



APLICAÇÃO DE BALANÇOS TÉRMICOS EM FORNOS INDUSTRIAIS DA V&M DO BRASIL¹

Wanderson Henrique Moreira²

Ricardo Junqueira Silva³

Lis Nunes Soares⁴

Peter Blaha Junior⁵

Victor Pires Gonçalves⁶

Resumo

O processo de fabricação da V&M do Brasil inclui diversos fornos industriais usados para o aquecimento, rea aquecimento e tratamento térmico de barras e tubos produzidos na usina, sendo os grandes consumidores de combustíveis gasosos e representando uma parcela considerável dos custos totais da usina. Torna-se necessário o estabelecimento de ferramentas e métodos de análise de desempenho dos processos energéticos que ocorrem nesses equipamentos. Uma das práticas adotadas é a realização de balanços térmicos dos fornos, possibilitando a quantificação da energia térmica consumida e fluxos de calor envolvidos para direcionar ações de melhoria do processo e do equipamento e, conseqüentemente, otimizar custos operacionais, custos de manutenção e emissões de gases de efeito estufa. A obtenção dos dados necessários para realizar o balanço é feita a partir de testes e medições de parâmetros importantes em pontos estratégicos, com o uso de termopares, medidores de vazão, análises termográficas e análise do perfil térmico de aquecimento das barras e tubos. Dentre os ganhos alcançados destacam-se a economia no consumo de combustíveis, melhoria na qualidade de aquecimento de materiais, eficiência do sistema e identificação de problemas pontuais. O objetivo deste trabalho é divulgar as boas práticas usadas na V & M do Brasil acerca de uma metodologia que visa à melhoria global de processos de aquecimento.

Palavras-chave: Ciclo térmico; Forno industrial; Aquecimento; Consumo de energia.

APPLICATION OF THERMAL BALANCES IN INDUSTRIAL FURNACES OF V&M DO BRASIL

Abstract

The manufacturing process of V & M do Brazil includes various industrial furnaces used for heating, reheating and heat treatment of bars and tubes produced at the plant, being the largest consumers of gaseous fuels and representing a considerable portion of the total cost of the plant. It becomes necessary to establish tools and methods of performance analysis of energy processes that occur in these devices. One of the practices adopted in the enterprise is stocktakings thermodynamic ovens, allowing the quantification of the thermal energy consumed and the heat fluxes involved, to direct actions to improve the process and equipment and thus optimizing operating costs, maintenance costs and emissions of greenhouse gases. Obtaining the data needed to perform the assessment is made from test and measurement of important parameters at strategic points, using thermocouples, flow meters, analysis and thermography analysis of the thermal profile of the heating rods and tubes. Among the gains highlights the savings in fuel consumption, improving the quality of heating materials, system efficiency and identification of specific problems. The objective of this work is to disseminate the good practices used in the M & V Brazil about a methodology that aims to improve global warming processes.

Keywords: Thermal cycle, industrial furnace; Heating; Energy consumption.

¹ *Contribuição técnica ao 33º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 27º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 22 a 24 de agosto de 2012, Belo Horizonte, MG.*

² *Técnico em Eletrotécnica. Técnico Industrial III. V&M do Brasil S.A.*

³ *Engenheiro Mecânico (Doutor). Engenheiro Sr - Gestão Energia. V&M do Brasil S.A.*

⁴ *Engenheira Mecânica (Doutora). Engenheiro III. V&M do Brasil S.A.*

⁵ *Engenheiro de Sistema da Informação. Fiscal Técnico. V&M do Brasil S.A.*

⁶ *Graduando em Engenharia de Energia. Estagiário. V&M do Brasil S.A.*



1 INTRODUÇÃO

O balanço térmico é a quantificação da energia térmica que atravessa um volume de controle. No caso da V & M do Brasil, os volumes de controle são os fornos e o balanço quantifica a energia necessária para aquecimento dos blocos/tubos e as perdas existentes no processo. Tudo isso faz parte de uma proposta de eficiência energética nos fornos, prática da empresa como forma de reduzir o gasto com energia e atender à norma ISO 50.001.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é divulgar as melhores práticas adotadas na V & M do Brasil acerca da prática de realização de balanços térmicos em fornos industriais como forma de aperfeiçoamento do desempenho térmico desses equipamentos.

