

CÁLCULO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO GLENDON *

Deyve Drengson Carneiro Vieira¹
Tiago Luis Oliveira²

Resumo

O objetivo desse trabalho é identificar a eficiência térmica do glendon de uma empresa do setor siderúrgico mineiro. Tendo em vista que quanto mais eficiente for o equipamento, maior é o aproveitamento da energia fornecida e também menor é o consumo de carvão vegetal no alto-forno, reduzindo o OPEX. Este trabalho foi um estudo de caso baseado na análise de diferentes referências bibliográficas e através de estudos prévios e dados reais. O glendon em estudo apresentou eficiência térmica de 53,1%. Estudos mais recentes apresentaram eficiência de 67,4% utilizando chicanas no interior do glendon alterando o fluxo gasoso. O combustível do glendon é o gás do topo do alto-forno recuperado. A energia proveniente da combustão representa 89% da entrada de energia no regenerador, o que mostra quão importante é uma queima estável do GAF no glendon. Observou-se um desperdício de 45,5% da energia de combustão que saem pelos gases na chaminé, sendo uma oportunidade futura de estudo para reaproveitamento dessa energia.

Palavras-chave: Altos-fornos; Glendon; Reator.

CALCULATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF GLENDON

Abstract

This paperwork focus on identify the thermic efficiency of the Gledon reactor from a steel company in Minas Gerais' State, Brazil. Considering that the more efficient is the equipment, the greater is the utilization of supplied energy and also the less is the consumption of charcoal in the blast furnace, reducing the OPEX. This study was a case study based on the analysis of different references and through previous studies and real data. This Glendon presented thermal efficiency of 53,1%. More recent studies presented the efficiency of 67,4% by using baffles inside the glendon which changes the gas flow. The Glendon Fuel is the gas recovered from the top of the furnace. The combustion's energy represents 89% of the energy input in the regenerator, which demonstrates how important is to have a stable burning of BFA (Blast Furnace Air) in Glendon. It was noticed a waste of 45,5% of the combustion energy through the gases in the chimmey, which is an opportunity for future study about the reuse of that energy.

Keywords: Blast furnace, Glendon; Reactor.

¹ Engenheiro Metalurgista, Bacharel, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Doutorando em Engenharia de Materiais, Redemat- Rede Temática em Engenharia de Materiais-UFOP/UEMG, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse trabalho é identificar a eficiência térmica do regenerador de calor do tipo glendon, realizando seus balanços de massa e energia.

A eficiência térmica do glendon tem grande importância dentro da usina siderúrgica, pois ele é responsável por aquecer o ar soprado no alto-forno, e assim contribuir, na redução de consumo de Biorredutor (carvão vegetal) para a produção do *hot metal*.

O alto-forno é um equipamento destinado a produção de *hot metal* em estado líquido a uma temperatura em torno de 1500°C. Para isso, o alto-forno utiliza como carga metálica (sinter, pelotas e minério granulado) e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal) além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado ECT.). [7]

Um dos princípios básicos do funcionamento do alto forno é a reação de combustão através da combinação do carbono do combustível com o oxigênio do ar, que é injetado pelas ventaneiras em alta velocidade, gerando calor para aquecimento da carga e gás redutor para o processo de conversão do minério de ferro em ferro metálico. [8]

Os altos-fornos atualmente são responsáveis por aproximadamente 95% da produção mundial de *hot metal* (ferro gusa). [8]

