

ESTIMATIVA DA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA DA FORNALHA DE UMA CALDEIRA SIDERÚRGICA INDUSTRIAL EVALUATION OF THE ADIABATIC FLAME TEMPERATURE FURNACE'S OF AN INDUSTRIAL BOILER STEELMAKING

Leticia Fabri Turetta¹; Andréa Oliveira Souza da Costa²

1 Graduada em Engenharia Química. Faculdades integradas de Aracruz (FAACZ), 2013. Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPEQ), Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, ES. leticialft@hotmail.br.

2 Doutora em Engenharia Química. Programa de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQ/COPPE/UFRJ), 2004. Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. (UFMG). Belo Horizonte, MG. andreaosc@yahoo.com.br.

Recebido em: 28/02/2016 - Aprovado em: 14/09/2016 - Disponibilizado em: 30/11/2016

RESUMO: A indústria siderúrgica produz quatro subprodutos com significativa capacidade de geração de energia. Esses subprodutos podem ser utilizados como combustível na caldeira siderúrgica, equipamento da central termoeletrica. O objetivo deste estudo é propor uma modelagem para estimar a temperatura adiabática da chama da fornalha de uma caldeira siderúrgica com a variação de ar e combustível disponível. A técnica empregada consiste no princípio da Primeira Lei da Termodinâmica. O balanço de energia do sistema foi proposto definindo assim o modelo. A solução do modelo possibilita estimar a temperatura adiabática do sistema. Na indústria, a temperatura adiabática é determinada pelo poder calorífico inferior dos combustíveis. A metodologia proposta neste estudo faz com que não sejam necessários levantamentos experimentais do poder calorífico inferior. Os valores da temperatura adiabática simulados indicam que utilizar condições operacionais distintas na alimentação do combustível e do ar podem afetar significativamente o valor deste parâmetro. Nas simulações com a variação de ar, nota-se que a temperatura adiabática decresce com o acréscimo do excesso de ar. Tal resultado é esperado, uma vez que o aumento da massa, contida no sistema, diminui a eficiência energética do processo. Conclui-se que a metodologia proposta provou ser eficaz de descrever o sistema quando diferentes condições de alimentação são adotadas.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria siderúrgica. Temperatura adiabática de chama. Primeira Lei da Termodinâmica.

ABSTRACT: Steel industry produces four by-products with significant capacity of energy generation. These products can be used as fuel at steel boiler, equipment thermoelectric plant. The objective of this study is to propose a modeling to estimate the adiabatic flame temperature furnace's of an industrial boiler steelmaking with the variation of available air and fuel. The technique employed consists in principle of the First Law of Thermodynamics. The system's energy balance was proposed thus defining the model. The solution's model enables to estimate the system's temperature of the adiabatic. In industry, the adiabatic temperature is determined by the fuel's lower heating value. The methodology proposed in this study makes is not necessary experimental surveys of the lower heating value. The values at the adiabatic temperature simulated to indicate that use different operating conditions in the feed of fuel and air can significantly affect the value of this parameter. In the simulation with the variation in air, it is noted that the adiabatic temperature decreases with the increase of excess air. This result is expected since the increase of the mass contained in the system decreases the energy efficiency of the process. It is concluded that the methodology proved to be effective to describe the system when different air and fuel feed are adopted.

KEYWORDS: Steel industry. Adiabatic flame temperature. First Law of Thermodynamics.

1 INTRODUÇÃO

A siderurgia é considerada uma atividade intensiva na demanda de energia. O cenário da evolução da oferta e da demanda de energia é uma tarefa desafiadora para o setor de planejamento das empresas siderúrgicas (EPE, 2014). Durante o processo siderúrgico, quatro subprodutos são produzidos.

O gás de coqueria (*coke oven gas* - COG) e o alcatrão (TAR) são os subprodutos gerados na etapa de coqueificação. A coqueificação consiste em submeter uma mistura de carvões de características adequadas a uma destilação, com a finalidade de produção do coque (ARAUJO, 2005; WIKLUND; PETTERSSON; SAXÉN, 2013; NISTALA *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2012; TAKANO, 2007). O gás de alto forno (*blast furnace gas* - BFG) é o subproduto gerado na etapa de redução. Essa etapa consiste basicamente na redução dos óxidos de ferro por meio de um redutor (coque). Após a etapa de redução, flui do topo do alto forno o BFG (DONATELLI, 1993; KORSHIKOV; MIKHAILOV; TITOV, 2013; NOGAMI; CHU; YAGI, 2006). O gás de aciaria (*Linz-Donawitz gas* - LDG) é gerado na etapa de refino. O refino é usado na eliminação de impurezas e segregações. A etapa de refino que ocorre nas aciarias promove a oxidação dos elementos do ferro gusa produzindo a aço (QUITES, 2007; MALYNOWSKYJ, 2007; SAMBASIVAM; DURST, 2009). As composições molares típicas desses subprodutos estão dispostas na Tabela 1. Os subprodutos da indústria siderúrgica, listados na Tabela 1, apresentam elevada capacidade de produção de energia elétrica, quando direcionados as centrais termoelétricas.

