

DESTAQUE

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA FABRICAÇÃO DE PLACAS CERÂMICAS MEDIANTE A UTILIZAÇÃO DE ÓLEO TÉRMICO

por **Ana Mezquita, Eliseo Monfort, Eva Vaquer Cañete e Salvador Ferrer**, do Instituto de Tecnologia Cerâmica (ITC), Associação de Investigação das Indústrias Cerâmicas (AICE), Universidade Jaume I, Castellón, Espanha, **Miguel Angel Arnal**, da Azulev, SA, Onda, Espanha, **Javier Toledo e Miguel Angel Cuesta**, da Endesa Energia, SA, Madrid, Espanha

Neste artigo é apresentada uma instalação industrial experimental onde é utilizado um óleo térmico que permite obter uma economia energética média de 650 kW, em função das condições de funcionamento e dos materiais processados.

RESUMO

O processo de fabricação de placas cerâmicas consome uma grande quantidade de energia, maioritariamente energia térmica, que se obtém da combustão de gás natural. O aumento do custo deste combustível, assim como a situação económica do presente, faz com que este custo seja crítico para as empresas e pode minar a sua competitividade.

O processo de cozedura das placas cerâmicas em fornos de rolos não se destaca precisamente pelo aproveitamento da energia utilizada, visto que aproximadamente 50% perde-se através das chaminés de fumos e de arrefecimento do forno.

Com o propósito de melhorar o aproveitamento da energia consumida durante a operação de cozedura instalaram-se, nas chaminés de um forno, dois permutadores de calor, nos quais os gases provenientes do forno cedem o seu calor sensível a um óleo térmico, que posteriormente o transfere, através de outros dois permutadores, aos gases de secagem nas condutas de recirculação de um secador vertical. Neste trabalho apresenta-se uma instalação industrial experimental, na qual os resultados obtidos de economia energética se situam num valor médio de 650 kW, dependendo das condições de funcionamento e dos materiais processados.

Palavras-chave: eficiência energética, recuperação de calor, permuta de calor, óleo térmico.

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de placas cerâmicas requer um elevado consumo de energia, principalmente de energia térmica. Todas as fases do processo de fabricação consomem energia eléctrica. O consumo de energia térmica verifica-se, principalmente, em três etapas: secagem das suspensões cerâmicas por atomização, secagem dos suportes e cozedura das placas cerâmicas. A energia térmica utilizada no processo obtém-se, principalmente, pela combustão de gás na-



tural. Na Figura 1 mostra-se, esquematicamente, o processo de fabricação de placas cerâmicas. A cozedura de placas cerâmicas por monocozedura realiza-se em fornos de rolos que utilizam o gás natural como fonte de energia térmica. O consumo médio de energia nesta etapa do processo cifra-se à volta de 705 kWh/ton de produto cozido, dos quais entre 5 e 20% aproveitam-se na cozedura do produto e o resto perde-se pelas chaminés do forno, através das paredes e fissuras do forno e com as peças que saem do forno. Na Figura 2 mostra-se um diagrama de Sankey típico de um forno de rolos, no qual se representa de maneira esquemática o fornecimento percentual de cada uma das correntes que intervêm no balanço de energia ao forno. Considera-se que, aproximadamente, 50% da energia fornecida ao processo de cozedura perde-se através das chaminés (de fumos de combustão e de gases de arrefecimento). O propósito deste trabalho é precisamente aproveitar esta energia me-

