



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
CECAU – COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE  
E AUTOMACÃO



# Estudo da Viabilidade Técnica do Uso de Biogás em uma Usina Siderúrgica usando Simulação Computacional

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Lucas Machado Viana

Ouro Preto  
Escola de Minas  
Abril, 2015

Lucas Machado Viana

## Estudo da Viabilidade Técnica do Uso de Biogás em uma Usina Siderúrgica usando Simulação Computacional

Monografia de graduação apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de grau em Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: José Alberto Naves Cocota Júnior

Ouro Preto  
Escola de Minas  
Julho 2015

Monografia defendida e aprovada, em 09 de julho de 2015, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Luiz Fernando Ríspoli Alves – Orientador



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao meu professor e orientador Cocota Jr. pela paciência e apoio, mesmo com todos os problemas no percurso. Agradeço ainda ao grupo de pesquisa do Biogás pela ajuda e concessão dos software necessários para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Nos últimos anos ficou evidente o avanço tecnológico e o crescimento das indústrias. Junto a esse desenvolvimento, também vieram as complicações para o meio ambiente. Foi crescente a emissão de gases para a atmosfera e números mostram que o desenvolvimento veio junto com a poluição e a necessidade de mitigação da mesma. Países como Estados Unidos e China são líderes mundiais na produção de gases do efeito estufa (GHG), e coincidentemente estão entre os países que têm mais acelerado a economia nos últimos anos. Para tentar diminuir a emissão dos gases do efeito estufa, o mundo tem se voltado para a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>, o principal gás do efeito estufa (GHG), que é o principal resíduo da indústria de base. Uma solução encontrada nos últimos anos para mitigação do efeito estufa foi a utilização de material de fonte totalmente orgânica e que pode ser reciclada. A biomassa pode ser utilizada em diversas aplicações pela sua capacidade de se transformar em vários tipos de energia, e.g. na produção de calor e eletricidade (The UK Energy Research Centre, 2014). O objetivo desse trabalho é o estudo do Biogás, um tipo de biomassa que tem forma de gás e possui uma grande potencial termo-energético, pelo fato de poder substituir o gás natural em processos industriais. O trabalho tem como objetivo o cálculo da viabilidade técnica a partir de cálculos utilizando o programa AFA\_1 e AFA\_2 disponibilizados pelo departamento de engenharia metalúrgica em parceria com a REDEMAT. O programa utiliza dados referentes ao funcionamento real do alto-forno e simula seu funcionamento. A proposta é injetar biogás em substituição do gás natural no alto-forno como material auxiliar e estudar sua viabilidade técnica e seu comportamento no alto-forno.

Palavras-Chave: Alto-Forno, Combustível Auxiliar, Biogás, Gás Natural.

## ABSTRACT

In recent years, it became clear the technological advances and the growth of industries in many fields. Along with this development, also came the complications for the environment. The increase of greenhouse gas emissions into the atmosphere, as shown in many researches, is connected to the development of the industry therefore the necessity to reduce the emissions without losing the benefits of progress. Countries like the United States and China are world leaders in the emissions of greenhouse gases (GHG), and coincidentally are among the countries that had a burst in the economy in the last decades. In order to reduce the emission of greenhouse gases, the world has turned to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions, the main GHG, which is the main gas residue of the industry. A solution found in recent years to mitigate the greenhouse effect was the use of organic source material and materials that can be recycled. The biomass is one of these materials that can be used in many applications for its ability to turn on various types of energy, such as in the production of heat and electricity (The UK Energy Research Centre, 2014). The objective of this work is the study of biogas, a type of biomass that has the form of gas and has a large thermal energy potential because it can replace natural gas in industrial processes. The focus of this study is to estimate the technical feasibility from calculations using the AFA\_1 and AFA\_2 program provided by the Metallurgical Engineering Department in partnership with REDEMAT. The program uses data of the actual operation of the blast furnace and simulate its operation. The proposal is to inject biogas instead of natural gas in blast furnace as an auxiliary material and study its technical feasibility and its behavior in the blast furnace.

Keywords: Blast Furnace, Auxiliary Fuel, Biogas, Natural Gas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do Alto-Forno. ....	15
Figura 2: Corte vertical de um Alto-Forno.. ....	15
Figura 3: Representação das zonas de um Alto-Forno. ....	17
Figura 4: Diagrama de Chaudron (Oxi-redução). ....	18
Figura 5: Exemplos de Fonte de Biomassa. ....	22
Figura 6: Adição de matérias-primas no programa AFA_1. ....	26
Figura 7: Características das matérias-primas adicionadas ao programa AFA_1. ....	27
Figura 8: Parâmetros do alto-forno referentes ao programa AFA_1. ....	27
Figura 9: Dados adicionais para balanço térmico. ....	28
Figura 10: Resultados. ....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição média do Biogás.. .....	24
Tabela 2 : Composição e massa de coque para produzir 1 tonelada de gusa. ....	30
Tabela 3 : Composição e massa de minério para produzir 1 tonelada de gusa.. .....	30
Tabela 5: Relação Temperatura de Chama e Coke-Rate sem Temperatura de chama fixa .....	32
Tabela 6: Relação Temperatura de Chama e Coke-Rate com temperatura de chama fixa. ....	33

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

BG –Biogás;

