

Reaproveitamento de Calor na Indústria Cerâmica

**Marcelo Tramontin Souza^{a*}, Roger Honorato Piva^a, Diógenes Honorato Piva^a,
Oscar Rubem Klegues Montedo^{a,b}**

^aCentro Universitário Barriga Verde – UNIBAVE, Rua Pe. João Leonir Dall’Alba, s/n,
CEP 88870-000, Cocal do Sul - SC, Brasil

^bUniversidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Av. Universitária, 1105,
CEP 88806-000, Criciúma - SC, Brasil

*e-mail: engmarcelosouza@hotmail.com

Resumo: Este estudo foca a importância da melhoria da eficiência energética como aspecto econômico, principalmente na indústria cerâmica que possui alto consumo energético. Foi demonstrado um projeto de reaproveitamento de calor de um forno para um atomizador, evidenciando a economia de combustível e sua viabilidade econômica. Foram realizados balanços mássicos e energéticos vinculados aos fenômenos de transferência de calor para quantificar e localizar a energia utilizada em cada componente do sistema e as perdas por dispersão térmica. Após a implementação do sistema de reaproveitamento de ar quente, foi constatado uma economia no consumo específico de 21%, o que representa uma redução de custos de R\$ 65.205,00 por mês. Como o custo do projeto foi de R\$ 240.000,00, o tempo de retorno será de aproximadamente 3,7 meses.

Palavras-chave: reaproveitamento, transferência de calor, eficiência energética, economia.

1. Introdução

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos tem um alto consumo de energia elétrica e principalmente térmica, juntos somam cerca de 30% do custo de produção. A segunda está relacionada ao processo de atomização (via úmida), secagem e na maior parte à queima¹. O Brasil, sendo um dos maiores produtores mundiais de revestimentos cerâmicos, tem contribuído significativamente para o aumento no crescimento do setor que praticamente dobrou nos últimos dez anos. Acompanhado a expansão do setor, estão os custos de produção principalmente voltados à energia. Portanto, as empresas têm buscado maneiras de racionalização energética para reduzir os custos e aperfeiçoar o processo produtivo.

Nas últimas duas décadas, houve uma grande evolução das empresas relacionada à gestão energética que buscaram soluções para melhoria de eficiência. Uma destas inovações é apresentada neste estudo, que visa o reaproveitamento de calor de máquinas térmicas, neste caso, a energia é transferida do forno para o atomizador.

Este estudo foca principalmente os ganhos com o projeto (viabilidade econômica). Com base nos princípios de conservação de energia foi possível calcular a distribuição das parcelas energéticas no equipamento, focando o entendimento e a importância das teorias e práticas relacionadas à melhoria na eficiência energética. O sistema consiste na retirada de ar quente proveniente da chaminé de entrada do forno através de ventiladores industriais, e reaproveitamento para um atomizador como ar de diluição através de uma tubulação, promovendo assim uma economia energética pelo equipamento. Serão abordadas análises de transferência de calor no atomizador, com balanços mássicos e energéticos, e na tubulação com cálculos envolvendo os mecanismos de transferência de calor e cálculos empíricos presente nas literaturas.

2. Materiais e Métodos

Os cálculos de fluxo energético entrando e saindo no equipamento são baseados em conceitos termodinâmicos simples. O princípio da conservação da energia ou 1ª lei da termodinâmica

estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada, e que a energia total transferida para um sistema pode ser expressa por

$$E_{IN} - E_{OUT} + E_G = \Delta E_{SIST} \quad (1)$$

onde:

- ΔE_{SIST} : Variação de energia do sistema (kcal/h);
- E_{IN} : Fluxo energético de entrada (kcal/h);
- E_{OUT} : Fluxo energético de saída (kcal/h); e
- E_G : Energia gerada internamente (kcal/h).