Tabela 1

Dados industriais da composição percentual molar dos subprodutos combustíveis

| Substância | COG (%) | BFG (%) | LDG (%) | TAR (%) |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| O ₂ | 0,1 | - | 0,3 | 1,6 |
| CO | 6 | 21,6 | 60,4 | - |
| CO ₂ | 1,34 | 23,4 | 15,1 | - |
| N ₂ | 1,81 | - | 21,2 | 0,8 |
| H ₂ | 63,16 | 52,3 | 3 | 6,2 |
| H ₂ S | 0,09 | 2,7 | - | - |
| CH ₄ | 23,72 | - | - | - |
| C ₂ H ₂ | 0,08 | - | - | - |
| C ₂ H ₄ | 2,15 | - | - | - |
| C ₂ H ₆ | 0,77 | - | - | - |
| C ₃ H ₈ | 0,13 | - | - | - |
| C ₆ H ₆ | 0,65 | - | - | - |
| C | - | - | - | 91,1 |
| S | - | - | - | 0,3 |

Fonte – Adaptado da indústria.

A central termoelétrica é uma instalação industrial, que transforma a energia térmica, obtida a partir da combustão de combustíveis na fornalha das caldeiras siderúrgicas, em energia elétrica (GARCÍA; ZORRAQUINO, 2002; HOU *et al.*, 2011). A combustão desses subprodutos na presença de ar disponibiliza o conteúdo energético do combustível e gera gases de exaustão (produtos da reação de combustão) (Figura 1).

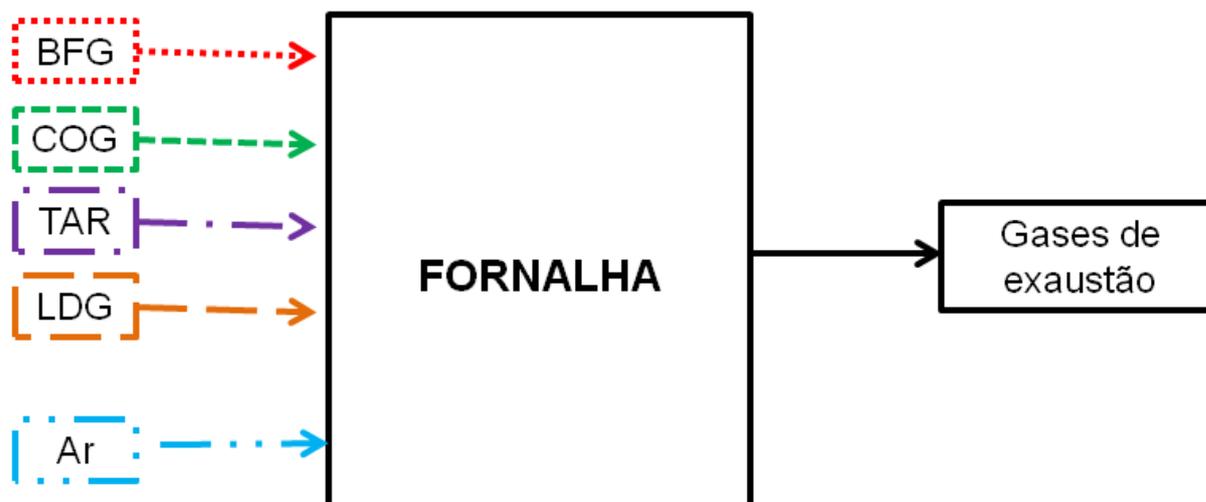


Figura 1 – Esquema do sistema de combustão
Fonte – Próprio autor.

Tradicionalmente, as empresas siderúrgicas adotam nas centrais termoelétricas uma mistura de combustíveis denominada de mix. O mix de combustível é a combinação dos quatro subprodutos gerados durante o processo de fabricação do aço (BFG, COG, LDG e TAR). A determinação das possibilidades de combinação (mistura) dos combustíveis é importante, pois cada combustível possui um poder calorífico diferente. Um combustível (ou mix de combustível) com elevado poder calorífico inferior (PCI), pode danificar os equipamentos das centrais termoelétricas, se os equipamentos não forem dimensionados para operar nessa condição. Ressalta-se nesse ponto ser essa uma preocupação rotineira na fábrica.

Na Tabela 2 é possível visualizar o poder calorífico inferior médio dos quatro subprodutos gerados na indústria siderúrgica. O PCI é determinado por levantamentos experimentais e podem ser fortemente alterados em função da composição química do combustível. Na indústria, o PCI é empregado para a avaliação do desempenho do mix de combustível no processo de combustão na caldeira.

Tabela 2
Dados industriais do poder calorífico inferior dos subprodutos

| Subproduto | PCI |
|------------|---------------------------|
| BFG | 820 kcal/Nm ³ |
| COG | 4250 kcal/Nm ³ |
| LDG | 2000 kcal/Nm ³ |
| TAR | 8999 kcal/kg |

Fonte – Adaptado da indústria.

