

Como Melhorar a Eficiência Energética na Indústria de Revestimentos Cerâmicos

Guido Nassetti*

Centro Cerâmico de Bologna, Via Tommaso Martelli, 26 40138 Bologna, Itália

**e-mail: nassetti@cencerbo.it*

Resumo: Atualmente, tanto as instalações quanto os equipamentos empregados na indústria de revestimentos cerâmicos já apresentam um bom nível de eficiência energética graças a um grande esforço realizado nas últimas duas décadas pelos fornecedores de equipamentos, em colaboração com as empresas cerâmicas e com instituições de pesquisa. No entanto, os custos de energia afetam o custo de fabricação entre 20 e 25%, dependendo do tipo de produto. O que mais se pode fazer? É ainda possível obter novas melhorias na eficiência energética do processo produtivo? Após uma visão geral das principais rotas seguidas no passado para aumentar a eficiência energética do processo produtivo cerâmico, neste artigo será dada atenção às atuais melhorias realizadas nos últimos anos, com o objetivo de sublinhar as estratégias e metodologias ainda em vigor, e as principais tecnologias de eficiência energética aplicadas no setor. Em especial, serão apresentadas novas soluções para a recuperação de calor perdido dentro dos modernos fornos a rolos, a recuperação de ar quente proveniente dos fornos dos atomizadores, e a cogeração de calor e energia com pequenas turbinas a gás, e serão analisados estudos de caso recentes. Além disso, serão consideradas estratégias para a redução do consumo de eletricidade e métodos de controle de consumo de energia.

Palavras-chave: *eficiência energética, cogeração, revestimentos cerâmicos.*

1. Introdução

Atualmente tem-se falado em melhorar a gestão da energia no processo de produção porque as instalações que já estão sendo utilizadas na indústria cerâmica apresentam, em geral, um bom nível de eficiência energética. Com efeito, a partir da primeira metade dos anos 1980, devido a um forte aumento nos custos de energia, os fabricantes de equipamentos, em colaboração com empresas de cerâmica e instituições de pesquisa, começaram a adotar e desenvolver soluções inovadoras para economia de energia, resultando em um bom desempenho dos sistemas de energia e das máquinas de produção já no início dos anos 1990. Apesar disto, os custos energéticos pesam sobre o custo de produção: na Itália representam cerca de 20%, e no Brasil ainda mais, cerca de 30% para certos tipos de produto; destes custos, um terço é atribuído à energia elétrica e dois terços à energia térmica.

É de conhecimento geral que o processo de produção de revestimentos cerâmicos é de elevado consumo de energia: as etapas de maior consumo de energia térmica estão relacionadas com a preparação da massa por via úmida, devido aos processos de secagem da barbotina (polpa cerâmica), secagem das peças prensadas e queima; as etapas onde se consome mais energia elétrica estão relacionadas à moagem das matérias-primas, à prensagem, ao tratamento da superfície no final da linha na produção de porcelanato e à depuração de efluentes gasosos. É necessário, portanto, estudar o que se tem feito nas últimas duas décadas para reduzir o consumo de energia na indústria cerâmica, a fim de identificar se as estratégias continuam a ser válidas, e em seguida concentrar-se no que é feito mais recentemente, para verificar-se se as técnicas ainda são válidas.

2. Estratégias para Redução do Consumo de Energia

Em anos recentes as estratégias adotadas e as medidas tomadas foram diferentes. A primeira etapa foi conter o desperdício da energia no processo de fabricação, realizando a recuperação da energia perdida nas máquinas térmicas, especialmente nos fornos de queima. Exemplos disto são: (i) a recuperação do calor dos gases dos

fornos para os atomizadores (o primeiro equipamento foi construído na cerâmica Stylon de Novara, em 1979, com base em um estudo realizado pelo Centro Cerâmico de Bolonha), (ii) recuperação de calor do ar de resfriamento dos fornos para a secagem das placas cerâmicas ou para aquecimento ambiente e, finalmente, mais recentemente (início dos anos 2000), (iii) recuperação de calor de condensação parcial de vapor de água contido em gases de escape atomizador.

