

HOJA DE RUTA HIPOCARBÓNICA PARA LA INDUSTRIA CERÁMICA CASTELLÓN (HIPOCARBONIC)

Fase I: Análisis de la situación actual

Durante esta fase del proyecto, se ha llevado a cabo una búsqueda bibliográfica y recopilación de toda la **información necesaria**, desde el punto de técnico y económico para abordar la transición energética del sector. Los datos se han obtenido a través de una búsqueda bibliográfica, a partir de análisis de datos públicos disponibles, revisión de artículos científicos, proyectos regionales nacionales y europeos llevados a cabo por el sector cerámico, o sectores afines, etc.

A continuación, se muestra un resumen de descripción de las tecnologías utilizadas a lo largo de todo el proceso productivo, especialmente de los principales equipos consumidores de energía térmica, como son los atomizadores, secaderos y hornos.

En este informe también se incluye información sobre los consumos de energía de los principales equipos consumidores del proceso de fabricación de baldosas cerámicas, por lo que ha podido determinarse la línea base actual de consumo energético. Además, se ha incluido información sobre balances de energía realizados a estos equipos para así tener claramente identificado su rendimiento, los flujos energéticos que se distribuye por los mismos, las pérdidas energéticas, así como la energía desaprovechada.

1 ATOMIZACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

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 450 °C y 600 °C. Si se utilizan los gases de escape de un sistema de cogeneración, se utiliza un quemador de postcombustión 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 1 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.

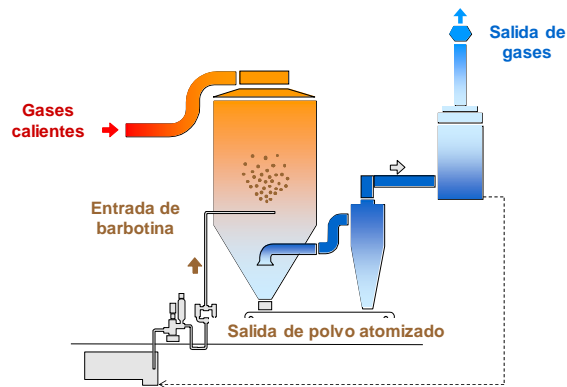


Figura 1. Esquema de funcionamiento de un atomizador

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 1.200 l/h hasta 20.000 l/h, para los atomizadores más grandes.

1.2 CONSUMO DE ENERGÍA Y BALANCE ENERGÉTICO

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. 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. El consumo específico medio para el proceso de atomización es de 476 kWh/tonelada atomizado seco (PCS), funcionando la instalación en estado estacionario, es decir, sin huecos ni paradas productivas.

Los balances de energía realizados en atomizadores, indican que entre un 60-70 % de la energía aportada se utiliza en el secado de la barbotina. El resto, se pierde principalmente por la chimenea de los gases de salida, y en menor medida por las superficies de la instalación, y con el granulado.

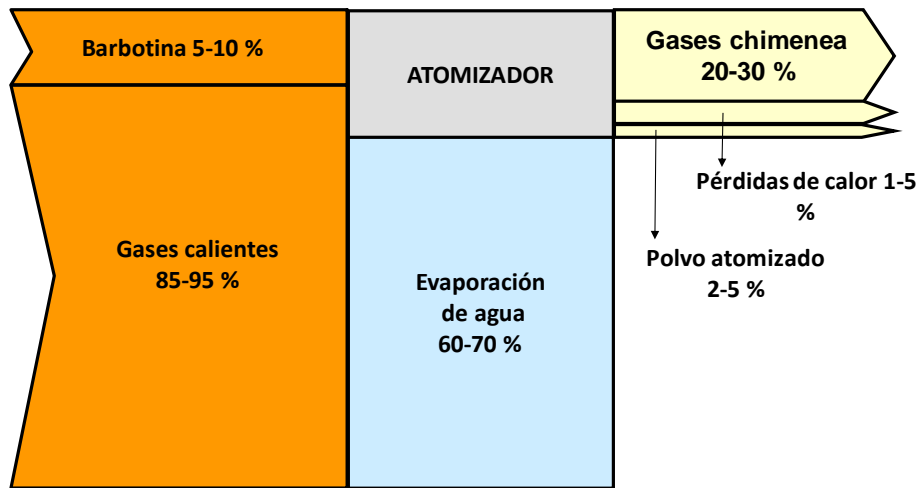


Figura 2. Balance de energía térmica a un atomizador. Intervalos de valores habituales en cada corriente.

1.3 ACCIONES DE AHORRO ENERGÉTICO

Algunas medidas de ahorro energético implementadas en atomizadores son la recuperación de calor procedente de otros equipos de proceso, el incremento de la temperatura y del contenido en sólidos de la suspensión, la mejora en la distribución de los gases en el interior del atomizador, así como el control automático de la energía aportada en base a la humedad del granulado obtenido. Esta última medida no es en sí una medida de ahorro energético, pero el control automático del proceso permite mantener las variables en unos intervalos pequeños de variación y se evitan así variaciones bruscas que conducen a sobreconsumos de energía.

La recuperación de calor de otras instalaciones es la medida de ahorro energético con mayor impacto. Habitualmente, se aprovechan los gases de salida de una turbina de cogeneración como gases de secado en un atomizador, y éstos constituyen la mayor parte del aporte de calor al atomizador, de modo que el quemador de postcombustión solo tiene un pequeño consumo de gas, en caso de estar encendido.

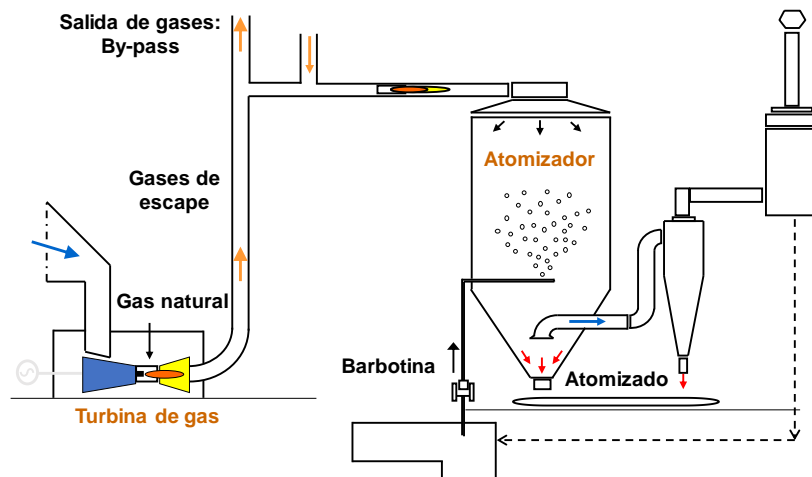


Figura 3. Esquema de una recuperación de calor de una turbina a un atomizador

Pero la situación de cada instalación es distinta, y no siempre hay una turbina para cada atomizador. De hecho, es habitual encontrar instalaciones en las que los gases de salida de una o varias turbinas se utilizan en varios atomizadores. En estos casos, en función de los atomizadores que estén en marcha, y del caudal total de gases procedentes de la turbina disponibles, la cantidad de gases a utilizar en cada atomizador es diferente, y por tanto los quemadores de postcombustión tienen que aportar más o menos energía al proceso de atomización.

Otra opción de recuperación de calor utilizada en las instalaciones de secado por atomización consiste en recuperar los gases de enfriamiento del horno. Estos gases, que están limpios de contaminantes, y suelen tener una temperatura comprendida entre 150-200 °C, se canalizan y dirigen hacia la zona de atomización. En cualquier caso, el ahorro final obtenido en las instalaciones de recuperación de calor siempre depende de la cantidad de gases aprovechados y de su temperatura.