3 METODOLOGIA

Foram coletados dados referentes aos balanços térmicos realizados na empresa, desde o estudo teórico à aplicação do programa em um caso real. O estudo consistiu em revisão bibliográfica e adequação das fórmulas necessárias para quantificação da energia envolvida no processo. Posteriormente, desenvolveu-se um modelo computacional com ajuda do *software* EES (*Engineering Equation Solver*) possibilitando obter resultados satisfatórios. Por fim, os dados são analisados, comparados com as melhores práticas encontradas em literatura e elabora-se um documento com um plano de ação para futuras melhorias.

A prática de balanços térmicos é de extrema importância para a V & M e segue-se a partir de uma série de recomendações quanto aos procedimentos para sua realização. É preciso planejamento e preparação das ações que serão realizadas para monitoramento dos dados necessários à análise, garantindo a obtenção de resultados confiáveis.

A base teórica, que culminou na programação pelo *software* EES, tem como volume de controle o forno e os recuperadores de calor.

Os fornos industriais são utilizados para aquecimento de blocos e tubos de aço. A energia necessária para aquecimento da massa é uma das variáveis mais importantes para o balanço. É calculada a partir da seguinte equação:

$$dQ_t = m \cdot C_p(T) \cdot dT$$

A potência de aquecimento dos tubos é calculada considerando sob um regime estacionário.⁽¹⁾ Esse valor, em kJ, é calculado a partir de sua entalpia, definida por uma série de variáveis⁽²⁾ para cada tipo de material.

Para determinação da potência total que é consumida pelo sistema é preciso que seja feito um balanço estequiométrico da reação de combustão. Calcula-se primeiramente a combustão completa. Em seguida, calcula-se a combustão com as medições do volume de ar e de gás combustível utilizados durante o aquecimento, para verificar, por conseguinte, a possível existência de CO no processo. A existência de CO não seria uma prática desejada pela usina, pois significa perda de energia que poderia ser aproveitada. Essa etapa do processo também determina a quantidade de ar em excesso que o volume de controle recebe, sob orientações que seja em torno de 10%, segundo as melhores práticas (encontradas em literatura). Para o cálculo do excesso de ar, utiliza-se a massa molar dos gases, suas vazões



molares e vazão volumétrica de cada um dos elementos constituintes dos combustíveis utilizados e dos fumos que são formados na combustão.

A temperatura adiabática de chama, também é determinada pelo balanço, representa a temperatura hipotética dos gases produzidos na combustão caso toda a potência fornecida ao forno fosse utilizada para aquecê-los. É calculada de forma iterativa a partir da potência que foi entregue ao forno,⁽³⁾ determinada previamente através do balanço estequiométrico dos gases de combustão.

Alguns fornos, como será visto mais adiante no estudo de caso, necessitam de água para o resfriamento de suas vigas e é um fator que modifica o estudo do balanço e deve ser considerado. A potência dissipada através da mesma é função da sua vazão mássica e entalpia de entrada e saída, determinada através das pressões e temperaturas na qual se encontram em cada ponto.

Outras perdas que se relacionam aos fornos são as que ocorrem por meio de transferência de calor para o ambiente. Existem perdas de energia através de radiação e convecção pelas portas de enformamento e desenformamento. Quaisquer perdas relacionadas à condução não são analisadas, pois são desprezíveis. Todo o processo utilizado para determinação dessas perdas decorre de dados como: dimensões do forno, temperatura das suas superfícies, temperatura ambiente, emissividade das superfícies, tempo de abertura das portas e fator de forma.⁽³⁾

A transferência de calor através da convecção natural obedece à lei de resfriamento de Newton (determinado através dos parâmetros de escoamento do forno),⁽³⁾ que consiste na multiplicação do coeficiente de transferência de calor por convecção pela área de troca de calor e a diferença das temperaturas superficial e ambiente.

A transferência de calor através da radiação obedece alguns padrões, os quais são considerados para superfícies isotérmicas, cinzas, difusas e opacas.⁽³⁾ O valor referente a essa variável é determinado através da área analisada, sua emissividade, a constante de Stefan-Boltzmann, fator de forma e às temperaturas de superfície e vizinhança elevadas à quarta potência.⁽³⁾ Para superfícies externas, toda a radiação que é emitida é perdida para o ambiente, dessa forma, o fator de forma toma o valor unitário. Nas perdas por aberturas, parte da radiação é barrada pelo próprio forno, sendo assim, o fator de forma é definido através de análises gráficas.

Todo esse estudo depende da geometria do forno, seja ela retangular ou cilíndrica, sendo aplicadas equações específicas para cada caso.

As perdas através das portas dependem do regime de funcionamento do forno e a fração de tempo em que a porta permanece aberta.