Nesse contexto, a temperatura adiabática de chama (T_{ad}) informa o limite superior a ser atingido no interior do equipamento (fornalha). Tal parâmetro teórico é amplamente empregado na rotina industrial, pois auxilia o operador na operação do equipamento.

Na literatura, García e Zorraquino (2002), Gicquel *et al.* (2003), Sanghyun *et al.* (2013), Fu *et al.* (2015), Gonca (2015) e Shivapuji e Dasappa (2015) empregam a T_{ad} do processo para avaliar a reação de combustão.

O objetivo do presente estudo consiste na determinação e na análise dos valores da T_{ad} da

fornalha de uma caldeira siderúrgica industrial que utiliza como combustíveis os subprodutos gerados. Diferentes configurações de alimentação do combustível e ar são analisadas.

Objetiva-se ainda propor uma metodologia iterativa para o cálculo de T_{ad} , uma vez que nem sempre os profissionais da fábrica dominam tal técnica ou a divulgam em trabalhos técnicos ou científicos.

2 METODOLOGIA

Energia é um conceito fundamental da termodinâmica, e um dos aspectos mais significativos de análise dos processos industriais. Na aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica, o balanço global de energia de um processo pode ser descrito pela Equação 1 (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2000; EL-MAHALLAWY; HABIK, 2002; WARNATZ; MAAS; DIBBLE, 2006; MOLLERUP; MICHELSEN, 2007).

$$\frac{dE}{dt} = Q - W + dH + dE_c + dE_p \quad (1)$$

Na qual,

$\frac{dE}{dt}$ - variação temporal da energia contida no sistema;

Q - quantidade líquida de energia transferida através da fronteira na forma de calor;

W - quantidade líquida de energia transferida através da fronteira do sistema na forma de trabalho;

dH - variação de entalpia no sistema através de suas fronteiras;

dE_c - variação da energia cinética no sistema através de suas fronteiras;

dE_p - variação da energia potencial no sistema através de suas fronteiras.

Neste trabalho, o balanço de energia explicitado na Equação (1) é aplicado para a fornalha siderúrgica, considerando as seguintes hipóteses:

- Combustão completa;
- O sistema opera em regime permanente;
- As variações de energia cinética e potencial não são significantes;
- Não ocorrem variações de pressão ou de volume (fronteiras da fornalha são rígidas);
- Não há transferência de energia na forma de trabalho através das fronteiras do sistema;
- Não há transferência de energia na forma de calor através das fronteiras do sistema (processo adiabático).

Assim, a Equação (1) pode ser reescrita como a Equação (2).

$$dH = 0 \quad (2)$$

Com o objetivo de determinar a variação de entalpia do processo (dH), qualquer trajetória conveniente entre os estados inicial (alimentação de reagentes) e final (geração de produtos) pode ser utilizada. Na Figura 2, a linha tracejada representa a trajetória real pela qual o processo ocorre. Como há disponibilidade de dados para os calores de reação padrão a 25°C, a trajetória mais conveniente é aquela que inclui as reações a 25°C. A variação da entalpia é independente da trajetória, portanto a trajetória escolhida para a estratégia de solução é representada pela linha contínua do diagrama na Figura 2.

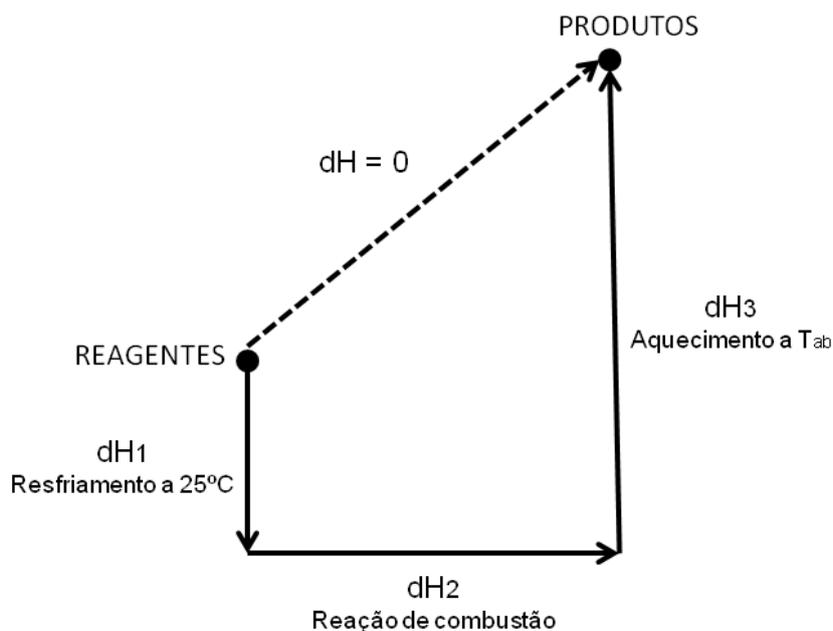


Figura 2 – Diagrama da trajetória do cálculo da variação de entalpia do processo
Fonte – Próprio autor.