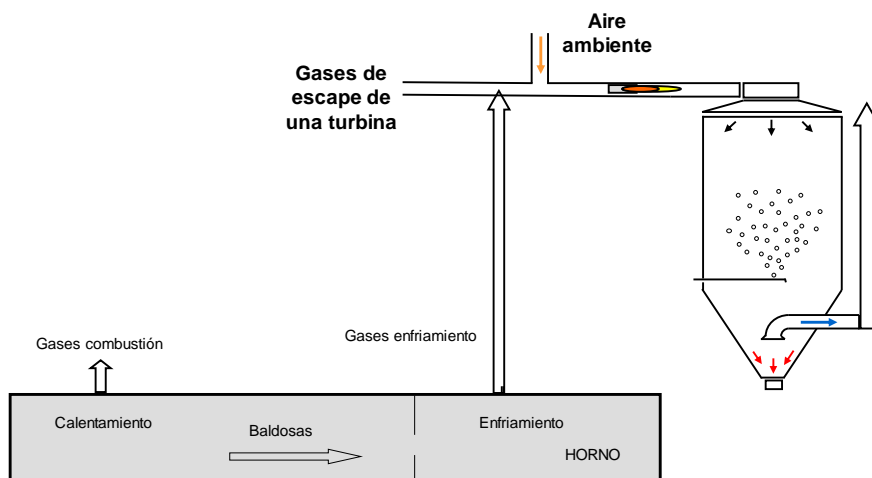


Figura 4. Esquema de una recuperación de calor de un horno a un atomizador

El incremento de la temperatura de la barbotina es una medida novedosa, que propone uno de los fabricantes de atomizadores¹. Consiste en pulverizar la barbotina en los gases de salida del atomizador, obteniéndose diversos beneficios: se aprovecha el calor residual que contienen los gases para precalentar la suspensión, se eliminan partículas en suspensión que pueden contener los gases de la chimenea, y se reduce el consumo de agua en la depuración de los gases de salida, pues el agua empleada habitualmente en el abatidor vía húmeda se sustituye por la suspensión.

Ahorro indicado por el fabricante, entre 20-50 kcal/l agua evaporada (aprox. entre 3,3 y 8,4 % de ahorro)

¹ <http://www.sacmiiberica.com/es-ES/Productos/Ceramica/Azulejos/Preparacion-de-polvos/Atomizacion-y-almacenado-de-polvos/Atomizadores.aspx?idC=62146&LN=es-ES>

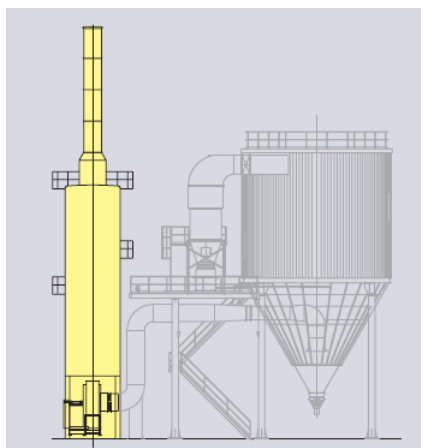


Figura 5. Esquema del abatidor-calentador de barbotina propuesto por SACMI.

Otra medida de ahorro energético innovadora es la propuesta por la empresa INVECAL, S.L.², en la que se calienta un fluido por intercambio de calor con las superficies del atomizador, y el calor recuperado se utiliza para precalentar los gases de secado en la entrada del atomizador. La empresa indica que este sistema implica un ahorro de gas natural (y por tanto una reducción de emisiones) del 28 %.

—REDUCCION DEL CONSUMO DE GAS EN UN ATOMIZADOR CONVENCIONAL MEDIANTE CIRCULACION DE UN FLUIDO TERMICO Y UN INTERCAMBIADOR TUBULAR

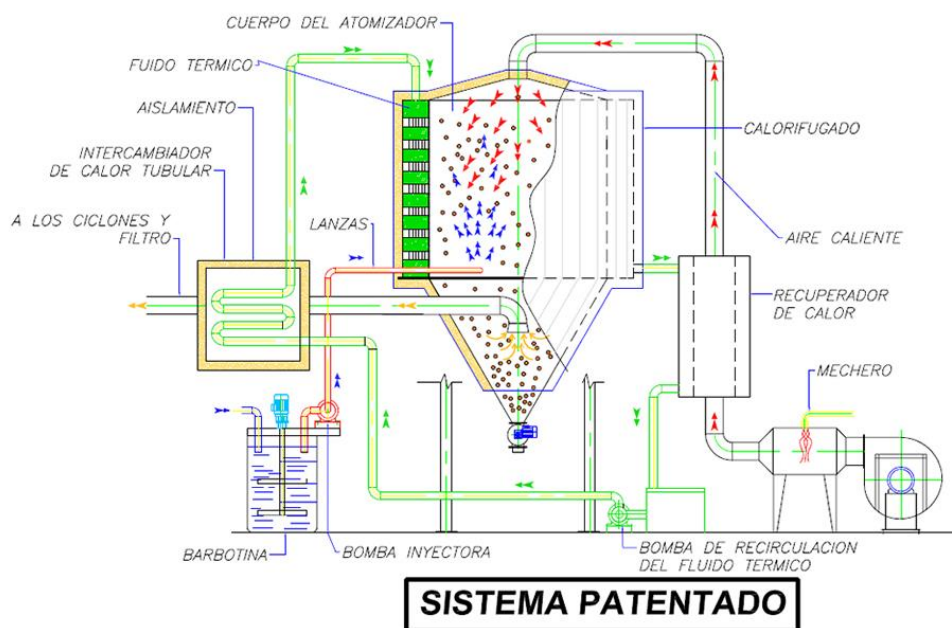


Figura 6. Esquema del sistema de recuperación de calor propuesto por INVECAL, S.L.

² <http://www.invecal.com/erp-portfolio/ahorro-de-energia-en-atomizadores/>

1.4 FUTURAS TECNOLOGÍAS DE POSIBLE APLICACIÓN EN LA ATOMIZACIÓN

Con vistas a un futuro con menores emisiones de CO₂ en la etapa de atomización, algunas de las opciones que podrían implantarse serían las siguientes:

- Cogeneración con nuevos combustibles, procedentes de biomasa, o generados a partir de fuentes de energía renovables.
 - Gas de síntesis, biogás o biometano generado a partir de biomasa
 - Hidrógeno, generado por hidrólisis con electricidad total o parcialmente renovable
- Nuevos procesos de preparación de materias primas, como la molturación vía seca y posterior granulación. Estos procesos han sufrido un importante impulso en los últimos años, con el desarrollo de nuevos molinos y granuladoras que han permitido obtener un granulado con características cada vez más similares a las obtenidas en el granulado obtenido por atomización.

No obstante, todavía queda camino por recorrer, ya que no todos los productos cerámicos pueden fabricarse con estos granulados, manteniendo la calidad demandada en el producto final. Es el caso, por ejemplo, de baldosas de pavimento de gran formato, especialmente de gres porcelánico.

2 SECADO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

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.

El secado de las piezas recién conformadas se realiza en secaderos continuos, verticales u horizontales, en los que 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. Se trata, por tanto, de un secado por convección forzada de gases calientes.

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 en un recorrido circular, 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 varía habitualmente entre unos 60 -90 minutos, y la temperatura de los gases suele ser entre 100 y 200 °C. No obstante, las condiciones de secado deben ajustarse en cada momento a las características del producto, como son el espesor y tamaño de las piezas, la porosidad del soporte, el tipo de esmalte que se va a aplicar posteriormente, etc.

La mayor parte de los gases de secado se recirculan en el mismo proceso, y alcanzan la temperatura de secado requerida mediante la instalación en la propia conducción de uno o dos quemadores de gas 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, actuando de este modo como purga del sistema.

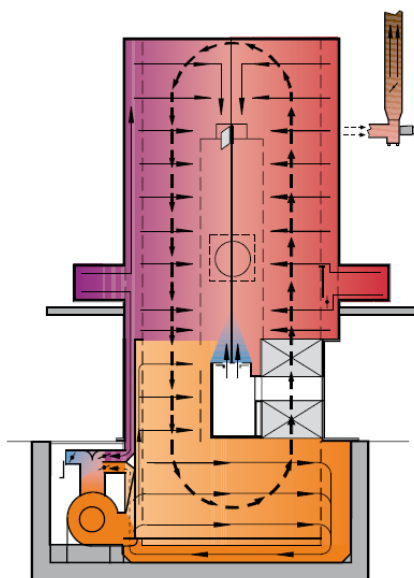


Figura 7. Esquema de la circulación de gases y piezas en un secadero vertical (SACMI)

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 200-250 °C, y ésta se hace circular en contracorriente con las piezas.