NG – Gás Natural.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS..	2
RESUMO.....	3
ABSTRACT.....	4
LISTA DE FIGURA.....	5
LISTA DE TABELAS.....	6
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	7
SUMÁRIO.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Justificativa.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Alto-Forno.....	14
2.1.1 As regiões de um alto-forno.....	16
2.1.2 O processo de redução.....	17
2.1.3 A redução direta e indireta do ferro.....	18
2.2 Técnica de Injeção de Material Auxiliar em Alto-Forno.....	19
2.3 A Biomassa.....	20
2.3.1 As vantagens da biomassa.....	21
2.4 O Biogás.....	23
2.4.1 A composição do biogás.....	24
2.4.2 A produção do biogás.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26

3.1 Materiais .....	26
3.1.1 Os programas AFA_1 e AFA_2 .....	26
3.2 Métodos.....	29
4. RESULTADOS .....	32
5. CONCLUSÕES .....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35
APÊNDICE .....	40

# 1 INTRODUÇÃO

No último século ficou evidente o avanço tecnológico e o crescimento das indústrias. Foi crescente o número de fábricas e produtos e junto a esse desenvolvimento, veio também complicações para ao meio ambiente, pois um número cada vez maior de indústrias acarretou em um menor números de áreas verdes, prejudicando a lei natural do meio ambiente. Foi crescente a emissão de gases para a atmosfera, números mostram que o desenvolvimento vem junto com a poluição e a necessidade mitigação da mesma. Países como Estados Unidos, China e Emirados Árabes são líderes mundiais na produção de gases do efeito estufa (GHG), e coincidentemente estão entre os países que tem mais acelerado a economia nos últimos anos, devido a desenfreada evolução tecnológica no início do século 19, o homem esqueceu do equilíbrio ambiental e da necessidade da preservação do meio ambiente.

Para tentar diminuir a emissão dos gases do efeito estufa, o mundo tem se voltado para a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>, o principal GHG, que é o principal resíduo da indústria de base e das transportadoras, que são pertencentes à cadeia logística. Uma solução encontrada nos últimos anos para mitigação do efeito estufa foi à utilização de material de fonte totalmente orgânica e que pode ser reciclada. A biomassa pode ser utilizada em diversas aplicações pela sua capacidade de se transformar em vários tipos de energia, como por exemplo, na produção de calor e eletricidade (The UK Energy Research Centre, 2014). Na última década, o uso da biomassa para a produção de energia moderna e de biomateriais, cresceu significativamente devido a crescente oposição ao esgotamento das fontes de energia fóssil, associado ao aumento dos preços de energia, e a necessidade de redução da emissão dos gases do efeito estufa (GERSSEN-GONDELACH et al, 2014).

Historicamente, a biomassa tem sido utilizada há anos pelo homem e tem sido sua fonte de abastecimento de energia primária. Em aproximadamente 1850, 85% do abastecimento da energia primária era derivada de biomassa, em contra partida, em 2005, 85% da fonte de energia mundial era oriunda de combustíveis fósseis (SMIL, 2005).

De maneira geral, biomassa é qualquer fonte de material proveniente de material orgânico (planta ou animal), que tem como principal objetivo a produção de energia (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014). Tal material pode ser utilizada em sozinha ou em combinação com combustíveis fósseis (co-combustíveis) para melhorar a eficiência do processo e diminuir os resíduos da combustão (The UK Energy Research Centre, 2014). A biomassa pode produzir vários tipos de combustíveis, sendo eles de caráter sólido, líquido ou gasoso.

Esse estudo contempla o Biogás, que é um tipo de combustível gasoso produzido através da digestão anaeróbica de determinados tipos de matéria orgânica que em condições ideais, é constituído por 40-80% de gás metano [ $\text{CH}_4$ ] e o restante inclui gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{NH}_2$  (HOSSEINI et al, 2013). A composição do biogás pode variar de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa empregada, fatores climáticos, dimensões do biodigestor, entre outros (CERVI et al, 2010). As características físicas do biogás levam em conta os dois principais gases da sua composição, o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{CO}_2$ .

A produção do biogás não é complicada se comparada com as outras formas de energia e tem a grande vantagem de não possuir limitações geográficas. Para se produzir o biogás é necessário um pequeno investimento inicial para a implantação de biodigestores, que são equipamentos responsáveis pela fermentação anaeróbica do resíduo utilizado para produção do gás. A produção do biogás conta não só apenas com a geração de um gás, uma vez que esse subproduto pode ser transformado em energia elétrica, além do resíduo do biodigestor que pode ser utilizado como adubo ou fertilizantes para a lavoura.

Devido a grande quantidade de metano encontrada na composição do biogás, o mesmo pode ser comparado ao gás natural, que é constituído por aproximadamente 90% de metano e é amplamente utilizado na siderurgia como combustível auxiliar na produção de ferro-gusa. A injeção de gás natural permite que, além do carbono contido no gás substituindo o da carga do coque, seja aproveitado também o hidrogênio dissociado como redutor (ARAÚJO, 1997). O gás metano é incolor e altamente combustível, e não produz fuligem. Em função da participação percentual

do metano na composição do biogás, o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esse poder calorífico pode chegar a 12.000 kcal por metro cúbico se eliminado todo o gás carbônico da mistura (DEGANUTTI et al., 2002).

Pelas características muito próximas ao gás natural, surgiu o interesse de estudar o comportamento desse gás como combustível auxiliar, tentando obter ganhos econômicos e ambientais. Estudos já feitos no Brasil, ao analisar as emissões de CO<sub>2</sub> no sistema energético nacional observou-se a importante participação do segmento siderúrgico do setor industrial nacional (CAVALIERO & JANNUZI, 1998), que é decorrente do alto consumo de coque metalúrgico no balanço energético siderúrgico.

