

REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS EM FORNOS DE REAQUECIMENTO, COM O USO DE UM SISTEMA MECANIZADO¹

Gustavo Acácio Corrêa Hauck²

Resumo

O reaquecimento de semiprodutos é largamente utilizado nas usinas siderúrgicas, constituindo-se num processamento intermediário entre a elaboração/solidificação do aço líquido e a conformação do produto final. Normalmente, são usados fornos contínuos, sendo o material, recebido sob a forma de placas, tarugos ou blocos, com ou sem preaquecimento, enornado continuamente com o objetivo de ser aquecido até a temperatura desejada nas etapas posteriores de laminação a quente. Diversos tipos de fornos são empregados no aquecimento, com distintas características geométricas, dimensionais, funcionais e térmicas em função do tipo de material, capacidade de produção e qualidade e homogeneidade térmica requeridos pelos processos subsequentes. O consumo de energia no reaquecimento é bastante elevado, originando a necessidade de se buscar a otimização do desempenho térmico da instalação, visando a redução do consumo de energia e a minimização dos impactos ambientais. Neste trabalho, é apresentado um sistema automatizado para a avaliação da eficiência térmica do processo de reaquecimento, independentemente das características construtivas, operacionais e tecnológicas da instalação. O sistema não requer alta especialização do usuário, é de fácil compreensão, tem características de interatividade, permite o cadastramento prévio de diferentes instalações e facilita a visualização e o armazenamento das informações e resultados obtidos.

Palavras-chave: Fornos de reaquecimento; Balanço térmico; Consumo de energia.

REDUCTION OF FUEL CONSUMPTION IN REHEATING FURNACES, BY USING A MECHANIZED SYSTEM

Abstract

In the steel industry, the processing material is submitted to reheating procedure that is required in order to achieve the aimed stock temperature necessary for further hot rolling process. The reheating process is performed by using continuous furnaces where a combustion system is utilized to heat the material (billets, blooms or slabs) from the initial temperature to the optimum required temperature for the subsequent hot rolling process. The energy consumption is a key factor at this stage and must be well estimated to allow the general process optimization, not only as regard the quality requirements but also concerning cost savings aspects. This paper discusses the main characteristics of a software product developed in order to evaluate the thermal performance of reheating furnaces no matter the geometry, capacity, dimensions or combustion systems that are employed. By using this software, it is possible to optimize the heating parameters, that is, select the ideal processing variables that must be used in order to achieve minimum fuel consumption, optimum stock temperature distribution, and better quality and operational characteristics of the reheating process. The paper also presents practical examples of industrial application of the mentioned software where the benefits of its utilization could be evaluated.

Key words: Reheating furnaces; Heat balance; Energy consumption.

¹ *Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.*

² *Diretor Técnico da Retcom Serviços de Engenharia; Instrutor do Curso sobre Fornos de Reaquecimento, promovido pela ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, desde 2000.*

1 INTRODUÇÃO

Praticamente todas as usinas siderúrgicas integradas dispõem de fornos contínuos de reaquecimento, onde os semiprodutos, tais como, placas, blocos ou tarugos são processados termicamente, com o objetivo de prepará-los para as etapas posteriores de conformação mecânica.

O consumo de energia nestes fornos é bastante elevado e muitos esforços tem sido dispendidos no sentido de otimizar os procedimentos com o intuito de reduzir o consumo de combustíveis e minimizar os impactos ambientais.

Neste trabalho, serão apresentadas as características de um sistema mecanizado de avaliação do desempenho térmico dos fornos de reaquecimento, independentemente das características dimensionais e tecnológicas do equipamento e do tipo e geometria do material em processamento.

O sistema é de fácil entendimento, permite a interatividade usuário/sistema e fornece todos os parâmetros relacionados à combustão, além de disponibilizar todas as informações e resultados seja sob a forma de relatórios impressos ou de arquivos de banco de dados.

2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

A seguir, serão expostos detalhes do embasamento teórico e de funcionalidade do sistema mecanizado.

2.1 Calor de Combustão do Óleo ou do Gás

A combustão representa o principal mecanismo de geração térmica no interior dos fornos de reaquecimento.