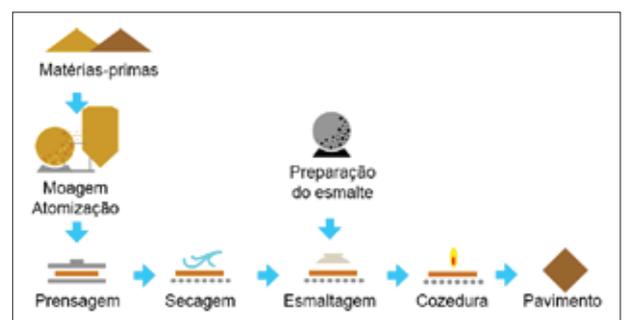


Figura 1
Processo de fabricação de placas cerâmicas

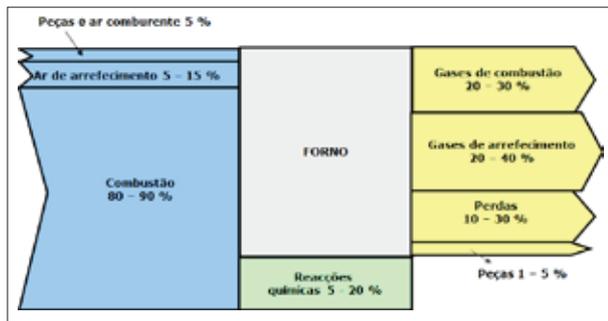


Figura 2
Diagrama de Sankey padrão de um forno de cozedura de placas cerâmicas

diante a instalação de um sistema de recuperação de calor. Presentemente, nos fornos de cozedura de placas cerâmicas aproveita-se, maioritariamente, o calor residual dos gases provenientes da chaminé de arrefecimento. Estes gases são compostos por ar isento de contaminantes, visto que são os gases resultantes do contacto directo do ar utilizado para reduzir a temperatura das peças na zona de arrefecimento. Contudo, devido ao facto de que durante a cozedura das peças cerâmicas, estas experimentam reacções químicas, os gases provenientes da chaminé de fumos possuem contaminantes, visto que contêm os produtos derivados da combustão do gás natural e das reacções químicas de materiais produzidas durante o processo de cozedura. Para poder aproveitar estes gases é necessário um tratamento prévio à sua utilização. As possibilidades para aproveitar o calor residual dos gases de combustão são as seguintes:

- **Instalação de um sistema de depuração** – Existe a possibilidade de depurar os gases de combustão e aproveitá-los, juntamente com os da zona de arrefecimento, nos secadores. Esta opção tem como factor limitativo a temperatura dos gases, visto que nos sistemas de depuração utilizados, os filtros de mangas, habitualmente, não podem ultrapassar temperaturas da ordem de 180 a 200 °C, dependendo do tipo de material das mangas.

- **Instalação de permutadores de calor** – Outra possibilidade consiste na instalação de permutadores de calor com um fluido intermédio que transporte o calor desde o forno até ao secador. Esta é a opção estabelecida no seguinte estudo, que além disso tem a vantagem de que, uma vez que depois do permutador de calor a temperatura dos gases de combustão diminui, é possível instalar um sistema de depuração dos mesmos, sem necessidade de diluí-los previamente para reduzir a sua temperatura.

2. OBJECTIVO

O objectivo deste estudo é melhorar o aproveitamento da energia consumida na operação de cozedura, mediante

a instalação de um novo sistema de recuperação de calor, que permite reduzir as perdas de calor através das chaminés e aproveitar esta energia na etapa de secagem.

3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A seguir, é feita a descrição da instalação e dos seus elementos principais.

3.1. Descrição da Instalação

A instalação consiste numa recuperação de calor, baseada num anel de óleo térmico que, mediante dois permutadores de óleo/ar instalados nas chaminés de fumos de combustão e de ar de arrefecimento do forno, capta o calor dos gases, reduzindo, portanto, a temperatura final destes e o seu caudal, de forma que a energia transfere-se desde o forno até ao secador utilizando um óleo como fluido térmico. O óleo térmico aquecido nos dois permutadores do forno une-se numa única corrente até ao secador. A conduta, pela qual o óleo térmico circula desde o forno até ao secador, está calorifugada, para minimizar as perdas energéticas. O calor nos secadores cede-se aos gases de secagem através de dois permutadores óleo/ar adicionais situados nos dois recirculadores, não fornecendo caudal de ar adicional aos secadores. O óleo térmico utiliza-se num circuito fechado, de forma que depois de ceder o calor aos gases do secador volta até aos permutadores de calor do forno para iniciar de novo o processo. Neste circuito existe um sistema de válvulas com bypass, que permitem manter a temperatura do óleo no valor óptimo, de forma que aumenta a eficiência global do processo. Em função das necessidades do sistema o óleo térmico cede calor, preferentemente a uma ou às duas recirculações dos gases de secagem.