Posteriormente a atenção foi voltada para a conservação de energia, com a adoção, já no projeto das máquinas térmicas, de dispositivos para aumentar a eficiência e reduzir o consumo de energia, como, por exemplo, a adoção de materiais refratários de baixa densidade para reduzir a massa térmica da estrutura do forno, a adoção de queimadores de alta velocidade para aumentar a eficiência de troca térmica, e o controle e regulação da temperatura e da pressão na zona de queima.

Por último, o conceito de economia de energia evoluiu para a utilização racional da energia com a aplicação de tecnologias inovadoras, ou seja, novos sistemas de produção com maior eficiência energética em relação aos sistemas convencionais. Podem ser citadas, por exemplo, as inovações na moagem das massas, com a introdução do moinho contínuo em colméia (1985), do moinho contínuo cônico e do moinho contínuo cilíndrico classificatório (1995), e ainda do moinho contínuo com módulos independentes (2005), ou a tecnologia de granulção a seco, que vem ganhando crescente interesse devido a uma redução drástica no consumo de energia térmica em relação ao processo por via úmida.

3. Melhoria da Eficiência Energética do Processo Produtivo

No início dos anos 1990 teve início a aplicação na indústria cerâmica da cogeração de energia elétrica e térmica para os atomizadores. Atualmente, no setor de revestimentos cerâmicos da Itália são produzidos cerca de 145 MW, com mais de trinta plantas de cogeração.

Por último, a consciência da importância do gerenciamento de energia de forma racional induziu os gestores de energia (Gestão de Energia) a adotar técnicas para a detecção de consumos periódicos de energia em diferentes estágios do processo de produção (Monitoração), a calcular o consumo específico e comparar com bases de dados de referência (Benchmarking), com objetivo de avaliar e determinar qualquer ação para reduzir este consumo (Segmentação). As bases de dados para o consumo energético da indústria de revestimentos cerâmicos (Figura 1) surgem, por exemplo, de estudos e pesquisas realizadas pelo Centro Cerâmico de Bolonha, em colaboração e com o apoio da Confederação das Indústrias Cerâmicas.

Mas o que pode ser feito para melhorar a eficiência energética do processo de produção? Certamente, o exercício da Monitoração e da Segmentação, que é a abordagem básica para a Gestão de Energia, feita pelo responsável técnico por esta função. Deve-se também garantir uma regulagem adequada dos equipamentos de acordo com o processo de produção; em outras palavras, deve-se combinar a gestão de máquinas e equipamentos, que devem ser energeticamente eficientes, com os requisitos de produção estabelecidos pelo mercado, que atualmente requer uma grande flexibilidade nas tipologias e tamanhos. Neste sentido, talvez seja interessante estudar as estratégias de racionalização das linhas de produção, por exemplo, verificando a possibilidade de dedicar uma linha a um produto bem definido (formato grande, médio ou pequeno; espessura normal, aumentada ou diminuída; etc.) para reduzir transientes devidos às mudanças de produção.

A recuperação do calor residual do processo produtivo é sempre uma estratégia válida para reduzir o consumo de energia, mesmo quando usada em máquinas com alta eficiência energética; de fato, é sempre uma recuperação do calor, que de outra forma seria enviado para a atmosfera.



Figura 1. Bancos de dados dos consumos energéticos na indústria cerâmica.

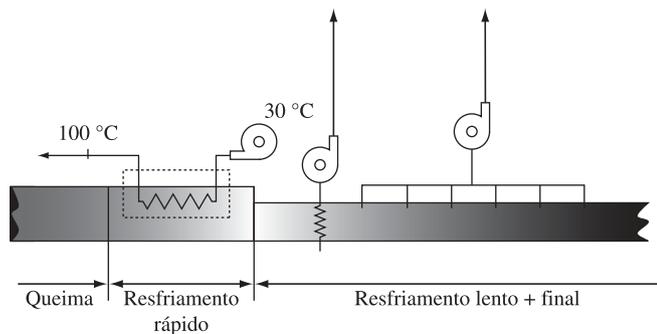


Figura 2. Recuperação de calor para os queimadores por um pequeno aquecimento do ar de combustão (economia de energia de até 5%).