Esse trabalho tem como objetivo o cálculo da viabilidade técnica a partir de cálculos utilizando os programas AFA\_1 e AFA\_2 disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica (DEMET) em parceria com a REDEMAT. O programa utiliza parâmetros do alto-forno e simula seu funcionamento. A proposta é injetar biogás em substituição do gás natural no alto-forno como material auxiliar e estudar sua viabilidade técnica e seu comportamento no alto-forno.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo principal desse trabalho é analisar a viabilidade técnica do uso do biogás em substituição ao gás natural em altos-fornos.

## **1.2 Justificativa**

A utilização do biogás na siderurgia é algo novo e inovador, sendo até então usado somente na produção de energia, logo surgiu a necessidade do cálculo da sua viabilidade técnica, que é um indicador que permite avaliar se essa substituição é viável, ou seja, se de fato se consegue alcançar os parâmetros normais de funcionamento do alto-forno.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Alto-Forno

O alto-forno é um reator metalúrgico que tem como proposta produzir o ferro gusa, que é um estado líquido do ferro a uma temperatura em torno de 1500°C, que possui aproximadamente um teor de 4,5% de carbono. O Ferro-gusa contém elevado teor de carbono, em função do contato próximo com o coque ou carvão vegetal que atuam como combustível e redutor simultaneamente no alto-forno (SILVA, 2011). As matérias primas para a produção do ferro gusa são carregadas pelo topo do forno e são compostas basicamente por minério de ferro e combustível sólido, que é o agente redutor. Para auxiliar o processo e aumentar a eficiência da produção, se utiliza alguns tipos de combustíveis auxiliares, que podem ser carvão pulverizado, gás natural, óleos e materiais alternativos (BISWAS, 1981).

O alto-forno é considerado o reator metalúrgico mais complexo. Em seu interior ocorrem mais de 100 reações químicas e estão presentes os três estados da matéria: sólido, líquido e gasoso. Neste reator existe um largo gradiente de temperatura (SOUZA, 2004).

A Figura 1 representa a estrutura de um alto-forno e mostra os equipamentos que compõe o sistema de um alto-forno, entre eles se encontram os silos, as correias transportadoras, os regeneradores, a chaminé, etc.

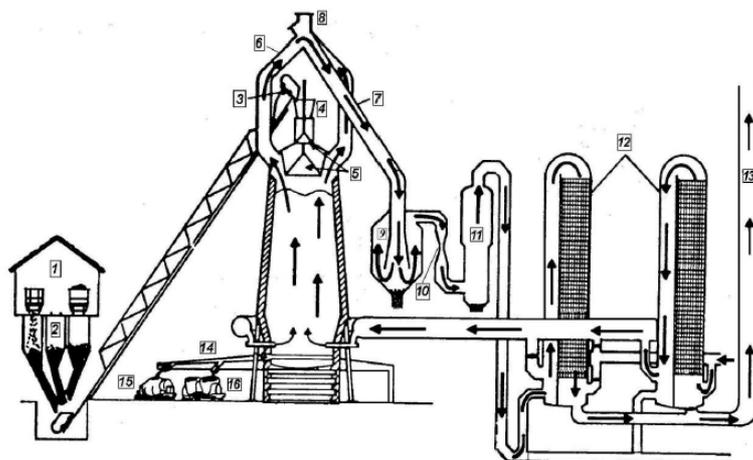


Figura 1: Representação do Alto-Forno. Fonte: <http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=48689>.

A Figura 2 representa um corte em um perfil de um alto-forno, onde é possível observar as partes principais deste reator.

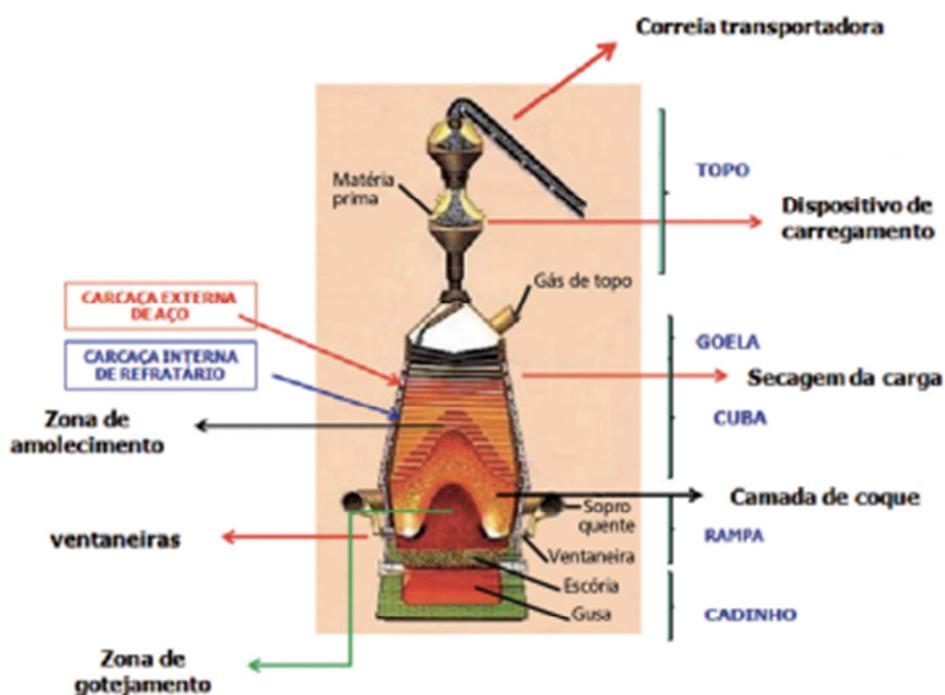


Figura 2: Corte vertical de um Alto-Forno. Fonte: <http://www.eeimvr.uff.br/psmetal.htm>.

