



Elis Regina Lima Siqueira

Simulação de Gás Natural Injetado pelas Ventaneiras do Alto Forno

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos.

Orientador: Prof. José Carlos D'Abreu

Rio de Janeiro
Agosto de 2014



Elis Regina Lima Siqueira

Simulação de Gás Natural Injetado pelas Ventaneiras do Alto Forno

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Carlos D'Abreu

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof. Helio Marques Kohler

Consultor TECHN-NOS

Prof. Francisco José Moura

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 30 de agosto de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Elis Regina Lima Siqueira

Graduou-se em Engenharia de Materiais (Universidade Federal do Pará - Brasil, 2011), Trabalhou e obteve experiência profissional na indústria siderúrgica SINOBRÁS.

Ficha Catalográfica

Siqueira, Elis Regina Lima

Simulação de gás natural injetado pelas ventaneiras de alto forno / Elis Regina Lima Siqueira ; orientador: José Carlos D'Abreu. – 2014.

90 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Alto forno. 3. Ventaneiras. 4. Injeção de gás natural. 5. Simulação computacional. I. D'Abreu, José Carlos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

O único homem que está isento de erros,
é aquele que não arrisca acertar
Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo apoio, dedicação e incentivo ao desenvolvimento desse projeto. De uma forma sutil eles foram a força motriz durante os anos dedicados ao desenvolvimento deste.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus professores do DEMA- Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio em especial ao professor Francisco Moura.

Ao meu orientador José Carlos D'Abreu, que sempre me colocou diante de desafios, permitindo dessa forma o meu desenvolvimento acadêmico. A sua experiência proveniente de anos dedicados ao setor siderúrgico refletiu nas aulas esclarecedoras e dinâmicas referentes a processos siderúrgicos, agradeço pela contribuição!

Ao professor Hélio Kohler, por estar sempre disposto em auxiliar, dando sempre o melhor de si.

Ao Jorge Luiz, pela gentileza em colaborar para o desenvolvimento deste, através de dados, apostilas e esclarecimentos referentes à injeção de gás natural em altos fornos siderúrgico. Todas essas informações foram de fundamental importância, no sentido de dar mais credibilidade ao projeto, pois, são relacionadas a resultados reais do processo de produção de ferro gusa em um alto forno siderúrgico.

Ao Thiago Konopka, por ter concedido o programa de simulação da combustão, o mecanismo cinético e por ter sido sempre solícito, com relação às minhas dúvidas referentes ao programa.

Aos membros do grupo de siderurgia: Raimundo Nonato, Enrique Dionísio, Jerson Alvarado e Efrain. Ao grande Ronald Mejia Sanches, um amigo sempre disposto a contribuir. Muito obrigada!

Resumo

Siqueira, Elis Regina Lima; D'Abreu, José Carlos. **Simulação de Gás Natural Injetado pelas Ventaneiras do Alto Forno**. Rio de Janeiro, 2014. 90p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O alto forno é um reator metalúrgico cujo objetivo consiste na produção de ferro-gusa. O consumo de combustível/redutor no processo de redução de minério de ferro em altos fornos, representa mais de 50% do custo do gusa. No sentido de aumentar a produtividade e reduzir o consumo de combustível/redutor são empregadas técnicas de injeção de combustíveis auxiliares pelas ventaneiras dos altos fornos. A combustão de gás natural (GN) injetado nas ventaneiras produz grande quantidade de hidrogênio, esse gás é melhor redutor se comparado ao monóxido de carbono, pois ele possui velocidade de reação maior com os óxidos de ferro e, além disso, a geração de CO₂ no processo de redução é diminuída quando comparado ao uso do carvão pulverizado (PCI), que é atualmente o material de injeção mais usado no Brasil. Este trabalho propõe a simulação da combustão de GN injetado pelas ventaneiras de um alto forno, utilizando o software CHEMKIN. As simulações provenientes deste software são amplamente utilizadas para otimização da combustão, sendo possível explorar rapidamente o impacto das variáveis de projeto sobre o desempenho do processo. Os resultados provenientes dessa simulação computacional em condições típicas de alto forno permitiram a previsão da temperatura de chama adiabática e a quantificação dos gases redutores de óxidos de ferro: H₂ e CO. A partir da variação dos parâmetros de processo foi possível obter resultados úteis para a tomada de decisão, visando controlar e otimizar o processo.

Palavras-chave

Alto-forno; ventaneiras; injeção de gás natural; simulação computacional.