Recentemente os fornecedores de equipamentos têm feito grandes esforços para melhorar a eficiência energética dos fornos de queima, utilizando cada vez mais a recuperação das perdas de energia. De fato, um forno a rolos normal apresenta um balanço energético de tal forma que 23% da energia que entra no forno se dispersa com os gases de escape e outros 55% são dispersos com o ar de resfriamento do equipamento.

Em seguida surgiram os fornos de última geração, que apresentam diversas soluções para a recuperação térmica do ar de resfriamento do forno, como o ar de combustão. Uma primeira solução é aquecer o ar destinado ao queimador pelo uso de um trocador de calor posicionado na zona de resfriamento rápido do forno (Figura 2); uma segunda solução (Figura 3) consiste em retirar da chaminé de resfriamento uma quantidade adequada de ar e conduzi-lo, após filtração, ao ventilador de ar de combustão. Ambos os dispositivos permitem o pré-aquecimento do ar destinado aos queimadores a partir da temperatura ambiente até aproximadamente 100 °C, com a vantagem de reduzir o consumo específico do forno em 5%. A realização de ambas as soluções descritas (Figura 4) permite pré-aquecer o ar de combustão a uma temperatura de 160 °C, alcançando economias de energia de até 10%.

Uma solução mais complexa (Figura 5) consiste em dividir a chaminé de extração de ar de resfriamento e retirar da chaminé de extração um determinado volume de ar a uma temperatura mais elevada para ser enviado, após filtração, a trocadores de calor posicionados na zona de resfriamento rápido, e depois para os queimadores. Desta forma é possível pré-aquecer o ar de combustão até 215 °C e obter uma economia de energia de 15%. Além disso, dado que o volume de ar de resfriamento que sai da primeira chaminé é excedente para os queimadores, pode-se destinar uma quantidade

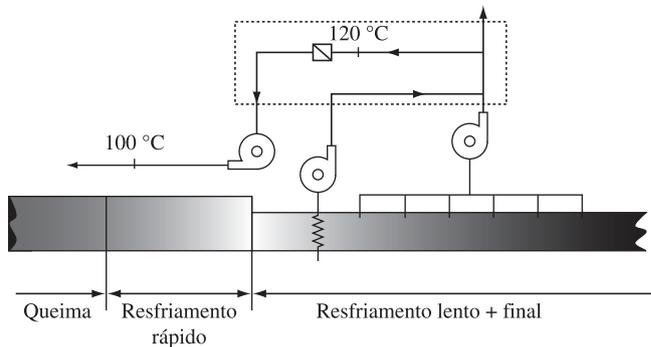


Figura 3. Recuperação de calor para os queimadores por um pequeno aquecimento do ar de combustão (economia de energia de até 5%).

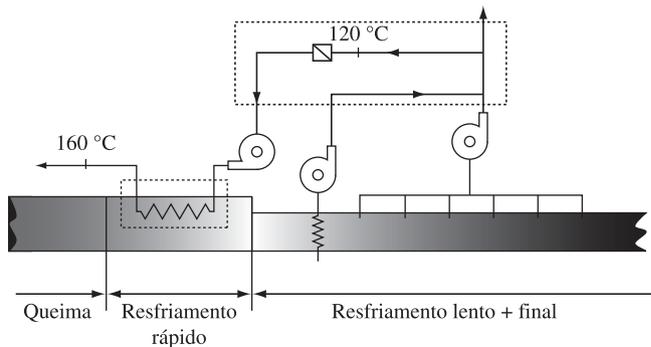


Figura 4. Recuperação de calor para os queimadores por um médio aquecimento do ar de combustão (economia de energia de até 10%).

adequada de ar para a secagem das peças, criando-se uma recuperação adicional de energia que de outra forma seria perdida.

