja temperatura.

Tabla 45 Ventajas y desventajas de las distintas opciones de cogeneración.

Tecnología de cogeneración	Consumo de energía primaria (kWh)	E. eléctrica generada (kWh)	E. térmica producida (kWh)	Rendimiento global (%)
Turbina de gas	100	30	55	85
Turbina de vapor	100	15	75	90
Motor alternativo	100	36	34	70

Tabla 46 Comparación de los rendimientos medios entre las diferentes tecnologías de cogeneración.

Tecnología de cogeneración	Consumo energía primaria		Ahorro de energía primaria (%)
	Cogeneración	Convencional	
Turbina de gas	100	153	34,6
Turbina de vapor	100	129	22,5
Motor alternativo	100	148	32,4

Tabla 47 Ahorro de energía en los diferentes sistemas de cogeneración. Comparación de consumos.

10.2.5 Otras tecnologías de cogeneración

Existen también otras tecnologías que se pueden aplicar al campo de la cogeneración, algunas de ellas están completamente desarrolladas y otras se encuentran en fase de estudio y desarrollo.

Una de estas tecnologías son los **motores Stirling**. Estos motores presentan algunas ventajas sobre los motores alternativos convencionales, entre las cuales cabe destacar:

- Mayor rendimiento térmico.
- Menor impacto ambiental, reduciéndose en gran medida el ruido ambiental.
- Posibilidad de utilizar variedad de fuentes energéticas: energía solar térmica, diferentes combustibles, biomasa, energía geotérmica, etc.

El principio de funcionamiento del motor Stirling se basa en el trabajo realizado por la expansión y contracción de un gas, al ser obligado a seguir un ciclo de enfriamiento en un foco frío, con el cual se contrae, y de calentamiento, con el que se expande.

Otras tecnologías que se han desarrollado se basan en la modificación de algunos ciclos termodinámicos ya existentes, como el ciclo de Rankine, utilizado en las turbinas de vapor.

En este grupo se sitúan el Ciclo de Rankine con fluido orgánico y el ciclo de Kalina. Ambos ciclos son apropiados para la recuperación de calores residuales hasta unas temperaturas de 250 ºC, con unos rendimientos que se encuentran en torno al 20 %.

El **Ciclo Orgánico de Rankine** (ORC) es un ciclo termodinámico de no-sobrecalentamiento que utiliza un fluido de trabajo orgánico para producir electricidad. Es similar a un ciclo de turbina de vapor convencional. Es una de las más prometedoras técnicas para aprovechar fuentes energéticas de baja temperatura, como fluidos calentados por energía solar, salmueras geotérmicas o calores residuales en la industria.

El esquema de una planta de un ORC se muestra en la figura 130: contiene una turbina, un condensador, una bomba y una caldera.

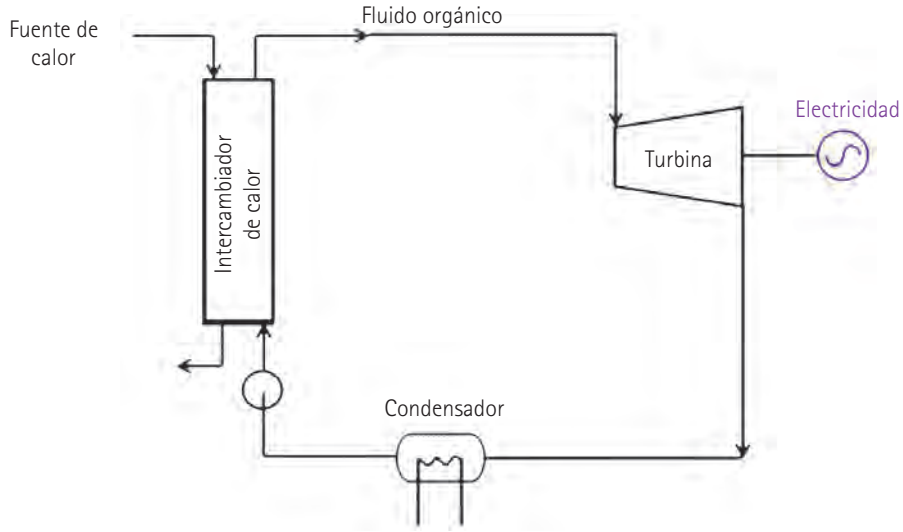


Figura 130 Esquema de un Ciclo Orgánico de Rankine.

Durante el proceso, el fluido se calienta hasta la ebullición y el vapor que se expande se utiliza para impulsar una turbina, que a su vez impulsa un generador que convierte el trabajo en electricidad. El vapor del fluido de trabajo se vuelve a condensar en líquido otra vez, tras pasar por un condensador, y regresar al sistema al ser bombeado de nuevo al evaporador.

La utilización de fluidos orgánicos genera diferencias entre el ciclo de Rankine tradicional y el ciclo ORC, posibilitando el aprovechamiento de fuentes de energía de baja temperatura (fuentes renovables como la energía solar o la combustión de biomasa) y su posible aplicación en la cogeneración industrial, de manera que se aumenta la eficiencia energética de los procesos.

Las ventajas técnicas del ciclo orgánico de Rankine frente a los ciclos basados en vapor a baja potencia son:

- Posibilidad de generar hasta 2 MW de electricidad a partir de fuentes de calor con baja entalpía.
- Procedimientos de marcha y parada simples.
- Buen funcionamiento a media potencia.
- Funcionamiento de la turbina a menos velocidad, lo que permite la impulsión directa del generador eléctrico sin necesidad de engranajes de transmisiones especiales.
- Menor tensión mecánica en la turbina, debido a que trabaja a menos velocidad.
- Larga vida de la turbina al no existir erosión en las paletas por no haber humedad en los inyectores de vapor.
- Fluido de trabajo libre de cloro, incombustible, no tóxico y que no daña la capa de ozono.

La mayor desventaja del ORC es la relativamente baja eficiencia del ciclo (inherente a las limitaciones termodinámicas) y los relativamente grandes tamaños de los equipos intercambiadores de calor. Por tanto, es importante usar métodos para incrementar la eficiencia térmica y para disminuir el tamaño de dichos intercambiadores de calor. Técnicas atractivas para conseguir ambos objetivos son el uso de recuperadores y el empleo de regeneradores.

El **ciclo de Kalina** surgió en los años 90 como una alternativa eficiente para aprovechar fuentes térmicas de baja y media temperatura en la producción de energía eléctrica.

El ciclo de Kalina es otra variante del ciclo de Rankine. Se realiza con una mezcla binaria de amoniaco y agua, que presenta un comportamiento zeotrópico, gracias al cual los procesos de cambio de fase realizados a presión constante no ocurren a temperatura constante, por lo que tiene lugar un buen seguimiento del perfil de temperatura de la fuente térmica.

Las pérdidas energéticas en la caldera de recuperación son menores a las que se producen en un ciclo combinado convencional que emplee Rankine como ciclo de cola.

El ciclo de Kalina se presta bien a la recuperación de calor de fuentes de baja temperatura, aunque todavía existen pocos ejemplos de aplicaciones reales para poder valorar sus futuras posibilidades.

Puesto que se utiliza una mezcla binaria como fluido, es posible modificar la composición de la misma en diferentes zonas del ciclo. De este modo se pueden alcanzar mejoras en el rendimiento del ciclo de hasta el 10 %.

Se utiliza una mezcla binaria de agua/amoniaco, debido a sus diversas ventajas, entre las cuales destacan:

- El uso de un componente ligero, como es el amoniaco, proporciona elevadas eficiencias en la recuperación de calor residual a bajas temperaturas, debido a que la ebullición se da a temperaturas menores.
- El uso de esta mezcla binaria, permite variar la composición de la misma, en diversas zonas, pudiéndose dar composiciones elevadas en la caldera y composiciones bajas en la zona de baja presión del condensador.
- La temperatura variable de la mezcla binaria reduce las pérdidas de calor, de modo que el redimiendo del ciclo aumenta.
- Posibilidad de utilizar materiales comunes (excepto el cobre).

Por último, destacar una tecnología nueva que se presenta como muy prometedora en las aplicaciones de cogeneración: las **pilas de combustible**. Se caracterizan porque permiten la conversión directa de la energía química de un combustible en electricidad, de manera que no existen etapas intermedias en la conversión de energía (energía química en calor, calor en energía mecánica, energía mecánica en electricidad) de modo que el rendimiento térmico no viene delimitado por el factor de Carnot.

En una pila de combustible, un gas combustible se oxida electroquímicamente liberando electrones en el ánodo y un oxidante, generalmente aire, se reduce captando electrones del cátodo. El resultado final es el flujo de electrones del ánodo al cátodo, generación de electricidad, y la oxidación de un combustible.

Las ventajas de las pilas de combustible son las siguientes:

- Posibilidad de alcanzar rendimientos térmicos elevados.
- Menor contaminación atmosférica.
- Posibilita la eliminación de la contaminación acústica, lo cual hace de ésta una tecnología especialmente válida para su aplicación a los sectores residencial y terciario.

10.3 Situación actual de la cogeneración en España y en la Comunitat Valenciana

Las instalaciones de cogeneración son consideradas, a efectos legislativos, como plantas de producción de energía eléctrica en régimen especial. Estas instalaciones pueden ceder su energía excedentaria a la compañía distribuidora de la zona (que tiene la obligación de adquirirla, siempre que sea técnicamente viable) percibiendo por ello una retribución económica.

Desde la década de los 90, tanto a nivel europeo como nacional, se viene fomentando el uso de las instalaciones de cogeneración, dado que son tecnologías que contribuyen al ahorro de energía primaria, a la diversificación energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero debido a su elevada eficiencia.

En diciembre de 2008, la potencia eléctrica instalada en sistemas de cogeneración en España era de 6.161 MW, repartidos en 883 instalaciones. La cantidad de energía eléctrica vertida a red por estas instalaciones ascendió a 20.950 GWh. En la gráfica de la figura 131 se muestra la evolución histórica de la potencia de cogeneración instalada, así como de la cantidad de energía vendida a las compañías eléctricas.

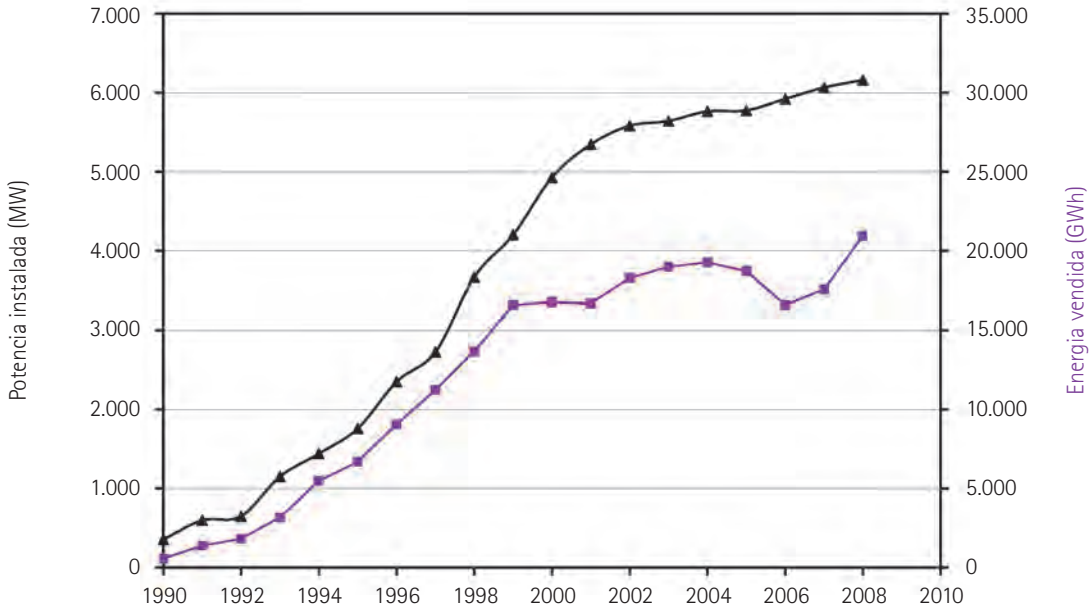


Figura 131 Evolución de la potencia instalada en sistemas de cogeneración en España (Fuente: Comisión Nacional de la Energía).

La distribución de la potencia instalada en sistemas de cogeneración, por comunidades autónomas, se muestra en la figura 132. La Comunitat Valenciana es la tercera en potencia instalada, sólo superada por Cataluña y Andalucía.