Na Figura 3 mostra-se um esquema geral da instalação.

3.2. Descrição dos Elementos Principais

Seguidamente é feita a descrição do secador, do forno e dos permutadores de calor e fluido térmico.

3.2.1. Secador

O secador estudado é um secador vertical. O fornecimento de calor, anteriormente à intervenção proposta, realiza-se mediante a combustão de gás natural através de dois queimadores situados nas duas recirculações de ar. Na Figura 4 mostra-se um esquema do secador estudado. A circulação das peças, ao entrarem no secador, é em primeiro lugar ascendente, e depois de passarem pela zona alta do secador, descem até à zona de estabilização. Depois de entrar em contacto com as peças, uma parte dos gases de secagem recircula-se de novo até ao secador mediante dois recirculadores independentes, onde estão localizados

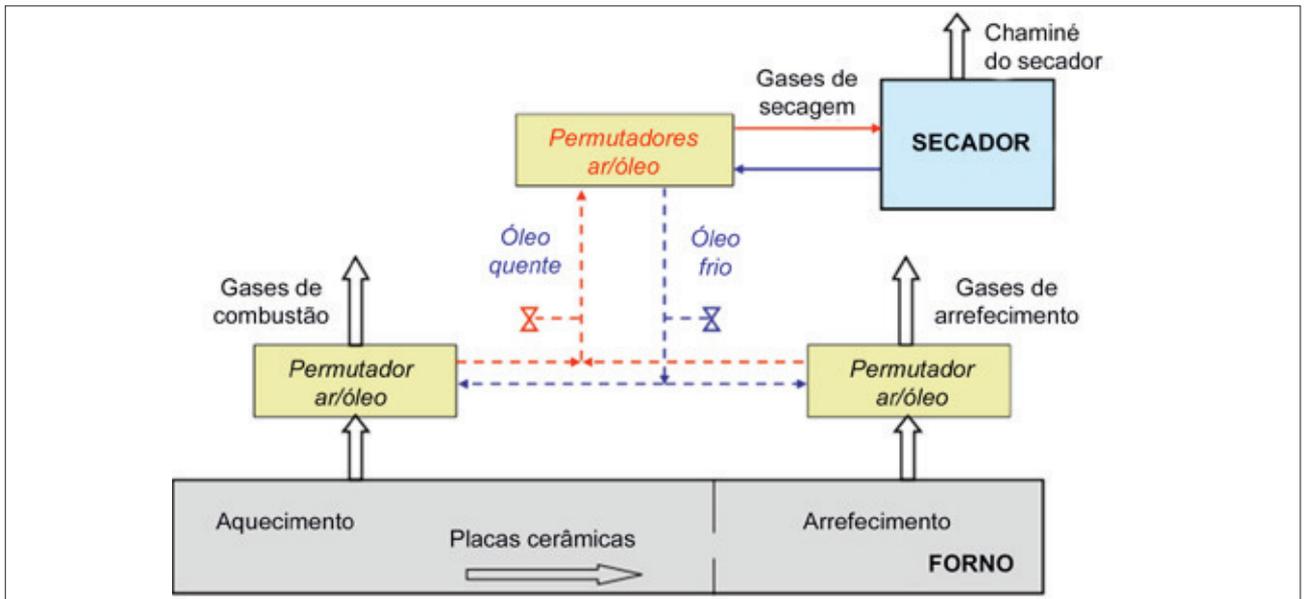


Figura 3
Esquema geral da instalação de recuperação de calor

os queimadores de veia de ar, e o restante derrama-se para a atmosfera através da chaminé. Nestas duas recirculações é onde estão localizados os dois permutadores de calor de óleo que aquecem os gases de secagem. As temperaturas nominais dos queimadores estabelecem-se para os gases de secagem que saem do secador, de modo que os elementos aquecedores (queimadores e permutador de calor) aquecem os gases que se introduzem no secador tanto quanto seja o necessário para que, na saída, a temperatura seja a estabelecida. O óleo chega até ao secador a uma temperatura de 200 °C, onde se vai distribuir automaticamente pelos dois permutadores. Depois da permuta de calor com os gases de secagem, o óleo retorna até ao forno a uma temperatura aproximada de 170 °C.

Nas Figuras 5 e 6 mostram-se duas fotografias da conduta pela qual circula o óleo desde o forno até ao secador.

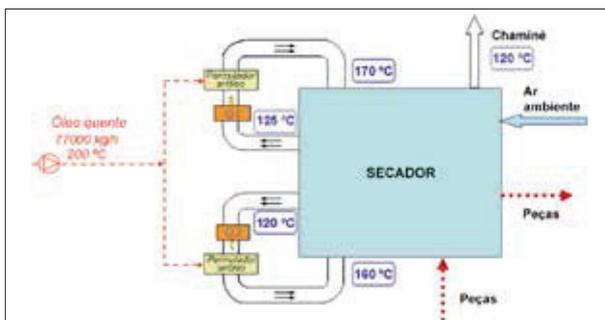


Figura 4
Esquema do secador

3.2.2. Forno

O forno estudado é um forno monoestrato de rolos, dividido em três zonas: aquecimento, cozedura e arrefecimento.