A operação do alto forno consiste no carregamento de matérias primas que são adequadamente preparados com uma carga equilibrada de uma carga ferrosa e uma

carga redutora. A grande vantagem do alto forno é que a matéria-prima pode ser injetada diretamente através dos silos, sem qualquer tratamento, apenas com granulometria adequada (BISWAS, 1981).

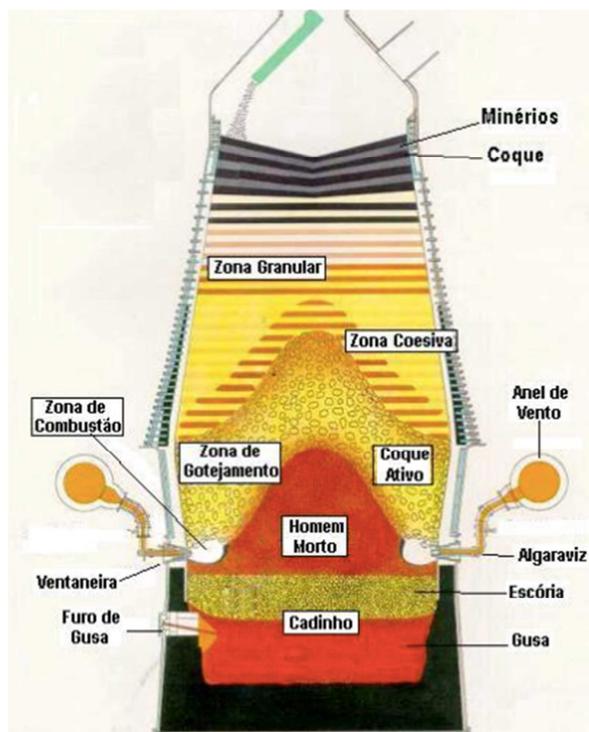
O processo de redução consiste na utilização de um combustível redutor na maioria dos casos é utilizado coque ou carvão. Na maioria dos alto-fornos utilizados no mundo é usado a técnica de injeção de material auxiliar em ventaneiras, técnica que reduz a quantidade de matéria-prima injetada no alto-forno (CALIXTO, 2013).

### **2.1.1 As regiões de um alto-forno**

O alto-forno se divide basicamente em cinco grandes zonas:

- Zona de Gotejamento
- Zona de Coesão
- Zona de Amolecimento e Fusão
- Zona de Combustão
- Cadinho

A Figura 3 representa as zonas citadas anteriormente. Entre as mais de 100 reações que ocorrem no alto-forno, é correto dizer que o combustível inicial desses processos vem da transferência de calor oriunda dos gases que circulam no reator, que ao combinar com os elementos químicos presentes nas matérias-primas, formam gases que irradiam e absorvem calor.



**Figura 3: Representação das zonas de um Alto-Forno. Fonte: <http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=48689>.**

### 2.1.2 O processo de redução

O processo de redução do metal é complexo e foi se aprofundando ao longo do tempo. O grande marco foi em 1962, quando R. L. Stephenson foi o primeiro cientista a entender o papel da reação de gaseificação do carbono, ou *solution loss* (JÚNIOR, 2012). Até então, acreditava-se que esta reação entre o dióxido de carbono com o carbono gerando monóxido de carbono ( $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ ) era puro desperdício de combustível.

Stephenson demonstrou que a redução do óxido de ferro é uma combinação entre a chamada redução indireta e redução direta, e que a redução indireta seguida da reação de gaseificação do carbono é a redução direta.

Para se entender a diferença básica entre redução direta e indireta é necessário uma breve passagem pelo diagrama de Chaudron, cujas coordenadas são, composição dos gases ( $\text{CO}/\text{CO}_2$ ) *versus* temperatura, conforme a Figura 4.

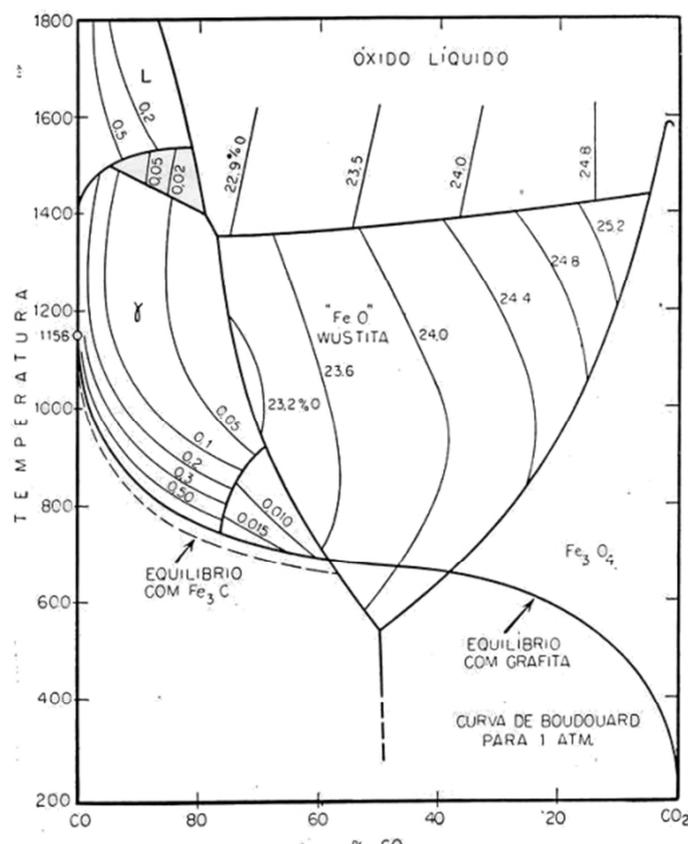
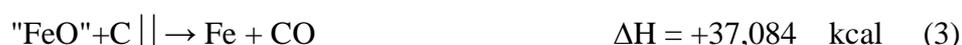


Figura 4: Diagrama de Chaudron (Oxi-redução). Fonte: JÚNIOR, 2002.