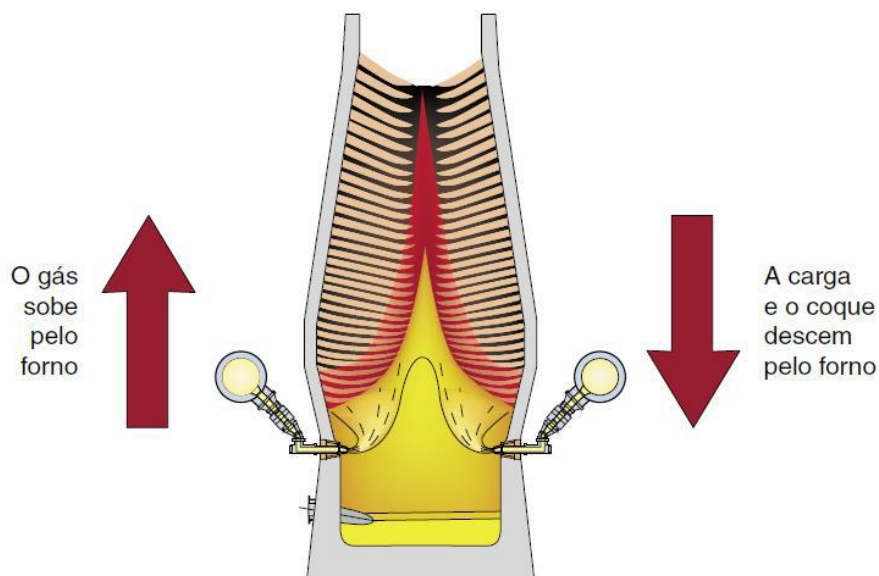


Figura 1. Alto Forno Como um Reator de Contra Corrente [6]

O alto-forno pode ser considerado como um intercambiador de calor e de materiais entre a carga descendente, inicialmente sólida, depois pastosa e mais tarde líquida e o gás redutor que sobe em contracorrente [1]

Apesar de ser baixo o poder calorífico do gás de alto-forno, comparado com os outros gases como os provenientes da aciaria e da coqueria, o mesmo pode ser recuperado e utilizado como combustível no pré-aquecimento do ar de combustão nos regeneradores do próprio alto-forno. [2]

O gás de alto-forno é um combustível de má qualidade, mas é, no entanto, produzido em uma quantidade grande o suficiente para representar uma parte importante do projeto de lei de combustível global da indústria do aço. [5]

Em situações em que há um excesso de GAF em todas as possíveis aplicações para baixa temperatura tem sido satisfeitas, é de interesse de olhar para a

possibilidade de utilizar o gás para a temperatura mais elevada no processo industrial. [5]

Esses gases são previamente purificados e queimados nos trocadores de calor. [8]

A tabela abaixo apresenta varias composições de gases de alto-forno, com seu respectivo poder calorífico: [5]

Tabela 1: Composição e poder calorífico de gases de alto-forno (GAF)

FLAME	Blast furnace gas analysis (% vol.)					LCV (kcal/m ³ ₀)	Stoich. air (kg/kg fuel)	density (kg/m ³ ₀)
	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂			
F1b	15.6	16.5	8.5	16.8	42.6	1662	1.845	1.124
E1b	18.3	18.6	4.2	4.2	54.7	1573	1.577	1.278
E1c	18.6	19.2	3.9	3.89	54.41	1641	1.650	1.279
E3b	18.5	19.3	3.96	4.07	54.17	1595	1.594	1.280
B11a	21.4	17.2	5.0	2.83	53.57	1022	.917	1.347
B22a	22.2	16.4	4.9	3.2	53.3	999	.897	1.349
B23a	21.7	15.9	4.7	2.8	54.9	949	.855	1.351
B33a	21.8	15.3	4.7	3.11	55.09	946	.853	1.348
B ^A 22/35a	20.2	16.4	4.6	3.13	55.67	971	.874	1.337
B23/25a	20.7	16.7	4.6	2.86	55.14	973	.873	1.340
B23/25a1	21.0	16.0	4.2	2.67	56.13	913	.810	1.350
B33/25a	21.5	16.3	4.3	2.89	55.01	936	.831	1.350
B ^A 22b	22.5	16.5	4.7	2.77	53.53	973	.866	1.357
B ^A 22/35b	22.8	17.2	4.9	2.89	52.21	1015	.901	1.357
C ^A 1b	19.6	18.4	3.91	3.95	54.14	993	.882	1.327
C10b	19.6	18.6	4.01	3.29	54.5	991	.876	1.334
C ^A 100b	20.4	19.9	3.65	4.20	51.85	1025	.881	1.335
C13a	19.1	18.4	4.22	3.35	54.93	1004	.897	1.328
C13b	18.5	17.8	5.04	2.72	55.94	1041	.946	1.327
C13/25b	20	19.2	4.33	3.39	53.08	1039	.921	1.334
C13/35b	18.6	19.4	3.8	3.42	54.78	1000	.885	1.326
C ^A 1/25b	21.6	20.8	3.5	4.16	49.94	1036	.897	1.338
C ^A 1/35b	19.7	19.1	3.95	4.31	52.94	1027	.914	1.320
C ^A 1/50	19.8	18.6	3.95	3.93	53.72	1002	.891	1.325
C ^A 1/35c	19.9	18.9	4.00	4.91	52.21	1041	.936	1.313
D ^A 23b	24.0	15.6	2.5	2.97	54.93	762	.639	1.376
D ^A 23/25b	26.0	15.1	2.8	2.84	53.26	769	.648	1.390
D ^A 31b	25.2	16.1	2.8	2.59	53.31	793	.664	1.386
D ^A 31/35b	24.9	15.6	3.0	2.42	54.08	791	.668	1.385
D ^A 11/35b	25.7	15.9	2.74	2.44	53.22	778	.648	1.392