Figura 8 Secadero horizontal de cinco canales (Fuente: www.sacmi.com).

El secado de baldosas cerámicas es más habitual que se realice en secaderos verticales, 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, y su empleo en el sector ha ido en aumento en los últimos años.

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. 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.

2.2 CONSUMO DE ENERGÍA Y BALANCE ENERGÉTICO

En ambos tipos de secaderos es posible la recuperación de aire caliente procedente de instalaciones de cogeneración, o de otras instalaciones que cuenten con calor residual, como los hornos. El aporte total de calor al secadero será la suma de la energía térmica recuperada y la aportada mediante la combustión del gas natural consumido en el secadero.

Los balances de energía realizados en secaderos indican que entre un 30-35 % de la energía aportada se utiliza en el secado de las piezas. El resto, se pierde principalmente por la chimenea de los gases de salida, y en menor medida por las superficies de la instalación.

Cabe resaltar que el objetivo de la etapa de secado es doble: por un lado, secar las piezas, y por otro, calentarlas hasta una temperatura dada, adecuada para el posterior proceso de esmaltado y decoración. Por tanto, parte de la energía consumida se emplea en calentar las piezas, y no puede considerarse que la energía térmica que contienen las piezas en la salida del secadero sea una pérdida de energía. Más bien al contrario, al tratarse de uno de los objetivos de esta etapa, forma parte de la energía útil utilizada.

Habitualmente, la energía empleada en calentar las piezas supone entre un 15-20 % de toda la energía aportada en el secadero, y por tanto el rendimiento total de la operación de secado se sitúa entre el 45 % y el 55 %. Es decir, aproximadamente la mitad de la energía aportada al secadero se aprovecha, y el resto se pierde.

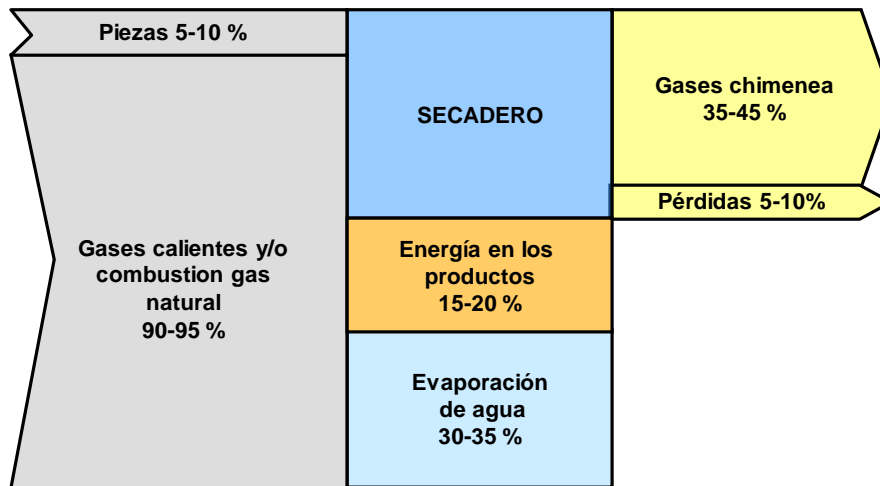


Figura 9. Balance de energía térmica a un secadero vertical. Intervalos de valores habituales en cada corriente.

El consumo medio de energía térmica se sitúa alrededor de 125 kWh/tss (referido al PCS del gas natural), estando la instalación funcionando en estado estacionario. No se han evidenciado diferencias significativas de consumo energético entre secaderos verticales u horizontales, ni por tipología de producto procesado.

2.3 ACCIONES DE AHORRO ENERGÉTICO

Las principales medidas de ahorro energético implementadas en secaderos se centran en el aprovechamiento de calor residual de otras etapas de proceso, y en la optimización de variables del proceso, principalmente los caudales de gases recirculados y de chimenea.

2.3.1 Aprovechamiento de calor residual

Los gases calientes que constituyen una energía residual en otros equipos se pueden aprovechar en el secadero como aire de secado, y así reducir del consumo de gas natural.

El origen más habitual de los gases recuperados en los secaderos es la chimenea de gases de enfriamiento de los hornos, por tratarse de gases limpios que se pueden aprovechar directamente. También se utiliza aire ambiente, precalentado mediante un intercambiador de calor situado en la chimenea de humos, y, en menor medida, gases procedentes de un sistema de cogeneración.

Los gases recuperados se pueden incorporar en diferentes puntos del secadero: en las conducciones de recirculación, en el punto de entrada del aire de renovación del secadero, o como aire de combustión en los quemadores del secadero.



Figura 10. Entrada de gases calientes recuperados en la conducción de recirculación de un secadero vertical.



Figura 11. Entrada de gases calientes recuperados a la zona de aporte de gases de renovación



Figura 12. Entrada de gases calientes recuperados en las conducciones de recirculación de un secadero horizontal.
(Foto de SACMI)

Otra opción para aprovechar calor residual en los secaderos es mediante el empleo de un fluido térmico, habitualmente aceite térmico.

La instalación consiste en la recuperación de calor desde las chimeneas de humos de combustión y de aire de enfriamiento de uno o varios hornos, de forma conjunta hasta uno o varios secaderos, mediante el uso de intercambiadores de calor (uno en cada chimenea) de forma que la energía se transfiere desde los hornos hasta los secaderos utilizando un aceite como fluido térmico. El aceite térmico calentado en los intercambiadores instalados en los hornos se une en una única corriente hasta los secaderos.

La conducción por la que el aceite térmico circula desde la zona de hornos hasta la sección de secado está calorifugada, para minimizar las pérdidas energéticas. El calor en los secaderos se cede a las corrientes de aire de recirculación de los secaderos, a través de dos intercambiadores adicionales, uno por cada uno de los quemadores, reduciendo de este modo el aporte energético a realizar por los quemadores de gas natural de los secaderos.

El aceite térmico se utiliza en un circuito cerrado, de forma que tras ceder calor a los gases de los secaderos vuelve hasta los intercambiadores de calor de los hornos para iniciar de nuevo el proceso. En este circuito existe un sistema de válvulas con bypass, que permiten mantener la temperatura del aceite en el valor óptimo, de forma que aumenta la eficiencia global del proceso.

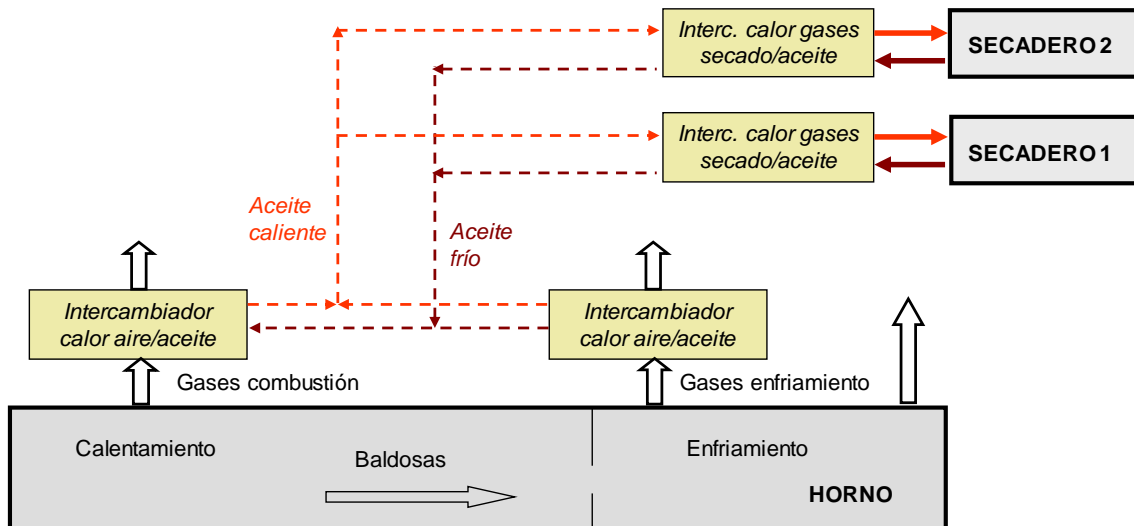


Figura 13. Esquema de recuperación de calor con aceite térmico de un horno a dos secaderos.