Como exemplo pode-se citar os resultados de um levantamento energético realizado pelo Centro Cerâmico de Bolonha sobre as instalações da Cerâmica Castelvetro de Solignano (Modena, Itália), que sofreu uma completa reestruturação energética. A unidade de produção da Cerâmica Castelvetro tem uma capacidade produtiva de 4.500.000 de m²/ano de grés porcelanato esmaltado. O setor de moagem é equipado com dois moinhos contínuos tipo colméia com capacidade de 160 m³/cad e um atomizador com capacidade de evaporação de 11.000 L. São quatro as linhas de produção de porcelanato. A cerâmica instalou em 1993 um sistema de cogeração com turbina a gás com 3,8 MW de potência elétrica no âmbito da ISO, que abrange as necessidades de eletricidade de todo o sistema e que recupera o calor dos gases de escape para o atomizador.

Antes da atualização o setor de queima era constituído por dois fornos de dois canais, um instalado em 1989, com capacidade de produção de 7.800 m²/dia, e o outro instalado em 1994, com capacidade de produção de 8.300 m²/dia. A reestruturação energética da unidade, feita em 2009, consistiu (i) na substituição do forno mais antigo por um moderno forno monocanal SACMI FMS 2950/94,5 dotado de um sistema de recuperação de calor para pré-aquecimento

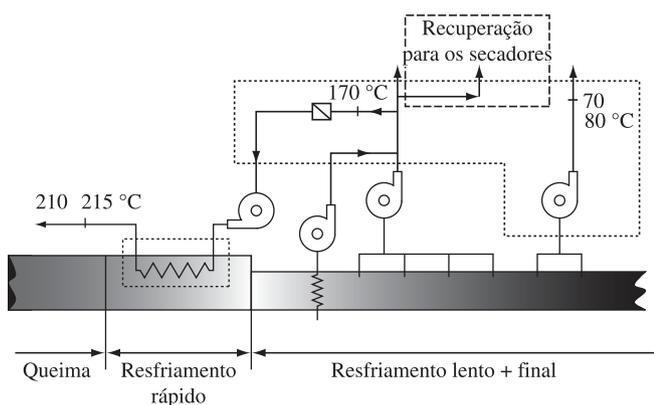


Figura 5. Recuperação de calor para os queimadores por um superaquecimento do ar de combustão (economia de energia de até 15%).

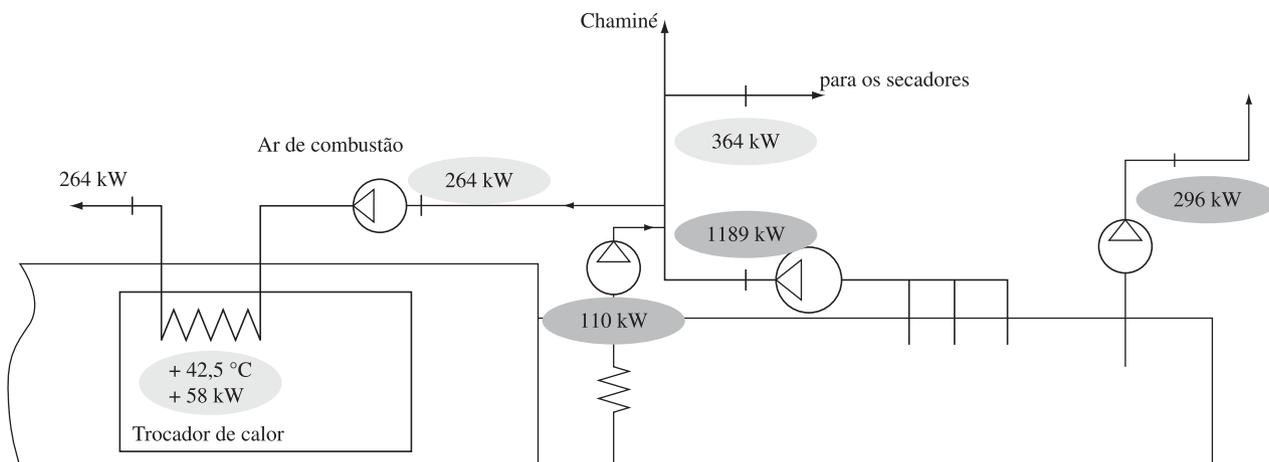
do ar de combustão descrito anteriormente, e (ii) na recuperação de calor, em ambos os fornos, do ar de resfriamento para os secadores.