Os recuperadores de calor são importantes para completar o balanço, uma vez que pré-aquecem o ar de combustão e gás de alto forno. Os recuperadores de gás e ar têm a mesma configuração básica e obedecem à mesma lei. Seu rendimento (inferior a 100% uma vez que nenhum processo apresenta tal desempenho) é determinado a partir dos fluxos de energia nas entradas e saídas do seu volume de controle. Para isso, é necessário realizar o produto da vazão mássica das substâncias constituintes de cada gás e a diferença entre suas entalpias de entrada e saída e a entalpia dos gases a temperatura ambiente. A modelagem é feita com a consideração que os gases são ideais. A diferença de fluxo de energia de saída e entrada do gás frio resulta na taxa de calor recuperado em cada equipamento. As perdas decorrentes do processo são calculadas definindo-se a razão da energia cedida pelos fumos que não é absorvida e depende da eficiência do equipamento.

4 ESTUDO DE CASO

No dia 19 de fevereiro de 2012, foi realizado um balanço térmico, entre 14h37 e 16h40, no forno de aquecimento da Laminação da Usina Barreiro da V & M do Brasil. A coleta e tratamento dos dados foram realizados por técnico e estagiário da área. A termografia ficou a cargo de terceiro. Os testes foram realizados sob condição de regime estacionário de funcionamento, garantidos pelas mesmas condições de material enfiado, dimensões, *setpoint* de temperatura, velocidade do forno e vazão dos gases. A entrada dos blocos cilíndricos de diâmetro 230 milímetros foi a 25°C e saída a 1.269°C

O forno possui com oito zonas e queimadores de chama aberta, controlados por *software*. Existem dois recuperadores de calor, um para pré-aquecimento do ar de combustão e outro para pré-aquecimento do gás de alto forno (GAF) que faz parte da combustão. São utilizados GAF e Gás Natural (GN) para aquecimento dos blocos. As vazões de gases medidas são vistas pela Tabela 1.

Tabela 1: Vazões medidas dos gases

	Ar	Gás Natural	Gás de alto forno
Vazão (Nm³/h)/t	249,25	8,50	238,83
%	50,2	1,7	48,1

As temperaturas nas entradas e saídas dos volumes de controle são vistos pela Figura 1.

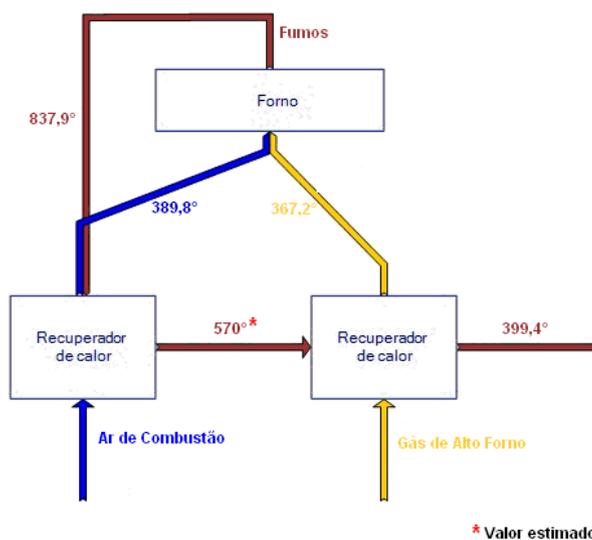


Figura 1: Temperatura de entrada e saída em cada volume de controle.

A vazão mássica de tubos de aço durante o período de teste foi de 67.116 kg/h e as composições dos gases também foram registradas conforme podemos ver na Tabela 2.



Tabela 2: Composição das Substâncias Constituintes dos Gases

GN		GAF		AR	
CH_4	94,66	CO	24,9	N_2	79
C_2H_6	2,64	CO_2	20,6	O_2	21
C_3H_8	0,75	H_2	7,1		
C_4H_{10}	0,33	N_2	47,5		
CO_2	0,89				
N_2	0,7				

As dimensões e temperaturas de cada parede do forno também são encontradas no relatório técnico da V & M e dão suporte à realização do balanço. Considerando a água de resfriamento das vigas do forno com entrada a 6 bar e 25°C e saída a 15 bar e 201°C, sob uma vazão de 6,6 t/h, podemos chegar ao resultado do balanço a partir da inclusão dessas informações no *software* EES. A Tabela 3 e a Figura 2 mostram os resultados.