Se o ar necessário à combustão fosse introduzido pelas ventaneiras do alto forno à temperatura ambiente maior quantidade de Coque ou carvão vegetal seria gasta para gerar calor para aquecer os gases até as temperaturas de trabalho reinantes na região de queima. [1]



Figura 2. Regenerador Glendon

Para realizar o aquecimento do ar de combustão nos trocadores de calor é utilizado parte dos gases que saem do topo do alto-forno. Estes gases são devidamente purificados e são queimados nos trocadores de calor. [8]

Segundo Rizzo (2009), o trocador de calor tipo glendon consiste em uma câmara de paredes refratárias, onde ocorre a combustão que conseqüentemente aquece fileiras de garrafas de ferro fundido, interligadas por canais na parte inferior ou tubulações de aço inox chamadas de serpentinas. O ar frio é soprado escoa por dentro das garrafas ou tubulações e se aquece. [8]

Os Glendons possuem um regime de trabalho contínuo. O ar quente é então conduzido ao anel de vento e injetado no alto-forno através das ventaneiras. [2]

Rizzo (2009) afirma que a operação do glendon consiste basicamente em se manter a temperatura do ar de sopro constante. [8]

1.1 Leis da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica: “A energia não pode ser criada nem destruída em um sistema de massa constante, mas pode ser convertida de uma forma para outra”. [4]

Para o desenvolvimento de balanço de massa é necessário lidar com alguns conceitos: Número de moles, equação dos gases e estequiometria de reações químicas. [4]

O balanço de massa para qualquer processo metalúrgico está baseado na seguinte expressão: [4]

$$\text{Entrada de massa} = \text{Saída de massa} + \text{Acumulo de massa} \quad (1)$$

Para o desenvolvimento de balanço de massa é necessário lidar com alguns conceitos: Número de moles, equação dos gases e estequiometria de reações químicas. [4]

A eficiência energética (térmica) de um equipamento pode ser entendida Como a razão entre o resultado obtido e o recurso empregado. No caso dos Glendons, A eficiência energética foi definida. [2]

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_0} \times 100 \quad (2)$$

η = Eficiência térmica do glendon; Q_1 = Calor absorvido pelo ar de sopro
 Q_0 = Calor fornecido pela combustão

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é um estudo de caso baseado na análise de dados reais de uma empresa do setor siderúrgico e na literatura referente ao assunto de altos-fornos e trocadores de calor.

Na empresa de estudo não se utiliza apenas 1 (um) glendon, mas sim um conjunto formado por 4 (quatro) glendons. Para simplificar foi estudado o glendon número 2, Sua escolha deve-se ao fato de estar em melhores condições físicas e apresentar instrumentos de medidas mais confiáveis.