Nesse diagrama está representada a curva da reação de Boudouard ( $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ ), responsável por definir o equilíbrio entre o Carbono e as suas fases gasosas CO e  $\text{CO}_2$ , também é projetada sobre o diagrama de Chaudron. Neste diagrama, à esquerda da curva de Boudouard (baixas temperaturas), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é a fase gasosa estável. Neste caso, o monóxido de carbono (CO) tende a se decompor em  $\text{CO}_2$  e Carbono, ou seja, reação reversa de Boudouard. Para maiores temperaturas, o  $\text{CO}_2$  reage com Carbono para produzir CO, em mais um exemplo do Princípio de Le Chatelier, pois sendo esta reação endotérmica, é favorecida pelas altas temperaturas (JÚNIOR, 2002).

### 2.1.3 A redução direta e indireta do ferro

Observa-se na figura 4 que acima de 1000°C a reação de Boudouard é essencialmente completa, ou seja, a fase gasosa consiste de 100% CO, ou seja, termodinamicamente CO<sub>2</sub> não pode existir na presença de Carbono para temperaturas acima de 1000°C. Entretanto a redução dos óxidos ocorre, devido às Equações (1) e (2) que ocorrem separadamente. Estas duas reações podem ser combinadas, para indicar a reação global (3):



A Equação 1 é chamada de redução indireta pelo carbono, enquanto que a Equação 2 é chamada de redução direta pelo carbono (QUINTANELLA, 2012). Ambas as reações objetivam formar Fe a partir de FeO, porém na redução direta a transformação é feita diretamente pelo carbono, já a indireta é feita por um gás, o monóxido de carbono.

A boa interpretação do diagrama da Figura 4 faz toda a diferença para o entendimento do funcionamento do Alto-Forno. Nota-se que a curva de equilíbrio da reação de Boudouard cruza a curva do equilíbrio wustita-ferro à aproximadamente 700°C e a curva de equilíbrio magnetita-wustita à cerca de 650°C. Novamente isto significa que, termodinamicamente, wustita não pode ser reduzida diretamente em temperaturas menores do que 700°C e magnetita não pode ser reduzida em temperaturas menores do que 650°C, pelo fato de que o CO tende a se decompor em CO<sub>2</sub> e C, sem reduzir os óxidos desejados (QUINTANELLA, 2012).

## 2.2 Técnica de Injeção de Material Auxiliar em Alto-Forno

A injeção de material auxiliar em alto-forno por ventaneiras é uma técnica utilizada em todo o mundo em muitas usinas siderúrgicas integradas. O principal objetivo desta

técnica é reduzir o consumo de coque em altos-fornos e reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> e consequentemente diminuir o custo de ferro-gusa (BARBIERI, 2013).

Recentemente, a técnica mais utilizada é o carvão pulverizado, também chamada de PCI ou ICP (injeção de carvão pulverizado), essa tecnologia foi introduzida nas indústrias de aço de alguns países desenvolvidos desde que o custo do carvão tornou-se mais razoável do que para o óleo (ISHII, 2000)

Tecnologias desenvolvidas para a injeção de carvão pulverizado em ventaneiras de alto-forno foram inicialmente desenvolvidas para utilização de carvão, no entanto é corrente a utilização de outros materiais, tais como carvão vegetal, óleos, gás natural, por exemplo. Há ainda estudo sobre a utilização de materiais alternativos em altos-fornos, como materiais oriundos de biomassa.

A substituição de parte do material redutor granulado, colocado na parte superior do alto-forno, por um combustível de baixo custo injetado diretamente através de ventaneiras, é o objetivo principal da PCI (ASSIS, 2006).

Segundo Assis, em seu estudo sobre injeção de carvão pulverizado, o PCI consiste nos seguintes fatores:

- Redução do custo de agente redutor;
- Maior economia de operação em um alto-forno com injeção;
- Aumento de produtividade;
- Maior estabilidade operacional do reator devido à maior eficiência do controle térmico através da injeção.

Para uma grande operação de alto forno é necessária uma eficiência de injeção ou ao contrário a relação entre custo e benefício não será eficaz.

### **2.3 A Biomassa**

O objetivo deste capítulo é abordar a tecnologia que utiliza biomateriais para a produção de energia. Biomassa não é um termo novo, mas apenas nos dias de hoje ele está sendo utilizado em larga escala por empresas na produção de combustíveis, devido a nova demanda mundial por métodos biosustentáveis.

Para tentar diminuir a emissão dos gases do efeito estufa, o mundo tem se voltado para a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>, que é o principal resíduo da indústria de base e das transportadoras, que são pertencentes à cadeia logística. Uma solução encontrada nos últimos para mitigação do efeito estufa foi à utilização de material de fonte totalmente orgânica e que pode ser reciclada. A biomassa pode ser utilizada em diversas aplicações pela sua capacidade de se transformar em vários tipos de energia, como por exemplo, na produção de calor, eletricidade (The UK Energy Research Centre, 2014). Na última década, o uso da biomassa para a produção de energia moderna e de biomateriais, cresceu significativamente devido a crescente oposição ao esgotamento das fontes de energia fóssil, associado ao aumento dos preços de energia, e a necessidade de redução da emissão dos gases do efeito estufa (GERSSEN-GONDELACH et al, 2014).