O fornecimento de calor realiza-se mediante a combustão de gás natural em queimadores de alta velocidade, distribuídos ao longo das paredes laterais do forno por cima e por baixo do plano que delimitam os rolos, nas zonas de aquecimento e cozedura. Anteriormente à instalação do sistema de recuperação, os gases de combustão do forno, depois de diluírem-se com ar ambiente, emitiam-se directamente para a atmosfera. Depois da instalação do sistema de recuperação, os gases não se diluem com ar ambiente e transferem calor ao fluido térmico. Na Figura 7 mostra-se o permutador óleo/ar instalado na saída dos gases de combustão do forno. Os gases de arrefecimento recolhem-se das zonas de arrefecimento rápido, arrefecimento indirecto e arrefecimento final. Desta chaminé, recupera-se uma par-



Figura 5
Conduta calorifugada que transporta o óleo térmico até ao secador



Figura 6
Chegada da conduta de óleo térmico ao secador

te para um secador pré-forno, outra parte para os queimadores do forno e o restante verte-se para a atmosfera.

O permutador de calor da zona de arrefecimento instalou-se na conduta de recuperação dos gases provenientes do arrefecimento rápido, visto que são os que possuem maior temperatura.

3.2.3. Permutadores de calor e fluido térmico

Nos quatro permutadores de calor o óleo térmico circula em contracorrente com os gases provenientes do forno, para alcançar uma maior eficiência energética.

O óleo refinado foi formulado especialmente como fluido de permuta térmica e foi aditivado convenientemente para proporcionar estabilidade térmica e resistência à oxidação. Deste modo, comporta-se de forma adequada face aos aumentos de temperatura ocorridos durante a sua utilização e ao espaçamento dos intervalos de mudança de óleo.

As suas bases refinadas proporcionam a este fluido térmico uma elevada resistência térmica assim como propriedades antioxidantes, o que faz diminuir consideravelmente a formação de materiais insolúveis e depósitos sobre as tubagens assegurando assim a perfeita circulação e transmissão de calor do fluido, evitando a obstrução dos circuitos.