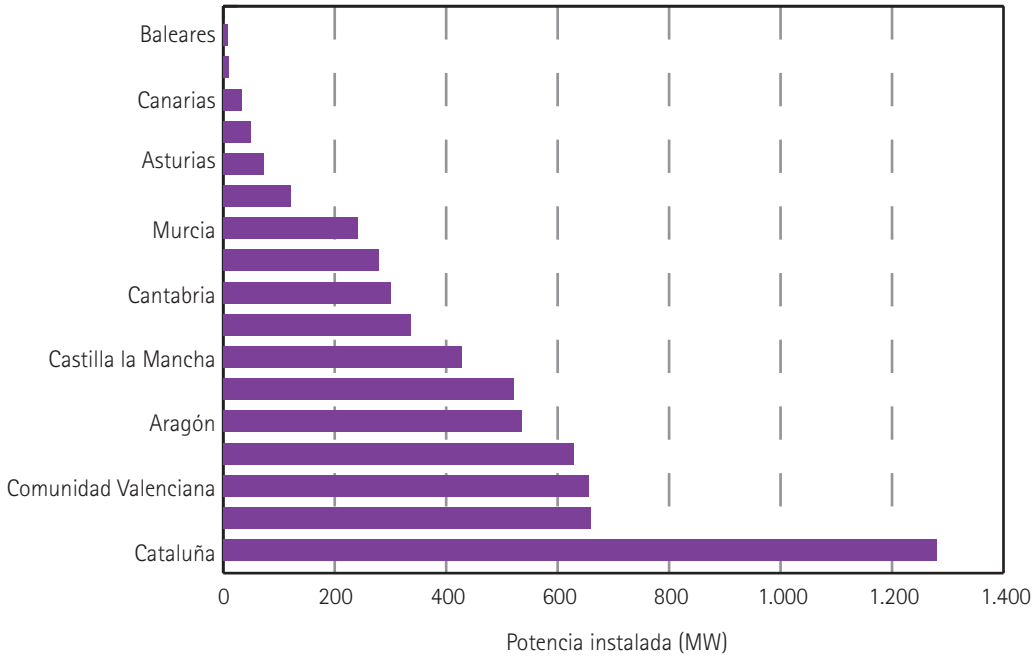


Figura 132 Potencia instalada en sistemas de cogeneración, por Comunidades Autónomas, en 2008 (Fuente: Comisión Nacional de la Energía).

La evolución de la potencia instalada en sistemas de cogeneración, en la Comunitat Valenciana, se ha representado en la figura 133. Se observa cómo, en general, en los últimos 10 años ha ido en aumento, si bien desde 2005 la situación no ha experimentado cambios significativos.

Esta situación de estancamiento de la producción eléctrica procedente de la cogeneración en la Comunitat Valenciana es similar a la observada a nivel nacional, y está causada por varios factores, entre los que cabe destacar la evolución de los precios energéticos.

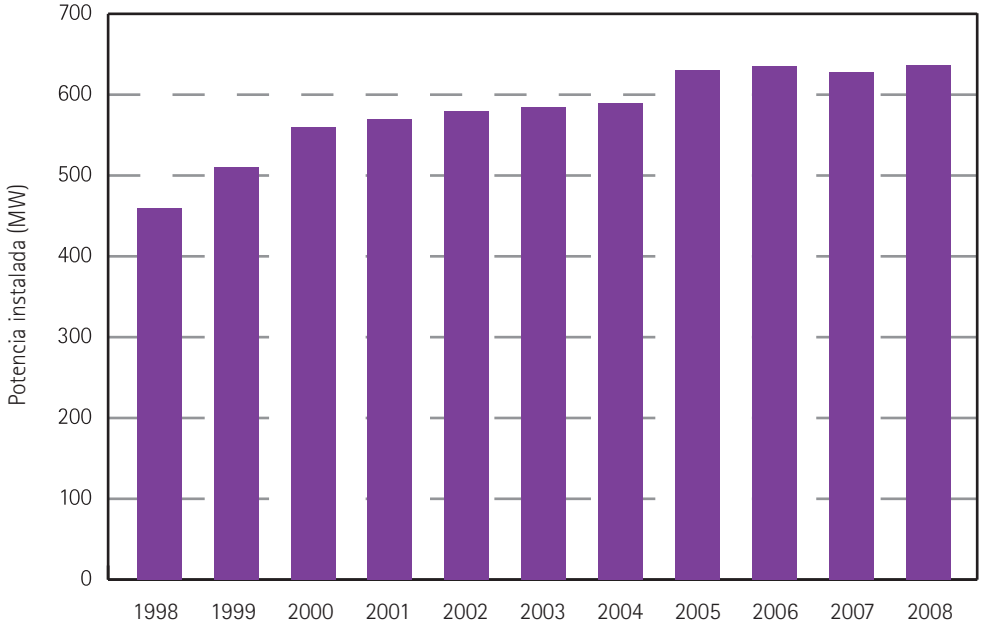


Figura 133 Evolución de la potencia instalada en sistemas de cogeneración en la Comunitat Valenciana (Fuente: Comisión Nacional de la Energía).

10.4 La cogeneración en la industria cerámica

El objetivo de emplear sistemas de cogeneración en las instalaciones industriales no es reducir el consumo de energía térmica, sino realizar un uso más eficiente de la misma. En efecto, en un sistema de cogeneración se aprovecha al máximo la energía química contenida en el combustible, pues los gases de combustión se utilizan para generar electricidad, y posteriormente se aprovechan en los procesos productivos.

Las necesidades de energía en forma de calor en el proceso de fabricación de las baldosas hacen que sea adecuado para que puedan emplearse sistemas de cogeneración.

Las aplicaciones más habituales de sistemas de cogeneración en la fabricación de baldosas cerámicas son las siguientes:

- Turbina de gas, cuyos gases de escape constituyen el aire de secado en los secaderos por atomización de las suspensiones cerámicas.
- Motores alternativos de combustión interna, cuyos gases de salida se utilizan en el secado de las baldosas recién prensadas.

A finales del año 2007, el sector de fabricación de baldosas cerámicas de la Comunidad Valenciana contaba con 76 instalaciones de cogeneración, cuya potencia total instalada ascendía a 290 MW (Fuente: AVEN). Todas las instalaciones se encuentran ubicadas en la provincia de Castellón.

En la figura 134 se muestra la cantidad de instalaciones de cogeneración en funcionamiento, agrupadas por rangos de potencias.

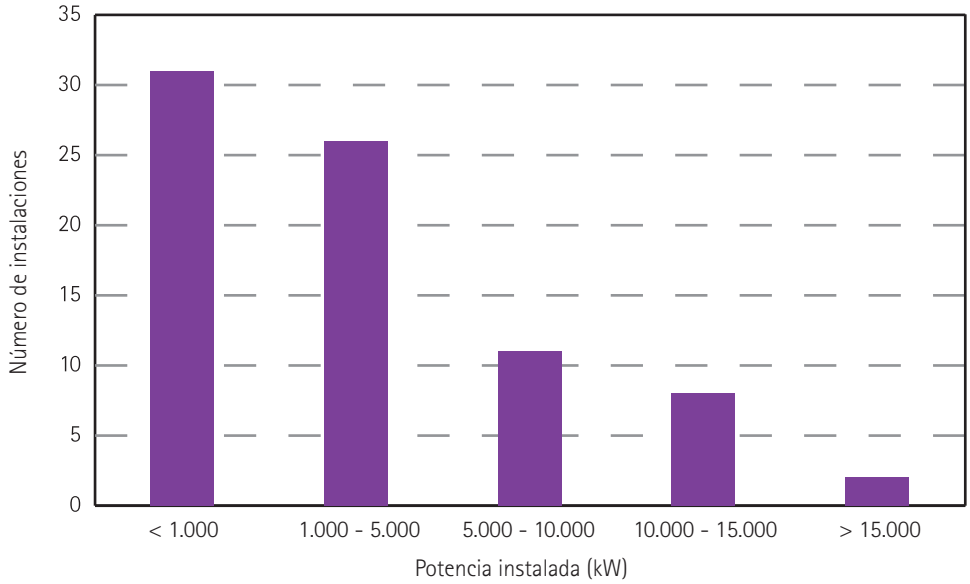


Figura 134 Cantidad de instalaciones de cogeneración en función de la potencia.

La cantidad anual de energía eléctrica vertida por estas instalaciones a la red de distribución asciende a 1.539 GWh, suficiente para abastecer una población de 244.908 habitantes, considerando un consumo medio por habitante 6.284 kWh/año (Fuente: IDAE 2007).

Respecto a las tecnologías de cogeneración instaladas, el 88 % de la potencia instalada corresponde a turbinas de gas, el 11 % corresponde a motores de gas, mientras que el 1 % restante corresponde a otros tipos de tecnología.

Tipo de tecnología	Número de instalaciones	Potencia instalada (MW)
Turbina de gas	41	256,09
Motor de gas	33	30,62
Otros	2	3,25
Total	76	289,96

Tabla 48 Potencia instalada por tecnología de cogeneración.

Las industrias cerámicas cumplen las condiciones necesarias para poder utilizar instalaciones de cogeneración energética, debido a que:

- El consumo de energía térmica es muy elevado, especialmente en las etapas de atomización, secado y cocción.
- Los tiempos de funcionamiento de las instalaciones son superiores a 5.000 h/año.

10.4.1 Empleo de turbinas de cogeneración en las instalaciones de atomización

Una de las etapas del proceso de fabricación donde más se ha extendido el uso de sistemas de cogeneración es la etapa de secado por atomización.

Los atomizadores son instalaciones que funcionan de manera continua, y tienen una demanda térmica muy elevada. Los sistemas de cogeneración implantados en los atomizadores son turbinas de gas. Las turbinas de gas reducen mucho su tiempo de vida útil con las arrancadas y paradas, por lo que interesa que se paren lo menos posible y así aumentar su durabilidad.

El rango de potencia eléctrica de las turbinas instaladas en el sector cerámico es amplio, variando desde valores de 3,5 MW hasta 10 MW.

Los gases de escape de la turbina, con una temperatura cercana a los 500 °C, y un contenido en oxígeno superior al 16 %, son adecuados para ser empleados como comburente en el quemador de vena de aire del atomizador. En la figura 135 se muestra esquemáticamente una instalación de atomización que funciona con los gases de escape de una turbina de gas.

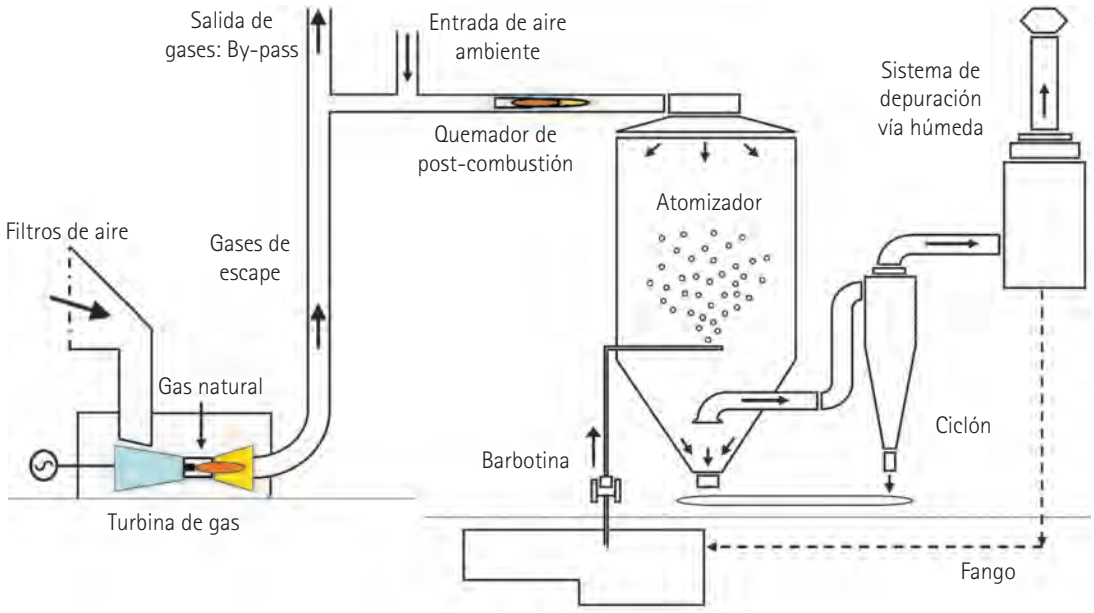


Figura 135 Esquema del funcionamiento de una turbina de gas cuyos gases de escape se aprovechan en un atomizador.

Habitualmente, las turbinas de gas se dimensionan para abastecer a un único atomizador, pero existen instalaciones en las que éstas se sobredimensionan para abastecer también a otro atomizador. En este

caso hay que considerar la pérdida de flexibilidad que supone enlazar el funcionamiento de varios equipos a la vez, aunque por otro lado se incrementa la producción de energía eléctrica, con el beneficio económico que esto conlleva.

La legislación vigente (Real Decreto 616/2007) exige un aprovechamiento mínimo de la energía térmica generada en los sistemas de cogeneración, definido mediante un factor denominado Rendimiento Eléctrico Equivalente, cuyo valor depende de la tecnología de cogeneración empleada y del combustible utilizado en la misma. En el caso de turbinas de gas natural, el Rendimiento Eléctrico Equivalente es del 55 %, y se calcula a partir de la cantidad de combustible consumido en la turbina, de la energía eléctrica generada y de la cantidad de energía térmica aprovechada en el proceso industrial.