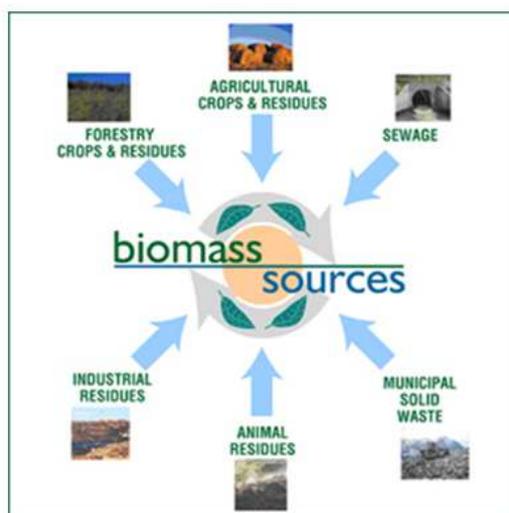
De maneira geral, biomassa é qualquer fonte de material proveniente de material orgânico (planta ou animal), que tem como principal objetivo a produção de energia (MINISTÉRIO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE, 2014). Tal material pode ser utilizada sozinho ou em combinação com combustíveis fósseis (co-combustíveis) para melhorar a eficiência do processo e diminuir os resíduos da combustão (The UK Energy Research Centre, 2014). A biomassa pode produzir vários tipos de combustíveis, sendo eles de caráter sólido, líquido ou gasoso.

### **2.3.1 As vantagens da biomassa**

Historicamente, a biomassa tem sido a principal fonte de abastecimento de energia primária do mundo. Em 1850, 85% da oferta total de energia primária do mundo era derivada da biomassa onde, em 2005, 85% da oferta mundial tornou-se fonte combustíveis fósseis (SMIL, 2006).

Em termos gerais, a biomassa pode ser considerada todo o recurso renovável que vem da matéria orgânica - vegetal ou animal – e que tem como principal objetivo a produção de energia (Ministério do Meio Ambiente do Brasil, 2014).

A Figura 5 representa alguns exemplos de fontes de biomassa. É possível obter a biomassa de fontes como resíduos de culturas florestais, resíduos de culturas agrícolas, esgoto, resíduos industriais, resíduos animais e de resíduos sólidos urbanos.



**Figura 5: Exemplos de Fonte de Biomassa. Fonte: <http://meioambiente.culturamix.com>**

A biomassa tem um grande impacto social e ambiental e sua principal vantagem pode ser observado quando se analisa a sua cadeia de produção. É possível ter várias fontes de produção, como por exemplo, resíduos de grandes e pequenos produtores agrícolas, depósitos de lixo, resíduos industriais, etc. Geralmente, a origem de biomassa é qualquer material que pode vir a ser reciclado ou algum tipo de massa orgânica que a sua utilização não irá prejudicar o ecossistema

A grande vantagem da biomassa é que a sua utilização pode ser feita diretamente através da combustão em fornos, geradores, etc (Ministério de Meio Ambiente do Brasil, 2014). No entanto, ele está sendo desenvolvido e melhorado mais tecnologias de conversão, como a gaseificação para a produção de biogás e algumas técnicas de pirólise para a produção de diversos produtos biológicos.

Uma importante vantagem do uso da biomassa é que o aumento do seu uso pode ser associado com a redução do consumo de combustíveis fósseis, como o petróleo e seus derivados, que são as matérias-primas não renováveis (Ministério do Meio Ambiente do Brasil, 2014).

O Brasil tem uma enorme vantagem, a sua localização geográfica e seu grande espaço para a agroindústria são grande fatores para o favorecimento de uma grande quantidade de matéria-prima disponível para a produção de biomassa.

A biomassa é uma fonte de energia flexível e, ao contrário de algumas outras fontes de energia renovável, como eólica e solar, pode ser armazenado e utilizado como combustível quando necessário. O argumento econômico é particularmente forte, pois a biomassa é recuperada a partir de fontes de custo negativo, tais como os resíduos urbanos biodegradáveis, o que também reduz a quantidade de resíduos depositados em aterros sanitários (The UK Energy Research Centre, 2014).

## **2.4 O Biogás**

Esse estudo contempla o Biogás, que é um tipo de combustível gasoso produzido através da digestão anaeróbica de determinados tipos de matéria orgânica. A composição média do biogás, em condições ideais, é constituído por 40-80% de  $\text{CH}_4$  e o restante inclui gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{NH}_2$  (HOSSEINI et al, 2013). A composição do biogás pode variar de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa empregada, fatores climáticos, dimensões do biodigestor, entre outros (CERVI et al, 2010). As características físicas do biogás levam em conta os dois principais gases da sua composição, o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{CO}_2$ .

O biogás é produzido através de um processo de digestão anaeróbica, onde a fermentação bacteriana do material orgânico na ausência de oxigênio livre para produzir que um gás combustível (VASQUES, 2012). Tal gás também pode ser produzido em aterros sanitários (gás oriundo da decomposição do lixo) e em obras de tratamento de esgoto (gás de esgoto). No geral, é um gás sintético, combustível, criado pelo processo termoquímico de gaseificação de biomassa. Este processo

envolve o aquecimento do biomaterial a uma temperatura elevada que permite que as reações químicas ocorram formando um gás de síntese constituído por hidrogénio ( $H_2$ ), monóxido de carbono (CO), metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (ESPERANCINI et al, 2007).