Figura 14. Intercambiador de aceite térmico instalado en la chimenea de humos de un horno.

2.3.2 Modificación de caudales

Para modificar los caudales de gases, se pueden reducir las secciones de paso de los gases mediante válvulas, o bien se pueden instalar variadores de frecuencia en los motores de los ventiladores. Las válvulas de control de caudal reducen el caudal de gases mediante el aumento de la pérdida de carga en la conducción, ya que suponen un obstáculo al paso de gases, pero independientemente de su apertura, no se modifica el régimen de trabajo del ventilador.

Los variadores de frecuencia son dispositivos electrónicos que modifican la frecuencia de giro de los ventiladores, y por tanto cambian el caudal de gases en movimiento sin añadir obstáculos a su circulación. Una reducción de la frecuencia de giro implica además una reducción en el

consumo eléctrico del motor del ventilador, de modo que es la manera más adecuada de modificar los caudales de gases.

En la chimenea, reducir el caudal de gases de salida implica reducir las pérdidas de energía térmica por la chimenea, y por tanto se obtiene un ahorro de gas natural. Esta reducción de caudal puede realizarse de manera manual, o bien de manera automática, en base a la humedad de los gases de salida. El ahorro obtenido depende la reducción de caudal realizada.

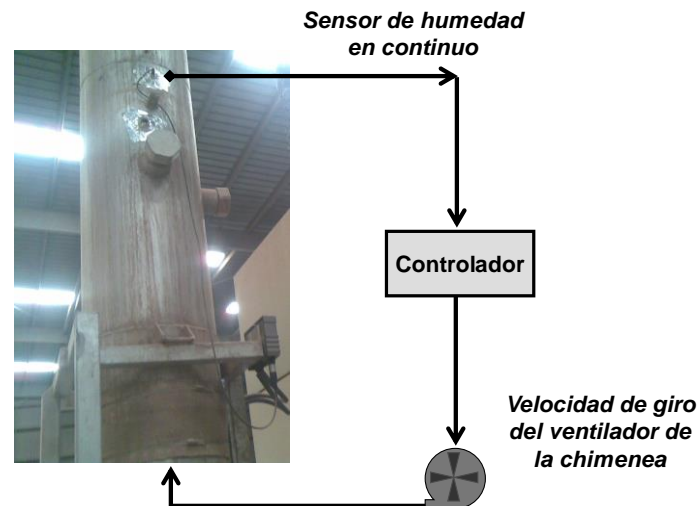


Figura 15. Esquema del control automático del caudal de la chimenea en un secadero basado en la humedad de los gases.

No obstante, hay que tener en cuenta que una reducción del caudal de gases de chimenea supone una menor renovación de gases en el interior del secadero, y por tanto el proceso de secado se ve afectado y cambian las propiedades de las piezas en la salida del secadero, tanto su temperatura como su humedad residual.

En las conducciones de recirculación de los gases de secado es donde se sitúan los quemadores de gas, encargados de calentarlos hasta la temperatura de secado establecida. Una reducción del caudal recirculado implica directamente, y en la misma proporción, una reducción en el consumo de gas. Pero también implica reducir el volumen de gases de secado, lo que modifica las condiciones del secado de las piezas.

Ambas acciones de ahorro, reducir caudal de chimenea y reducir caudal de gases recirculados, se pueden realizar en la medida en que las propiedades de las piezas en la salida del secadero siguen siendo adecuadas para las siguientes etapas del proceso, aunque se hayan modificado respecto a la situación inicial.

Los ahorros, lógicamente, dependen de la reducción de caudal realizada en cada caso. Una reducción del 40 % en el caudal de chimenea, implica un ahorro de gas natural de entre el 10-15 %, y un ahorro en el consumo eléctrico del ventilador de entre un 5-10 %. La reducción del caudal de gases recirculados, entre un 10-20 %, implica una reducción en el consumo de gas del mismo orden, siempre que no se modifiquen otras variables del proceso, como por ejemplo las temperaturas de secado establecidas.

2.4 FUTURAS TECNOLOGÍAS DE POSIBLE APLICACIÓN EN LA ETAPA DE SECADO

La reducción de emisiones en la etapa de secado implicará cambios tecnológicos, bien por cambio de combustible, o bien por cambio en la fuente de generación del calor.

- Modificaciones en el combustible: mezclas de gas natural con hidrógeno, o bien mezclas de gas natural con biometano (mezclas realizadas en la red, no de manera particular en cada empresa).
 - Biometano generado a partir de biomasa
 - Hidrógeno, generado por hidrólisis o cualquier otra tecnología, pero haciendo uso de electricidad de origen renovable

- Tecnologías de secado basadas en el consumo de electricidad, que deberá ser de origen cada vez más renovable.
 - Microondas
 - Resistencias
 - Bombas de calor

- Sistemas híbridos, en los que haya ambos tipos de aporte de calor.

3 COCCIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COCCIÓN

Las baldosas cerámicas se cuecen mayoritariamente 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. La mayoría suelen medir alrededor de 100 metros, aunque los de mayor tamaño pueden alcanzar los 150 m

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 °C, 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 siguiente:

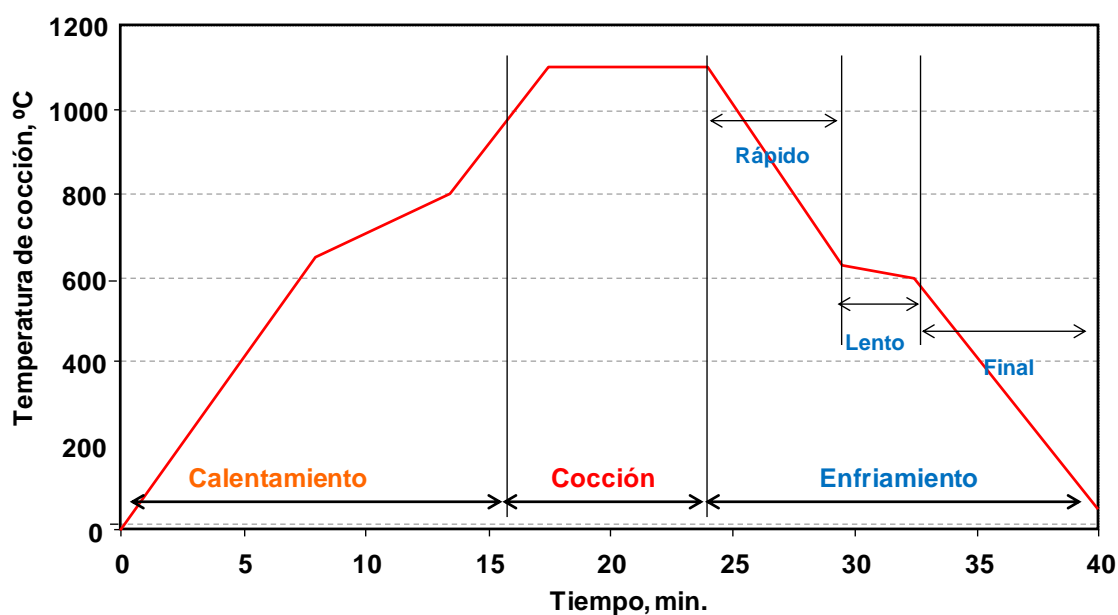


Figura 16. Diagrama temperatura-tiempo de un ciclo típico de cocción

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 °C 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 °C, que da lugar a un importante cambio de volumen que puede originar grietas.