Abstract

Siqueira, Elis Regina Lima; D'Abreu, José Carlos (advisor). **Natural Gas Simulation Injected for tuyeres of blast furnaces Steel**. Rio de Janeiro, 2014. 90p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The blast furnace is a metallurgical reactor whose goal is to produce pig iron. The fuel / reductant in the reduction of iron ore in the blast furnace process, represents more than 50% of the cost of the iron. In order to increase the productivity of the blast furnace and reduce fuel consumption / reducer injection techniques are employed by tuyeres of materials that act as fuel / reducer. The combustion of natural gas injected into the tuyeres produces large amounts of hydrogen, which replaces part of the carbon monoxide as reducing gas in the tank. The hydrogen gas is better compared to the reductant carbon monoxide, because it has reaction rate with the iron oxides and, moreover, the CO₂ generation in the process of reduction is decreased when compared to the use of pulverized coal (PCI), which is currently the material most commonly used injection by tuyeres in Brazil. This paper proposes the simulation of combustion of natural gas injected into the tuyeres of a blast furnace, using the CHEMKIN software package. Simulations from this software are widely used for optimization of combustion, which can quickly explore the impact of design variables on the performance of the process, using accurate models of chemical kinetics. The computer simulation results from the combustion of natural gas at typical conditions of blast furnaces allowed the prediction of the adiabatic flame temperature and the reaching of the reducing gases of iron oxides: H₂ and CO. From the variation of process parameters was possible to obtain useful results in order to control and optimize the process.

Keywords

Blast furnace; tuyeres; injection of natural gas; computer simulation.

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Estrutura do texto	18
2. Objetivos	20
2.1. Objetivos Específicos	20
3. Revisão bibliográfica	21
3.1. Produção de ferro-gusa em altos fornos	21
3.2. Divisão do Alto Forno em regiões	23
3.3. Conjunto de sopro do ar de combustão	25
3.4. Zona de combustão (raceway)	28
3.5. Combustíveis/redutores empregados no alto forno	28
3.5.1. Carvão mineral coqueificável	28
3.5.2. Carvão vegetal	29
3.6. Função dos combustíveis/redutores no alto forno	29
3.6.1. Combustível	30
3.6.2. Redutor de óxidos de ferro	31
3.6.2.1. Diagrama de Chaudron	32
3.6.3. Permeabilizador e agente estrutural da carga	33
3.6.4. Fornecedor de carbono	33
3.7. Injeção de combustíveis auxiliares	33
3.7.1. Injeção de carvão pulverizado	34
3.7.2. Injeção de óleo combustível	35
3.7.3. Injeção de plástico	36
3.7.4. Injeção de borracha de pneu	37
3.7.5. Injeção de pó de balão	38
3.7.6. Injeção de gás natural	38

3.8. Redução de óxidos de ferro por hidrogênio gasoso	39
3.8.1. Velocidade de redução de óxidos de ferro	40
3.9. Sistema de equilíbrio Fe-O-C e Fe-O-H	41
3.10. Redução dos óxidos de ferro em misturas de CO e H ₂	42
3.11. Oxidação de hidrocarbonetos	44
3.11.1. Mecanismo do gás natural	44
3.12. Relação ar/combustível	45
4. Metodologia	47
4.1. Software aplicado para simulação da combustão	48
4.2. Mecanismo de reação aplicado no software CHEMKIN	48
4.3. Reator Perfeitamente Agitado	49
4.4. Variáveis de projeto	50
5. Resultados e discussões	54
5.1. Influência do enriquecimento de O ₂ do ar de combustão na temperatura de chama adiabática	54
5.2. Efeito do aquecimento do ar de combustão na temperatura de chama adiabática	60
5.3. Efeito da vazão de GN na temperatura de chama adiabática	63
5.4. Efeito da formação de CO ₂ na temperatura de chama adiabática	64
5.5. Efeito da riqueza da mistura na produção de CO, H ₂ , CO ₂ e H ₂ O	67
5.6. Efeito da riqueza da mistura no consumo de CH ₄ e O ₂	73
5.7. Estudo paramétrico a partir da vazão de Gás Natural	76
5.8. Efeito da injeção de GN na produção de ferro gusa líquido	82
5.9. Taxa de substituição (Kg coque/ Nm ³ de Gás Natural)	84
6. Conclusões	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

Lista de figuras

Figura 1 - Diagrama da oxidação do CH ₄ , pressão atmosférica (Kee, 2013).	16
Figura 2 – Representação simplificada do processo de produção de ferro gusa no alto- forno (RIZZO, 2009)	22
Figura 3 - Regiões de um alto-forno de acordo com o seu perfil (RIZZO, 2009)	24
Figura 4 - Exemplo do interior de um alto-forno com destaque para o cadinho e as ventaneiras (Kobe Steel)	25
Figura 5 - (a) Arranjo das ventaneiras no interior do forno; (b) Detalhes internos da ventaneira (MCNALLY et al, 2011)	26
Figura 6 - Representação esquemática do conjunto de sopro de ar de combustão (RIZZO,2009)	27
Figura 7 - Sistema externo do sopro de ar com destaque para o anel de vento (RIZZO, 2009)	27
Figura 8 - Diagrama de equilíbrio da reação de Boudouard, pressão 1 atm (QUINTANILLA, 2012)	30
Figura 9 - Diagrama de Chaudron: Diagrama de estabilidade do sistema Fe-O-C em função da temperatura	33
Figura 10 - Influência do percentual de gás redutor (CO ou H ₂) em misturas (CO + N ₂) e (H ₂ + N ₂) sobre a cinética de redução, (HANSEN, 2000)	40
Figura 11 - Diagrama de equilíbrio Fe-O-C e Fe-O-H adicionado a reação de Boudouard	41
Figura 12 - Diagrama de oxi-redução para o sistema Fe-O-C-H	43
Figura 13 - Representação esquemática do reator perfeitamente misturado (Fogler, 2009)	50