### 2.4.1 A composição do biogás

O biogás é uma mistura gasosa constituída principalmente por metano e dióxido de carbono. A composição média de biogás varia de acordo com a seguinte Tabela 1 (HOSSEINI et al, 2013).

**Tabela 1: Composição média do Biogás. Fonte: HOSSEINI ET AL, 2013.**

<b>Gás</b>	<b>% Volume</b>	<b>Fórmula Química</b>
<b>Metano</b>	55-75	$CH_4$
<b>Dióxido de Carbono</b>	25-45	$CO_2$
<b>Nitrogênio</b>	0-3	$N_2$
<b>Hidrogênio</b>	0-2	$H_2$
<b>Oxigênio</b>	0-0.1	$O_2$
<b>Gás Sulfídrico</b>	0-1	$H_2S$

Alguns fatores podem variar de acordo com a fonte da biomassa e consequentemente composição do material decomposto também irá sofrer variação, tais como a composição dos resíduos, humidade, pH, etc.

O metano é um gás que pode formar-se em vários lugares, como em minas de carvão, pântanos ou por fermentação da celulose por trás da decomposição de plantas ou vegetais. Já o dióxido de carbono é um gás muito comum produzido por fotossíntese.

### 2.4.2 A produção do biogás

O biogás é produzido a partir de diversos materiais orgânicos, sendo sua composição base o metano. Tais materiais orgânicos podem ser provenientes de aterros, fazendas, indústrias e etc. Outra maneira de obter o material orgânico é de dejetos de animais, como vacas, porcos e galinhas. O biogás é produzido naturalmente, através da decomposição de material orgânico (JÚNIOR, 2010).

A produção de biogás utilizando-se resíduos da suinocultura é realizada por meio de biodigestores (reatores anaeróbios) onde o resíduo é geralmente diluído com água de lavagem, constituindo-se no chamado chorume, quantificado em 72 litros por dia/cabeça de suíno e com uma Demanda Química de Oxigênio de 33 g/litro (SANTOS, 2000).

No Brasil os biodigestores rurais vem sendo utilizados para fins de saneamento rural, tendo como sub produtos e biogás e biofertilizante. Conforme dados disponibilizados pelo (IBGE, 1997), o Brasil é o quarto produtor mundial de suínos, contando com cerca de 38 milhões de cabeças, apresentando-se com grande potencial de resíduos.

O principal componente do biogás é o gás metano, que é incolor e altamente combustível, e não produz fuligem. Em função da participação percentual do metano na composição do biogás, o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cubico. Esse poder calorífico pode chegar a 12.000 kcal por metro cubico se eliminado todo o gás carbônico da mistura (DEGANUTTI et al., 2002).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

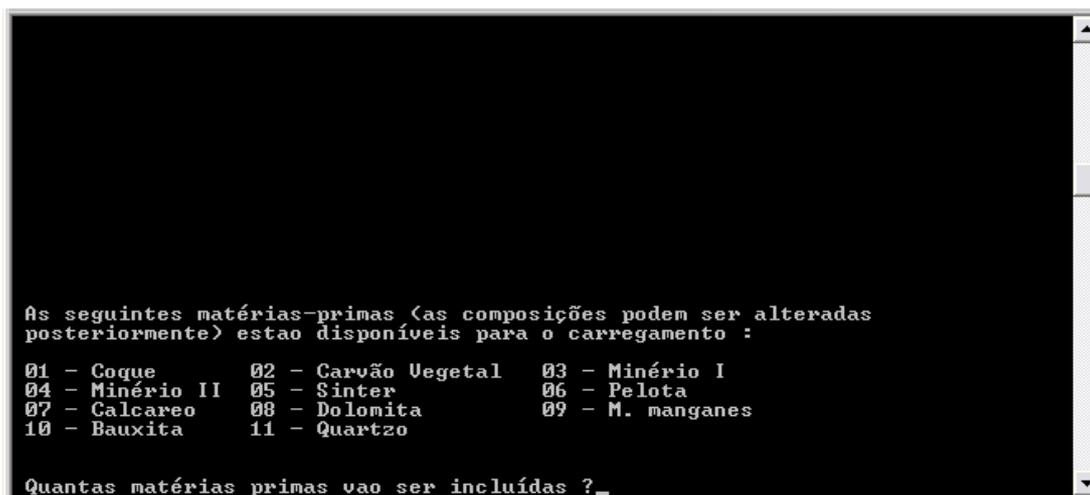
#### 3.1 Materiais

Para o cálculo da viabilidade técnica do Biogás foi utilizado o programa AFA\_1 e AFA\_2 criados em linguagem Fortran pelo professor Carlos Silva do departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade de Ouro Preto. O programa AFA\_1 reproduz simulação de balanço de massa enquanto o programa AFA\_2 realiza simulação de balanço térmico, ambos em language Fortran baseando-se no modelo criado no IRSiD (Institut de Recherche de la Sidérurgie) hoje Arcelor Mittal de Lorraine no Nordeste da França.

##### 3.1.1 Os programas AFA\_1 e AFA\_2

A Figuras a seguir mostram a sequencia feita de inserção de dados para que o programa possa simular e gerar os dados do comportamento do Alto-Forno referente a produção de uma tonelada de ferro-gusa.

A Figura 6 é a primeira tela do programa, onde se insere as matérias-primas desejadas para a simulação, podendo ser minério, coque, fundentes, etc.



```
As seguintes matérias-primas <as composições podem ser alteradas
posteriormente> estão disponíveis para o carregamento :
01 - Coque          02 - Carvão Vegetal   03 - Minério I
04 - Minério II    05 - Sinter           06 - Pelota
07 - Calcáreo     08 - Dolomita         09 - M. manganês
10 - Bauxita      11 - Quartzo
```

Quantas matérias primas vão ser incluídas ?