Assim, como a entalpia é uma propriedade termodinâmica, a variação da entalpia do sistema de combustão dos reagentes, composto pelos subprodutos do processo siderúrgico é calculada pela soma das variações da entalpia da trajetória escolhida (Equação 3).

$$dH = dH_1 + dH_2 + dH_3 \quad (3)$$

Na qual,

dH_1 - variação da entalpia da etapa 1;

dH_2 - variação da entalpia da etapa 2;

dH_3 - variação da entalpia da etapa 3.

A etapa 1 consiste em resfriar os reagentes até a temperatura de 25°C. Destaca-se nesse ponto que os combustíveis e o ar são alimentados na fornalha a temperaturas distintas como será explicitado posteriormente. Na Tabela 3 constam os dados industriais de alimentação dos reagentes em condições de operação típicas verificada na indústria.

Tabela 3

Dados industriais referentes à alimentação de combustível (mix de combustível)

| Condição operacional | Caldeira | Alimentação dos reagentes | | | | | Temperatura de alimentação (°C) | | | | |
|----------------------|-----------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|---------------------------------|------|------|-------|-------|
| | | BFG (ton/h) | COG (ton/h) | LDG (ton/h) | TAR (ton/h) | Ar _{excesso} (%) | BFG | COG | LDG | TAR | Ar |
| 1 | 1 ou 2 | 154,24 | 2,58 | 0 | 0 | 12 | 34,0 | 33,6 | 0 | 0 | 174,0 |
| 2 | 1, 2 ou 3 | 142,38 | 3,16 | 0 | 7,30 | 12 | 37,5 | 46,0 | 0 | 120,0 | 167,4 |
| 3 | 4 | 144,02 | 3,41 | 0,03 | 7,50 | 12 | 37,6 | 34,6 | 63,6 | 120,6 | 177,7 |

Fonte – Adaptado da indústria.

O emprego da Equação 4 possibilita o cálculo da energia disponibilizada pela etapa do processo responsável em resfriar os reagentes até 25°C.

$$dH_1 = \sum_{i=1}^n \int_{T_{\text{Combustível}}}^{25^\circ\text{C}} n_{\text{combustível}_i} \cdot C_{p\text{Combustível}_i} dT + \int_{T_{\text{Ar}}}^{25^\circ\text{C}} n_{\text{Ar}} \cdot C_{p\text{Ar}} dT \quad (4)$$

Na qual,

$T_{\text{Combustível}}$ - temperatura de alimentação do combustível;

$n_{\text{Combustível}}$ - número de mols de alimentação do combustível;

T_{Ar} - temperatura de alimentação do ar;

n_{Ar} - número de mols de alimentação do ar;

$C_{p\text{Combustível}}$ - capacidade calorífica do combustível;

$C_{p\text{Ar}}$ - capacidade calorífica do ar;

n - número de diferentes espécies químicas que compõem o mix de alimentação de combustível.

As reações de combustão foram consideradas na etapa 2 do diagrama sendo determinada pela Equação 5. A variação da entalpia na etapa 2 foi determinada pela subtração da entalpia de formação padrão dos produtos menos a entalpia de formação padrão dos reagentes considerando a temperatura de 25°C. O balanço de massa por espécies químicas foi aplicado para a determinação do número de mols dos produtos gerados e o número de mols dos reagentes consumidos.

$$dH_2 = \sum_{i=1}^m n_{\text{Produtos}_i} \cdot H_{\text{Produtos}_i} - \sum_{i=1}^n n_{\text{Reagentes}_i} \cdot H_{\text{Reagentes}_i} \quad (5)$$

Na qual,

H_{Produtos} - entalpia padrão de formação da espécie química presente no gás de exaustão a 25°C;

n_{Produtos} - número de mols da espécie química presente no gás de exaustão;

$H_{\text{Reagentes}}$ - entalpia padrão de formação da espécie química que compõe o mix de alimentação de combustível a 25°C;

$n_{\text{Reagentes}}$ - número de mols da espécie química que compõe o mix de alimentação de combustível;

n - número de diferentes espécies químicas que compõem o mix de alimentação de combustível;

m - número de diferentes espécies químicas presentes no gás de exaustão.

A etapa 3 consiste em dispor os gases de exaustão (produtos) a T_{ad} . Os gases de exaustão que deixam a fornalha, produtos da reação de combustão completa, contêm CO_2 , H_2O , SO_2 e N_2 . Nos casos em que o processo opere com excesso de ar, a vazão dos gases de exaustão também irá conter O_2 . A variação de entalpia dos produtos, quando são aquecidos de 25°C até a T_{ad} , é descrita pela Equação 6.

$$dH_3 = \sum_{i=1}^m \int_{25^\circ\text{C}}^{T_{\text{ad}}} n_{\text{Produtos}_i} \cdot C_{p\text{Produtos}_i} dT \quad (6)$$

Na qual,

$C_{p\text{Produto}}$ - capacidade calorífica total da corrente de produto;

n_{Produtos} - número de mols da espécie química presente no gás de exaustão.