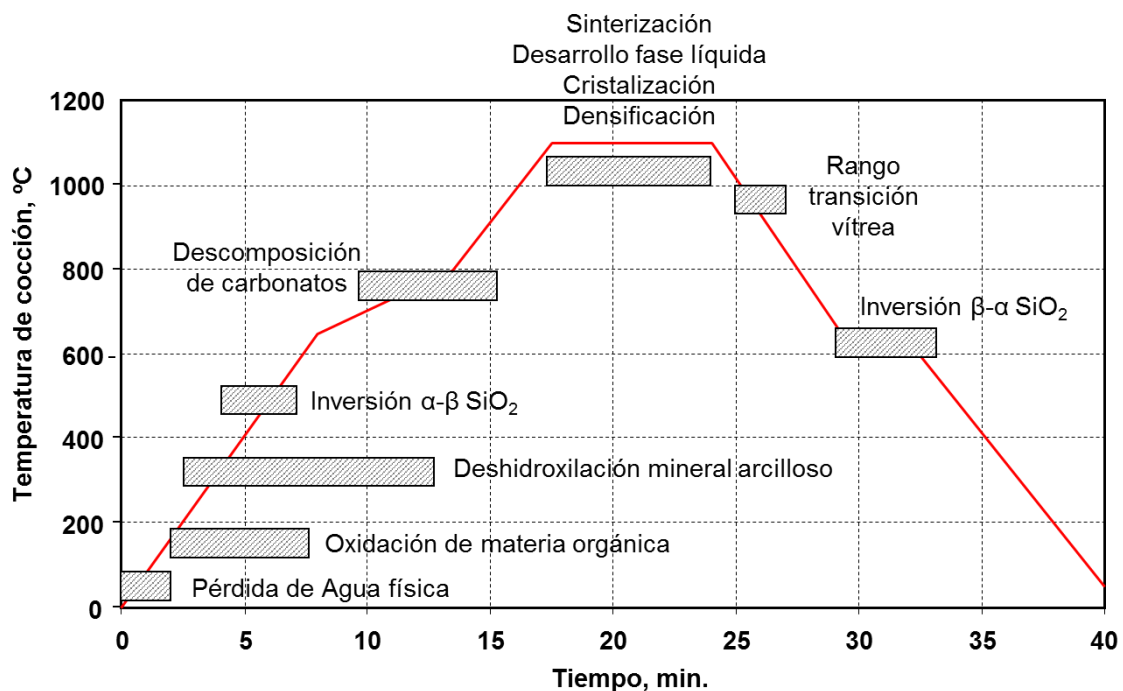


Figura 17. Reacciones que ocurren en el material cerámico durante el ciclo de cocción.

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 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 °C, 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 α en cuarzo β , la pérdida de grupos OH en las arcillas, y 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 °C 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, por encima y debajo del plano formado por los rodillos.

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.

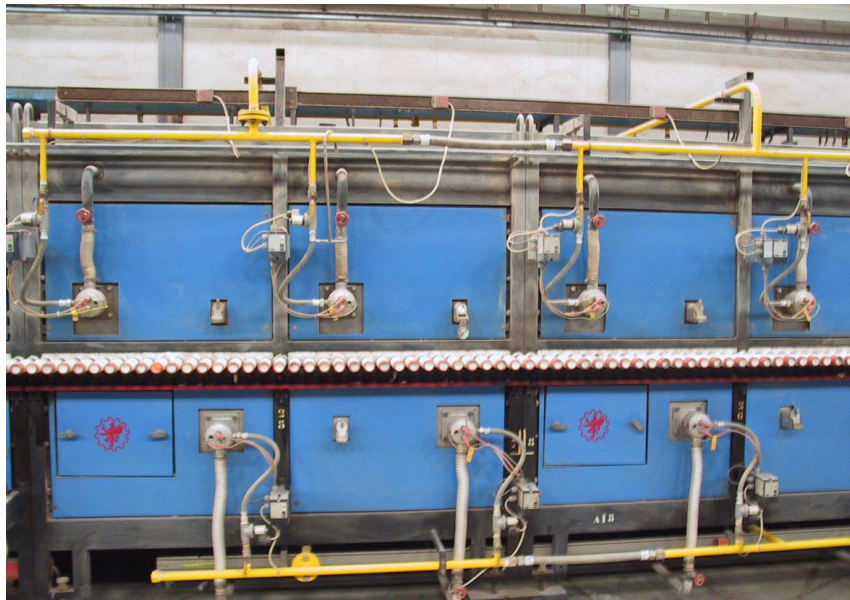


Figura 18. Imagen de dos módulos de la zona de cocción en un horno.

- Zona de enfriamiento rápido

En el enfriamiento rápido, un conjunto de conducciones con numerosas perforaciones introduce 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 °C, 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 19. Imagen de la zona de enfriamiento rápido en un horno.

- Zona de enfriamiento lento o indirecto

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 frío no entra en contacto con las piezas sino que circula a través de unos tubos ubicados en esta zona del horno.

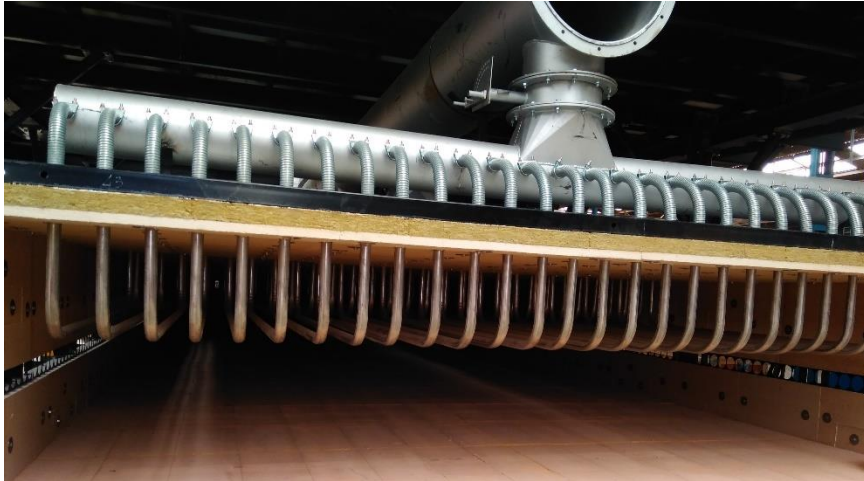


Figura 20. Imagen de un módulo abierto, de la zona de enfriamiento indirecto.

- **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 o incluso tres chimeneas de enfriamiento.



Figura 21. Fotografía de la zona de enfriamiento final de un horno.

3.2 CONSUMO DE ENERGÍA Y BALANCE ENERGÉTICO

Los balances de energía realizados en hornos indican que menos del 20 % de la energía aportada se utiliza en la cocción del material cerámico. El resto se pierde, principalmente, por las chimeneas del horno, a través de las paredes y bóvedas del horno, así como por la presencia de fugas de calor incontroladas.

Dado que entre un 40-60 % del calor aportado se pierde por las chimeneas del horno, el aprovechamiento de parte de esta energía en el mismo horno o en otras etapas del proceso permite aumentar el aprovechamiento energético en el horno y así aumentar la eficiencia energética global.

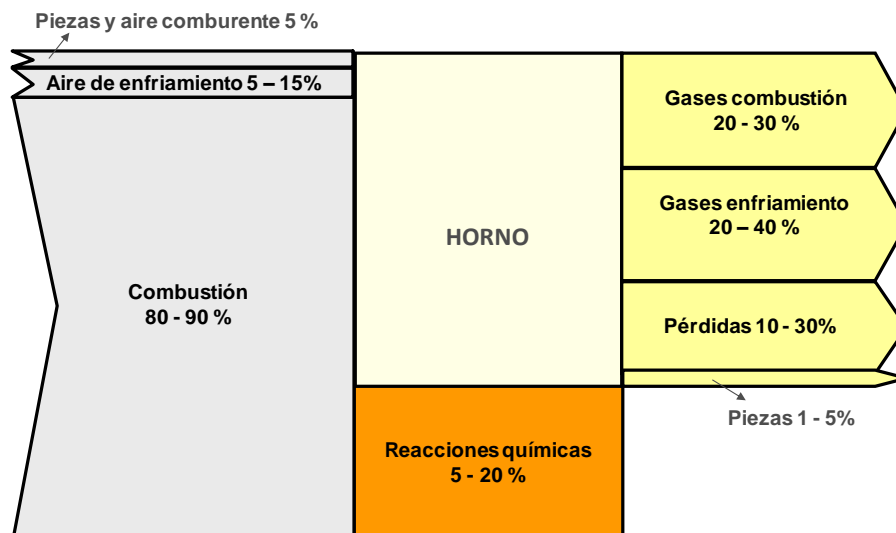


Figura 22. Balance de energía térmica a un horno. Intervalos de valores habituales en cada corriente.