O calor gerado na combustão pode ser avaliado genericamente (independente do tipo de combustível), pela seguinte expressão (4):

$$Q_c = V_c \cdot H_c$$

onde,

Q_c = calor gerado pela combustão do óleo combustível ou do gás

V_c = vazão de combustível.

H_c = poder calorífico inferior do combustível.

Deve-se lembrar que, quando se usa combustível líquido, as grandezas são expressas por unidade de massa (normalmente, kg) e no caso de combustível gasoso, as grandezas são expressas por unidade de volume (normalmente Nm³).

2.2 Calor Sensível de Cada Componente

No caso dos fornos de reaquecimento, diversas substâncias participam do processo, tais como, combustível, material em processamento (placa, bloco ou tarugo), ar de combustão, gás de exaustão, carepa formada no produto e umidade.

Em função da temperatura de cada componente, pode-se calcular genericamente o calor sensível da seguinte maneira (4):

$$Q_{sx} = V_x \cdot c_x \cdot (t_x - t)$$

onde,

Q_{sx} = calor sensível do componente x, na temperatura t_x ;
 V_x = vazão (em massa ou em volume) do componente x;
 c_x = calor específico médio (entre t_x e t) do componente x;
 t = temperatura de referência, normalmente 0°C.

2.3 Coeficiente de Excesso de Ar de Combustão

Normalmente se trabalha com um ligeiro excesso de ar de combustão, de tal maneira a se garantir a queima de todo o combustível e, ao mesmo tempo, não se provocar aumento da poluição e perda de eficiência térmica com um valor elevado do excesso de ar.

Para se avaliar o excesso de ar, utiliza-se o coeficiente de excesso de ar, que representa a relação entre a vazão de ar de combustão efetivamente usada e a vazão estequiométrica de ar (vazão de ar estritamente necessária para a queima completa do combustível).

Quando se usa concomitantemente combustível líquido e combustível gasoso, o coeficiente de excesso de ar (m) pode ser avaliado por (4):

$$m = 1 + \frac{(O_2) - 0,5 \cdot (CO)}{[O_o \cdot V_o + O_g \cdot V_g] \cdot \frac{[(CO_2) + (CO)]}{A_o \cdot V_o + A_g \cdot V_g}}$$

onde,

(O_2) , (CO) e (CO_2) = percentagem de O_2 , CO e CO_2 , respectivamente, no gás de exaustão;

V_o = vazão em massa do óleo combustível;

V_g = vazão em volume do gás combustível;

O_o = volume estequiométrico de oxigênio, necessário à combustão da unidade de massa do óleo;

O_g = volume estequiométrico de oxigênio, necessário à combustão da unidade de volume do gás;

A_o = volume estequiométrico de CO_2 , gerado pela combustão da unidade de massa do óleo;

A_g = volume estequiométrico de CO_2 , gerado pela combustão da unidade de volume do gás.

Baseado nas reações de combustão, os valores dos quatro últimos parâmetros podem ser avaliados por (4):

$$O_o = \frac{1,867 \cdot C + 0,7 \cdot S + 5,6 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right)}{100}$$

$$A_o = \frac{1,867 \cdot C}{100}$$

$$O_g = \frac{0,50 \cdot (H_2 + CO) + 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 - O_2}{100}$$

$$A_g = \frac{CO + CO_2 + CH_4 + 2 \cdot C_2H_4 + 2 \cdot C_2H_6}{100}$$

onde,

C , H , O e S = percentagem em massa de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, respectivamente, no óleo combustível;

H_2 , O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 e C_2H_6 = percentagem em volume de H_2 , O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 e C_2H_6 , respectivamente, no gás combustível.

Note-se que, no caso de se usar apenas um tipo de combustível, basta se colocar, na expressão de cálculo do coeficiente de excesso de ar, $V_g = 0$ (quando só se usa óleo) ou $V_o = 0$ (quando só se usa gás).

2.4 Calor Perdido pelas Paredes do Forno, por Radiação e convecção

O calor perdido através do teto do forno será calculado por (4):

$$Q_t = S_t \left\{ \varepsilon \cdot \sigma \left[(t_t + 273)^4 - (t_\infty + 273)^4 \right] + 2,8 \sqrt[4]{t_t - t_\infty} \cdot (t_t - t_\infty) \right\}$$

onde,

- S_t = área superficial do teto do forno;
- ε = emissividade da parede externa;
- σ = constante de Stefan-Boltzmann;
- t_t = temperatura superficial do teto do forno;
- t_∞ = temperatura do ambiente externo.