Além disso, este fluido apresenta uma viscosidade baixa que permite o arranque imediato a baixas temperaturas, excelente transmissão de calor e oferece assim um maior rendimento da bomba. Com tudo isto, permite garantir um perfeito funcionamento e um alto rendimento nas instalações de tipo fechado sem contacto directo com o ar e dotadas de meios mecânicos de circulação. As propriedades do óleo térmico mostram-se na Tabela I.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir, é feita a determinação da economia energética e a determinação das condições de operação do secador.

4.1. Determinação da Economia Energética

A medição e verificação da economia energética realizaram-se segundo a metodologia descrita no Protocolo Internacional de Performance da Medição e Verificação (IPMVP – International Performance Measurement & Verification Protocol) promovido pela Efficiency Valuation Organization (EVO). A Medição e Verificação (M&V) é um processo que consiste em realizar de maneira correcta medições de consumo energético, para estabelecer de forma fiável a economia real gerada numa instalação dentro de um programa de gestão energética. A economia de energia não se pode medir de forma directa visto que representa a ausência do consumo de energia. Por este motivo, a economia determina-se comparando o consumo, ou a procura, antes e depois da implementação de um projecto de eficiência energética, ao mesmo tempo que se realizam os ajustamentos segundo a variação das condições iniciais.

O consumo energético do secador realizou-se tomando a leitura do caudalímetro de gás natural instalado no secador. Esta leitura realizou-se em pequenos intervalos de tempo, com a finalidade de registar as incidências produzidas, e sempre em intervalos de tempo total, superiores a 3 horas.

Para além da leitura do consumo no caudalímetro de gás anotou-se a pressão e a temperatura do gás natural no interior da conduta, e mediante estes dados é possível normalizar o caudal de gás, através da seguinte equação:

$$Q_N = Q \cdot \left(\frac{T_0}{T_{\text{gas}}} \right) \cdot \left(\frac{P_{\text{gas}} + P_{\text{atm}}}{P_0} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Nesta equação Q é o caudal obtido a partir da leitura directa do caudalímetro (m^3/s), T_{gas} é a temperatura do gás



Figura 7
Permutador óleo/ar na chaminé dos gases de combustão

Tabela I
Características do óleo térmico usado

PROPRIEDADE	NORMA	VALOR
Temperatura máxima de operação (°C)	–	350
Viscosidade cinemática a 40 °C (cSt)	ASTM D 445	20 – 25
Índice de viscosidade	ASTM D 2270	95
Densidade a 15 °C (g/cm ³)	ASTM D 1298	0,860
Ponto de inflamação (°C)	ASTM D 92	210
Ponto de congelação (°C)	ASTM D 97	-14

natural na conduta (K), T_0 é a temperatura de referência (273 K), P_{gas} é a pressão do gás na conduta (N/m²), P_{atm} é a pressão atmosférica média (N/m²) e P_0 é a pressão de referência (1,013 x 10⁵ N/m²).

4.2. Determinação das Condições de Operação do Secador

Com a finalidade de validar que o sistema de recuperação de calor não afecta as condições da operação de secagem, determinou-se experimentalmente a distribuição de temperatura no interior do secador, nas diferentes situações analisadas, e as propriedades dos gases de secagem na chaminé de saída do secador. A determinação experimental do ciclo de secagem foi levada a cabo mediante um dispositivo mostrado na Figura 8 que consiste num recipiente metálico, de dimensões de 33 cm x 33 cm, com 2,5 cm de espessura, recoberto externamente com fibra cerâmica isolante.

No seu interior está situado o sistema de aquisição de dados, onde se ligam 4 termopares de tipo K. Junto à electrónica de aquisição de dados, situam-se duas bolsas de água, que se congelam antes de iniciar o ensaio, para assegurar que o sistema de aquisição de dados não supera os 50 °C.

A entrada em funcionamento e a detenção da aquisição de dados, assim como a descarga dos valores armazenados, realiza-se através de um computador, utilizando um software específico.