2.1 Premissas

Na siderúrgica o conjunto é formado por 4 glendons, para simplificação estudou-se o glendon de número 2. Sua escolha deve-se ao fato de estar em melhores condições físicas e apresentar instrumentos de medidas mais confiáveis.

Seguem algumas premissas:

Temperatura ambiente, referência 25°C; Temperatura do ar e gás de combustão 25°C; Composição do ar atmosférico constante; A vazão de ar a ser aquecido é 1/4 do total, pois não há medidor de vazão independente.

2.2 Balanço de massa

A entrada de massa no glendon acontece de duas formas (a e b) e a saída também ocorre de duas formas (c e d). A tabela 2 mostra o teor de cada componente dos gases

- Ar de sopro frio que sofrerá aquecimento para ser soprado no alto-forno;
- Combustão do GAF com ar atmosférico;
- Ar de sopro aquecido;
- Gases da chaminé do glendon.

Tabela 2: composição dos gases utilizados no glendon

GAF		Ar Atmosférico	
%		%	
O2	0,74	N2	77,23
CH4	2,02	O2	20,53
H2	4,77	2,24	2,24
N2	51,53	-	-
CO	24,52	-	-
CO2	16,36	-	-

Como já se sabe o volume parcial de cada composto o cálculo de mol de cada composto se dá pela equação:

$$n_i = V(Nm^3) \times 1000 \times (\% i) / 100 \times 122.4 \quad (3)$$

n_i = número de mol do elemento/composto;

V = volume em Nm^3 ;

$\%i$ = percentual em volume do elemento composto no gás.

Conhecendo a quantidade em mol de água, pode calcular o volume nas condições normais de temperatura e pressão:

$$1000 \times V(Nm^3) / V(Nm^3)_{H2O} = n_{H2O} \times V_{H2O} \quad (4)$$

Tabela 4: Vazão dos glendons

Entrada	unidade	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Média
Vazão Total	Nm^3/h	20737	21850	20046	20878
Vazão glendon 2	Nm^3/h	5184	5462	5011	5219
Vazão glendon 2	Nm^3/s	Parede	1,52	1,39	1,45

A vazão da mistura de combustão Ar/GAF não é medida no processo. Sendo assim, não é possível ser feito balanço de massa diretamente. Então foi realizado o balanço de massa indiretamente. Foi realizado o balanço de massa para queima de 1 Nm³ de GAF.

2.3 Balanço de energia

Para o cálculo de energia utilizou-se dados conforme tabela 5:

Tabela 5: Entradas e saídas de calor

Entrada de Calor	Saída de calor
Calor de reação ar atm com GAF	Aquecimento do ar de sopro
Calor contido no ar de sopro frio	Perda pelas paredes e teto
-	Perdas pelos gases de chaminé

A entrada de energia se dá pelo calor contido no ar de sopro frio e reação de combustão ar/GAF.

A energia contida no ar de sopro pode ser calculada com a expressão abaixo:

$$(HT - H_{298})e = ne(AT + B \times 10^{-3} \times T_2 + ct \times 10^5 + D) \quad (5)$$

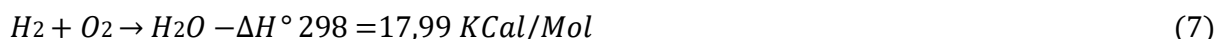
Essa temperatura do ar de sopro frio é medida mas não é registrada. Para formação de dados foi realizado um acompanhamento aleatório para calcular a média dessa temperatura durante 10 dias, Conforme tabela 6.

Tabela 6: Temperatura de ar de sopro frio

Temperatura de ar de sopro na entrada do glendon											
Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
°C	134	131	138	135	126	129	140	131	119	138	132

A energia de combustão de GAF/Ar foi calculada através das entalpias das reações químicas a seguir (6,7,8,9).

$$\Delta H^{\circ}R = ne(\Delta H^{\circ}298 P) - ne(\Delta H^{\circ}298 r) \quad (6)$$



A saída de energia se dá por aquecimento do ar de sopro, pelos gases que saem pela chaminé e perda pelas paredes e perdas pelo teto.