El consumo medio de energía térmica se sitúa alrededor de 793 kWh/tss (referido al PCS del gas natural), estando la instalación funcionando en estado estacionario.

3.3 ACCIONES DE AHORRO ENERGÉTICO EN HORNOS

Los hornos de cocción de baldosas cerámicas son los equipos de mayor consumo energético, y por tanto donde más se han centrado los esfuerzos en implementar medidas de ahorro. Se puede distinguir entre medidas de ahorro energético que consisten en optimizar y ajustar las variables de proceso con influencia en el consumo de gas natural, y que requieren nula o muy poca inversión, y aquellas medidas de ahorro, con las que se consiguen mayores ahorros de gas natural, pero que requieren de cierta inversión. Entre estas últimas, destacan el precalentamiento del aire de combustión, las instalaciones de recuperación de calor, y las mejoras en el aislamiento térmico del horno.

3.3.1 Optimización de variables de proceso

Las principales variables de proceso con influencia en el consumo de gas natural son:

- **Presión estática en el horno.** Tanto la presión estática en cada zona del horno, como el perfil de presión a lo largo de la cámara de combustión influyen en el consumo de gas natural del horno.

En efecto, si la presión estática es demasiado elevada (presión máxima superior a 0,5 mmca) se produce la salida de gases calientes por cualquier abertura o fisura del horno; si por el contrario, es demasiado baja, y hay zonas con una presión inferior a la presión atmosférica, por cualquier abertura se producirá la entrada de aire ambiente al horno. En ambos casos, la consecuencia es un aumento del consumo de gas para compensar la disminución de la temperatura en la zona en la que se produzca la salida de gases o la entrada de aire ambiente.

El perfil de presión estática en un horno presenta un punto de máxima presión. La ubicación de este punto determina la circulación de gases por el interior de la cámara de combustión, de modo que si está situado en la zona de alta temperatura se pierden gases calientes hacia la zona de enfriamiento, provocando un sobre consumo de gas natural en los quemadores de la zona de alta temperatura

- **Caudal de aire de combustión.** La combustión en los quemadores se realiza habitualmente con exceso de aire comburente, para asegurar la combustión completa del gas natural. Pero si el exceso de aire es demasiado elevado, se produce un consumo demasiado alto e innecesario de gas natural, ya que el exceso de aire reduce la temperatura de la llama. En cada zona del horno hay una regulación automática de la temperatura, de modo que se quema todo el gas necesario para que la temperatura en la zona sea la establecida. Así, tener un caudal de comburente elevado, implica que todo este caudal de aire se va a calentar hasta la temperatura de consigna establecida, de manera que hay un consumo adicional de gas natural asociado a ese aire en exceso.

Hay que tener en cuenta que el comburente, en realidad, es únicamente el oxígeno; el resto de gases presentes en el aire, principalmente el nitrógeno que supone alrededor del 79 % de la composición del aire, también se calientan pero no intervienen en la reacción de combustión. Así que cuando hay un exceso de aire de combustión, se están calentando con gas natural el resto de gases presentes pero que en realidad no intervienen en la reacción, es decir, que no aportan energía al proceso de cocción.

Se considera que un exceso de aire de alrededor del 20 %, sobre el mínimo necesario estequiométricamente para la combustión del gas natural, es adecuado para, por un lado, asegurar la correcta y completa combustión del gas natural, y por otro lado, disponer de oxígeno suficiente en el interior de la cámara de combustión para que se desarrollen adecuadamente las reacciones de oxidación que ocurren en el material.

3.3.2 Precalentamiento del aire de combustión

El calor generado en la combustión del gas natural se emplea en elevar la temperatura de los gases de combustión, desde la temperatura de entrada del aire comburente hasta la temperatura de consigna establecida. Cuanto mayor sea la temperatura de entrada del aire de combustión en los quemadores, menor será el consumo de gas natural, ya que la combustión con aire precalentado produce un incremento de la temperatura de llama.

No obstante, existen ciertas limitaciones a la máxima temperatura admisible en la línea de alimentación del aire de combustión; por un lado, la máxima temperatura que son capaces de soportar los elementos de distribución, regulación y control del aire, y por otro, la posibilidad de que se produzca un defecto de aire (oxígeno) en la combustión y por tanto se origine una atmósfera reductora en el horno. En efecto, al aumentar la temperatura del aire disminuye su densidad, de modo que en el mismo volumen hay menos masa. Como la reacción de combustión se produce mol a mol, puede llegar a ocurrir que no hayan suficientes moléculas de oxígeno para reaccionar con todas las moléculas de gas, y entonces se originaría una atmósfera reductora, carente de oxígeno y con parte de gas natural sin quemar, lo que supondría un riesgo para la seguridad de la instalación y de los trabajadores. Este efecto se puede compensar aumentando el caudal de aire de combustión.

En general, cada incremento de 50 °C en la temperatura del aire de combustión, supone un ahorro del 3 % de gas natural. Así, por ejemplo, si el aire se precalienta hasta 150 °C, el ahorro de gas respecto a una instalación que esté utilizando aire a temperatura ambiente, sería aproximadamente del 9 %.

La temperatura del aire precalentado varía en función de su procedencia, siendo las opciones más habituales:

- Aire ambiente, precalentado en la zona de enfriamiento rápido del horno, haciéndolo pasar por un intercambiador de calor ubicado en esta zona del horno. La temperatura que se alcanza se sitúa entre 100-130 °C.
- Gases recuperados de la chimenea de enfriamiento. En el caso de que el horno sólo tenga una chimenea de enfriamiento, la temperatura se sitúa en el intervalo de 140-160 °C. Cuando el horno dispone de dos chimeneas de enfriamiento, el aire se recupera de la primera, que es la que recoge los gases de las primeras zonas de enfriamiento del horno (enfriamientos rápido e indirecto) y por tanto tiene mayor temperatura. Estos gases tienen típicamente una temperatura alrededor de 160-180 °C.
- Gases recuperados de la chimenea de enfriamiento, que además se hacen pasar mediante un intercambiador por la zona de enfriamiento rápido del horno para elevar aún más su temperatura. Su temperatura final depende de la temperatura inicial que tengan los gases en la chimenea de enfriamiento de la que se recuperan los gases, pero puede considerarse que el paso por este intercambiador eleva unos 30-40 °C la

temperatura de los gases, obteniéndose de este modo una temperatura bastante elevada en el aire de combustión, que puede alcanzar en el mejor de los casos una temperatura superior a los 200 °C.

Habitualmente, cuando la temperatura del aire supera los 120 – 130 °C, es necesario realizar modificaciones en el sistema de distribución y control del aire que suponen un coste para la empresa, pero el ahorro de gas obtenido permite recuperar la inversión realizada en unos meses. En hornos nuevos, la instalación del aire suele estar ya preparada para trabajar a mayor temperatura, pues los hornos nuevos suelen llevar incorporado alguno de los sistemas de precalentamiento y/o recuperación del aire comburente mencionados anteriormente.

3.3.3 Reducción de las pérdidas de calor por paredes y bóveda

La realización de balances de energía en hornos de cocción de baldosas muestra que las pérdidas de calor a través de las superficies externas del horno suponen, habitualmente, entre un 10 y un 15 % del calor total aportado. En valor absoluto, estas pérdidas de calor se sitúan alrededor de 0,4 MW, dependiendo del tamaño y antigüedad del horno, del estado del mismo, etc.

Para reducir estas pérdidas de calor, es importante que se realice un buen mantenimiento predictivo en el horno, que contemple paradas periódicas que permitan realizar una evaluación detallada del estado de los materiales refractarios y aislantes del horno. De este modo, se pueden detectar zonas con un mayor deterioro para su reparación o sustitución, y así evitar una degradación excesiva que conduciría a mayores pérdidas de energía a través de las paredes, bóveda y solera del horno.

Habitualmente, la temperatura de las paredes se sitúa entre 40 y 80 °C, encontrándose la mayor temperatura en la zona superior de las paredes de los módulos situados en la zona de máxima temperatura del ciclo de cocción.

La bóveda es la superficie por dónde se producen mayores pérdidas de calor, ya que en la zona de alta temperatura se pueden alcanzar temperaturas situadas entre 100-130 °C.