Para um volume de controle fechado simples, sem geração de energia, operando em condições estacionárias, a variação da energia de um sistema pode ser expressa por

$$E_{IN} - E_{OUT} = \Delta U_{SIST} \quad (2)$$

onde:

- ΔU_{SIST} : Variação de energia interna do sistema (kcal/h).

A energia interna é uma medida macroscópica das energias moleculares em níveis atômicos e subatômicos. É uma forma de energia sem valor absoluto, ou seja, possui apenas medidas de variações. Essas variações são o resultado das vibrações microscópicas provocadas por uma mudança nas condições externas do sistema².

Quando não há geração de energia pelo sistema, nem transformações de fases (energia latente), a equação simplificada da energia térmica para sistemas com escoamento em regime estacionário é expresso por

$$Q_E = m \times cp \times \Delta T \quad (3)$$

onde:

- Q_E : Fluxo energético (kcal/h);
- m : Fluxo mássico (kg/h);
- cp : Calor específico do material (kcal/kg.°C); e
- ΔT : Variação de temperatura (°C).

2.1. Determinação da vazão dos gases de exaustão

Para obter os valores de vazão e temperatura foram utilizados um tubo de Pitot acoplado a um micromanômetro e um termopar tipo K posicionado em vários pontos no interior da tubulação.

O método para leitura das pressões consiste em posicionar a haste de metal paralelamente à tubulação formando um ângulo de 90 °C em relação ao movimento do fluido, e tomar várias leituras de uma extremidade a outra da tubulação para obter um valor médio. Os valores são lidos com o micromanômetro, que fornece diretamente a variação da pressão dinâmica. Com os valores da pressão dinâmica, calcula-se a velocidade dos gases de exaustão na tubulação da chaminé e na tubulação de reaproveitamento de ar quente (Equação 4)³.

$$V = \sqrt{\frac{(2 \times \Delta P)}{\rho}} \quad (4)$$

onde:

- V: Velocidade dos gases (m/s);
- ΔP: Variação da pressão medida (Pa); e
- ρ: Massa específica da corrente gasosa.

Com a velocidade conhecida é possível calcular a vazão pela Equação 5.

$$Q_M = V \times A \quad (5)$$

onde:

- QM: Vazão mássica (kg/h); e
- A: Área (m²).

2.2. Determinação da vazão e temperatura do ar de combustão

Os valores são obtidos com um anemômetro, que fornece a velocidade e temperatura do ar de combustão que entra pelo ventilador. A obtenção da vazão do ar deu-se posicionando o aparelho em vários pontos na boca de entrada do ventilador obtendo assim a velocidade e temperatura média do ar de combustão.

$$Q_d = A_i \times \left[4,65 \times \left[\left(\frac{273,15 + T_{mp}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273,15 + T_a}{100} \right)^4 \right] + 1,78 \times (T_{mp} - T_a)^{1,25} \right] \times 10^{-3} \quad (6)$$

onde:

- Qd = Quantidade de calor dissipado pelas paredes (kcal/h);
- Ai: Área externa do equipamento (m²);
- Tmp: Temperatura média da parede (K); e
- Ta: Temperatura ambiente (K).

Tabela 1. Dados de vazão mássica de entrada e saída antes do sistema de reaproveitamento de ar quente.

Termos de entrada	Vazão mássica (kg/h)
Gás natural	645
Ar de combustão	25166
Ar de diluição	39602
Barbotina	28903
Total	94316
Termos de saída	Vazão mássica (kg/h)
Água evaporada	9019
Pó atomizado	1269
Gases de exaustão secos	64768
Pó atomizado	19883
Finos	537
Total	95476

2.3. Determinação da produção do pó atomizado

O procedimento foi realizado da seguinte forma: um caixote com capacidade para aproximadamente uma tonelada de pó atomizado foi utilizado com o auxílio de uma empilhadeira. A correia transportadora é deslocada de modo que a massa é coletada com o caixote durante um determinado período de tempo. Assim, com o peso e o tempo cronometrado determina-se a produção de massa atomizada, dada em quilogramas por hora.