Foi realizado um levantamento utilizando dados históricos para determinar a temperatura média em que o ar de sopro é aquecido, Conforme tabela 7.

Tabela 7: Temperatura do ar de sopro aquecido

Temperatura do ar de sopro aquecido				
Temperatura	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Média
°C	671	663	672	672

A temperatura dos gás que saem da chaminé são medidas mas não são registradas. Para criação da base de dados foram realizadas amostragens de temperatura durante 10 do mês 3. Foi tomado o cuidado em não coletar dados em dias em que ocorreram anomalias no processo (tabela 8).

Tabela 8: temperatura do gás da chaminé do glendon

Temperatura do gás da chaminé											
Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
°C	475	486	478	430	484	470	397	435	397	458	451

Não foi possível calcular as perdas térmicas pelas paredes e tetos. Para calcular as perdas seriam necessárias informações sobre o material de construção do glendon tais como, condutividade térmica.

Descrever brevemente os equipamentos e os procedimentos utilizados, assim como a literatura e os métodos estatísticos empregados, quando for o caso.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O glendon em estudo apresentou eficiência térmica de 53,1%. A perda pelos gases da chaminé foi de 45,5%. Como proposto, a perda pelas paredes e teto aproximadamente 2,2% (figura 3). É clara uma grande perda de energia pelos gases de chaminé, se aproximando a eficiência térmica do glendon.

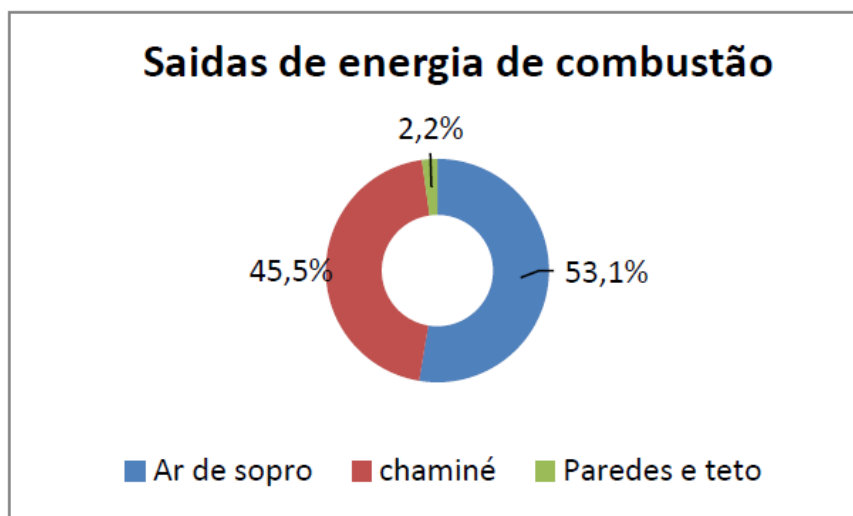


Figura 3. Saída de energia do Glendon

O glendon em estudo apresentou eficiência próxima do encontrado na literatura 51,3%. Eficiência energética dos Glendons é da ordem 59,1%. [2]

Após alguns trabalhos realizados com instalação de chicanas Assunção conseguiu elevar a eficiência para 67,4%. A inclusão das chicanas se mostrou mais efetiva do que a redução da área de passagem dos gases da combustão, e promoveu um aumento na eficiência energética do Glendons de 59,1% para 67,4%. O objetivo foi fazer com que o fluxo dos gases da combustão fosse cruzado ao fluxo de ar no interior das serpentinas e a turbulência do escoamento externo fosse aumentada, aumentando assim a troca de calor (Figura 4). [2]

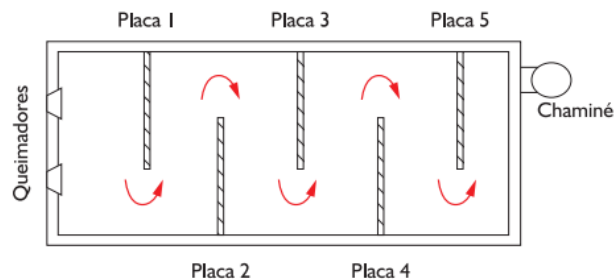


Figura 4. Esquema das chicanas no interior do glendon

De acordo com os cálculos de balanço de massa, para uma queima completa do GAF a relação de ar/GAF é 0,84. Para garantia de uma queima completa é utilizado um relação com excesso de O₂ 1,1 (figura 5).