La temperatura media de las superficies exteriores de los hornos se obtiene por análisis termográfico, haciendo uso de termografía infrarroja para la captación de las imágenes y de un software específico de tratamiento de imágenes.

A modo de ejemplo, se muestra en la siguiente gráfica la temperatura media de la pared y la bóveda, a lo largo de un horno.

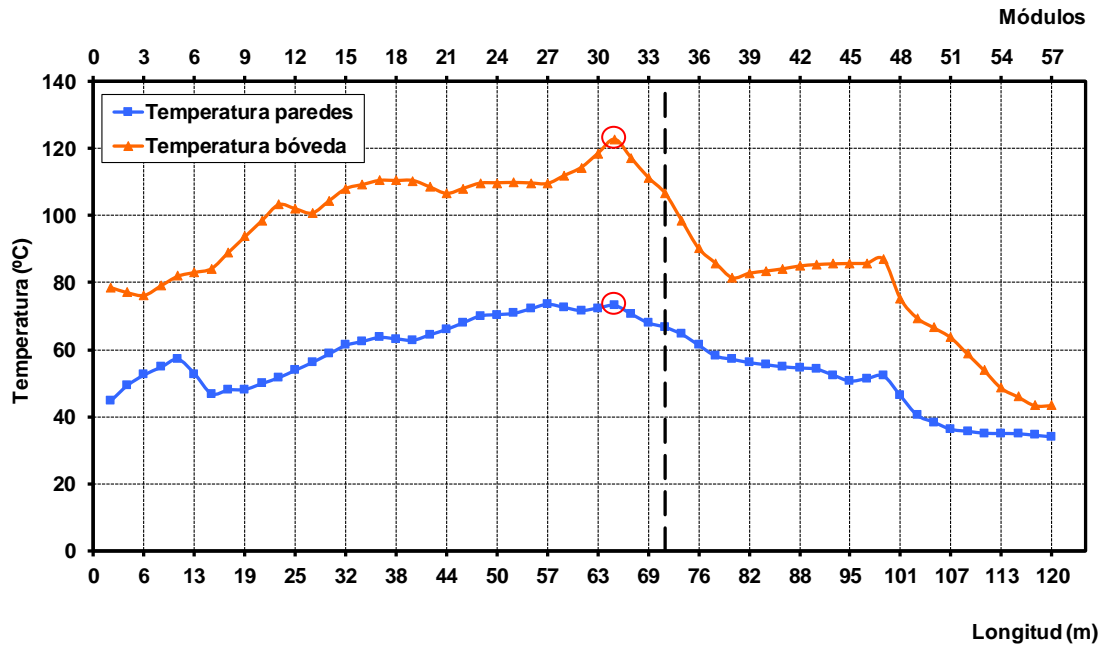


Figura 23. Temperatura media de las paredes y la bóveda en un horno de cocción de baldosas.

Actualmente, hay algunas empresas que comercializan recubrimientos refractarios que protegen los elementos refractarios del horno del ataque químico de los gases y por tanto aumentan su tiempo de vida.

En algún caso, y como parte de un proyecto de investigación³, se ha estudiado también el impacto de estos recubrimientos en las pérdidas de calor del horno, obteniéndose que con la aplicación del recubrimiento desarrollado en el marco del proyecto la temperatura externa de las paredes se redujo unos 4 – 5 °C, y el consumo energético del horno disminuyó en aproximadamente un 3 %. Estos resultados hay que considerarlos como preliminares, a falta de una evaluación que abarque un mayor periodo de tiempo que el considerado en el marco del citado proyecto.

3.3.4 Instalaciones de recuperación de calor

Los balances de energía realizados en hornos de cocción de baldosas muestran que las mayores pérdidas de energía se producen a través de las chimeneas de evacuación de los gases, tanto por la chimenea de los gases de combustión como por la chimenea de los gases de enfriamiento. Aproximadamente, entre un 20 y un 30 % del calor total aportado al horno se vierte por cada una de las chimeneas, de modo que puede decirse que aproximadamente la mitad de la energía consumida en el horno se tira por las chimeneas.

Una de las principales acciones de ahorro en las instalaciones de fabricación de baldosas consiste en la implementación de sistemas de recuperación de calor que permiten aprovechar este calor

³ Proyecto DREAM, financiado por la CE en el marco del programa H2020.

<https://www.spire2030.eu/dream>

residual procedente de los hornos, bien en el propio horno, o bien en otras instalaciones del proceso, como los secaderos y atomizadores.

La **chimenea de humos**, situada en la zona de entrada de las piezas al horno, recoge los gases de combustión de las zonas de calentamiento y de alta temperatura, así como los gases producto de las descomposiciones que tienen lugar en las piezas. Estos gases no son limpios, sino que contienen compuestos orgánicos volátiles y elementos ácidos, como son el Azufre, el Cloro y el Flúor, que imposibilitan su aprovechamiento directo.

La temperatura de estos humos, en la zona de aspiración del horno, se sitúa en torno a 250 °C. Habitualmente, se diluyen con aire ambiente para que así el ventilador que los aspira e impulsa fuera del horno pueda funcionar con una temperatura inferior, reduciéndose de ese modo el coste del ventilador al no necesitar materiales resistentes a tan alta temperatura. Esta dilución suele ser de entre un 30 y un 40 %, de modo que la temperatura de salida al exterior de los gases se sitúa en el intervalo 160-180 °C, suficientemente elevada para evitar que condensen los elementos ácidos y se produzca la corrosión de las instalaciones, pero adecuada para el buen funcionamiento del ventilador.

La recuperación de calor de esta corriente gaseosa se realiza, pues, mediante un intercambiador de calor, en el que se calienta un fluido, que puede ser aire ambiente o bien un aceite térmico. El aire ambiente caliente se aprovecha habitualmente como aire de secado en los secaderos (de baldosas recién conformadas o de barbotina), reduciéndose de este modo el consumo de gas natural en los mismos.



Figura 24. Fotografía de un intercambiador de calor instalado para la recuperación de calor de las chimeneas de humos de dos hornos, calentándose aire ambiente para su empleo en secaderos de baldosas.

En caso de calentarse aceite térmico, tal y como se ha comentado anteriormente al describir los sistemas de recuperación de calor en secaderos, éste circula por un circuito cerrado desde la chimenea, donde se calienta, hasta otro intercambiador ubicado en el secadero en el que se

deseo aprovechar el calor, donde cede su calor a los gases de secado, volviendo después de nuevo hacia la chimenea para iniciar de nuevo el ciclo de aprovechamiento térmico.

Los **gases de enfriamiento**, por el contrario, son gases limpios, pues son simplemente aire ambiente que se ha calentado en la zona de enfriamiento de las piezas. Estos gases se pueden aprovechar tanto de manera directa como indirecta. El aprovechamiento directo como aire caliente se suele realizar de manera habitual en los hornos, ya que parte de los gases de enfriamiento se utilizan como comburente precalentado en los quemadores, y parte se utilizan como gases de secado en el secadero prehorno. Además, en algunas instalaciones, parte de estos gases se aprovechan como gases de secado, bien en atomizadores o en secaderos de producto recién prensado.

En la siguiente figura se muestra un esquema que representa el aprovechamiento de calor residual en un horno, que combina tanto aprovechamiento directo como indirecto. En este ejemplo, se recupera calor de la chimenea de humos indirectamente, con aire ambiente, y este aire caliente se une a los gases de la chimenea de enfriamiento, para ser aprovechados como gases de secado, reduciéndose de este modo el consumo de gas natural en el atomizador y en el secadero.