O calor perdido pelas paredes laterais será (4):

$$Q_{pl} = S_{pl} \left\{ \varepsilon \cdot \sigma \left[(t_{pl} + 273)^4 - (t_\infty + 273)^4 \right] + 2,2 \sqrt[4]{t_{pl} - t_\infty} \cdot (t_{pl} - t_\infty) \right\}$$

onde,

- S_{pl} = área superficial das paredes laterais;
- t_{pl} = temperatura superficial das paredes laterais.

O calor total perdido por radiação e convecção será (4):

$$Q_{pr} = Q_t + Q_{pl}$$

2.5 Eficiência Térmica do Forno

A eficiência térmica do forno será calculada por (4):

$$\eta = \frac{Q_p - Q_{sp}}{\sum Q_i - Q_{sp}} \cdot 100$$

onde,

- Q_p = calor sensível do material, na saída do forno;
- Q_{sp} = calor sensível do material, na entrada do forno;
- $\sum Q_i$ = somatório de todos os calores de entrada

3 VISUALIZAÇÃO DO SISTEMA

3.1 Telas de Entrada de Dados

As Figuras 1 e 2 apresentam as telas de entrada de dados. Podem-se notar as características de interatividade do sistema, através das mensagens “Atenção” e “Erro de dados”.

3.2 Resultados do balanço térmico

A Figura 3 apresenta os resultados do cálculo do balanço térmico. São apresentadas todas as parcelas que constituem o balanço térmico do forno e do recuperador de calor e as informações referentes ao desempenho térmico do forno

(eficiência térmica, consumo específico de energia e de combustíveis e excesso percentual de ar de combustão).

Figura 1 – Tela para entrada de dados (combustíveis e gases).

Figura 2 – Tela para entrada de dados (carga, água de refrigeração e forno).

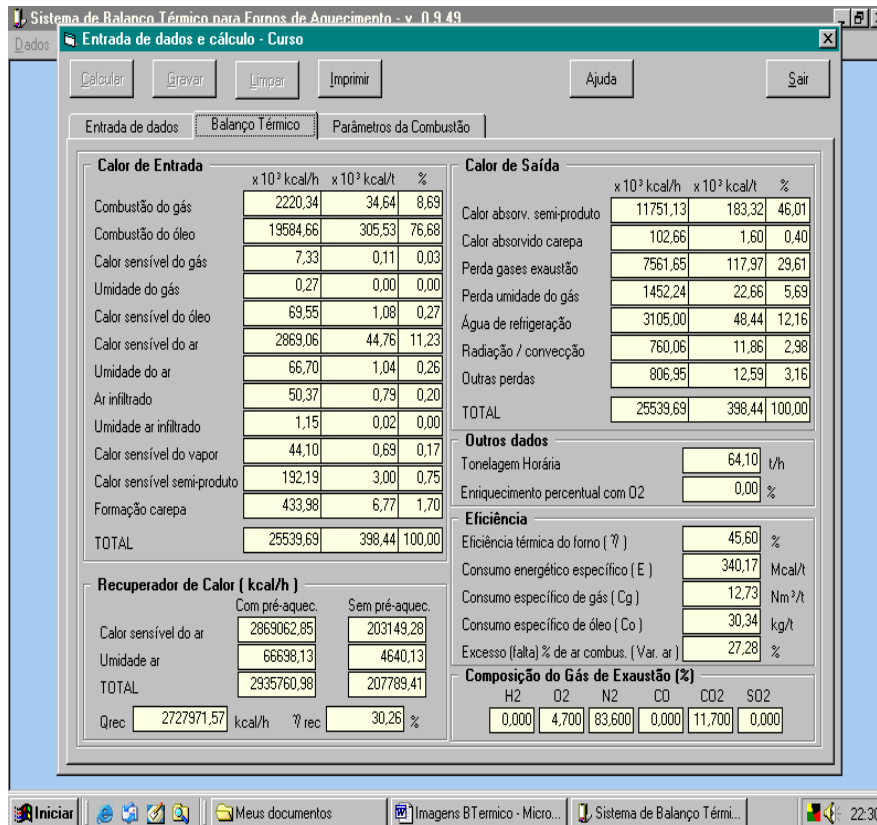


Figura 3 – Resultados dos cálculos (Balanço Térmico).