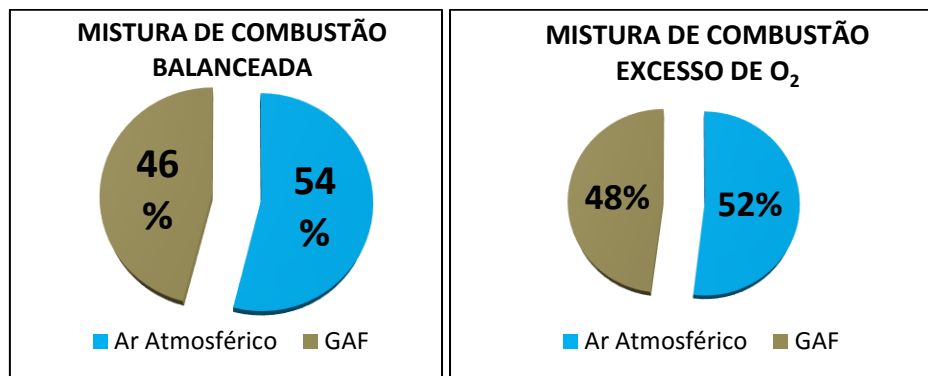


Figura 5: (a) mistura de queima balanceada, (b) mistura de queima com excesso de oxigênio

A energia proveniente da combustão representa 89% da entrada de energia no regenerador, o que mostra quão importante é uma boa queima do GAF (figuras 6).

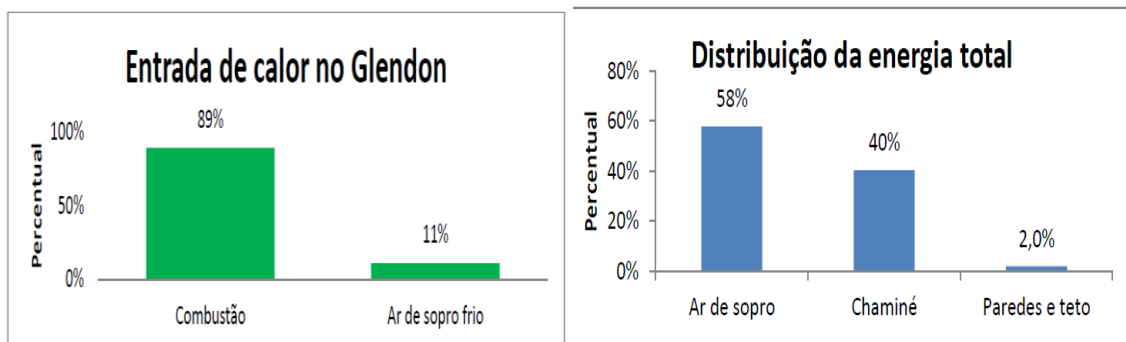


Figura 6: (a) Entrada de calor no glendon, (b) Saída da energia do glendon

Tendo em vista de outro trabalho relacionado, é verificado que as perdas térmicas pelo teto e paredes são pequena. Segundo (ASSUNÇÃO, 2006) a perda térmica pelas paredes e teto representa cerca de 1% da energia liberada pela combustão do GAF.[2]

Visando que o modelo de equipamento tem algumas diferenças e que nesse trabalho não foi calculado. Esse tipo de perda foi considerada em até 2,6% da energia produzida pelo GAF. (Tabela 9).