Como as capacidades caloríficas médias dependem da temperatura do processo (neste caso representado por T_{ad}) avaliamos $C_{p\text{Produto}}$ e $C_{p\text{Excesso}}$ (em caso de processo que opere com excesso de ar) em um valor de T_{ad} admitido, ou seja, maior que 25°C e substituímos os resultados das Equações 6, 5 e 4 na Equação 2. O procedimento continua até a convergência alcançar o valor final.

Na busca pela solução do problema foi empregada a implementação do método de solução de equações não lineares do programa comercial *Matlab*. O fluxograma apresentado na Figura 3 ilustra uma representação esquemática do algoritmo proposto.

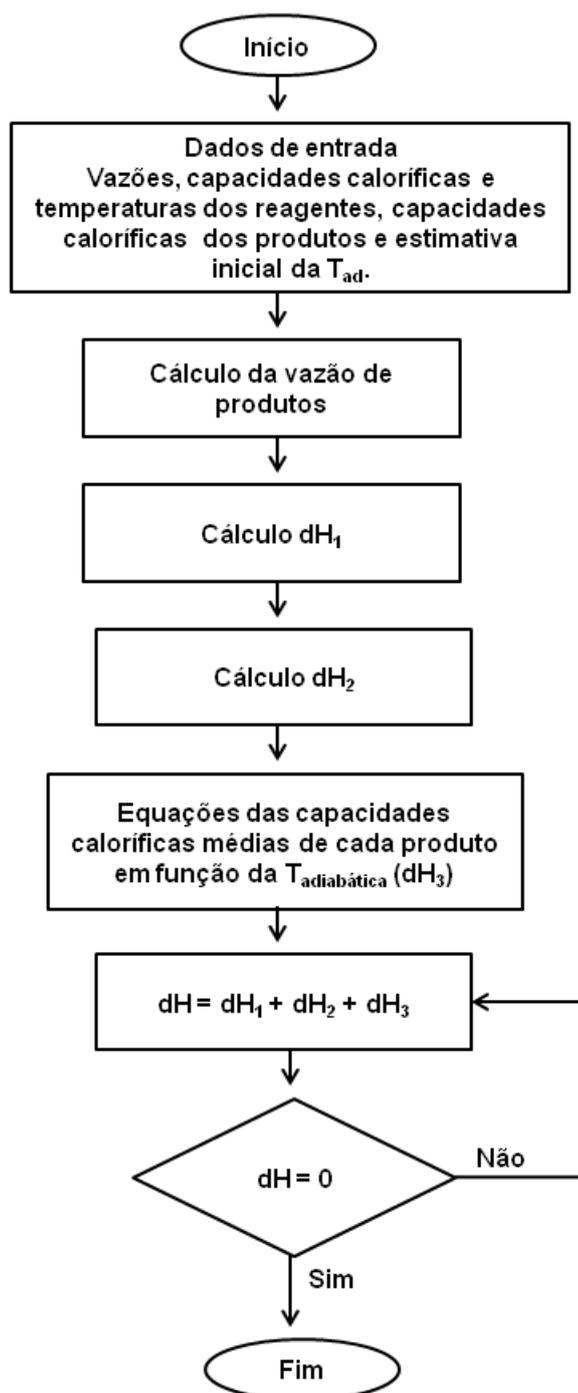


Figura 3 – Representação esquemática da metodologia de resolução do problema
Fonte – Próprio autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A central termoelétrica estudada possui quatro caldeiras denominadas como caldeiras 1, 2, 3 e 4 (Tabela 3). As caldeiras 1 e 2 foram projetadas e construídas para operar com um mix de combustível,

contendo apenas BFG e COG. Entretanto, devido às demandas do processo, as caldeiras 1 e 2 atualmente operam queimando adicionalmente ao TAR. As caldeiras 3 e 4, foram projetadas e construídas posteriormente às caldeiras 1 e 2, devido à uma demanda na ampliação do processo produtivo. A caldeira 3, opera com um mix de combustível contendo BFG, COG e TAR e a caldeira 4 é a única capaz de queimar os quatro subprodutos citados na Tabela 1. Tal realidade evidencia a importância do conhecimento de T_{ar} , uma vez que alterações rotineiras, como as aqui explicitadas para a alimentação de combustível, devem ser administradas pelo corpo técnico que opera os equipamentos.

Os valores adotados para as condições operacionais da simulação refletem valores reais usualmente utilizados em uma indústria siderúrgica brasileira, como já mencionado anteriormente (Tabela 3).

A T_{ad} estimada neste trabalho, quando a fornalha queima BFG e COG (Condição operacional 1, Tabela 3) é $1953,15^{\circ}\text{C}$. Operando com um mix de combustível contendo também o TAR além do BFG e COG, a T_{ad} estimada é $1969,35^{\circ}\text{C}$ (Condição operacional 2, Tabela 3). Quando o processo de combustão utiliza os quatro subprodutos gerados como combustível, a T_{ad} estimada é de $1975,55^{\circ}\text{C}$ (Condição operacional 3, Tabela 3).