El volumen de energía eléctrica excedente depende, entre otros factores, del tipo de instalación industrial. Así, si la empresa únicamente fabrica gránulo atomizado (ciclo parcial), su consumo de electricidad es inferior al de las empresas que fabrican baldosas (ciclo completo), pues el número de equipos consumidores de energía eléctrica es menor. Cuanto menor sea el consumo en la propia empresa, mayor será la cantidad de energía eléctrica exportada a la red.

CASO PRÁCTICO Nº 16:
Utilización de un sistema de cogeneración con turbina de gas en una instalación de producción de gránulo atomizado

En una empresa dedicada a la producción de gránulo atomizado, se ha instalado, desde la puesta en marcha, un sistema de cogeneración que consiste en una turbina de gas. La potencia eléctrica del equipo es de 7,5 MW (en condiciones ISO, que son 15 °C, 1 atm y 60 % de humedad relativa) y proporciona 13,9 MW de energía térmica.

Los gases calientes de escape de la turbina se incorporan a la planta de fabricación. La instalación se ha diseñado de modo que permite su aprovechamiento en cualquiera de los atomizadores que esté en funcionamiento, optimizándose de este modo la eficiencia energética global del proceso.

Cada atomizador está dotado de un quemador de post-combustión, donde se aporta a los gases de escape de la turbina la energía necesaria para conseguir el caudal de gases y la temperatura de trabajo en el atomizador.

En las condiciones particulares de localización de la instalación, la turbina genera 7 MW eléctricos, lo que posibilita a la fábrica disponer de un suministro de energía eléctrica seguro e ininterrumpible. El excedente, resultado de la diferencia entre el consumo de electricidad de la planta productiva y la energía generada, se vende a la red eléctrica, según el régimen económico que regula la producción de energía eléctrica en régimen especial.

En la tabla 49 se muestra un ejemplo de la cantidad de energía eléctrica producida, la energía autoconsumida en las instalaciones (considerando la turbina y la planta productiva), la energía vendida a la red, y la comprada, en la empresa. Como se observa, la turbina de cogeneración produce energía eléctrica suficiente para abastecer a la planta productiva, y la energía excedente se vende a la red. La compra de energía eléctrica se produce por desfase horario entre la producción y el consumo en algunos periodos de tiempo.

Concepto	Cantidad (GWh)
EE producida	51,5
EE autoconsumida	31
EE vendida	21,3
EE comprada	0,8

Tabla 49 Ejemplo de producción, consumo y venta de energía eléctrica anual en una empresa con turbina de gas, dedicada a la fabricación de gránulo atomizado.

10.4.2 Empleo de motores de cogeneración en las instalaciones de secado de baldosas

Esta aplicación es bastante conocida en el sector de baldosas cerámicas, aunque no está tan extendida como la de las turbinas de gas. La potencia eléctrica de los motores instalados varía entre 300 kWe y 2.000 kWe.

Las instalaciones de secado de baldosas no suelen funcionar todo el día, sino que paran durante las horas de noche. Este hecho provoca que el sistema de cogeneración que trabaje conjuntamente con los secaderos debe ser capaz de arrancar y parar muchas veces a lo largo de su tiempo de vida útil.

Debido a la temperatura de operación de los secaderos (entre 100 y 250 ºC), y a su ritmo productivo, los sistemas de cogeneración más adecuados para trabajar con los secaderos de baldosas son motores de gas. Habitualmente, uno o dos motores abastecen a varios secaderos.

Los gases de escape de los motores de cogeneración tienen una temperatura elevada, entre 400 y 500 ºC. Estos gases se diluyen con aire precalentado (a 60 – 70 ºC) procedente del circuito de refrigeración del agua utilizada para enfriar internamente el motor (cilindros, aceite, etc.), cuya temperatura alcanza los 95 ºC.

El resultado es una corriente gaseosa a una temperatura situada, habitualmente, entre 200 y 300 ºC. Estos gases son adecuados para su empleo como gases de secado, aunque su incorporación a los secaderos debe ser estudiada con detalle en cada caso particular para interferir lo menos posible en el ciclo de secado establecido.

Con objeto de regular el funcionamiento de los secaderos, éstos cuentan también con quemadores de gas. En la figura 136 se muestra un esquema de funcionamiento de un motor de cogeneración cuyos gases de escape se utilizan en el secado de soportes crudos recién prensados en un secadero vertical.

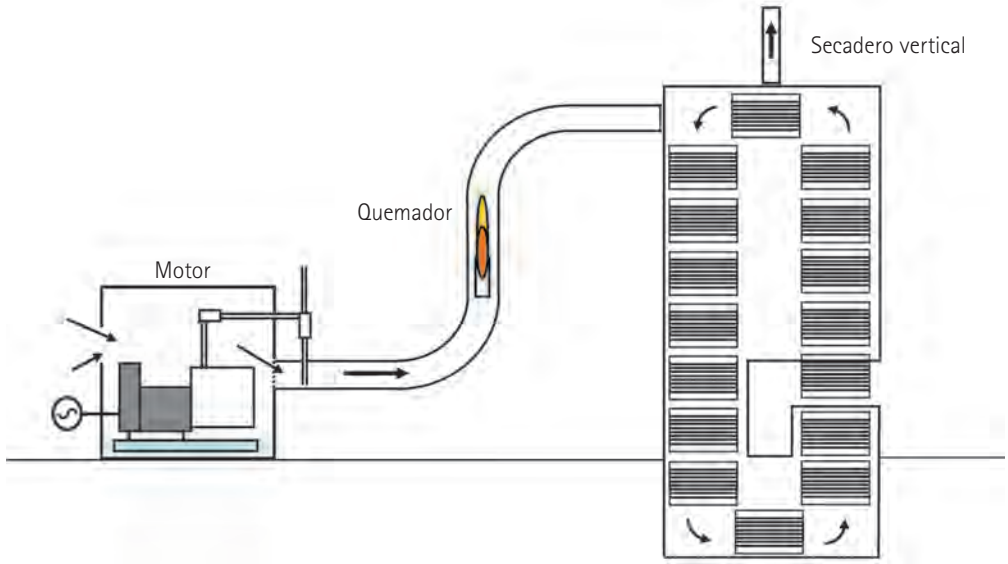


Figura 136 Esquema del funcionamiento de un motor de gas cuyos gases de escape de aprovechan en un secadero vertical.

En el caso de que el secadero tenga dos quemadores, conviene individualizar el acceso de los gases de cogeneración a cada quemador, de modo que se pueda aproximar al máximo posible en cada caso la temperatura de los gases empleados como comburente a la temperatura de consigna del quemador.

CASO PRÁCTICO Nº 17:
Cálculo del ahorro energético obtenido en un secadero vertical por la recuperación de gases de un sistema de cogeneración

Se ha calculado cuál es el ahorro energético alcanzado en un secadero vertical de baldosas, dotado de dos conducciones de recirculación, y dos quemadores, uno en cada una de las recirculaciones, al sustituir parte de los gases recirculados por gases procedentes de un sistema de cogeneración.

En el caso estudiado, los gases recuperados son gases calientes excedentes de una turbina de gas, cuyos gases de escape se emplean, mayoritariamente, en un atomizador.

El aporte al secadero de los gases calientes, cuya temperatura era de 350 ºC, se realiza en las dos conducciones de recirculación, y está regulado por la temperatura de los gases recirculados.

En la tabla 50 se muestran comparativamente algunas variables operativas del secadero, funcionando sin y con aporte de gases calientes procedentes del sistema de cogeneración.

Se aprecia cómo el consumo de gas natural en el secadero se reduce en un 54 % al incorporar gases del sistema de cogeneración, sin que se produzcan variaciones significativas en los parámetros de funcionamiento del secadero, y en las propiedades de las piezas en la salida del mismo.

Variable	SIN COGENERACIÓN	CON COGENERACIÓN
Consumo de gas (m^3_N /h)	47,7	22,1
Producción (kg ss/h)	1,46	1,44
Caudal de gases en chimenea (m^3_N /h)	6.080	6.850
Temperatura de los gases en chimenea (ºC)	94	86
Humedad de los gases en chimenea (m^3_N agua/ m^3_N aire seco)	0,084	0,072
Temperatura piezas en la salida (ºC)	90	90
Humedad de las piezas en la entrada (%)	6,7	6,8
Humedad de las piezas en la salida (%)	0,1	0,1

Tabla 50 Ejemplo de recuperación de gases calientes de un sistema de cogeneración en un secadero vertical.

10.5 Estudio de viabilidad de un proyecto de cogeneración

El punto de partida de un proyecto de cogeneración es la realización de un estudio de viabilidad para determinar el tipo de instalación que mejor se adapta al centro consumidor y la rentabilidad de la misma.

En la figura 137 se muestran las fases de un proyecto para la instalación de un sistema de cogeneración.

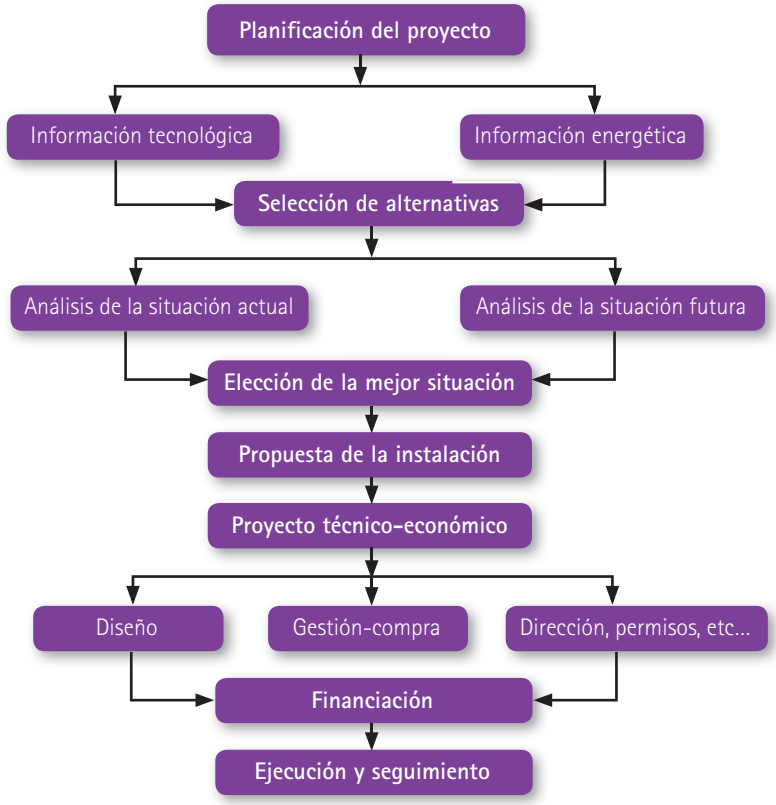


Figura 137 Fases de un proyecto de cogeneración.

Un estudio de viabilidad debe contemplar las siguientes etapas:

1. Análisis de la situación actual y previsión de la demanda
2. Evaluación técnica
3. Evaluación económica

1) Análisis de la situación actual y previsión de la demanda

Inicialmente se deben definir los datos básicos de partida a tener en cuenta en el diseño de la instalación de cogeneración, entre ellos destacan:

- Reglamentación aplicable a las instalaciones de cogeneración y normativa medioambiental.
- Consumo de electricidad y de combustible de la instalación y precio de la energía eléctrica y de los combustibles. Es interesante conocer la evolución del consumo a lo largo del tiempo para poder determinar las variaciones en la demanda.

- Demanda energética (eléctrica y térmica) del proceso que puede ser satisfecha por un hipotético sistema de cogeneración. Prever las posibles ampliaciones de las instalaciones o aumentos de producción.
- Tiempo de funcionamiento real de una instalación de cogeneración:
    - Tiempo de funcionamiento de los equipos.
    - Paradas de mantenimiento programadas.
    - Estimación de las paradas imprevistas (averías).
- Disponibilidad de combustibles.
- Medios de financiación y las subvenciones existentes.
- Costes de mantenimiento de la instalación de cogeneración:
    - Programa preventivo de mantenimiento.
    - Programa predictivo de mantenimiento.
    - Mantenimiento imprevisto correctivo.

Tras el análisis de la situación actual, se debe definir el tipo de tecnología más adecuada para la instalación (turbinas de vapor, turbinas de gas, motor de combustión interna, o combinados de ellas), y hacer una primera estimación de la dimensión de los equipos principales, obteniendo unos valores aproximados de los ahorros energéticos y económicos que se pueden conseguir, junto con la inversión requerida.

2) Evaluación técnica. Consiste en evaluar técnicamente la nueva instalación, determinando:

- Los nuevos consumos de electricidad y de combustible.
- Los excedentes de energía eléctrica y los posibles beneficios derivados de su venta.
- Los rendimientos de la instalación:
    - Rendimiento Eléctrico Equivalente.
    - Rendimiento Eléctrico.
    - Rendimiento Térmico.

3) Evaluación económica de la nueva instalación. Es la parte más decisiva del preestudio; en ella se calculan los ahorros económicos que producirá la cogeneración, considerando los nuevos costes energéticos (térmico y eléctrico) así como los costes de mantenimiento.

Consiste en:

- Determinar la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto:
    - Equipos de cogeneración.
    - Unión al proceso.
    - Unión a la red eléctrica.
    - Construcción, obra civil.
- Determinar los beneficios obtenidos:

  Beneficios = Costes iniciales – Costes actuales + Venta EE

    - Costes iniciales: EE + Combustible.