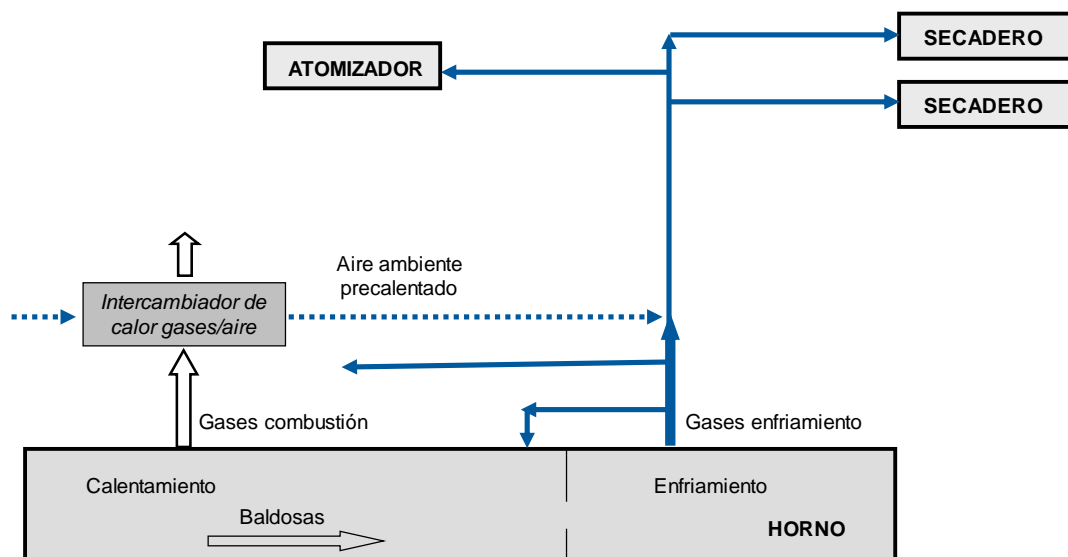


Figura 25. Esquema del aprovechamiento de calor residual de un horno en los secaderos, con aire ambiente.

Los hornos disponen de una o varias chimeneas de enfriamiento. Si todos los gases de enfriamiento se evacúan del horno por una sola conducción, el caudal es muy elevado, y la temperatura se sitúa en torno a 150 °C. Cuando se dispone de dos o tres chimeneas de enfriamiento, la chimenea que recoge los gases del primer enfriamiento rápido y del enfriamiento indirecto es la que presenta gases con mayor temperatura, por lo que son estos gases los que despiertan mayor interés para la implementación de sistemas de recuperación de calor, a pesar de que, en este caso, su caudal es menor.

La chimenea de enfriamiento que recoge los gases del enfriamiento final del horno, suele tener mucho caudal de gases pero una temperatura menor, situada en torno a 70 °C, por lo que las posibilidades de aprovecharlos son menores.

El sistema de recuperación de calor utilizando aceite térmico como fluido de intercambio de calor también puede implantarse en la chimenea de enfriamiento, como parte de la instalación de calentamiento del aceite, complementando el calor obtenido de la chimenea de humos. En este caso, la chimenea de enfriamiento de mayor temperatura puede tener hasta tres sistemas diferentes de aprovechamiento del calor: calentamiento del aceite en un intercambiador de calor, y aprovechamiento posterior de los gases en los quemadores y en el secadero prehorno.

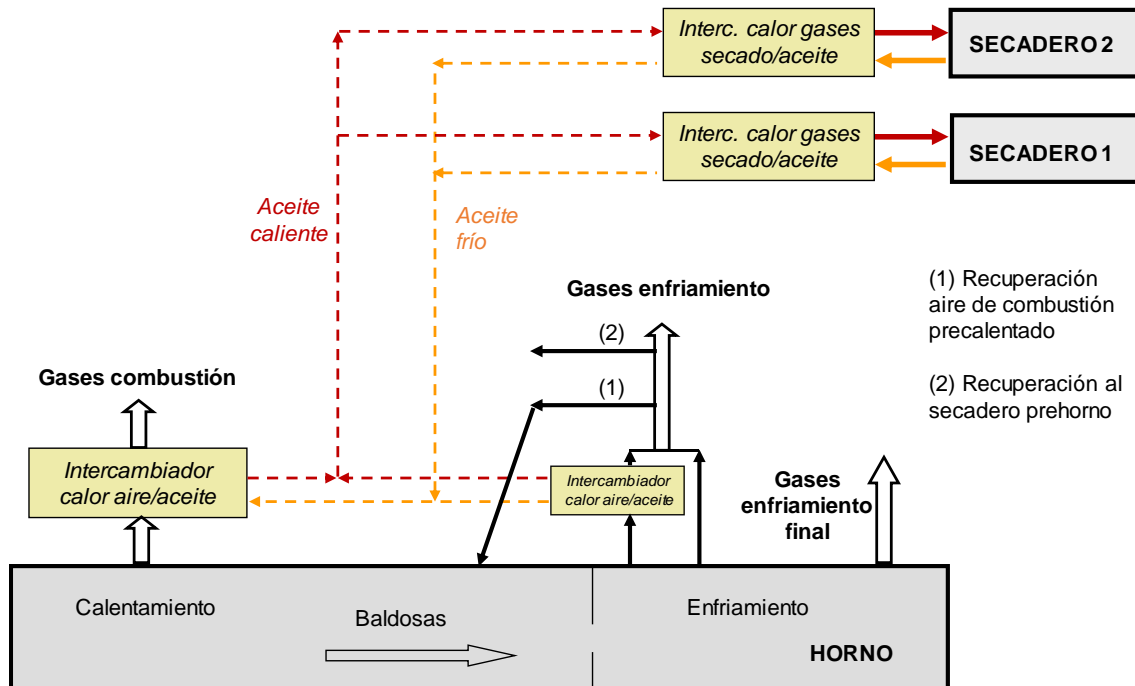


Figura 26. Esquema de aprovechamiento indirecto de calor residual en un horno mediante aceite térmico.

Además del empleo de intercambiadores de calor para el aprovechamiento del calor residual contenido en los gases de salida de los hornos, en los últimos años se ha desarrollado una tecnología basada en el intercambio de calor haciendo uso de fluidos con cambio de fase (Heat Pipe Heat Exchanger, HPHE). Dicha tecnología se ha implementado en la zona de enfriamiento de un horno, a modo de piloto, en el marco del proyecto europeo DREAM⁴, y se está estudiando su empleo en la chimenea de humos de hornos de cocción de baldosas, en el marco del proyecto europeo SMARTREC⁵.

En el caso estudiado en el proyecto DREAM, la instalación ha consistido en la recuperación de calor de la zona de enfriamiento de los hornos, basada en el empleo de HPHE, que calienta aire ambiente para ser utilizado aire de combustión en los quemadores del horno. El recuperador de calor, es capaz de recuperar hasta 100 kW de calor, obteniéndose un ahorro en gas natural y una reducción de las emisiones de CO₂ asociadas. El tiempo de retorno de esta instalación se ha calculado en torno a 15 meses. En la figura 27 se muestra una imagen del equipo utilizado.

⁴ <https://www.spire2030.eu/dream>

⁵ <http://smartrec.eu/>



Figura 27. Fotografía del HPHE utilizado para la recuperación de calor de la zona de enfriamiento (proyecto DREAM)

El proyecto SMARTREC, comprende la instalación de un sistema de recuperación de calor, de unos 65 kW de potencia, basado en el empleo de HPHE. Este sistema se ha implementado en la chimenea de salida de humos de un horno de cocción de baldosas cerámicas instalado en la planta piloto del Instituto de Tecnología Cerámica.

Las eficiencias obtenidas se han situado en el intervalo entre el 45 y el 65 %, en función de las condiciones de operación. Cabe destacar la rapidez de respuesta de la instalación ante cambios en alguna de las variables de trabajo, así como la facilidad de operación del sistema.



Figura 28. Fotografía del HPHE utilizado para la recuperación de calor de los gases de combustión en un horno piloto (proyecto SMARTREC)

3.4 FUTURAS TECNOLOGÍAS DE POSIBLE APLICACIÓN EN LA ETAPA DE COCCIÓN

La reducción de emisiones en la etapa de cocción implicará cambios tecnológicos, bien por cambio de combustible, o bien por cambios en la fuente de generación del calor.

- Modificaciones en el combustible: mezclas de gas natural con hidrógeno, o bien mezclas de gas natural con biometano (mezclas realizadas en la red, no de manera particular en cada empresa).
 - o Biometano generado a partir de biomasa
 - o Hidrógeno, generado por hidrólisis o cualquier otra tecnología, pero haciendo uso de electricidad de origen renovable
- Hornos eléctricos, de resistencias, con electricidad que deberá ser de origen cada vez más renovable.
- Sistemas híbridos, en los que haya ambos tipos de aporte de calor.