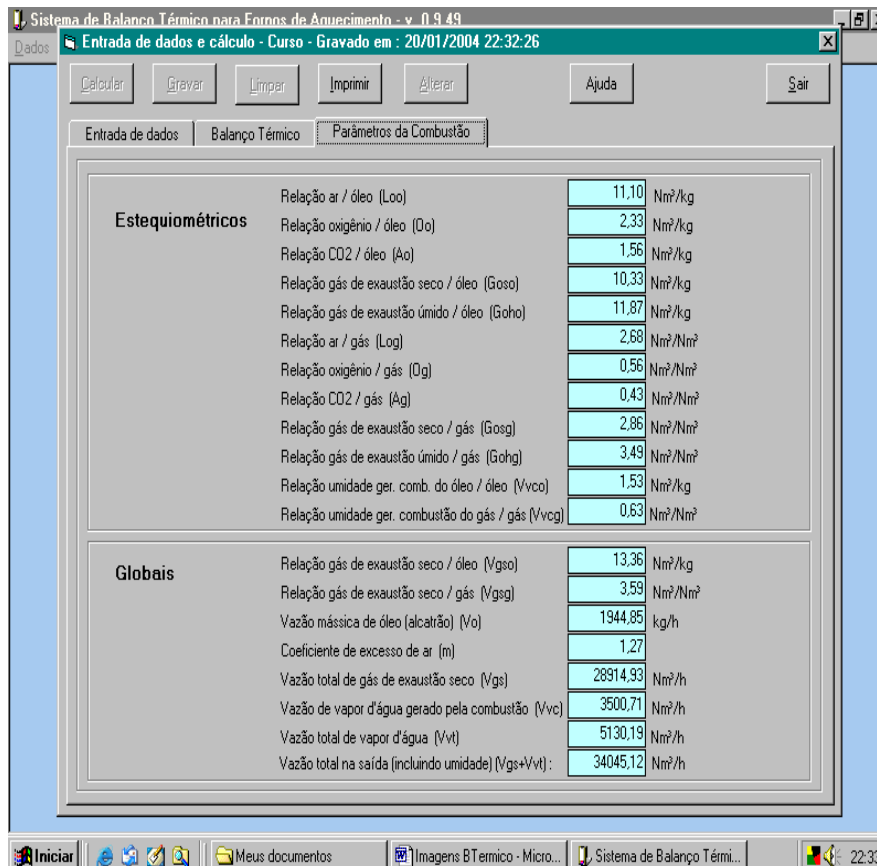


Figura 4 – Resultados dos cálculos (Parâmetros da combustão).



3.3 Parâmetros da Combustão

A Figura 4 apresenta os valores de diversos valores relacionados à combustão. Os parâmetros estequiométricos são valores específicos, ou seja, são relativos à unidade de massa (para o óleo) ou à unidade de volume (para o gás) e não levam em consideração o excesso de ar.

Os parâmetros globais são calculados para a situação real, ou seja, consideram o excesso de ar de combustão.

Note-se que, quando um dos combustíveis (gás ou óleo) não é utilizado, os parâmetros relacionados a este componente aparecerão zerados.

4 CONCLUSÃO

O modelo apresentado neste trabalho permite uma avaliação ampla e genérica do desempenho térmico de fornos de reaquecimento de quaisquer tipos, tamanhos, produtividades, tipos de produto, sistemas de combustão, etc.

O sistema pode ser usado a partir da especificação de um valor pré-determinado do excesso percentual de ar de combustão ou da composição química completa do gás de exaustão.

Todas as informações contidas no sistema podem ser gravadas em banco de dados de tal modo a se poder recuperar resultados obtidos em épocas distintas.

A utilização do programa é bastante simples, sendo que à medida que os dados são informados, é feita uma análise de consistência de tal modo a se evitar a digitação de informações conflitantes.

Na Tabela 1, é apresentado o resultado completo da aplicação do modelo a uma instalação industrial (forno de reaquecimento de placas), usando-se valores reais coletados *in loco*.