    - Costes actuales: ¿EE? + Combustible + Mantenimiento de la instalación.
    - Venta EE: beneficios por la venta de la electricidad excedente.
- Calcular el tiempo de amortización simple:

  TAS = Inversión / Beneficio

Como resultado del análisis económico, se obtienen unos parámetros de rentabilidad que suelen ser el periodo de retorno simple, el Valor Actualizado Neto, y la Tasa de Rentabilidad Interna que indicarán si es conveniente la instalación o no del sistema de producción conjunta de energía térmica y eléctrica.

CASO PRÁCTICO Nº 18:
Instalación de una turbina de gas en un atomizador

Se ha llevado a cabo un estudio de viabilidad para realizar la instalación de un sistema de cogeneración en una empresa de fabricación de gránulo atomizado.

Mediante el sistema de cogeneración se logra abastecer gran parte de la demanda térmica de la instalación de secado, y se produce electricidad, suficiente para abastecer a toda la empresa y permitir la venta de los excedentes a la red eléctrica.

En la tabla 51 se muestra la situación inicial de la planta de fabricación antes de la instalación del sistema de cogeneración.

Producción (kg atom/h)	24.570
Agua evaporada (kg/h)	10.550
Horas de funcionamiento (h/año)	7.920
Consumo específico energía térmica (kWh/Kg atom)	0,52
Precio de compra energía térmica (PCS) (€/kWh)	0,0283
Coste específico energía térmica (€/kg atom)	0,0147
Consumo específico energía eléctrica (kWh/kg atom)	0,0391
Precio de compra energía eléctrica (€/kWh)	0,08745
Coste específico energía eléctrica(€/kg)	0,00342

Tabla 51 Situación de la empresa sin instalación de cogeneración.

El sistema de cogeneración seleccionado es una turbina de gas que tiene las siguientes características:

Parámetro	Valor
Potencia Eléctrica (MW)	5,9
Potencia Térmica (PCS) (MW)	13,5
Consumo Energía térmica (PCS) (kWh/kg atom)	0,83
Horas de funcionamiento (h/año)	7.920

Tabla 52 Características de la turbina de gas seleccionada.

Finalmente, en la tabla 53 se describe la situación de la planta productiva tras la instalación del sistema de cogeneración. Se observa que el sistema de cogeneración es capaz de cubrir totalmente la demanda de energía eléctrica en la empresa, y hay un excedente que se vende a la red eléctrica, produciendo un beneficio económico.

La inversión requerida es de 2,7 millones de €, pero el beneficio obtenido reduce el periodo de retorno simple de la inversión a 1,2 años.

Planta con cogeneración	
Producción (kg atom./h)	24.570
Agua evaporada (kg/h)	10.550
Horas de funcionamiento (h/año)	7.920
Consumo energía térmica (kWh/kg atom)	0,277
Precio energía térmica (PCS) (€/kwh)	0,0283
Coste energía térmica (€/kg atom)	0,00784
Autoconsumo energía eléctrica (kWh/kg atom)	0,0391
Venta de energía eléctrica (kwh/año)	39.417.840
Precio venta energía eléctrica (€/kg)	0,10217
Beneficio venta energía eléctrica (€/kg atom)	0,0207
Beneficio energético (€/kg atom)	0,01286
Beneficio anual (€/año)	2.502.659
Inversión total (€)	2.704.555
Costes mantenimiento (€/año)	265.000
Tiempo de retorno simple (años)	1,21

Tabla 53 Situación de la empresa con la instalación de cogeneración.

11.

Acciones de futuro

11 Acciones de futuro

11.1 Sustitución de la molienda vía húmeda por molienda vía seca

En los últimos años, el método utilizado mayoritariamente para la obtención de las materias primas utilizadas posteriormente en el prensado en seco ha sido la molienda vía húmeda en molinos de bolas, y posterior secado por atomización de la mezcla obtenida.

La molienda vía húmeda presenta una serie de ventajas tecnológicas frente al método tradicional de molienda en seco, en el que se utilizan molinos pendulares o de martillos (Nassetti, G., 1997):

- Permite obtener tamaños de gránulo más finos, especialmente indicado para el prensado de piezas de gran tamaño.
- Facilita la eliminación de impurezas de gran tamaño, que podrían dar lugar a defectos en cocción.
- El gránulo obtenido tras el secado por atomización presenta mayor fluidez que el obtenido vía seca, debido a la irregular distribución de tamaños de partículas de este último.
- La forma de los gránulos es casi esférica y uniforme, frente a la forma angulosa e irregular de los gránulos obtenidos en seco. Este hecho facilita la etapa de prensado del polvo obtenido vía húmeda.
- Permite utilizar instalaciones de cogeneración.
- Permite recuperar residuos (aguas residuales y fangos) de otras etapas productivas.
- La coloración de las composiciones vía húmeda es más sencillo que realizar la coloración en seco.
- Permite molturar mezclas de varios componentes sin que se produzcan problemas de segregación.

Sin embargo, la molienda de las materias primas mediante molinos vía húmeda y posterior secado por atomización, presenta una serie de inconvenientes medioambientales y económicos:

- Elevado consumo de agua, en parte paliado por la reutilización de aguas residuales.
- Elevada demanda energética para evaporar el agua de la suspensión, y como consecuencia, mayor emisión de CO_2 ligado al consumo de combustibles fósiles.
- Elevados costes ligados a la utilización de desfloculantes y aditivos.
- Mayores costes de mantenimiento.

Los últimos avances tecnológicos han intentado paliar las desventajas tecnológicas del método de molienda vía seca, con el objetivo de introducir de nuevo esta opción de molienda en la fabricación de baldosas cerámicas. (Schianchi, S. et al., 2006). Estos avances pueden resumirse en:

- Secado y trituración de las materias primas previo a la molienda.
- Utilización de molinos de elevada eficiencia, que permiten obtener partículas de tamaños comparables a los obtenidos mediante molienda en húmedo.

- Posterior granulación del polvo obtenido mediante humidificación, dando lugar a aglomerados de comportamiento similar al de los gránulos obtenidos mediante molienda vía húmeda y atomización.

Estas mejoras tecnológicas permiten una reducción drástica del consumo térmico en el proceso con respecto al consumo térmico de la atomización, donde grandes cantidades de agua de molturación debe ser eliminada mediante el aporte de calor.

Sin embargo, aunque mediante este sistema es posible obtener un sólido de características similares al obtenido mediante molienda en húmedo y secado por atomización, las características del polvo obtenido siguen siendo diferentes:

- Presenta menor fluidez.
- Los gránulos son más compactos.
- El porcentaje de gránulos finos (menor de 125 µm) es mayor.
- Los gránulos son menos deformables durante la etapa de prensado que los gránulos atomizados.

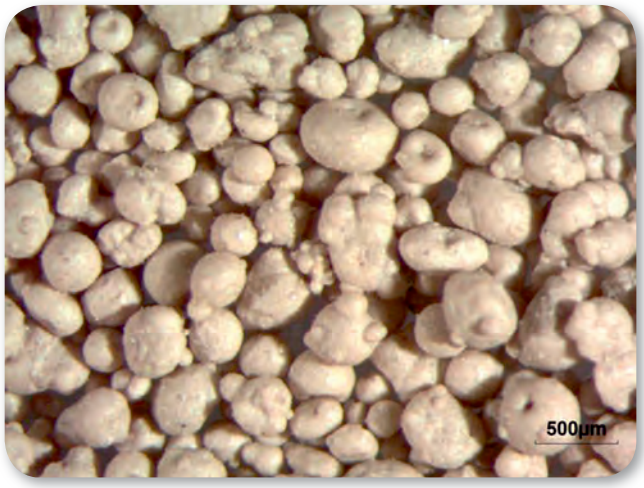


Figura 138 Micrografía de una composición cerámica de coloración blanca obtenida mediante atomización (Fuente: ITC).

Figura 139 Micrografía de una composición cerámica de coloración roja obtenida mediante molienda convencional vía seca (Fuente: ITC).

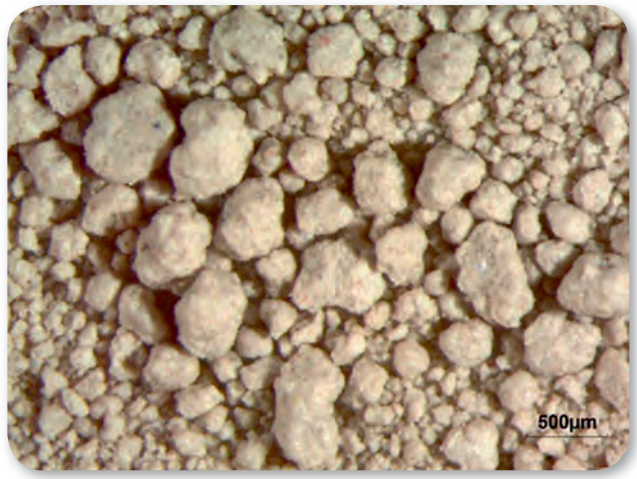


Figura 140 Micrografía de una composición cerámica de coloración blanca, obtenida mediante molienda vía seca y posterior granulación (Fuente: ITC).

En estas figuras se muestran una serie de micrografías obtenidas con un microcopio estereoscópico, donde se puede observar las diferencias fisiológicas entre las materias primas cerámicas obtenidas mediante atomización, molienda en seco convencional, y molienda en seco y posterior granulación.

Como se obseva en las imágenes mostradas anteriormente, las partículas obtenidas mediante atomización (figura 138) poseen una forma más redondeada que las partículas resultado de la molienda en seco (figura 139). Sin embargo, la forma de las partículas obtenidas mediante molienda en seco y posterior granulación (figura 140) presentan una forma redondeada, más parecidas a las obtenidas mediante atomización.

11.2 Empleo de la energía solar en el proceso de fabricación de baldosas

11.2.1 Radiación solar en la Comunitat Valenciana

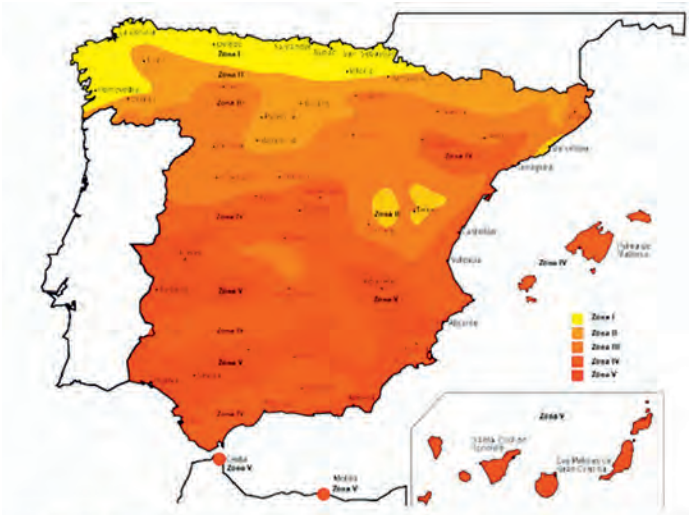
El territorio de la Comunitat Valenciana ocupa una posición geográfica privilegiada por lo que se refiere a la radiación solar.

Según se observa en la figura 141, esta zona goza de una radiación superior a la media española, con un elevado número de horas de sol al año, lo que hace que se tome muy en consideración la instalación de sistemas de energéticos que permitan su aprovechamiento. Nótese que, según los datos del Plan de Energías Renovables 2005 – 2010, una gran parte de la Comunidad se encuentra situada en zonas climáticas IV y V, que son las más favorables desde el punto de vista de radiación, con valores medios diarios de entre 4,5 y 5 kWh/m^2.

Puesto que la producción de una instalación solar está directamente relacionada con la radiación incidente, la Comunitat ocupa una posición privilegiada para el desarrollo de estas tecnologías.

Un estudio más detallado de la radiación solar en la Comunidad Valenciana puede apreciarse en la figura 142. En este mapa se muestran los valores medios anuales de la radiación solar global sobre el plano horizontal, expresados en cal/cm^2 y día. Las líneas expresan, en estas unidades, los puntos de igual radiación. Los puntos entre líneas pueden extrapolarse de forma lineal. Para transformar los datos mostrados a MJ/m^2 y día, basta multiplicarlos por 0,0418, en tanto que la transformación a kWh/m^2 y día se consigue multiplicándolos por 0,0116.

En el mapa se puede observar que existe un efecto longitudinal, de forma que al aumentar la latitud, disminuye la radiación. También se observa un efecto continental, que se manifiesta en las zonas de interior, donde se incrementa ligeramente la radiación total anual, en alrededor de un 5 %.



FUENTE: INM. Generado a partir de isolíneas de radiación solar global anual sobre superficie horizontal.

ZONA CLIMÁTICA	I	II	III	IV	V
IRRADIACIÓN MEDIA DIARIA (kWh/m²)	< 3,8	3,8 - 4,2	4,2 - 4,6	4,6 - 5,0	> 5,0

Figura 141 Radiación media diaria en España según zonas climáticas (Fuente: PER 2005-2010).