A determinação dos caudais gasosos realizou-se com um tubo pitot tipo S, segundo a norma UNE 77225:2000.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Realizou-se um estudo preliminar do funcionamento da instalação com o produto maioritário. A tomada das medições com recuperação e sem recuperação de calor foi realizada em condições de produção similares, com o propósito de que a comparação seja aceite e se tenha em conta os critérios do IPMVP. Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos nas duas situações de funcionamento analisadas. Na Tabela II mostram-se os parâmetros de funcionamento do secador estudado nas situações analisadas.

Com a finalidade de validar o funcionamento do sistema de recuperação de calor, analisaram-se as propriedades dos gases de secagem enquanto se estava a recuperar calor desde os fornos e sem a recuperação, com o intuito de comprovar se estas propriedades são afectadas pelo sistema de recuperação utilizado. Na Tabela III mostram-se as propriedades dos gases de chaminé do secador nas situações analisadas. Observa-se que as condições dos gases de secagem apenas são modificadas pelo sistema de recuperação usado. A menor humidade absoluta dos gases de secagem, com o sistema de recuperação de calor, corresponde com o menor consumo de gás natural do secador, visto que um dos produtos da combustão do gás natural é o vapor de água. O ciclo de secagem experimental levou-se a cabo utilizando um dispositivo indicado no parágrafo 4.2 (ver a Figura 8). Na Figura 9 mostram-se os resultados obtidos sem recuperação de calor e na Figura 10 apresentam-se os resultados obtidos com recuperação de calor.

Os resultados obtidos mostram que não existem diferenças de temperaturas importantes entre a zona central e lateral do secador. Durante o trecho ascendente, a temperatura dos gases na parte lateral do secador é ligeiramente superior que no centro. Em ambas as situações, esta situação inverte-se durante o trecho descendente. A máxima diferença de temperatura observada ascende a, aproxima-

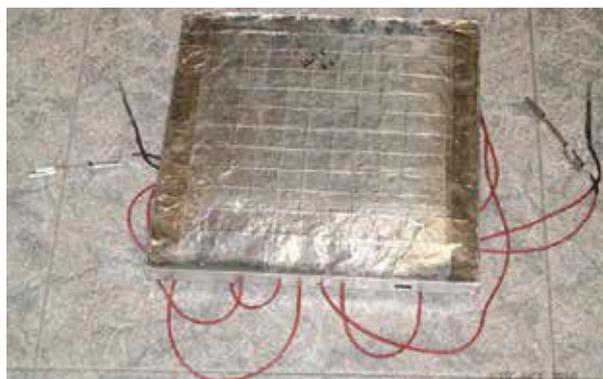


Figura 8
Dispositivo usado para determinar o ciclo de secagem

Tabela II
Parâmetros de funcionamento do secador sem e com recuperação

PARÂMETRO		SEM RECUPERAÇÃO	COM RECUPERAÇÃO
Produto	Tipo de composição fabricada	Grés porcelânico	
	Formato (cm x cm)	30 x 60	
	Produção (kg/h)	2,30	2,36
	Humidade de entrada (%)	6,35	6,35
	Humidade de saída (%)	0,05	0,06
Secador	Temperatura nominal do queimador 1 (°C)	125	125
	Temperatura nominal do queimador 2 (°C)	120	120

Tabela III
Caracterização dos gases de chaminé do secador sem e com recuperação de calor