A pesquisa mostrou que (Figuras 6 e 7) quase 40% do calor que sai como ar de resfriamento, equivalente a 20% do calor disponível no forno, pode ser recuperado seja para os queimadores do próprio forno, seja para a secagem do suporte cerâmico. Graças ao pré-aquecimento do ar de combustão, o forno apresenta consumo específico inferior a 70-80 kcal.kg⁻¹ de produto queimado em relação aos fornos a rolos tradicionais para grés porcelanato, semelhante ao consumo para queima de produtos com massa tipo monoporosa. Graças à recuperação de calor para a secagem, os secadores apresentaram consumo específico inferior a 30 kcal.kg⁻¹ de produto seco. Portanto, com esta reestruturação a empresa de cerâmica pode economizar cerca de 700.000 Sm³ (m³ padrão, a 760 mm.Hg⁻¹ e 15,6 °C) de gás natural por ano.

4. Cogeração de Calor e Energia Elétrica

Outra tecnologia energética ainda válida e cuja aplicação deve ser disseminada é a cogeração de calor e energia elétrica. A cogeração é uma tecnologia energética, pois a recuperação do calor que sai do sistema de cogeração (motor ou turbina), em favor do processo produtivo, permite a obtenção de rendimentos energéticos entre 85% e mais de 90%. Os fatores que determinam o êxito da implementação da cogeração são: (i) o aproveitamento pleno do calor produzido pelo sistema de cogeração, e (ii) o tempo de operação do sistema, pois quanto mais calor é recuperado e quanto mais tempo o sistema funciona, tanto maior é seu rendimento. Deste modo, entende-se que é essencial para o sucesso da implementação da cogeração a simultaneidade da operação dos equipamentos que recebem calor e dos usuários da energia elétrica produzida. As principais diferenças entre os motores e as turbinas, que nas indústrias italianas de revestimentos cerâmicos são alimentados quase exclusivamente a gás natural, são apresentadas na Figura 8.

A rentabilidade da cogeração depende: (i) do custo do investimento, (ii) da gestão do sistema de cogeração (em função da simultaneidade de cargas e do tempo de operação) e (iii) dos custos de energia; a cogeração é tão mais vantajosa quanto maior o custo da energia elétrica e menor o custo do combustível. Este último aspecto é atualmente o fator mais crítico na definição da rentabilidade do



$$\begin{aligned} \text{Calor perdido com o resfriamento} &= 1189 + 296 + 110 = 1595 \text{ kW} \\ \text{Calor recuperado} &= 206 + 58 + 364 = 628 \text{ kW} \\ \text{Percentual de calor recuperado do ar de resfriamento} &= \frac{628 \text{ kW}}{1595 \text{ kW}} = 39,4\% \end{aligned}$$

$$\text{Percentual de calor recuperado em relação ao calor de entrada no forno} = \frac{628 \text{ kW}}{3082 \text{ kW}} = 20,4\%$$

Figura 6. Balanço de calor destinado à recuperação.