A partir de los datos de radiación solar en el plano horizontal, se obtienen los valores de radiación sobre una superficie inclinada, para diferentes ángulos de inclinación. En las tablas obtenidas por la AVEN (pueden consultarse en www.aven.es) se concluye que la radiación interceptada tiene un máximo anual para un ángulo de inclinación de 35º, mientras que para los meses más fríos este máximo se obtiene para inclinaciones de 55º. Estos valores se utilizarán como referencia para el diseño de sistemas de captación solar, ya que en determinadas tipologías deberá ser considerada la estacionalidad de la demanda energética.

11.2.2 Tipos de instalaciones de energía solar

La implantación de instalaciones de energía solar obedece a motivaciones no solo económicas, por cuanto reportan un ahorro económico debido al ahorro de combustible, sino también a una motivación medioambiental, por cuanto permiten la sustitución de combustibles fósiles, causantes del efecto invernadero por sus emisiones de dióxido de carbono.

Existen dos sistemas de aprovechamiento solar claramente diferenciados con tecnologías muy divergentes, cuya aplicación práctica está también muy definida:

- **Solar Térmica**. Su finalidad es la captación de la energía solar para el aprovechamiento térmico.
- **Solar Fotovoltaica**. Su finalidad la captación de la energía solar para la generación de energía eléctrica.

Figura 142 Valores medios anuales de radiación solar en la Comunitat Valenciana (cal/m² y día) (Fuente: AVEN).

11.2.3 Instalaciones de energía solar térmica

11.2.3.1 Energía solar térmica mediante captadores solares

Una de las formas más extendidas de aprovechamiento de la energía solar consiste en la producción de agua caliente utilizando captadores solares, y más concretamente la producción de agua caliente a baja temperatura, como el agua caliente sanitaria (ACS) o agua caliente para procesos industriales.

Las instalaciones de captación solar para calentamiento de agua se caracterizan por emplear, como elemento receptor de energía, el colector o panel solar plano, y requieren el acoplamiento de tres subsistemas principales:

- **Subsistema colector**. Su finalidad es la captación de la energía solar.
- **Subsistema de almacenamiento**: Su función es adaptar en el tiempo la disponibilidad de energía y la demanda, acumulándola cuando está disponible, para poderla ofrecer en cualquier momento en que se solicite.
- **Subsistema de distribución o consumo**: Su objetivo es trasladar a los puntos de consumo el agua caliente producida.

En la figura 143 se observa un diagrama simplificado para generación de agua caliente mediante energía solar. Nótese que siempre deberá existir un sistema de aporte auxiliar para garantizar el servicio durante los periodos de menor radiación. El sistema auxiliar suele implementarse a través de una caldera de apoyo, ya se encuentre instalada en línea o bien atacando a un depósito acumulador secundario.

Las instalaciones solares térmicas de baja temperatura han sido empleadas tradicionalmente para la producción de agua caliente sanitaria para uso humano, mediante configuraciones individuales o colectivas en función del tamaño de la instalación. En los últimos años han aparecido nuevos usos que se están incorporando rápidamente al mercado, como por ejemplo el empleo para aplicaciones de calefacción, climatización de piscinas o incluso generación de agua caliente para procesos industriales.

En la Comunitat Valenciana existen múltiples y muy variados ejemplos de instalaciones de energía solar para procesos industriales o semi-industriales, entre los que se citan: lavaderos de vehículos (figura 144), mataderos (figura 145), procesos de limpieza de ropa, etc.

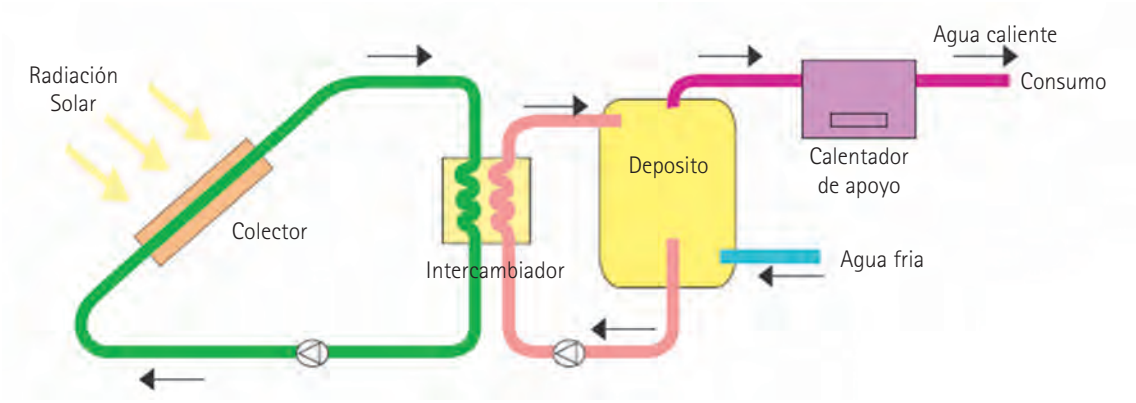


Figura 143 Esquema simplificado de instalaciones de ACS por energía solar.

En el momento de realizar un análisis para la viabilidad de un sistema de aprovechamiento de la energía solar, los factores más determinantes para la rentabilidad del proyecto son los siguientes:

- **Precio del combustible**. A mayor precio del combustible utilizado para la producción de agua caliente, mayor el ahorro económico que se obtiene con la instalación solar y menor es el periodo de retorno de la inversión.
- **Nivel de consumo de agua caliente.** Este parámetro es el que va a determinar el tamaño de la instalación. Cuanto mayor sea la instalación, los costes unitarios de inversión son menores y mayor es la rentabilidad del proyecto.
- **Ayudas públicas**. Puesto que estas instalaciones pueden conllevar desembolsos elevados, resulta conveniente optar a ayudas a fondo perdido o financiación en condiciones favorables que disminuyan el periodo de retorno de la inversión.

Figura 144 Instalación solar térmica para agua caliente de proceso de Aspe – Alicante (Promotor: Lavaderos automáticos Lavalle, S.L.U. – Empresa instaladora: Alanca Solar, S.L.).

Figura 145 Instalación solar térmica para agua caliente de proceso de Orihuela – Alicante (Promotor: Matadero de Orihuela S.A. – Empresa instaladora: Eurener, S.L.).

La principal barrera que existe para el desarrollo de esta tecnología de forma generalizada en el sector cerámico es que podría aplicarse de forma limitada al proceso, debido principalmente a los reducidos niveles de temperatura que se pueden lograr.

11.2.3.2 Energía solar térmica mediante concentradores

El aprovechamiento térmico de la energía solar puede llevarse a cabo mediante la utilización de una tecnología diferente a la expuesta hasta el momento. Se trata de la aplicación de la energía solar térmica mediante el uso de sistemas concentradores.

En la actualidad existen estudios en los que se ha probado la viabilidad de la utilización de esta tecnología en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, para el secado de soportes cerámicos, cocción de baldosas mediante monococción, cocción de piezas de tercer fuego y fusión de fritas.

El principal proyecto de investigación en esta línea está enmarcado en el Plan Nacional de I+D del Ministerio de Ciencia y Tecnología, y cuenta con la participación del Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) de Castellón, el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales de la Universidad de Sevilla, y el departamento de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cataluña. El proyecto se está desarrollando en la Plataforma Solar de Almería (PSA), que pertenece al Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), y es el mayor centro de investigación, desarrollo y ensayos de Europa dedicado a las tecnologías solares de concentración.

La Plataforma Solar de Almería cuenta en sus instalaciones con un horno solar donde se están llevando a cabo los ensayos de investigación en esta materia (ver figura 146). Los hornos solares constan esencialmente de uno o varios espejos captadores planos (llamados helióstatos), que realizan un seguimiento solar continuo, un espejo parabólico concentrador, un atenuador y la zona de ensayos situada en el foco concentrador.

El helióstato refleja los rayos solares paralelos y horizontales sobre el disco parabólico, el cual los vuelve a reflejar concentrándolos en su foco (área de ensayos). La cantidad de luz incidente se regula mediante el atenuador situado entre el concentrador y el helióstato. Bajo el foco se encuentra la mesa de ensayos donde se posicionan las probetas con gran exactitud en el foco.

En las aplicaciones a baja temperatura, se están realizando ensayos de secado de materiales cerámicos, para lo que ha sido necesario diseñar un secadero solar, capaz de trabajar a unas temperaturas que oscilan entre 200 y 300 ºC. El prototipo desarrollado permite reproducir el ciclo de secado industrial, eliminar la humedad presente en las piezas (que presentan una humedad inicial alrededor de 6 – 7 %) y obtener piezas sin defectos.

En cuanto a las aplicaciones a alta temperatura, se han diseñado captadores para cocer baldosas cerámicas (a temperaturas entre 1.100 y 1.200 ºC) y fundir fritas cerámicas (a temperaturas entre 1.400 y 1.600 ºC). El horno diseñado permite alcanzar una temperatura de cocción de 1.100 ºC, con una velocidad de calentamiento controlada. Existen líneas abiertas de investigación encaminadas al

Figura 146 Horno solar de la Plataforma Solar de Almería, donde puede observarse el helióstato y el atenuador.

perfeccionamiento de los prototipos de hornos solares de modo que sea posible alcanzar temperaturas del orden de los 1.200 ºC, que permitan realizar la cocción de baldosas cerámicas utilizando únicamente energía solar térmica.

La utilización de energía solar térmica concentrada permite alcanzar temperaturas de 1.600 ºC, necesarias para realizar la fusión de fritas cerámicas. Los estudios realizados en esta materia permitieron obtener fritas con propiedades muy similares a las de las fritas producidas por métodos tradicionales.

Esta tecnología se halla en fase de desarrollo inicial, pues todas las aplicaciones estudiadas se han desarrollado a pequeña escala. Actualmente, siguen abiertas las líneas de investigación para aplicar la energía solar térmica en el procesado de materiales cerámicos.

11.2.4 Instalaciones de energía solar fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica es un sistema de generación de energía que transforma directamente la radiación solar en electricidad. Se caracteriza por su simplicidad, larga duración, bajo mantenimiento y alta fiabilidad.

La energía solar fotovoltaica esta basada en la aplicación del denominado efecto fotovoltaico, que se produce al incidir la luz sobre unos materiales denominados semiconductores, de tal modo que se genera un flujo de electrones en el interior del material y, en condiciones adecuadas, una diferencia de potencial que puede ser aprovechada para producir energía eléctrica.

Hasta hace pocos años, la energía solar fotovoltaica tan solo tenía aplicación en instalaciones aisladas alejadas de la red eléctrica convencional, cuya aplicación en el sector industrial es prácticamente nula. Sin embargo, recientemente se ha planteado una nueva vertiente de explotación a través de instalaciones conectadas a red, muy bien acogidas por el sector empresarial.

En este caso, la instalación se conecta en paralelo a la red eléctrica, inyectando toda la energía producida a la red del distribuidor de zona. La relación entre el productor de energía eléctrica y la compañía distribuidora está regulada por la legislación, tanto a nivel técnico como a nivel económico.

Este tipo de sistemas presenta un evidente interés medioambiental, habida cuenta que las emisiones gaseosas a la atmósfera en su fase de explotación son nulas, lo que supone una inestimable aportación para el cumplimiento de los compromisos adquiridos tras la ratificación del Protocolo de Kioto.

Figura 147 Instalación fotovoltaica sobre cubierta de nave industrial en Valencia (Promotor: Porvasal, S.A. – Empresa instaladora: Energía Solar Aplicada, S.L.)

Otra de las ventajas asociadas a la instalación de paneles solares sobre cubiertas de naves industriales consiste en la mejora del aislamiento térmico y por consiguiente la disminución de la temperatura ambiente en el interior de la nave.

Finalmente, la utilización de un recurso autóctono y renovable, como la energía solar, hace que estas instalaciones ayuden a disminuir la dependencia energética exterior y que aumente la concienciación social respecto al uso racional de la energía, despertando hábitos de consumo más respetuosos con el medio ambiente.

Figura 148 Instalación fotovoltaica sobre cubierta de nave industrial en Valencia (Promotor: FAINCO, S.A. – Empresa instaladora: Energía Solar Aplicada, S.L.).

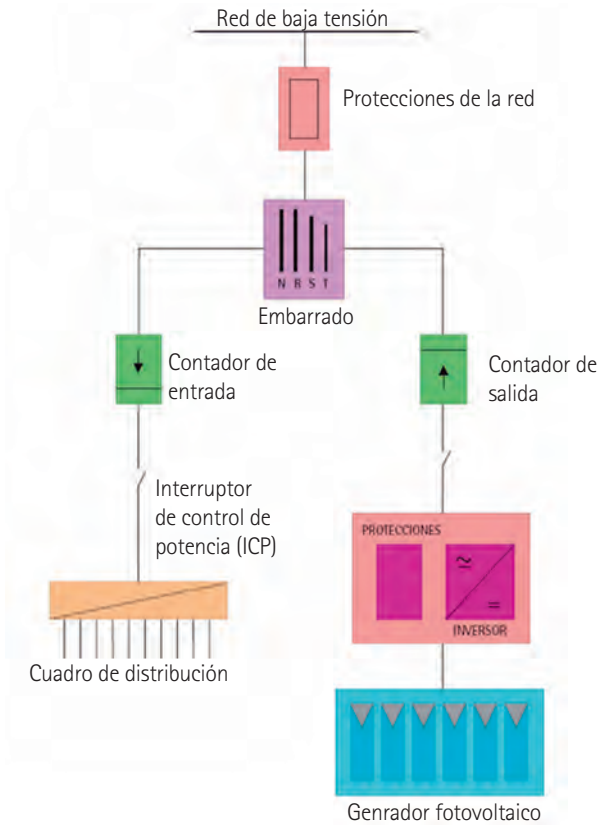


Figura 149 Esquema simplificado de una instalación solar fotovoltaica conectada a la red.