PARÂMETRO	SEM RECUPERAÇÃO	COM RECUPERAÇÃO
Temperatura (°C)	120	120
Humidade absoluta (kg de água/kg de ar seco)	0,100	0,090
Caudal de gases (m ³ /h)	7100	7900

damente, 15 °C. Observa-se que quando a recuperação de calor está em funcionamento, alcançam-se temperaturas mais elevadas na segunda metade do ciclo de secagem. O ciclo de secagem é, formalmente, similar em ambas as situações, pelo que pode concluir-se que o modo de recuperação de calor proveniente do forno apenas incide sobre o ciclo de secagem. Na Tabela IV mostra-se a economia energética alcançada no secador nas condições de trabalho estabelecidas, depois de instalar-se o sistema de recuperação de calor. Observa-se uma redução no consumo de gás natural de 70%, o que implica uma redução das emissões de 650 ton CO₂/ano. A economia energética no secador está relacionada com a diferença de temperatura que se consiga no óleo térmico nos permutadores do forno (diferença entre a temperatura de entrada e de saída do óleo): para maior diferença de temperatura maior economia, tal

como se observa na Figura 11. Em condições de funcionamento médias, a diferença de temperatura que se consegue no forno situa-se no intervalo entre 28 e 30 °C, com o que se consegue uma potência média recuperada das saídas do forno entre 600 e 700 kW.

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões do estudo realizado são as seguintes:

- Desenvolveu-se uma instalação experimental de recuperação de calor que permite a recuperação simultânea de energia desde a chaminé dos gases de combustão e de arrefecimento numa única corrente, utilizando um óleo térmico.
- Comprovou-se que a instalação deste sistema não modifica as condições de operação nem do forno nem do seca-

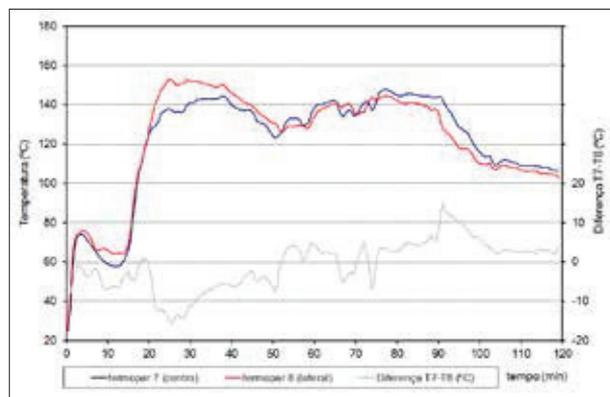


Figura 9
Temperatura dos gases de secagem sem recuperação

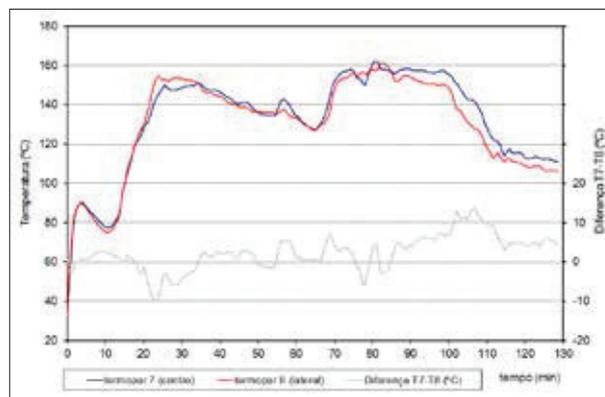


Figura 10
Temperatura dos gases de secagem com recuperação

Tabela IV
Economia energética do secador com recuperação

PARÂMETRO	SEM RECUPERAÇÃO	COM RECUPERAÇÃO
Consumo de gás natural (m ³ N/h)	74	22
Consumo PCS (kW)	870	261
Economia energética (%)	–	70
Redução de emissões (ton CO ₂ /ano)	–	650

dor, de maneira que não se modificam as propriedades do produto processado.