Assim, os valores de T_{ad} estimados indicam que utilizar condições operacionais distintas na alimentação do combustível pode afetar o valor deste parâmetro, como já era previsto na literatura e na operação diária da planta industrial.

Novas simulações (análises) foram realizadas (Tabela 4), considerando-se diferentes valores de percentuais molares para cada combustível, mantendo fixa:

- A vazão de combustível total molar em 9760400 mol/h;
- Temperaturas alimentação de BFG, COG, LDG, TAR e Ar em 37,6°C; 34,6°C; 63,6°C; 120,6°C e 177,7°C respectivamente;
- Sem excesso de ar.

Tabela 4
Simulação de novas condições operacionais

| Porcentagem da vazão total molar de alimentação (%) | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Análise | BFG | COG | LDG | TAR |
| 1 | 80 | 4 | 9 | 7 |
| 2 | 90 | 3 | 0 | 7 |
| 3 | 97 | 3 | 0 | 0 |
| 4 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 100 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 8 | 50 | 50 | 0 | 0 |
| 9 | 50 | 25 | 0 | 25 |
| 10 | 50 | 25 | 25 | 0 |
| 11 | 25 | 25 | 25 | 25 |

Fonte – Próprio autor.

Na Figura 4 é possível visualizar graficamente as variações da T_{ad} para 11 análises distintas (Tabela 4).

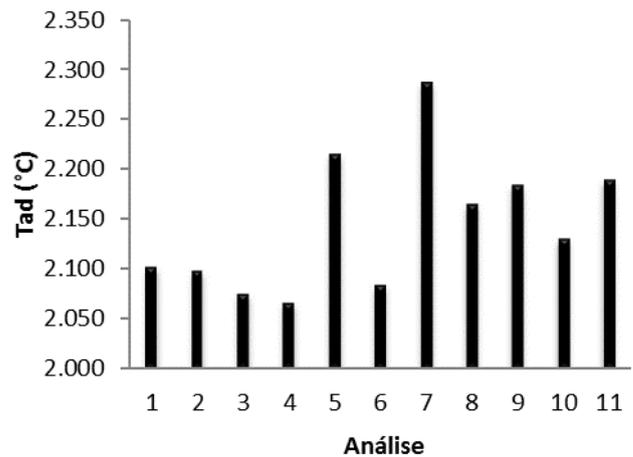


Figura 4 – Gráfico da T_{ad} do processo quando diferentes condições operacionais
Fonte – Próprio autor.

Nas análises 1, 2 e 3 (Tabela 4) foram utilizadas porcentagens da vazão molar de alimentações aplicadas na indústria. Percebe-se que, para tais condições, foram encontrados os menores valores de T_{ad} (Figura 4).

Nas simulações para as análises 4, 5, 6 e 7 (Tabela 4) foram utilizadas na alimentação do processo 100% de cada combustível. Nota-se que, de acordo com as simulações realizadas, quanto maior o PCI (Tabela 2), maior é a T_{ad} . Tal resultado já era esperado, pois o PCI quantifica a energia liberada na forma de calor na oxidação completa do material (LIANG; JINGQI, 2015).

É comum que indústrias siderúrgicas não utilizem grandes percentuais de TAR no mix de combustível, apesar deste subproduto ter o maior conteúdo energético entre os quatro subprodutos (Tabela 1). O TAR não é gerado em grande volume como os outros subprodutos, e sua queima gera grande instabilidade na central termoelétrica. Essa instabilidade está relacionada ao elevado PCI e à alta viscosidade. Assim, é possível afirmar que tradicionalmente a maioria das caldeiras siderúrgicas são originalmente projetadas para queimar os gases COG, BFG e LDG.

As análises 8, 9, 10 e 11 (Tabela 4) são sugestões adicionais para o mix de combustíveis. Percebe-se que as combinações percentuais destas novas configurações de operação fornecem valores bem distintos de T_{ad} e superiores aos valores obtidos para as condições de operação usualmente adotadas (análises 1, 2 e 3; Tabela 4).

Assim, os valores de T_{ad} estimados indicam que a utilização de condições operacionais distintas na

alimentação do combustível (composição, vazões, temperaturas) pode afetar significativamente o valor deste parâmetro.

Na Figura 5 constam os resultados das simulações dos valores da temperatura adiabática de chama para as 11 análises (Tabela 4), quando são considerados valores distintos para o excesso de ar.