Según se muestra en la figura 149, los elementos que componen la instalación son:

- **Campo solar fotovoltaico.** Consiste en un conjunto de módulos (paneles) formados por células de silicio, los cuales convierten la radiación solar en energía eléctrica. Se encuentran conectados en serie-paralelo para conseguir los adecuados niveles de tensión e intensidad.
- **Inversor.** Este elemento transforma la corriente continua (CC) producida por los paneles en corriente alterna (CA) de las mismas características que la de la red eléctrica (véase figura 150).

Figura 150 Inversor trifásico de 100 kW para instalación fotovoltaica conectada a red (Fuente: Xantex).

- **Protecciones**. Estos cuadros contienen alarmas, interruptores y otros dispositivos al objeto de proteger los diferentes elementos de la instalación, tanto en la parte de corriente continua como en la de corriente alterna.
- **Contadores**. El contador de salida mide la energía producida y enviada a la red, para que pueda ser facturada a la compañía eléctrica. El suministro de electricidad al edificio se realiza desde la red, con su propio contador de entrada, siendo una instalación totalmente independiente de la fotovoltaica.

En lo referente a las inversiones a realizar, normalmente están limitadas por dos factores: el espacio disponible para ubicar la instalación y el capital disponible. Por regla general, el espacio no suele ser un impedimento, puesto que las empresas suelen disponer de una gran superficie en las cubiertas de las naves de producción o sobre edificios anexos para uso auxiliar. En cuanto al capital necesario, se debe señalar que las instalaciones fotovoltaicas tienen un alto coste, debido sobre todo al elevado precio de las células semiconductoras. En cualquier caso, las interesantes condiciones de venta, la facilidad de financiación y el bajo riesgo de la inversión hacen que la rentabilidad de las instalaciones sea más que aceptable, según se muestra en el caso práctico nº 19.

CASO PRÁCTICO Nº 19:
Instalaciones de energía solar fotovoltaica sobre cubierta de 100 y 1000 kW conectada a red

A continuación se llevará a cabo un estudio básico de rentabilidad de dos instalaciones de energía solar fotovoltaica conectada a red, de 100 y 1.000 kW de potencia nominal respectivamente.

	Instalación 1	Instalación 2
Datos de la instalación		
Ubicación	*Castellón*	*Castellón*
Potencia nominal (de inversor)	*100 kW*	*1 MW*
Superficie de paneles	*900 m²*	*8250 m²*
Ángulo de inclinación	*30 – 35º*	*30º*
Rendimiento inversor	*95 %*	*92 – 95%*
Pérdidas conexionado	*8 %*	*8 %*
Balance energético anual		
Producción eléctrica CC	*205.969 kWh/año*	*1.812.538 kWh/año*
Producción eléctrica CA	*175.074 kWh/año*	*1.540.658 kWh/año*
Estudio económico		
Precio de venta electricidad	*0,32€/kWh*	*0,32€/kWh*
Ingresos brutos	*56.024€/año*	*493.011€/año*
Mantenimiento, gestión, seguridad	*3.861€/año*	*29.581€/año*
Ingresos netos	*52.125€/año*	*458.697€/año*
Inversión	*448.354€*	*3.814.648€*
Fondos propios (20%)	*89.671€*	*762.930€*
Financiación bancaria (80%)	*358.683€*	*3.051.719€*
Bonificación fiscal	*2 %*	*2 %*
Periodo de retorno simple	*8,6 años*	*8,3 años*

Tabla 54 Estudio de rentabilidad de dos instalaciones de energía solar.

11.3 Empleo de microondas en el procesado de baldosas cerámicas

Las microondas son ondas electromagnéticas con un rango de frecuencias que va desde los 0,3 GHz a los 300 GHz, y longitudes de onda desde 1 mm a 1m.

Las microondas se utilizan principalmente para la difusión de televisión, radares para facilitar la navegación aérea y marítima, y las telecomunicaciones, incluyendo la telefonía móvil. El uso más conocido es el de los hornos microondas para calentar alimentos, aunque las microondas también se utilizan en medicina, para el tratamiento por diatermia, y en la industria para procesar materiales.

Al hacer incidir este tipo de ondas sobre un material que contenga agua en su estructura, las moléculas polares de agua reaccionan rotando sobre su eje. Esto hace que las moléculas se rocen entre ellas, convirtiendo la energía electromagnética en energía térmica.

11.3.1 Secado de baldosas cerámicas

El secado de baldosas cerámicas se lleva a cabo convencionalmente en secaderos en los que una corriente de aire es calentada mediante quemadores de gas natural. Esta energía térmica se transmite por convección a la superficie de la pieza, y debe penetrar hacia el interior, por conducción, para conseguir una distribución de temperaturas uniforme. La velocidad de secado es directamente proporcional a la conductividad térmica del material. La humedad de las piezas a la salida de las prensas suele ser del 5-7 %, y tras el secado éstas presentan una humedad próxima al 0,5 %.

El secado convencional de baldosas cerámicas presenta limitaciones en cuanto a la velocidad de secado. Si las baldosas se calientan demasiado rápido, pueden producirse gradientes de temperatura que darían lugar a tensiones y roturas. Por este motivo, el secado de baldosas en secaderos horizontales o verticales debe producirse de manera gradual, con ciclos de secado de unos 30 minutos en los secaderos horizontales y de hasta una hora en los secaderos verticales.

En el secado por microondas, las ondas electromagnéticas calientan rápidamente el sólido hasta una temperatura ligeramente superior a la temperatura del aire en el interior del secadero. Esto hace que el agua se mueva desde el interior del sólido hasta la superficie del mismo. Una vez en la superficie se evapora de forma convencional.

La utilización de microondas en el secado de baldosas cerámicas permite aumentar la velocidad de secado de las piezas y disminuir los defectos producidos en el secado, por la suavidad con que éste se produce. Además, el secado por microondas requiere un 36 % de energía menos que el secado convencional utilizando gases calientes. (Earl, D.A. et al., 1995).

El proceso de secado por microondas es un proceso muy efectivo para contenidos en humedad mayores del 5 %. Sin embargo, no es efectivo para obtener valores inferiores de humedad final. (Suhm, J., 2000).

Existe una nueva técnica de secado que permite combinar las características del secado convencional con gases calientes y el secado con microondas para conseguir un secado más rápido, efectivo y con menor consumo energético. Se trata de un único equipo dotado con un sistema generador de microondas y con quemadores de gas natural. Con este sistema se consigue aumentar la velocidad de secado minimizando los defectos en las piezas, y se logra alcanzar la humedad final requerida, gracias a la transmisión de calor por radiación y convección (Hajduk, A., 2003).

11.3.2 Cocción de baldosas cerámicas

La cocción de baldosas cerámicas suele realizarse en hornos continuos con quemadores de gas natural, en los que la transmisión de calor se realiza por radiación y convección.

La cocción de materiales cerámicos mediante microondas presenta numerosas ventajas con respecto a la cocción tradicional de materiales cerámicos (Cherian, K., 2008):

- Elevada eficiencia energética, debido a que el calor es aplicado directamente al material cerámico, y no se disipa en el material aislante del horno ni en la atmósfera.
- Reducción del tiempo de cocción, alcanzando reducciones del 90 % para algunos productos cerámicos.
- Reducción del consumo energético, hasta valores del 80 % en comparación con procesos tradicionales para algunos productos cerámicos.
- Disminución de las emisiones atmosféricas contaminantes.
- La sinterización de los materiales cerámicos mediante microondas permite mantener o incluso mejorar la calidad del producto final.
- Disminución de los costes de producción.

En la actualidad es posible realizar la cocción de algunos materiales cerámicos mediante microondas en hornos discontinuos. Esta técnica ha sido aplicada principalmente a cerámicas avanzadas, y está siendo perfeccionada para aplicaciones a productos de cerámica tradicional.

Sin embargo, la cocción mediante microondas presenta una serie de inconvenientes que limitan su aplicación a escala industrial (Roper, J., 2006). La principal desventaja está relacionada con la aparición de gradientes de temperatura en el seno de las piezas cerámicas. Al hacer incidir las microondas sobre los materiales cerámicos, éstas calientan los sólidos hasta una temperatura superior a la del aire que rodea las piezas, lo cual provoca gradientes de temperatura en el sentido contrario a los provocados cuando el calor se aplica mediante convección o radiación. Este factor limitante puede ser particularmente significativo en la cocción de cerámicas avanzadas que requieran una elevada homogeneidad en su estructura interna. Otro factor a tener en cuenta es el hecho de que algunos materiales no son capaces de calentarse mediante microondas partiendo de temperatura ambiente, sólo son susceptibles de hacerlo una vez han alcanzado una cierta temperatura, o mediante la adición de diferentes aditivos que facilitan la absorción de la radiación microondas.

Estas limitaciones pueden solucionarse mediante la utilización de una técnica híbrida que combina la cocción mediante microondas y mediante convección o radiación (Shulman, H.S., 2008). Esta tecnología permite aplicar las ventajas de las microondas a la cocción de productos cerámicos, incluyendo cerámicas avanzadas, ladrillos, sanitarios, cerámica de mesa, baldosas, abrasivos, pigmentos y refractarios. Existen en el mercado hornos a escala de industrial para la cocción de estos materiales, en los que el aporte de calor mediante quemadores de gas natural o mediante radiación se complementa con la aplicación de microondas. El tiempo de cocción y el consumo energético en el proceso de algunos materiales cerámicos mediante esta técnica puede reducirse hasta un 50 %.

Aunque el uso de esta tecnología no está ampliamente extendido en la actualidad, existen numerosas líneas de investigación abiertas acerca de la utilización de microondas en el sector cerámico.

11.4 Empleo de hidrógeno como vector energético en el sector cerámico

El hidrógeno es el tercer elemento más abundante en la Tierra. Las características del hidrógeno hacen que éste pueda ser utilizado potencialmente:

- Como combustible en los procesos donde en la actualidad se utiliza gas natural u otros combustibles fósiles.
- Como generador de energía eléctrica mediante el uso de pilas de combustible.

Sin embargo, el hidrógeno apenas se encuentra en la naturaleza en forma de molécula diatómica, sino que aparece como elemento químicamente combinado formando el agua, la materia orgánica, el gas natural, el petróleo y el carbón. Por ello, es necesario someter una de las materias primas anteriores a un proceso intermedio para la obtención de hidrógeno.

Existen numerosas posibilidades para la obtención de hidrógeno, dependiendo de la fuente a partir de la cual se quiera obtener: combustibles fósiles, energía nuclear o agua. El proceso más interesante desde el punto de vista medioambiental es la obtención de hidrógeno mediante electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovables.

Con este método se consigue obtener hidrógeno en estado puro a partir de agua, mediante la utilización de energía eléctrica. (Ver figura 151).

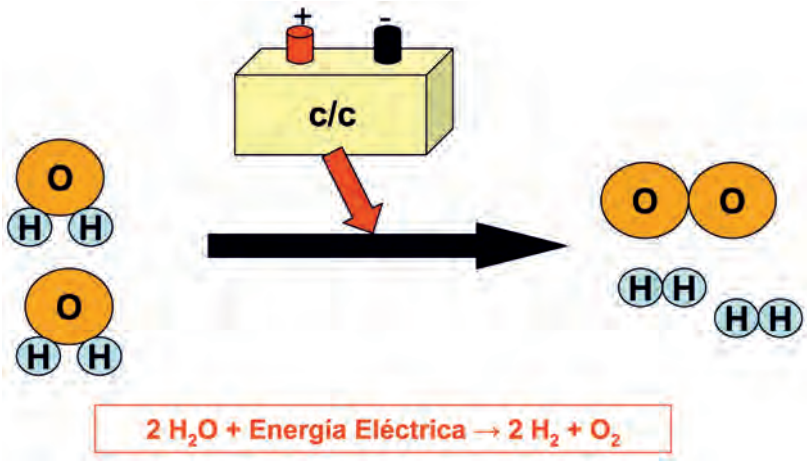


Figura 151 Obtención de hidrógeno mediante hidrólisis.

El proceso de obtención de hidrógeno mediante hidrólisis del agua consiste en hacer circular corriente continua en una celda electrolítica a través de electrodos metálicos separados por una membrana porosa o por un electrolito conductor ionizado. (Ver figura 152).