2.4. Determinação do consumo de combustível

Faz-se o acompanhamento no quantômetro (medidor de vazão) por um período de no mínimo uma hora, com intervalos de quinze a vinte minutos nas leituras, de modo a observar se em algum intervalo houve alguma variação significativa na vazão do combustível e conseqüentemente alguma mudança na condição de operação do atomizador.

Os dados serão válidos quando as leituras forem realizadas após um período de tempo do atomizador em funcionamento, de modo que esteja em operação constante. Quando esses intervalos de leituras apresentarem valores de vazão semelhantes, e constatado que as condições de operação estejam estáveis, calcula-se a vazão total do combustível com o consumo e tempo totais lidos. A pressão e temperatura também devem ser anotadas para normalização do consumo.

2.5. Determinação da dissipação de calor pelas paredes

Para quantificar a energia dispersa pelas superfícies externas do equipamento foi utilizado um termovisor. Este equipamento nos fornece imagens térmicas por infravermelho que permite avaliar gradientes de temperatura nas superfícies do atomizador e dos componentes. As imagens obtidas são tratadas em software que permite obter medidas pontuais e por área, obtendo assim uma média da temperatura em uma determinada região e, assim determinar a dispersão térmica pela equação empírica dada por⁴:

A equação 6 fornece uma estimativa da dissipação térmica pelo atomizador somando a transferência de calor por irradiação e convecção.

Para obter maior precisão no resultado final, o atomizador e os componentes foram divididos em pequenas partes, ou seja, em regiões com temperaturas mais próximas, a somatória de todas as dispersões fornece o resultado final, que naturalmente é um valor aproximado. Estes dados serão vistos mais à frente.

Tabela 2. Dados de entrada e saída de energia antes do sistema de reaproveitamento de ar quente.

Termos de entrada	Fluxo de energia (kcal/h)
Combustão do gás natural	7557105
Barbotina	27209
Ar combustão	19914
Total	7604228
Termos de saída	Fluxo de energia (kcal/h)
Água evaporada	5565454
Gases de exaustão secos	1664502
Pó atomizado	184732
Dissipação térmica	197512
Finos	4846
Total	7617046

3. Resultados e Discussões

Uma vez implantado o projeto, existem algumas condições para o reaproveitamento. Considerando que o ar quente é proveniente da região de entrada do forno, existem gases, dependendo da composição da matéria-prima, que podem estar presentes, como o ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF), ácido sulfídrico (H₂S) e ácido carbônico (H₂CO₃), que podem se condensar e causar problemas de corrosão nas paredes do atomizador. Por isso, o equipamento quando parado para manutenção ou regulagem, deve ser religado sem o sistema de reaproveitamento em funcionamento. Este deve ser religado apenas com o atomizador funcionando normalmente, com a temperatura da câmara estabilizada.

As Tabelas 1 e 2 mostra os dados de entrada e saída da vazão mássica e fluxo energético no atomizador, respectivamente. Os dados são o resultado de um valor médio de diferentes coletas de dados em diferentes dias. As Tabelas 3 e 4 mostram os mesmos dados com o sistema de reaproveitamento de ar quente implantado. Fazendo uma comparação entre os dados de entrada e saída antes e depois

do reaproveitamento de ar quente já é possível notar a economia de gás natural com a energia introduzida com o ar reaproveitado. Para visualizar os dados mais claramente, utilizou-se o digrama de Sankey, Figuras 1 e 2, que mostra os dados em termos de porcentagem. A energia empregada com a combustão do metano que representava 99,38% reduziu para 79,91% com o reaproveitamento de ar quente.

Nota-se ainda um pequeno aumento na quantidade de energia utilizada para evaporação da água, isso porque o projeto proporcionou um aumento da produção de massa atomizada, conseqüentemente houve uma redução percentual na quantidade de gases exaustos secos. A temperatura interna da câmara do atomizador aumentou cerca de 25 °C, refletindo em um pequeno aumento no calor dissipado pelas paredes. Com o diagrama de Sankey é possível observar com clareza a contribuição do ar quente reaproveitado e a redução no calor associado à combustão do gás natural.