Tabela 3: Resultados para o forno como volume de controle

	[%]	[kW/t]
Entrada	100	479,6
Aquecimento de tubos	44,8	214,8
Perdas	55,2	264,8
Água de resfriamento de vigas	15,35	73,7
Transferência de calor	5,2	24,7
Fumos	34,6	166,1
Outras perdas	0,05	0,13

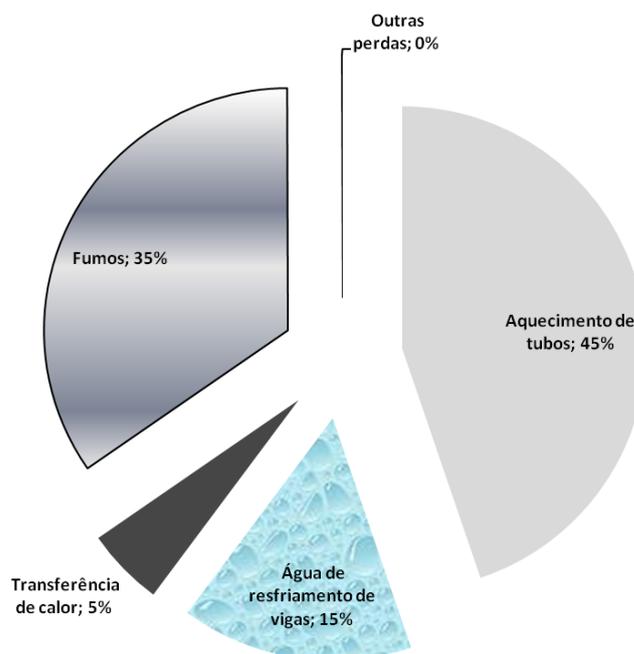


Figura 2: Distribuição da energia térmica utilizada no forno de aquecimento.

Os fluxos de energia são analisados separadamente:



- Aquecimento de tubos: cerca de 45% da energia consumida no processo é utilizada para aquecimento de tubos. Nesse caso é interessante fazer a medição da curva de aquecimento do material para verificar as possibilidades de melhorias.
- Água de resfriamento das vigas: cerca de 15% da energia consumida no processo é perdida pela água de resfriamento das vigas. É interessante verificar a eficiência das torres de resfriamento para identificação das possibilidades de melhorias.
- Transferência de calor: cerca de 5% da energia consumida no processo é perdida por convecção e radiação das paredes para o ambiente e pelas portas do forno. É conveniente verificar a integridade dos refratários e a condição de operação das portas de entrada e saída do forno para identificação das possibilidades de melhorias.
- Fumos: cerca de 35% da energia consumida no processo é perdida pelos fumos. Nesse caso é interessante verificar a integridade dos recuperadores de calor para identificação das possibilidades de melhorias. É indicada também, uma análise mais detalhada de viabilidade sobre a instalação de novas tecnologias para aproveitamento dessa energia como, por exemplo, a instalação de um Rankine Organic Cycle (ORC).

Pela análise dos fluxos de energia observa que a elaboração de balanços térmicos pode ajudar na quantificação e direcionamento das melhorias de eficiência energética. Após a realização das melhorias, é interessante realizar um novo balanço para quantificação do ganho.

5 CONCLUSÃO

A realização do balanço térmico é uma ferramenta importante para quantificar os fluxos de energia consumidos durante o processo de aquecimento dos tubos. A partir do gráfico da Figura 02 foi possível quantificar as perdas de energia que ocorrem durante o processo de aquecimento. Foi possível elaborar um plano de ação para melhorar a performance do equipamento e diminuir o consumo de energia,⁽⁴⁾ melhorando a eficiência energética e diminuindo a emissão de gases de efeito estufa para o ambiente.

Essa prática vem sendo utilizado pela V & M do Brasil em todos os fornos industriais inseridos no processo de fabricação do tubo de aço sem costura.

Agradecimentos

Agradecimentos a toda equipe da V & M do Brasil participante do processo do balanço térmico e à equipe de Pesquisa e Desenvolvimento do setor responsável pelo mesmo.

REFERÊNCIAS

- 1 INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª Edição. s.l. : LTC, 2008.
- 2 MCBRIDE, B., ZEHE, M., GORDON, S.NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species. Cleveland: s.n., 2002.



- 3 MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 5th Edition. 2006.
- 4 US. DEPARTMENT OF ENERGY. Process Heating Assessment Survey Tool. Disponível em:
<http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/software_phast.html>.
Acesso em: 05 abril 2012.