Tabela 1 – Balanço térmico, incluindo parâmetros de avaliação do desempenho térmico, de um forno industrial de reaquecimento de placas⁽⁵⁾

CALOR DE ENTRADA				CALOR DE SAÍDA			
Parcelas	*10 ³ kcal/h	*10 ³ kcal/t	%	Parcelas	*10 ³ kcal/h	*10 ³ kcal/t	%
Combustão do óleo	22.967,43	296,35	78,55	C. absorv. semi-produto	15.104,54	194,90	51,66
Combustão do gás	1.431,03	18,46	4,89	C. absorv. carepa	199,24	2,57	0,68
C. sensível do óleo	94,62	1,22	0,32	Perda gases ex.	8.460,01	109,16	28,93
C. sensível do gás	3,09	0,04	0,01	Perda umid. gás	1.265,97	16,34	4,33
Umidade gás	0,12	0,00	0,00	Água refrigeração	2.926,00	37,75	10,01
C. sens. do ar	228,60	2,95	0,78	Radiação/conveção	980,65	12,65	3,35
Umidade ar	6,02	0,08	0,02	Outras perdas	303,41	3,92	1,04
Excesso de ar	257,40	3,32	0,88	TOTAL	29.239,84	377,29	100,00
Umid. excesso ar	6,67	0,09	0,02				
C. sensível do vapor	44,10	0,57	0,15				
C. sens. do semi-produto	3.421,10	44,14	11,70				
Formação carepa	779,65	10,06	2,67				
TOTAL	29.239,84	377,29	100,00				

Eficiência térmica do forno	=====>	$\eta =$	45,25	%
Consumo energético específico	=====>	$E =$	314,82	Mcal/t
Consumo específico de gás	=====>	$C_g =$	4,30	Nm ³ /t
Consumo específico de óleo	=====>	$C_o =$	27,38	kg/t
Excesso (falta) percentual de ar combustão	=====>	Var. ar =	30,17	%
Vazão gás exaustão (incluindo umidade)	=====>	Vaz. Fumaças	34.546,12	Nm ³ /h

Neste caso, foram utilizados simultaneamente óleo e gás de coqueria como combustíveis, sendo o material enforado a quente (temperatura de enforamento de 363°C). A temperatura do ar de combustão foi de 327°C, a tonelagem horária de 77,5 t/h e o excesso de ar de combustão de 30,17%.

Na Tabela 2, pode ser observada a economia conseguida em um forno de reaquecimento de tarugos, pela aplicação do sistema desenvolvido neste trabalho.

Neste caso, foi usado o gás natural como combustível, com uma temperatura de enformamento de 30°C, temperatura do ar de combustão de 450°C, tonelagem horária de 65 t/h e excesso de ar de 5,16%.

Tabela 2 – Resultados conseguidos em um forno de reaquecimento de tarugos

Aumento da eficiência térmica do forno	+ 7,26 %
Redução do consumo energético	- 54,07 Mcal/t
Redução consumo específico combustível	- 5,88 Nm ³ /t
Redução mensal combustível (Produção de 1.000.000t de aço/ano)	- 490.000 Nm ³
Economia mensal	R\$ 147.000,00
Economia diária	R\$ 4.900,00
Economia horária	R\$ 204,16

BIBLIOGRAFIA

- 1 ANDRADE, H. L. et alii - Balanço Térmico dos Fornos de Reaquecimento da Usiminas - Metalurgia - ABM - vol. 39 - nº 302 - Janeiro de 1983
- 2 HAUCK, G. A. C. et alii - Balanço Térmico do Forno de Recozimento nº 3 - V Simpósio Técnico do Departamento de Laminação a Frio da Usiminas - Ipatinga – 23-25 de junho de 1981
- 3 Norma JIS-G 0702 - 1977 sobre "Método de Balanço Térmico para Fornos Contínuos".
- 4 HAUCK, G. A. C.; CARMO, R. A. - Fornos de Reaquecimento – Curso da ABM, realizado anualmente, a partir de 2000.
- 5 HAUCK, G. A. C. et alii – Balanço Térmico do Forno nº 1 de Reaquecimento de Placas da Linha de Chapas Grossas, durante Realização de “Hot Charge” – Serviço de Apoio Técnico – Ipatinga, Agosto de 1993.