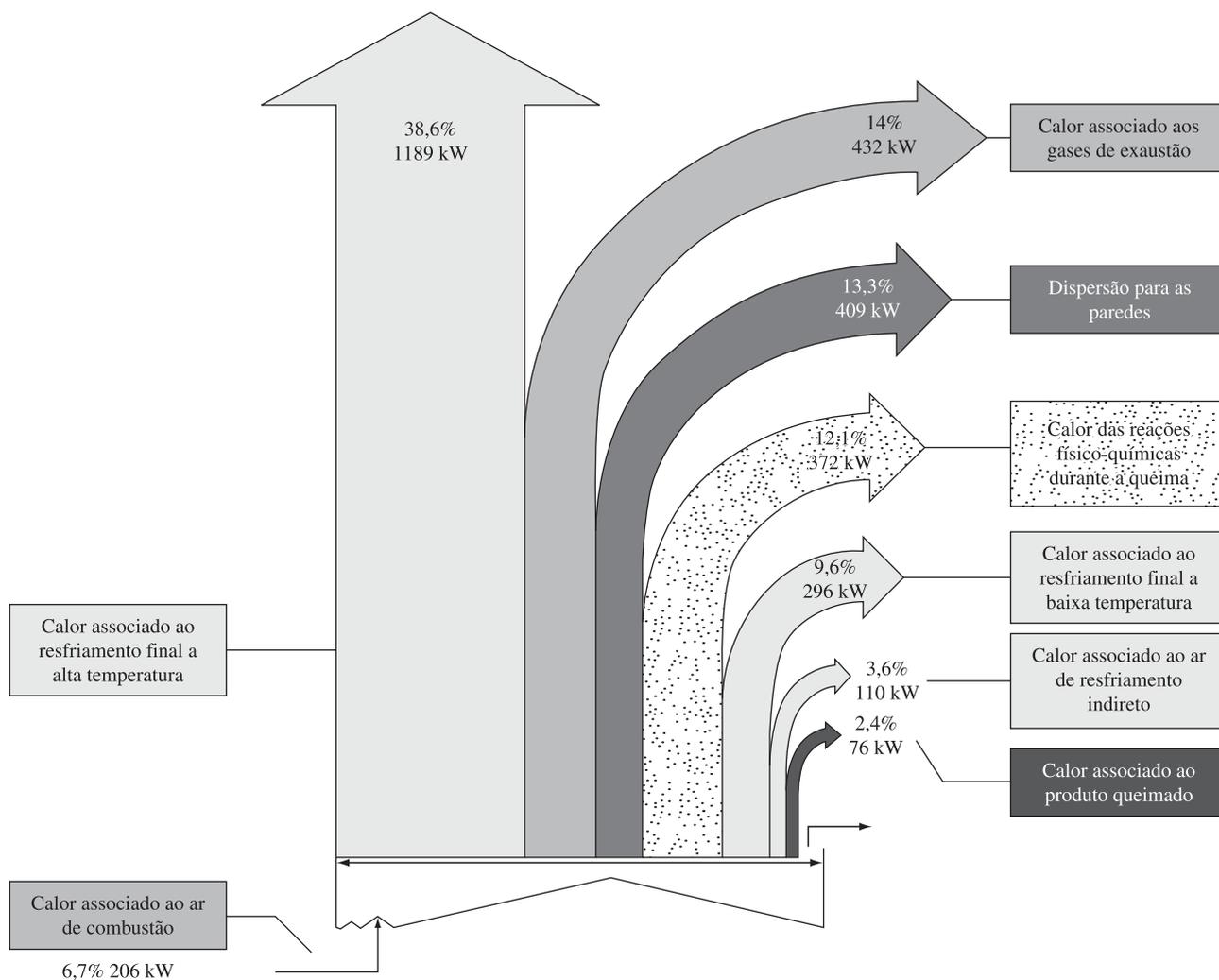


Figura 7. Diagrama de Sankey (forno SACMI FMS 2950/94,5).

sistema de cogeração, depois do tempo de retorno do investimento, dada a contínua e incerta variação nos preços da energia nos últimos anos. Atualmente, a energia elétrica produzida por cogeração envolve mais de trinta fábricas de cerâmica, com centrais de cogeração com 1 a 7 MW de potência, quase todas pertencentes a fábricas de grande porte.

O maior obstáculo a uma maior utilização da cogeração é o custo do investimento, o que retarda a aplicação em pequenas e médias empresas, que muitas vezes não exigem grandes necessidades de calor porque não possuem atomizador. Para tornar acessível a aplicação da cogeração também para os usuários com consumo não muito elevado, ou, pelo menos, para tornar possível a aplicação pontual da cogeração mesmo para máquinas individuais (secadores para os suportes cerâmicos, secadores de leito fluidizado para os pós), desde 2005 estão sendo consideradas microturbinas a gás com potência entre 30 e 250 kW.