Figura 14: Influência do enriquecimento de O ₂ do ar de combustão na temperatura de chama adiabática. Vazão de GN: 2,00Nm ² /seg. Vazão do ar de combustão: 72,45 Nm ³ /seg. Temperatura de aquecimento do ar: 1020°C.	55
Figura 15 - Efeito do enriquecimento de oxigênio no ar de combustão.Ar pré-aquecido a 1020°C. Vazão de GN constante: 0,18Nm ³ /seg.	56
Figura 16 - Efeito do enriquecimento de oxigênio no ar de combustão.Ar pré-aquecido a 1020°C. Vazão de GN constante: 2,00Nm ³ /seg.	58
Figura 17 - Efeito do enriquecimento de oxigênio no ar de combustão.Ar pré-aquecido a 1020°C. Vazão de GN constante: 3,92Nm ³ /seg.	59
Figura 18 - Efeito da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Ar pré aquecido a 1020°C e 1350°C, com 3,21% de enriquecimento de O ₂ . Vazão de GN constante: 0,18Nm ³ /seg	61
Figura 19 - Efeito da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Ar pré aquecido a 1020°C e 1350°C, com 3,21% de enriquecimento de O ₂ . Vazão de GN constante: 2,00Nm ³ /seg	62
Figura 20 - Efeito da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Ar pré aquecido a 1020°C e 1350°C, com 3,21% de enriquecimento de O ₂ . Vazão de GN constante: 3,92 Nm ³ /seg	63
Figura 21 – Efeito da vazão de GN na temperatura de chama adiabática. Vazão do ar: 72,45 Nm ³ /seg. temperatura de aquecimento do ar: 1020°C. Enriquecimento de O ₂ : 0,00%	64
Figura 22 - Influência da formação de CO ₂ na temperatura de chama adiabática. Ar de combustão pré aquecido a	

1020°C e enriquecido com 3,21% O ₂ , vazão entre 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg com vazão de GN: 0,18Nm ³ /seg	65
Figura 23 - Influência da formação de CO ₂ na temperatura de chama adiabática. Ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% O ₂ , vazão entre 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg com vazão de GN: 2,00Nm ³ /seg	66
Figura 24 - Influência da formação de CO ₂ na temperatura de chama adiabática. Ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% O ₂ , vazão entre 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg com vazão de GN: 3,92Nm ³ /seg	67
Figura 25 - Produção de H ₂ e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 0,18Nm ³ /seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg	68
Figura 26 - Produção de H ₂ e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21%de oxigênio. Vazão de GN constante: 2,00Nm ³ /seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg	69
Figura 27 - Produção de H ₂ e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 3,92Nm ³ /seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg	70
Figura 28 - Produção de H ₂ O e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 0,18Nm ³ /seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg	71
Figura 29 – Produção de H ₂ O e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 2,00 Nm ³ /seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg	72
Figura 30 - Produção de H ₂ O e CO a partir da combustão de GN	

com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 3,92 Nm ³ /seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm ³ /seg	73
Figura 31 - Disponibilidade de O ₂ e CH ₄ a partir da combustão de GN com vazão de 0,18 Nm ³ /seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O ₂ , pré aquecido a 1020°C , vazão entre 28, 92 – 106,55 Nm ³ /seg	74
Figura 32 – Disponibilidade de O ₂ e CH ₄ a partir da combustão de GN com vazão de 2,00 Nm ³ /seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O ₂ , pré aquecido a 1020°C e com vazão entre 28, 92 – 106,55 Nm ³ /seg	75
Figura 33 – - Disponibilidade de O ₂ e CH ₄ a partir da combustão de GN com vazão de 3,92 Nm ³ /seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O ₂ , pré aquecido a 1020°C e com vazão entre 28, 92 – 106,55 Nm ³ /seg	76
Figura 34 – Temperatura de chama adiabática proveniente da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C.	77
Figura 35 – Produção de CO ₂ a apartir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm ³ /seg.	78
Figura 36 – Produção de H ₂ O a apartir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm ³ /seg.	79
Figura 37 - Produção de CO a apartir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. Vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm ³ /seg.	80
Figura 38 – Produção de H ₂ a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. Vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm ³ /seg.	81
Figura 39 – Disponibilidade de CH ₄ a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. Vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm ³ /seg.	82
Figura 40 - Produção mensal de ferro gusa a partir de distintas taxas de consumo de coque e de gás natural	83

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação H/C de algumas tecnologias de redução	44
Tabela 2 - Composição do gás natural	51
Tabela 3 - Composição do ar de combustão	52
Tabela 4 – Vazão volumétrica do comburente e do combustível	52
Tabela 5 - Riqueza da mistura para distintos % de enriquecimento de O ₂	57
Tabela 6 - Riqueza da mistura para distintos % de enriquecimento de O ₂	58
Tabela 7 - Riqueza da mistura para distintos % de enriquecimento de O ₂	60
Tabela 8 – Taxa de substituição Kg coque/Nm ³ de GN	84