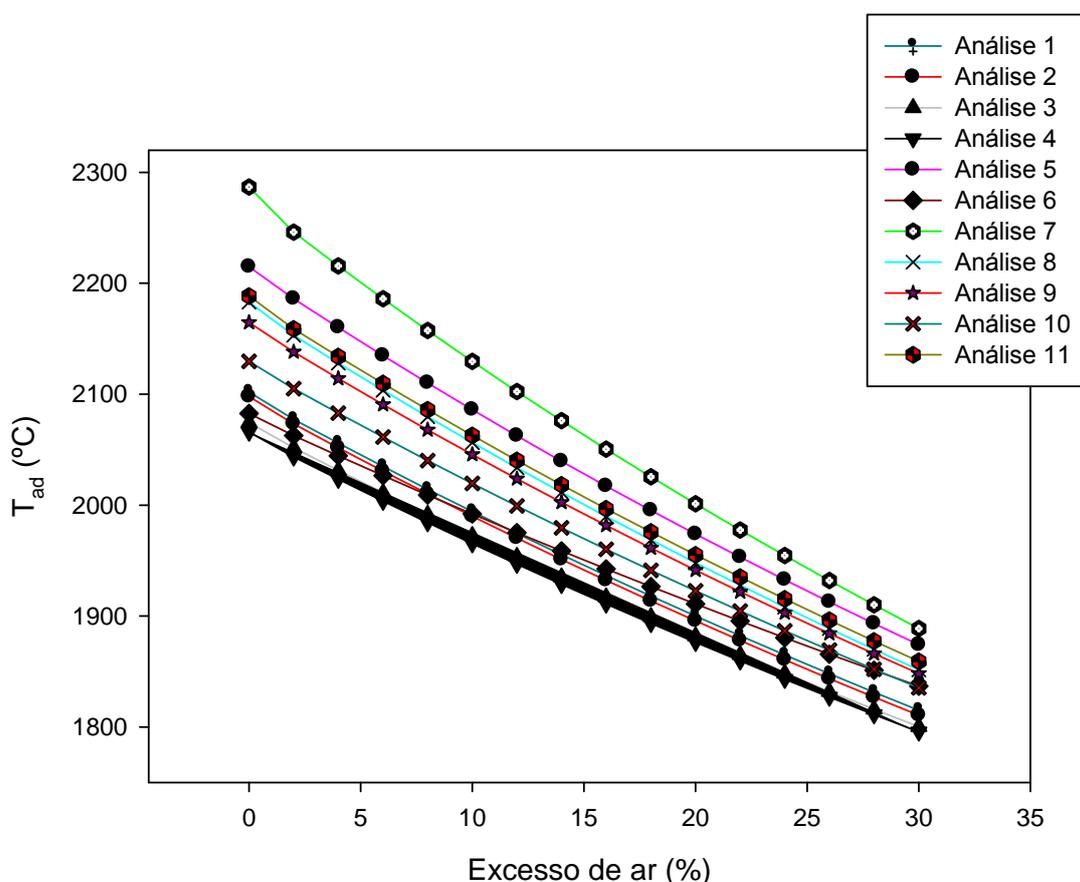


Figura 5 – Gráfico da T_{ad} do processo quando diferentes porcentagens de excesso de ar são inseridos na fornalha

Fonte – Próprio autor.

Os valores simulados para T_{ad} (Figura 5) decrescem com o acréscimo do excesso de ar. Tal resultado é esperado uma vez que o aumento da massa contida no sistema diminui a eficiência energética do processo. Todavia, vale ressaltar nesse ponto que o excesso de ar é um fator determinante da eficiência da

combustão. Um grande excesso de ar é indesejável para o processo, mas, por outro lado, uma carência de O_2 no meio reacional pode resultar em uma combustão incompleta (GUNGOR, 2009). Neste trabalho, como é assumida a mistura perfeita das espécies no interior da fornalha, o efeito do

escoamento do ar na conversão de reagentes em produtos não é analisado. Assim, sabe-se na prática que, embora o excesso de ar prejudique a eficiência energética do processo, é inviável operar uma fornalha adotando-se alimentação estequiométrica de ar.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma estratégia para a determinação da temperatura adiabática de chama (T_{ad}) foi empregada na análise da combustão de uma fornalha siderúrgica. Para isso, foi considerado um conceito da 1ª Lei da Termodinâmica, que preconiza o princípio da conservação da energia. A solução forneceu a T_{ad} resultante da combustão na fornalha da caldeira siderúrgica, com a variação das condições de alimentação do combustível e do ar. Os resultados obtidos para T_{ad} confirmam a adequação da metodologia proposta.

Neste estudo, a rotina empregada para o cálculo da temperatura adiabática de chama (T_{ad}) se diferencia de algumas metodologias usualmente propostas no meio industrial. Isso porque, ao contrário do que é frequentemente empregado, a metodologia aqui proposta não leva em consideração o poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis. Tal estratégia faz com que não sejam necessários levantamentos experimentais deste parâmetro. Esse fato pode tornar a estratégia proposta neste estudo bastante atraente, uma vez que os valores de PCI podem ser fortemente alterados em função da composição química do combustível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (bolsa de mestrado) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, L. A. D. **Manual de siderurgia**. 2. ed. São Paulo: Arte e ciência, v. 1, 2005. P.1-469. ISBN: 96-4892-669-1.

DONATELLI, L. M. **Análise termodinâmica aplicada à central termoeletrica da cia Siderúrgica de Tubarão - CST**.1993. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajuba, 1993.