- Os estudos realizados mostram que com este sistema de recuperação de calor é possível obter uma redução média no consumo de gás natural no secador entre 600 e 700 kW, em função do material processado e das condições de trabalho do forno e do secador.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Decisão da Comissão n.º 2007/589/CE, de 18 de Julho de 2007, pela qual se estabelecem as directrizes para o acompanhamento e a notificação das emissões de gases de efeito de estufa em conformidade com a Directiva n.º 2003/87/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Outubro de 2003.
- [2] Directiva n.º 2003/87/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Outubro de 2003, pela qual se estabelece um regime para o comércio de direitos de emissão de gases de efeito de estufa na Comunidade e pela qual se modifica a Directiva n.º 96/61/CE, do Conselho, de 24 de Setembro de 1996.
- [3] Directiva n.º 2009/29/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009, pela qual se altera a Directiva n.º 2003/87/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Outubro de 2003, para aperfeiçoar e ampliar o regime comunitário de comércio de direitos de

emissão de gases de efeito de estufa.

- [4] Escardino, A., "El Esfuerzo en Innovación de la Industria Cerámica de la Comunidad Valenciana para Reducir las Emisiones de Dióxido de Carbono", in Simposio Internacional sobre el Cambio Climático, desde la Ciencia a la Sociedad, Valência, Generalitat Valenciana, 2005. pp. 121-133.
- [5] Escardino, A., Jarque, J. C., Moreno, A., & De La Torre, J., "Secado de Materiales Cerámicos (I) – Consideraciones Generales – Isotermas de Equilibrio", Técnica Cerámica, No. 185, pp. 452-462, 1990.
- [6] Escardino, A., Jarque, J. C., Moreno, A., & De La Torre, J., "Secado de Materiales Cerámicos (I) – Cinética del Secado de Piezas Cerámicas de Pavimento y Revestimiento – Modelos Dinámicos", Técnica Cerámica, No. 190, pp. 34-42, 1991.
- [7] Escardino, A., Gallégo, M. A., Ibáñez, M. J., & Negre, F., "Secado de Materiales Cerámicos – I. Factores que Afectan a la Humedad de Equilibrio", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Volume 26, No. 6, pp. 367-373, 1987.
- [8] Mallol, G., Mezquita, A., Llorens, D., Jarque, J. C., Sahún, J., & Valle, F., "Estudio de la Operación de Secado en los Soportes de las Baldosas Cerámicas en Secaderos Verticales, Cerámica Información, No. 287, pp. 81-93, 2002.
- [9] Mezquita, A., Monfort, E., & Zaera, V., "Sector Azulejero y Comercio de Emisiones: Reducción de Emisiones de CO₂, Benchmarking Europeo", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Volume 48, No. 4, pp. 211-222, 2009.
- [10] Monfort, E., Mezquita, A., Granel, R., Vaquer, E., Escrig, A., Miralles, A., & Zaera, V., "Análisis de Consumos Energéticos y Emisiones de Dióxido de Carbono en la Fabricación de Baldosas Cerámicas", XI Congreso Mundial da Qualidade do Azulejo e do Pavimento Cerâmico (Qualicer'2010), Castellón, Câmara Oficial de Comércio, Indústria e Navegação de Castellón, 2010.

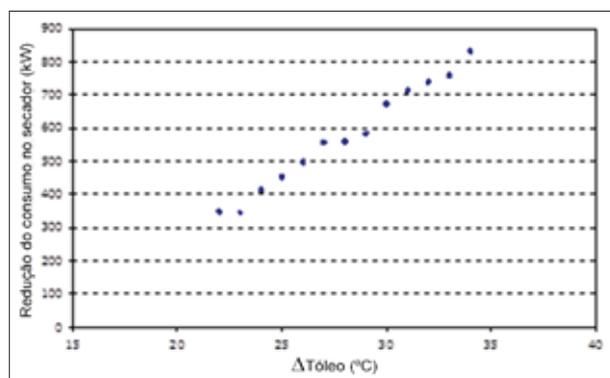


Figura 11
Economia energética no secador em função da diferença de temperatura do óleo

AGRADECIMENTOS

O estudo apresentado foi financiado pelo Instituto da Média e Pequena Indústria Valenciana (IMPIVA) dentro do Programa de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico através do projecto IMIDTF/2010/179.