Uma microturbina é composta essencialmente por (Figura 9) um compressor, um combustor, uma turbina, um gerador de alta velocidade e um recuperador. Normalmente, a turbina, o compressor e o gerador de corrente elétrica são introduzidos em um único conjunto, para reduzir o espaço (o conjunto de uma turbina de 100 kW está contido em um volume de quatro metros cúbicos e pesa menos de duas toneladas). Assim, o número de partes móveis é limitado ao conjunto compressor-turbina-gerador, que gira em velocidades

muito altas (de 60.000 a 100.000 rpm), permitindo reduzir bastante a vibração e portanto o ruído.

As microturbinas operam com taxas de compressão de 3 a 4, muito menores do que aquelas típicas de turbinas de grande porte (10 a 15). Em um ciclo simples, valores reduzidos da taxa de compressão resultam em baixas temperaturas na entrada para o queimador e de alta temperatura dos gases de escape, que não permitem a obtenção de rendimentos satisfatórios. Para resolver este problema, as microturbinas com projetos mais recentes são construídas com um trocador de calor (recuperador), que permite o pré-aquecimento do ar de combustão na entrada do queimador, usando a energia térmica dos gases de exaustão na saída da turbina. Isto torna possível alcançar rendimentos de 30%.

Estudos de viabilidade realizados pelo Centro Cerâmico de Bolonha, em colaboração com a SACMI Imola e a Fornos SACMI, para a aplicação de uma microturbina com 100 kW de potência elétrica em um secador vertical SACMI EVA 992 e em um secador horizontal SACMI ECP 285 demonstraram a possibilidade de reduzir o consumo de energia térmica do secador de 25 a 33%.

Há relato de um caso de aplicação de micro-cogeração para a secagem de pó granulado por via seca na Cerâmica Mediterrânea (Guspini, Sardenha, Itália). A planta é composta por quatro turbinas movidas a GLP (Figura 9), cada uma capaz de fornecer 100 kW de eletricidade e 180 kW de energia térmica, ligadas a dois secadores

Turbina	Característica	Motores
22 / 28	η_e (%)	32 / 40
65 / 73	η_t (%)	55 / 60
5 / 10	Perdas (%)	5 / 10

Principais diferenças

Maior calor disponível	Menor calor disponível
Mais alta temperatura do gás de saída 480 / 510 °C T _m = 495 °C	Mais baixa temperatura do gás de saída 330 / 410 °C T _m = 370 °C
Necessidade de funcionamento contínuo	Adequado quanto o funcionamento é descontínuo
Custo de manutenção mais baixo	Custo de manutenção mais alto
Custo de investimento mais elevado	Custo de investimento mais baixo

Figura 8. Cogeração de calor e eletricidade (de 1 a 4 MW).



Figura 9. Cogeração com microturbinas a GLP instaladas na Cerâmica Mediterranea.

de leito fluidizado mediante tubulação isolada e ventiladores de recuperação de 45 kW de potência máxima, ajustados por inversor. É recuperado tanto o gás de escape das turbinas quanto o ar de resfriamento do conjunto. O ar que sai da turbina (270 °C) é diluído com o ar de resfriamento do conjunto e com ar ambiente para trazê-lo à temperatura necessária para o secador (200 °C). Os queimadores dispostos nos secadores modulam a temperatura do ar, a fim de assegurar a regulação ótima da temperatura de secagem. O sistema permite uma modulação tanto de operação quanto de manutenção: é possível desativar uma ou mais turbinas se a necessidade de energia térmica é inferior ao máximo, assim como é possível executar a manutenção em uma turbina de cada vez, mantendo a outra operacional. É possível fazer mudanças simples para alimentação das turbinas para a utilização de outros combustíveis, por exemplo, gás natural, óleo vegetal, etanol, etc.

Quadro 1. Dados energéticos do grupo de cogeração instalado na Cerâmica Mediterranea.