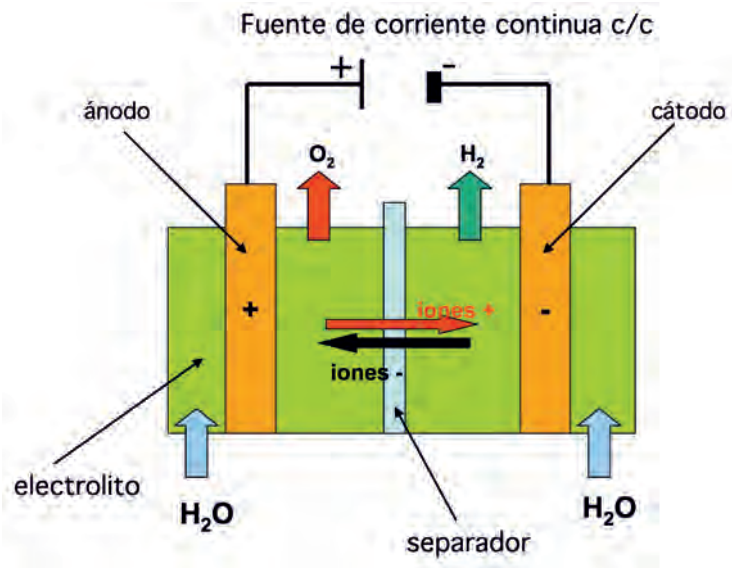


Figura 152 Celda electrolítica para la producción de hidrógeno.

La descomposición del agua por medio de la electrólisis tiene lugar en dos reacciones parciales de ambos electrodos. En el electrodo negativo (cátodo) se produce hidrógeno y en el electrodo positivo (ánodo) se genera oxígeno. El intercambio necesario de carga se produce por medio de la conducción iónica. Para permitir la producción de ambos gases de forma separada, los dos compartimientos reactivos se separan por un separador de iones o diafragma. La energía para la ruptura del agua es provista por la electricidad.

Las ventajas de la obtención de hidrógeno mediante hidrólisis del agua frente a otros métodos de obtención de hidrógeno, son:

- Es un método totalmente limpio, no genera residuos; especialmente si la energía eléctrica necesaria proviene de fuentes renovables.
- Permite obtener hidrógeno y oxígeno en estado puro, que puede comercializarse o emplearse en múltiples usos, por ejemplo, en los hornos de fusión de fritas.

Sin embargo, el coste de la obtención de hidrógeno mediante electrólisis del agua es mayor que el de la generación de hidrógeno mediante reformado de gas natural con vapor (steam reforming).

11.4.1 Empleo de hidrógeno como combustible

El hidrógeno podría utilizarse en el sector cerámico en aquellos procesos donde en la actualidad se utiliza gas natural, aunque es necesario prestar especial atención a las diferentes características de ambos combustibles.

El poder calorífico inferior del hidrógeno es unas tres veces menor que el del gas natural por unidad de volumen, por lo tanto, se requeriría un volumen tres veces mayor de hidrógeno para producir la misma energía.

El hidrógeno presenta una mayor fugacidad y volatilidad que el gas natural, por lo que requiere especiales medidas de seguridad en espacios cerrados (sistemas de detección de llama, etc.).

La combustión de hidrógeno presenta una ventaja muy importante con respecto a la combustión de combustibles fósiles, no presenta emisiones de CO_2, como puede observarse en las siguientes reacciones de combustión:

- gas natural: $CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O$
- hidrógeno: $H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$

El único producto de la reacción de combustión del hidrógeno es el vapor de agua. El volumen de vapor de agua producido en la combustión de hidrógeno para obtener la misma cantidad de energía es mayor que el producido en la combustión de gas natural. Este aumento en la concentración de vapor de agua no afectaría a la etapa de secado por atomización, sin embargo, es difícil predecir a priori los efectos que produciría el aumento de la cantidad de agua en la atmósfera del horno y del secadero de piezas.

El hidrógeno podría utilizarse en la fabricación de baldosas cerámicas en los procesos en los que se utiliza combustibles fósiles (principalmente gas natural), estos son principalmente: secado de materias primas mediante atomización, secado de piezas crudas tras el prensado y cocción de baldosas. La sustitución de estos combustibles fósiles por hidrógeno implicaría la adaptación y/o sustitución de los quemadores o equipos actuales, dadas las especiales características del hidrógeno.

Otro factor a tener en cuenta en el uso de hidrógeno en la combustión, son las diferentes características de la llama de hidrógeno frente a la producida en la combustión de gas natural.

Al quemar gas natural en un quemador jet de mezcla en cabeza, como los utilizados en los hornos de rodillos, se obtiene una llama ancha de color azul con una pequeña llama amarilla en el centro. Se trata de llamas turbulentas con una amplia zona de recirculación donde los productos calientes se propagan en contracorriente con el flujo de gas natural, produciendo un mezclado rápido y aumentando la estabilidad de la llama.

Si se sustituye un porcentaje de gas natural por hidrógeno, manteniendo constante el caudal volumétrico total, se observa que la llama azul se hace más estable pero más corta. En el centro de la llama aparece una llama amarilla que aumenta de tamaño al aumentar el porcentaje de hidrógeno, alcanzando su máxima longitud para proporciones de hidrógeno entre el 50 y 60 %. Esta llama de color amarillo indica que en la combustión se está produciendo hollín. En presencia de hidrógeno la zona de reacción disminuye en tamaño, esto hace que la oxidación del gas natural no pueda producirse completamente, dando lugar a la formación de hollín.

La introducción de hidrógeno mejora la combustión del gas natural cerca de la cabeza del quemador, siendo aquí donde se produce la reacción más intensamente. Además, debido a que el rango de inflamabilidad del hidrógeno es muy ancho y la velocidad de la llama es mayor, las llamas son más estables.

Otra consecuencia de la introducción de hidrógeno en los quemadores junto con gas natural es el aumento de las emisiones de CO y NO_x. La emisión de CO aumenta progresivamente al aumentar el porcentaje de hidrógeno, alcanzando el máximo para un porcentaje de hidrógeno del 80 %. Esto se debe a que la oxidación del CO se ve dificultada por la reducción del tamaño de la zona de reacción, y por tanto, la reducción del tiempo de residencia. Del mismo modo se observa un aumento en las emisiones de NO_x. Aunque la temperatura a lo largo del eje del quemador disminuye con la introducción de hidrógeno, la temperatura principal de la llama aumenta, lo que da lugar a la formación de moléculas de NO_x (Cozzi, F. et al., 2006).

Las llamas resultantes de la combustión de hidrógeno 100 % son bastante débiles y prácticamente invisibles; únicamente se observa una tonalidad rojo pálido debido a las impurezas del aire y a la formación de agua como subproducto de la combustión.

En resumen, la adición de una proporción de hidrógeno al caudal volumétrico de gas natural (hasta 80 % en volumen):

- reduce la potencia térmica (el PCI del hidrógeno es menor que el del gas natural)
- aumenta la estabilidad y la velocidad de la llama
- aumenta las emisiones de CO, NO_x y hollín

11.4.2 Empleo de hidrógeno como generador de energía eléctrica

Además de la utilización de hidrógeno en procesos de combustión, el hidrógeno puede utilizarse para generar energía eléctrica mediante el uso de pilas de hidrógeno. Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos capaces de suministrar de forma continua energía eléctrica mientras se le suministre un combustible (hidrógeno, gas natural, metanol, etc.) y oxígeno (generalmente del aire). La reacción química que se produce es altamente exotérmica, por lo que además de producirse energía eléctrica, las pilas de combustible desprenden calor.

En la figura 153 se observa el esquema de funcionamiento de una pila de combustible que funciona con hidrógeno, y las reacciones químicas que en ella se producen.

	ánodo	cátodo
medio ácido	H_2O 2 $H^+ + 2e^-$	$^1/_2O_2 + 2H^- + 2e^-$ 0 $2H_2O$
medio básico	$H_2 + 2OH^-$ 0 $2H_2 + 2e^-$	$^1/_2O_2 + H^2O + 2e^-$ 0 $2OH^-$

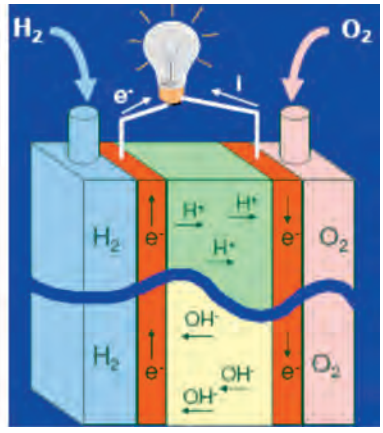


Figura 153 Esquema de funcionamiento de una pila de hidrógeno.

El uso de pilas de combustible presenta la principal ventaja frente a otros sistemas generadores de energía eléctrica, de la emisión cero de productos contaminantes.

La energía eléctrica generada en las pilas de combustible podría utilizarse para satisfacer la demanda eléctrica de la planta de fabricación de baldosas cerámicas, o en el funcionamiento de vehículos y carretillas elevadoras.

Es importante señalar que el hidrógeno no es una fuente directa de energía sino un vector de almacenamiento de energía. La utilización de hidrógeno es especialmente interesante si la energía eléctrica requerida para la obtención de hidrógeno proviene de fuentes renovables, y si la materia prima para la obtención de éste es el agua.

De este modo se conseguiría disponer de la energía eléctrica y térmica necesaria para el proceso de fabricación de baldosas cerámicas haciendo uso únicamente de energías renovables y sin emisión de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, la producción de hidrógeno a gran escala todavía no se ha desarrollado hasta el punto de conseguir precios competitivos. Se trata de una tecnología en potencia con un futuro prometedor dadas sus importantes ventajas (alta eficiencia, posibilidades tecnológicas y bajas emisiones contaminantes) pero que todavía no se ha desarrollado lo necesario para su aplicación industrial.

12.

Anexos

12 Anexos

12.1 Anexo 1: Glosario de términos técnicos

- **Aire parásito**: Aire ambiente que penetra de forma incontrolada en un horno por puntos de su estructura donde el cierre no es hermético.
- **Balasto**: Dispositivo empleado para limitar la corriente que atraviesa una lámpara de descarga, evitando su crecimiento hasta valores excesivos que podrían destruirla.
- **Barbotina**: En el argot cerámico se denomina barbotina a las suspensiones de arcillas o esmaltes y otros componentes en agua, resultado de la molienda de las materias primas cerámicas en molinos de bolas.
- **Bizcocho**: Baldosa cocida desprovista de esmalte.
- **Comburente**: Mezcla de gases en el cual el oxígeno está en proporción suficiente para que se produzca la combustión.
- **Combustible**: Sustancia utilizada para obtener calor. Según su estado físico se clasifican en sólidos, líquidos o gaseosos.
- **Combustió**n: Conjunto de reacciones químicas por las cuales se realiza la oxidación de un combustible. Se acompaña de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.
- **Consumo específico**: Energía consumida en la elaboración de un producto o una cantidad determinada de un producto. Se expresa habitualmente en kcal/kg o kWh/kg.
- **Contracción**: Reducción de las dimensiones o retraimiento que sufre un objeto cerámico durante los procesos de secado y cocción.
- **Deformación piroplástica:** Deformación permanente o irreversible de un sólido a temperatura elevada.
- **Densidad aparente**: Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo poroso. Su unidad en el Sistema Internacional de unidades es el kilogramo por metro cúbico (kg/m^3).
- **Desfloculante:** Sustancia que dispersa los aglomerados de partículas de una barbotina para formar una suspensión más fluida.
- **Emisión específica de un contaminante**: Relación entre la cantidad liberada de contaminantes durante la combustión de un combustible y la energía aportada por éste.
- **Frita**: Material vítreo que resulta de un proceso de fundido de una mezcla de materias primas a alta temperatura en un horno de fusión. Las fritas se utilizan como materia prima para la preparación de esmaltes.
- **GLP (Gases licuados del petróleo):** Gases combustibles obtenidos a partir de la destilación fraccionada del petróleo que pueden licuarse por presión a temperatura ambiente.

- **Motores de gas**: Máquina que produce energía mecánica a partir de la combustión de una mezcla de aire y gas combustible. La energía mecánica se transforma en energía eléctrica mediante un alternador, y los gases de escape se utilizan como gases de secado en procesos industriales.
- **Plasticidad**: Capacidad de un material para ser deformado sin ruptura por la acción de una fuerza y de retener, posteriormente, la deformación alcanzada cuando esta fuerza es eliminada.
- **Quemador**: Dispositivo utilizado para realizar la combustión entre un combustible y un comburente de forma controlada.
- **Reacción estequiométrica:** Una reacción química se produce de forma estequiométrica cuando los componentes que forman parte de la reacción aparecen en las proporciones necesarias para que no exista defecto o exceso de ningún componente (si la reacción se desarrolla completamente).
- **Refractario:** Producto cuya composición está concebida principalmente para resistir altas temperaturas.
- **Soplante o ventilador**: Máquina impulsora de grandes cantidades de aire o gas a una presión determinada. Pueden ser axiales o radiales (centrífugas).
- **Temperatura de rocío o punto de rocío**: Temperatura a la que empieza a condensar el vapor de agua o de otro compuesto contenido en aire o en una corriente gaseosa.
- **Tixotropía**: Propiedad de algunos fluidos que muestran una variación de su viscosidad con el tiempo.
- **Turbina de gas**: Máquina térmica compuesta por un compresor, donde se comprime el aire comburente, una cámara de combustión, donde se produce la combustión de la mezcla aire/gas natural, y una turbina de expansión de gases, donde se obtiene la energía mecánica, que será transformada en energía eléctrica mediante un alternador. Los gases de escape se utilizan como gases de secado en procesos industriales.
- **Vagoneta:** Estructura móvil en la que se colocan las piezas cerámicas para pasarlas por el secadero o introducirlas en un horno.
- **Variador de velocidad (o de frecuencia):** Dispositivo electrónico que regula la frecuencia y tensión de la corriente eléctrica aplicada a un motor, logrando modificar su velocidad.