A Tabela 5 mostra os dados de consumo específico antes e depois da recuperação de ar quente, a redução no consumo específico chega a aproximadamente 21%.

Tabela 3. Dados de vazão mássica de entrada e saída depois do sistema de reaproveitamento de ar quente.

Termos de entrada	Vazão mássica (kg/h)
Gás natural	547
Ar combustão	28175
Ar reaproveitamento	33755
Barbotina	32621
Total	95098
Termos de saída	Vazão mássica (kg/h)
Água evaporada	10143
Água combustão	1114
Gases exaustão secos	62220
Pó atomizado	22478
Finos	606,9
Total	96561

Tabela 4. Dados de entrada e saída de energia depois do sistema de reaproveitamento de ar quente.

Termos de entrada	Fluxo de energia (kcal/h)
Combustão do gás natural	6395065
Ar combustão	26225
Barbotina	97071
Ar de reaproveitamento	1483663
Total	8002024
Termos de saída	Fluxo de energia (kcal/h)
Água evaporada	6287519
Gases de exaustão secos	1229047
Pó atomizado	183198
Dissipação térmica	310876
Finos	6830
Total	8017470

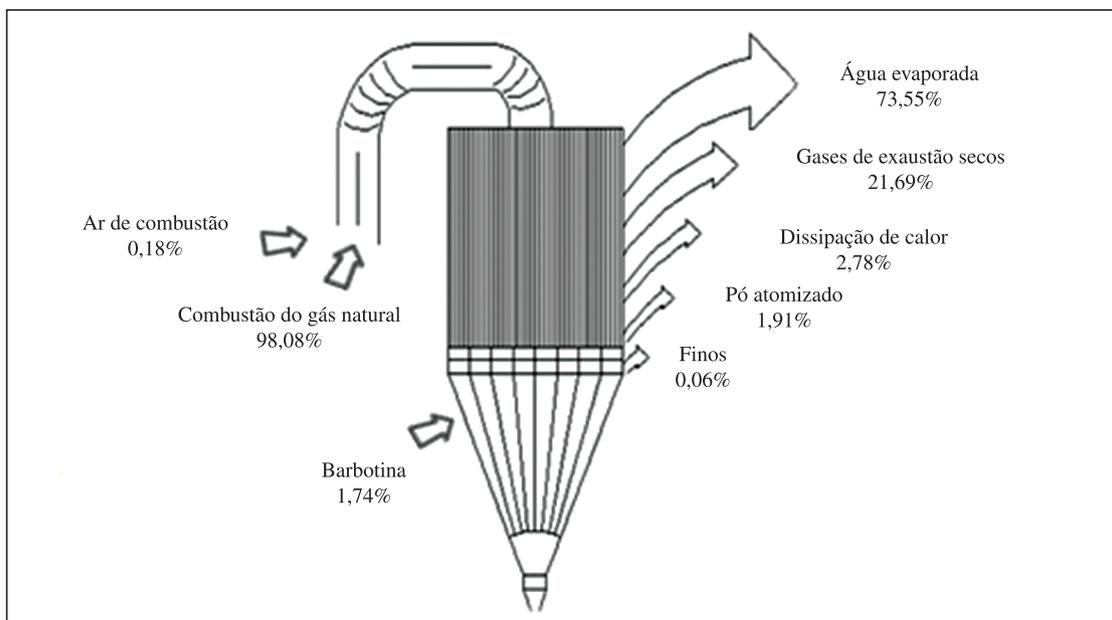


Figura 1. Diagrama de Sankey para os fluxos energéticos antes do sistema de reaproveitamento de ar quente.