Temperatura ambiente	15 °C	36
Potência elétrica obtida (valor de potência líquida)	412 kW	313
Potência elétrica absorvida pelos ventiladores de regeneração	7,7 kW	7,7
Consumo total de GLP	106 kg/h	95
Potência térmica na entrada das turbinas	1331 kW	1194
Potência térmica na entrada dos secadores (calor do gás de saída + resfriamento do conjunto)	787 kW	608
Rendimento elétrico	30,4 %	25,6
Rendimento térmico	59,1 %	50,9
Rendimento global	89,5 %	76,5

O Centro Cerâmico de Bolonha realizou medidas de energia no sistema de cogeração em duas condições diversas de temperatura ambiente (em fevereiro e julho de 2009, Quadro 1), que representam as condições de rendimento mínimo e máximo do sistema operacional na instalação da Cerâmica Mediterranea. Pode-se ver que o rendimento elétrico do grupo de cogeração varia de um máximo de 30,4%, com uma produção de energia elétrica (valor líquido da potência disponível) de 412 kW e recuperação de calor para os secadores igual a 787 kW, a um mínimo 25,6%, com produção de energia elétrica igual a 313 kW e recuperação de calor para os secadores igual a 608 kW. A análise da rentabilidade do sistema de cogeração para um período de funcionamento de 6.440 h/ano mostrou uma vantagem econômica média de 180.000 euros/ano (cerca de R\$ 430.000/ano).

5. Uso de Combustíveis Verdes

Na Itália um tema de grande interesse para redução dos custos energéticos é o uso de combustível “verde” na cogeração. Os combustíveis verdes derivam de plantas, como por exemplo, óleo de palmeiras, de sementes, de soja, entre outros, ou o bioetanol, e seu uso é incentivado, pois é mais favorável para o ambiente (o balanço das emissões de gases de efeito estufa é melhor com relação aos combustíveis fósseis). Na Itália, para cada kWh produzido com combustíveis verdes é atribuído um preço mais elevado do que àquele para os combustíveis fósseis (0,105 euros); ou seja, € 0,28 (R\$ 0,67) para óleo vegetal, e € 0,22 (R\$ 0,53) para bioetanol.

6. Conclusão

Quais são as lições a serem aprendidas e as soluções a serem propostas hoje para a economia de energia na área de revestimentos cerâmicos? Em primeiro lugar deve-se considerar a reestruturação dos fornos de queima, considerando-se a possibilidade de inserção de um trocador de calor para pré-aquecimento do ar de combustão. O custo de investimento é importante, mas também é verdade que os fornos são as máquinas que consomem mais energia térmica no processo produtivo e, conseqüentemente, a rentabilidade alcançada é notável.

Se a planta está equipada com atomizadores é interessante avaliar a implementação da cogeração para a produção de toda a eletricidade necessária para o estabelecimento, porém o custo do investimento é alto em comparação com os importantes benefícios alcançados. Com custos de investimento mais baixos pode-se considerar a transferência dos gases dos fornos dos atomizadores e do ar de resfriamento dos fornos para os secadores. Para as unidades que não têm atomizadores,

pode-se avaliar a aplicação da cogeração com microturbinas para os secadores ou, como alternativa e com menores custos de investimento, a recuperação do ar de resfriamento dos fornos para os secadores.

Finalmente, o que se pode fazer para economizar um pouco de energia elétrica? Técnicas já consolidadas são (i) reduzir o fator de potência distribuído entre as cargas elétricas, (ii) o uso de inversor para regular o fluxo de ventiladores e bombas, (iii) o dimensionamento correto ou a adequação das seções dos cabos de alimentação de quadros elétricos, (iv) a transmissão de eletricidade de média tensão

dentro da planta e, mais recentemente, (v) a adoção de sistemas de iluminação de alta eficiência com consumo de energia ajustável em função da luz ambiente.

Num futuro próximo está se pensando na adoção de painéis fotovoltaicos nos telhados de edifícios industriais, que têm dezenas de milhares de metros quadrados. Para estas aplicações são previstos incentivos interessantes na Europa, tais como o estabelecimento de um preço variando entre 36 a 40 centavos por kWh por vinte anos de funcionamento, com rápido retorno do investimento de 5 a 8 anos.