12.2 Anexo 2: Expresiones utilizadas en el cálculo de entalpías

12.2.1 Energía térmica

Entalpía de una corriente gaseosa

$$\Delta H_g = \left(Q^0_{Vg} \cdot \rho_a \cdot C_{pa}\right) \cdot \left(T_g - T_0\right)$$

ΔH_g: entalpía de los gases calientes (W).

Q^0_{Vg}: caudal volumétrico de gases calientes (/s).

ρ_a: densidad de los gases (aire, 1,285 kg/).

c_{pa}: capacidad calorífica de los gases (aire, 1.000 J/kgK).

T_g: temperatura de los gases (K).

T_0: temperatura de referencia (273 K)

Entalpía de una suspensión cerámica (barbotina)

$$\Delta H_b = (m_b \cdot C_{pS} \cdot w_S) \cdot (T_b - T_0) + (m_b \cdot C_{pw} \cdot (1 - w_S)) \cdot (T_b - T_0)$$

ΔH_b: entalpía de la barbotina (W).

m_b: caudal másico de barbotina (kg barb/s).

C_{pS}: capacidad calorífica del sólido seco crudo (soporte, 752 J/kg K).

w_S: contenido en sólidos de la barbotina (kg ss/kg barb).

T_b: temperatura de la barbotina (K).

C_{pw}: capacidad calorífica del agua (4.182 J/kg K).

Entalpía de un sólido húmedo

$$\Delta H_s = (m_S \cdot C_{pS}) \cdot (T_s - T_0) + (m_S \cdot C_{pw} \cdot X_P) \cdot (T_s - T_0)$$

ΔH_s: entalpía del sólido húmedo (W).

m_S: caudal másico de sólidos (kg ss/s).

X_P: humedad del sólido (kg agua/kg ss).

T_s: temperatura del sólido húmedo (K).

Entalpía de combustión del gas natural

$$\Delta H_{gc} = Q^0_{Vg} \cdot \Delta h_c$$

ΔH_{gc}: entalpía de combustión (W).

Q^0_{Vg}: caudal de combustible consumido en el quemador (m^3_N/s). Se calcula con la siguiente expresión:

$$Q^0_{Vg} = Q_{Vg} \cdot \frac{T_N}{T_g} \cdot \frac{P_{abs}}{P_N}$$

Q_{Vg}: caudal de gas natural (m^3/s).

T_g: temperatura del gas natural en la conducción (K).

P_{abs}: presión absoluta en la conducción del gas natural (presión manométrica + presión atmosférica).

Δh_c: entalpía de la reacción química de combustión del gas natural (Poder Calorífico Inferior, 39.116.440 J/ m^3_N).

Pérdidas de calor desde un cuerpo caliente hacia el ambiente

$$\Delta H_p = q_{conv} \cdot A_{conv} + q_{rad} \cdot A_{rad}$$

ΔH_p: pérdidas de energía del cuerpo caliente (W).

q_{conv} : densidad de flujo de calor por convección (W/m^2).

A_{conv}: área a través de la cual se pierde calor por convección (m^2).

q_{rad} : densidad de flujo de calor por radiación (W/m^2).

A_{rad}: área a través de la cual se pierde calor por radiación (m^2).

$$q_{conv} = c_c \cdot (T - T_{amb})^{1.25}$$

c_C: coeficiente de transmisión de calor por convección.

Depende de la orientación de la superficie a través de la cual se produce la pérdida de calor:

Pared vertical, c_C = 1,85 J/(m^{2}sK$^{1.25}$)

Bóveda, c_C = 2,50 J/(m^{2}sK$^{1.25}$)

Solera, c_C = 1,31 J/(m^{2}sK$^{1.25}$)

T: temperatura de la superficie (K).

T_{amb} : temperatura ambiente (K).

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot c_R \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb}}{100} \right)^4 \right]$$

ε: emisividad de la superficie caliente.

c_R: coeficiente de transmisión de calor por radiación (5,67 J/(m^{2}sK^4)).

12.2.2 Energía eléctrica

Rendimiento nominal de un motor eléctrico

$$\eta_n = \frac{P_n \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}$$

η_n: rendimiento nominal (%).

P_n: potencia nominal (kW).

U_n: tensión de línea nominal (V).

I_n: corriente de línea nominal (A).

$\cos \varphi_n$: factor de potencia del motor en régimen nominal.

Potencia absorbida por una bomba

$$P_b = \frac{Q \cdot g \cdot h}{10 \cdot \eta_b}$$

P_b: potencia absorbida por la bomba (kW).

Q: caudal másico (kg/s).

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s^2).

h: incremento de presión generado por la bomba (mca).

η_b: rendimiento de la bomba (%).

12.3 Anexo 3: Unidades de conversión

Equivalencias entre unidades de trabajo o energía

	tep	Termia	kcal	kJ	kWh
1 tep	1	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^7$	$4{,}19 \cdot 10^{10}$	$1{,}16 \cdot 10^4$
1 termia	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$1 \cdot 10^3$	$4{,}19 \cdot 10^6$	1,16
1 kcal	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$4{,}19 \cdot 10^3$	$1{,}16 \cdot 10^{-3}$
1 kJ	$2{,}39 \cdot 10^{-8}$	$2{,}39 \cdot 10^{-4}$	$23{,}88 \cdot 10^{-2}$	1	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$
1 kWh	$8{,}62 \cdot 10^{-5}$	0,86	860	$3{,}60 \cdot 10^6$	1

Tabla 55 Equivalencias entre unidades de trabajo o energía.

NOTA: tep, tonelada equivalente de petróleo.

12.4 Anexo 4: Fuentes de información

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRÉS, J.; SANTOS, A. El hidrógeno combustible. Métodos de obtención y aplicación a la generación eléctrica. *Ingeniería Química*. 402. 124-131, 2003.
- ASCER. Los sectores español y mundial de fabricantes de baldosas cerámicas 2004. Informe publicado por ASCER, en 2004.
- AVEN. Datos energéticos de la Comunitat Valenciana 2008. Informe publicado por la Agencia Valenciana de la Energía.
- AZARA, M.; AMORÓS, J.L.; BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E. Ahorro energético en el sector azulejero. Generalitat Valenciana: Consellería de Industria, Comercio y Turismo, 1990.
- BARBA, A.; FELÍU, C.; GARCÍA, J.; BELTRÁN, V.; SÁNCHEZ, E.; SANZ, V. *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas, 2ª Edición*. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica, 2002.
- BLASCO, A.; CARDA, L.; MALLOL, G.; MONFORT, E. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (I). Curva de presiones. Técnica Cerámica, 206, 585-593, 1992.
- BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E.; MALLOL, G.; MONFORT, E. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (II). Caudal de aire de combustión. Técnica Cerámica, 218, 716-729, 1993.
- CHERIAN, K.; KIRKSEY, M.; et al. *Ride the Wave*. Ceramic Industry, 158(9), 16-19, 2008.
- COZZI, F. COGHE, A. Behaviour of hydrogen-enriched non-premixed swirled natural gas flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. 31, 669-677, 2006.
- CUÑAT MARTINEZ, G.; LATORRE BELTRAN, J.V. Ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas (I). Técnica Cerámica, 218, 695-715, 1993.
- CUÑAT MARTINEZ, G.; LATORRE BELTRAN, J.V. Ahorro energético en el sector de baldosas cerámicas (II). Técnica Cerámica, 219, 803-819, 1993.
- EARL, D.A.; CLARK, D.E.; SCHULZ, R.L.; *Microwave energy versus convected hot air for rapidly drying ceramic tile. Microwaves: Theory and Application in Materials Processing III*. Ohio: American Ceramic Society, 449-456, 1995.
- ENRIQUE, J.E.; BLASCO, A.; MONFORT, E.; MALLOL, G. *Improving energy efficiency in single-deck kilns by optimization of the process variables*. Cfi Ber. DKG, 72(5), 255-260, 1995.
- GIACOMINI, P. *World production and consumption of ceramic tiles*. Ceram. World Rev., 78, 56-74, 2008.
- *Guía de ahorro y eficiencia energética en el sector de la cerámica artística, de uso y técnica de la Comunidad Valenciana*. Agencia Valenciana de la Energía, 2006.
- *Guía de la baldosa cerámica: el vademecum de la baldosa cerámica, para su clasificación, su selección, materiales de agarre y rejuntado, la redacción del proyecto, el control de la obra, el uso y mantenimiento*. 5ª Edición. Valencia: Generalitat Valenciana, 2006.

- HAJDUK, A. *Microwave hybrid drying*. Ceramic Industry. 153(5), 32-35, 2003.
- LATORRE BELTRÁN, J.V.;CUÑAT MARTÍNEZ, G. *Sistemas de cogeneración y ejemplos de instalaciones en Europa.* Valencia: Institut Valencià de l'Energia, 1993.
- LURUEÑA, R. La pilas de combustible y el hidrógeno: el comienzo de una nueva era. *Residuos Bilbao,* 71, 88-93, 2003.
- MALLOL, G.; MONFORT, E.; BUSANI, G.; LEZAUN, F.J. *Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica.* 2ª Edición. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica, 2001.
- MALLOL, G.; MEZQUITA, A.; LLORENS, D.; JARQUE, J.C.; SAHÚN, J.; VALLE, F. Estudio de la operación de secado de los soportes de las baldosas cerámicas en secaderos verticales. Técnica Cerámica, 304, 805-817, 2002.
- NASSETTI, G. Advances in dry grinding. *Ceramic World Review*, 25, 82-86, 1997.
- NASSETTI, G. et al. *Piastrelle ceramiche & energia. Banca dati dei consumi energetici nell'industria delle piastrelle di ceramica.* Bologna: Centro Ceramico, 1998.
- REAL DECRETO 616/2007, de 11 de mayo, sobre fomento de la cogeneración.
- ROPER, J. *Developments in Microwave Heat Technology*. Ceramic Industry, 156 (9), 20-23, 2006.
- SACMI, ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TÉCNICOS CERÁMICOS. *Tecnología cerámica aplicada. Volumen I y II.* Castellón: Faenza Editrice Ibérica, 2004.
- SALA LIZARRAGA, J.M. *Cogeneracion: aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos.* [2ª ed.]. Bilbao: Servicio editorial, Universidad del País Vasco, 1994.
- SCHIANCHI, S; CHAM, C. Evolution of dry grinding technology for ceramic products. *International Ceramics Journal*. February, 23-29, 2006.
- SCHULMAN, H.S.; FALL, M.L.; STRICKLAND, P. *Ceramic Processing Using Microwave Assist Technology*. American Ceramic Society Bulletin, 87(3), 34-36, 2008.
- SUHM, J. *Rapid wave microwave technology for drying sensitive products.* American Ceramic Society Bulletin. 79(5), 69-71, 2000.
- The Carbon Trust. *Lighting. Bright ideas for more efficient illumination*. Energy Efficiency Enquires Bureau UK. Marzo 2007.

ENLACES DE INTERÉS

- www.acogen.org
  Asociación Española de Cogeneración (ACOGEN).
- www.aeh2.org
  Asociación Española del Hidrógeno. Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combsutibles (AEH2).
- www.ascer.es
  Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos.
- www.aven.es
  Agencia Valenciana de la Energía.
- www.cdti.es
  Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI)
- www.cener.com
  Centro Nacional de Energías Renovables (CENER).
- www.ciemat.es
  Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
- www.cne.es
  Comisión nacional de la energía (CNE)
- www.hispalyt.es
  Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida.
- www.idae.es
  Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)
- www.itc.uji.es
  Instituto de Tecnología Cerámica (ITC)
- www.ite.es
  Instituto de Tecnología Eléctrica (ITE)
- www.mityc.es
  Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- www.psa.es
  Plataforma Solar de Almería.
- www.ptehpc.org
  Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible.
- www.ree.es
  Red Eléctrica de España.

ORGANISMOS COLABORADORES:

- ASCER, Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos.
- ATC, Asociación de Técnicos Cerámicos.
- AVEC, Asociación Valenciana de Cerámica.
- IDAE, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía.
- ITC, Instituto de Tecnología Cerámica.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO.

AGRADECIMIENTOS

A todas las empresas del sector que de forma desinteresada han cedido información e imágenes para la confección de esta guía.