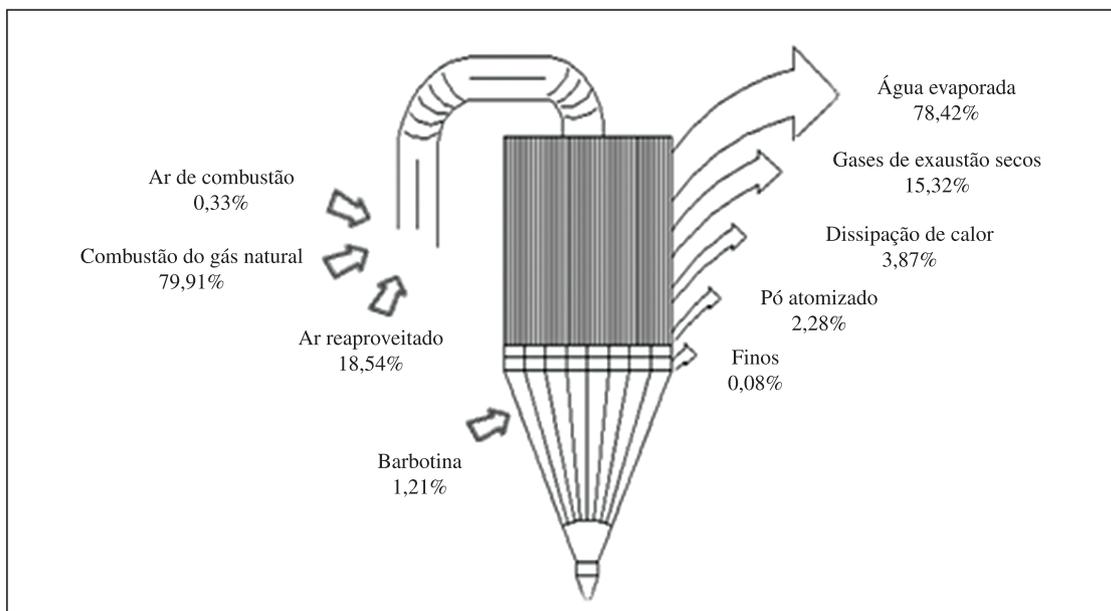


Figura 2. Diagrama de Sankey para os fluxos energéticos antes do sistema de reaproveitamento de ar quente.

Tabela 5. Comparação do consumo específico antes e depois do projeto de recuperação.

Consumo específico	Antes	Depois
kcal/kg (massa seca)	400	316
kcal/L (água)	816	645

4. Conclusões

O custo total para implantação do projeto de reaproveitamento de ar quente foi de R\$ 240.000,00. Analisando as médias do consumo específico antes e após a implantação do sistema de reaproveitamento de ar quente, observa-se uma redução 21%. Em termos econômicos, isso representa uma economia mensal de aproximadamente R\$ 65.205,00 e o tempo de retorno do investimento será de 3,7 meses. Portanto, o projeto se mostrou muito viável, com excelentes resultados, dado a economia mensal e o baixo tempo de retorno do investimento.

O mesmo método aplicado neste estudo pode ser aplicado para abordar outros projetos voltados ao reaproveitamento energético,

como transferência de ar quente do forno para os secadores e para os próprios queimadores do forno como ar de combustão. Outros estudos podem ser aplicados à cogeração de energia elétrica, que é uma tecnologia pouco empregada na indústria cerâmica e pode se mostrar eficaz, permitindo reaproveitar ainda mais o calor rejeitado pelas máquinas térmicas.

Referências

1. NASSETTI, G. Como Melhorar a Eficiência Energética na Indústria de Revestimentos Cerâmicos. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 15, n. 1, jan./fev. 2010.
2. ÇENGEL, Y. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda., 2009.
3. FONTANA, C. M. B.; MONTEDO, O. R. K. Reaproveitamento de Gases de Exaustão do Forno para a Secagem de Barbotina. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 14, n. 3, maio/jun. 2009.
4. NASSETTI, G. **Gestão Racional da Energia na Indústria de Revestimentos Cerâmicos**. Centro Cerâmico de Bolonha, 2006.