Tabela 9. Entrada e Saída De Calor Do Glendon

Entrada	Kcal	Saída	Kcal
Ar de sopro Frio	62	Ar de sopro aquecido	331
Combustão	505	Chaminé	230
-	-	Parede	11
Total	568		572

4 CONCLUSÃO

A realização do cálculo da eficiência térmica do glendon foi importante para conhecer o verdadeiro estado de eficiência térmica do conjunto de glendons da empresa em estudo. Sendo que em mais de 19 anos em operação do equipamento nunca foi realizado um estudo dessa amplitude.

glendon em estudo apresentou boa eficiência térmica 53,1%. Do total de energia que entra no regenerador 58% é absorvida pelo ar de sopro, sendo que 89% desta energia sendo proveniente da queima do GAF.

Para que fosse possível chegar ao resultado foi de grande importância conhecer, através de uma relação matemática, a quantidade de ar atmosférico necessário para que seja possível a queima desejada do GAF, que para a composição química do gás em estudo foi de 0,84 ar/GAF.

A bibliografia sobre glendon é pequena e de difícil acesso. O regenerador é um equipamento que tem poucos instrumentos de controle e acompanhamento o que dificulta a obtenção de dados precisos e confiáveis, o que demanda um esforço maior na coleta e tratamento dos dados obtidos.

Como a energia de queima é de extrema importância para o boa eficiência térmica do glendon, a automatização das válvulas que regulam a relação ar/GAF é uma condição que levará à um avanço no sentido de aproveitar melhor o potencial energético do GAF.

Em seu trabalho (ASSUNÇÃO 2009) afirma que, com um aumento real na temperatura de sobro de 135°C. [2]

Para trabalho futuro o estudo de viabilidade econômica da implantação das chicanas abre uma grande oportunidade de melhoria da eficiência energética do glendon.

Observou-se uma grande perda de energia pelos gases da chaminé, o aprofundamento em estudos em reaproveitamento desses gases na secagem e tratamento térmico em minérios é outra oportunidade de avanços.

Agradecimentos

Meus Agradecimentos vão para: Professor Dr. Tiago Oliveira pelo apoio, confiança e orientação nesse trabalho desde o início; Engenheiro metalurgista Cristhian Luiz Gomes pelo suporte técnico e prático; FaEnge e Departamento de Engenharia Metalurgia pela parceria firmada academia – indústria, sem a qual não seria possível a realização do projeto; A empresa em questão empresa por abrir as portas para realização dos trabalhos; Aos departamentos de Engenharia Ambiental, Minas e Civil por terem se mobilizado em conjunto as atividades do projeto; Professores Breno Eustáquio e Marcelo Alves Fonseca pelo apoio com a metodologia. A coordenação de pesquisa da Faenge por acreditar no projeto; Sara Oliveira pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 ARAUJO, Luiz Antonio de, Manual de Siderurgia (2ª Ed., Vol.1). São Paulo: Arte & Ciência, 2005.
- 2 ASSUNÇÃO, Charles Sóstenes. Glendon Siderúrgico: Análise Termodinâmica e Modelagem Matemática Simplificada. Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação Stricto Sensu de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2006. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
- 3 ASSUNÇÃO, C. S. Redução do consumo de oxigênio em um alto-forno a partir do aumento da eficiência energética dos aquecedores de ar In: ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 25., SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 2009, São Paulo. Anais. São Paulo: ABM, 2009.
- 4 CASTRO, Luiz Fernando Andrade de; TAVARES, Roberto Parreiras; MORELATO, Anderson Peter; Injeção de Carvão Pulverizado nas Ventaneiras do Alto-Forno. UFMG, Belo Horizonte, 1997.
- 5 Commission Of The European Communities. The use of blast-furnace gas as a fuel in high-temperatura furnaces of the steel industry. EUR 1979
- 6 GEERDES, Geerdes et al. Práticas Modernas para Operação de Alto Forno. Cidade de IJmuiden, Outubro de 2004.
- 7 MOURÃO et al. Introdução à Siderurgia. ABM, São Paulo, 2007.
- 8 RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno. ABM, São Paulo, 2009.