EPE. **Demanda de energia 2050**. EPE. Rio de Janeiro, p. 1-245. 2014.

EL-MAHALLAWY, F.; HABIK, S. E.-D. **Fundamentals and technology of combustion**. 1. ed. Kidlington: Elsevier Science Ltd., v.1, p. 1-840, 2002. ISBN: 0080440894.

FU, C. *et al.* Thermal efficiency of coal-fired power plants: From theoretical to practical assessments **Energy Conversion and Management**. v.105; p.530–544, 2015. ISSN: **0196-8904**.

GARCÍA, I.; ZORRAQUINO, J. V. M. Energy and environmental optimization in thermoelectrical generating processes application of a carbon dioxide capture system. **Energy**. V.27; p.607-623, 2002. ISSN: 0360-5442

GICQUEL, O. *et al.* Combustion of residual steel gases: Laminar flame analysis and turbulent flamelet modeling. **Fuel**. V. 82; p.983-99, 2003. ISSN: 0016-2361.

GONCA, G. Investigation of the influences of steam injection on the equilibrium combustion products and thermodynamic properties of bio fuels (biodiesels and alcohols). **Fuel** V.144; p.244-258, 2015. ISSN: 0016-2361.

GUNGOR, A. Prediction of SO₂ and NO_x emissions for low-grade Turkish lignites in CFB combustors. **Chemical Engineering Journal**. v.146; p.388-400, 2009. ISSN: 1385-8947.

HOU, S.S. *et al.* Firing blast furnace gas without support fuel in steel mill boilers. **Energy Conversion and Management**. v.52; p.2758-2767, 2011. ISSN: 0196-8904

KORSHIKOV, G. V.; MIKHAILOV, V. G.; TITOV, V. N. Energy Expenditures and CarbonDioxide Emissions at Blast Furnaces. **Steel in Translation**, v. 43, p. 465–470, 2013. ISSN: 09670912.

LIANG, X.; JINGQI, Y. Online identification of the lower heating value of the coal entering the furnace based on the boiler-side whole process models. **Fuel**. V.161; p.68–77, 2015. ISSN: 0016-2361.

MALYNOWSKYJ, A. Fabricação de aço líquido em conversor a oxigênio. In: MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. 1. ed. São Paulo: ABM, v. 1, 2007. Cap. 5, p. 125-161. ISBN: 85-7737-015-1.

MOLLERUP, J. M.; MICHELSEN, M. L. **Thermodynamic models: fundamental e computational aspects**. 2. ed. Denmark: Tie-line; 2007. ISBN: 87-98996134. ISBN: 8521616899

NISTALA, S. H. *et al.* Study of generation of sinter return fines during transportation. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 42, p. 227-232, jun. 2014. ISSN: 0301-9233.

NOGAMI, H.; CHU, M.; YAGI, J.-I. Numerical analysis on blast furnace performance with novel feed material by multi-dimensional simulator based on multi-fluid theory. **Applied mathematical modelling**, v. 30, p. 1212–1228, jan. 2006. ISSN: 0307-904X.

QUITES, E. E. Redução de Minério de ferro em altos-fornos. In: MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. 1. ed. São paulo: ABM, 2007. Cap. 3, p. 55-101. ISBN: 85-7737-015-1.

SAMBASIVAM, R.; DURST, F. Characteristics of supersonic jets in LD steelmaking. **Ironmaking and**

Steelmaking, v. 37, p. 195-203, maio 2009. ISSN 1743-2812.

SANGHYUN, P. *et al.* Combustion and heat transfer characteristics of oxy-coal combustion in a 100 MWe front-wall-fired furnace. **Fuel**. V. 106; p.718-729. 2013. ISSN: 0016-2361.

SHIVAPUJI, A. M.; DASAPPA, S. Influence of fuel hydrogen fraction on syngas fueled SI engine: Fuel thermo-physical property analysis and in-cylinder experimental investigations. **International journal of hydrogenenergy**. V.40; p.10308-10328. 2015. ISSN: 0360-3199.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 5. ed. Rio de Janeiro: JC; 2000. ISBN: 8521611943.

TAKANO, C. Processos de preparação de matérias-primas siderúrgicas. In: MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. 1. ed. São Paulo: ABM, 2007. Cap. 2, p. 21-53. ISBN: 85-7737-015-1.

WARNATZ, J.; MAAS, U.; DIBBLE, R. W. **Combustion Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation**. 4. ed. Berlin : Springer; 2006. ISBN: 3-540-25992-9.

WIKLUND, C.-M.; PETTERSSON, F.; SAXÉN, H. Optimization of a Steel Plant with Multiple Blast Furnaces Under Biomass Injection. **Metallurgical and materials transactions**, v. 44B, p. 447-458, abr. 2013. ISSN: 1073-5623.

ZHOU, H. *et al.* Numerical Modeling of the Iron Ore Sintering Process. **ISIJ International**, v. 52, p. 1550–1558, abr. 2012. ISSN:0915-1559.