Figura 6: Adição de matérias-primas no programa AFA\_1.

A Figura 7 mostra como é possível alterar a qualidade de cada matéria-prima, ou seja, é possível alterar os teores de porcentagem em cada matéria-prima do Alto-Forno. A Figura 7 por exemplo mostra o Coque, que é uma das matérias primas injetadas, sua massa e seus componentes, que podem ser alterados na forma de input no programa.

```

Os dados armazenados na memória, referentes a      Coque      são mostrados
na tabela abaixo. As composições são expressas em porcentagem em peso (base
seca) enquanto que MASSA se refere a quantidade necessária para produzir
01 tonelada de gusa.

Matéria Prima :   Coque
01- Massa      02- % Fe      03- % Mn      04- % SiO2     05- % Al2O3
   500.00      .000      .000      3.900      2.560
06- % CaO      07- % MgO     08- % FeO     09- % TiO2     10- % P2O5
   .426      .139      .000      .000      .000
11- % S         12- % Cfixo          13- % H2O
   .000      90.220      4.000

Alguma alteração ? (s/n)

```

Figura 7: Características das matérias-primas adicionadas ao programa AFA\_1.

O programa ainda apresenta outras opções, como a inserção de materiais auxiliares, onde é possível adicionar nas ventaneiras materiais como carvão pulverizado, gases (coqueria e gás natural), óleos e etc. Figura 8 são dados referentes aos parâmetros do alto-forno que são adicionados com a para que o balanço de massa seja realizado.

```

Os seguintes dados adicionais são necessários para o balanço de massa :
01- % de FeO na escória          =   .500
02- % de Silício no gusa         =   .600
03- % de Manganês no gusa       =   .400
04- Umidade no ar soprado (gramas/Nm3) = 25.000
05- Enriquecimento do ar soprado em oxigênio (%) = .000
06- % de H2 no gas de topo (base seca) =  2.500
07- Produção diária de gusa (toneladas/dia) = 1000.000

Alguma alteração ? (s/n)

```

Figura 8: Parâmetros do alto-forno referentes ao programa AFA\_1.

A Figura 9 representa os dados necessário para o balanço de térmico.

```

Os seguintes dados adicionais são necessários para o balanço térmico :
01- Temperatura do ar soprado          (C) = 970.000
02- Temperatura da escória             (C) = 1550.000
03- Temperatura do gusa                 (C) = 1500.000
04- Temperatura da zona de reserva térmica (C) = 950.000
05- Delta de temperatura no PINCH POINT (C) = 3.760
06- Perdas térmicas Zona de Elaboração (Kcal/ton)= 70000.000
07- Perdas térmicas Zona de Preparação (Kcal/ton)= 30000.000
08- Desvio de RISI (fator omega)       = .002

Alguma alteração ? (s/n)

```

Figura 9: Dados adicionais para balanço térmico.

Após a inserção dos inputs o programa apresenta os primeiros cálculos, no que se refere as três primeiras interações do programa de acordo com os inputs adicionados. A Figura 10 representa de forma simplificada o resultado da simulação.

```

Cálculo completo apos 3 iterações

Resultados parciais mostram :
i - Temperatura de gas no topo 88.697 C
ii - Razão entre temperaturas da carga e gas no "pinch point" igual a .996
iii - consumo teórico de Coque igual a 496.95 kg/tonelada
iv - fator omega igual a .0017

Deseja repetir os cálculos ? (s/n)

```

Figura 10: Resultados.

Após o resultado de forma simplificada, o programa libera todos os outputs no formato .docx para que seja analisado e estudado. O Apêndice A representa esses resultados, a título de exemplo de uma simulação qualquer.

### 3.2 Métodos

Como o objetivo desse trabalho é comparar o uso do biogás e do gás natural, para a simulação computacional foi utilizada a mistura de composições de gás natural normalmente utilizada na indústria e de gases provenientes da biodigestão de dejetos suínos, bovinos e de lixo orgânico foram retiradas da literatura, para ser considerado como biogás.

As simulações realizadas foram feitas com injeção de gás natural e/ou biogás juntamente com a injeção de carvão pulverizado tendo todos esses materiais composições utilizadas em grandes siderúrgicas do território nacional.

Utilizando o AFB\_1 foi possível realizar o cálculo térmico global de um Alto-Forno tendo como variáveis:

- %H<sub>2</sub> no gás de topo seco e vazão de ar;
- % da razão CO/CO<sub>2</sub> no topo e vazão de ar;
- %H<sub>2</sub> no gás de topo seco e razão CO/CO<sub>2</sub>;
- %N<sub>2</sub> no gás de topo seco e vazão de ar.

A massa e composição de carvão mineral injetado, coque, minério, sínter, pó de alto-forno, materiais voláteis do coque são determinadas previamente, pois esses são dados de entrada do programa. Além disso, os dados de entrada devem ser padrão, pois, obviamente, a variação deles leva a erros nos resultados encontrados, impossibilitando uma análise comparativa dos resultados.

Coque, carvão mineral e pós de alto-forno tiveram suas composições fornecidas de uma usina integrada a coque e os dados de minério de ferro e sínter são provenientes da própria usina siderúrgica. As tabelas 2 e 3 mostram os dados acima retratados.

**Tabela 2: Composição e massa de coque para produzir 1 tonelada de gusa.**

kg/t	%Fe	%Mn	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
400	0.57	0	6	2.99
%CaO	%MgO	%FeO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
0.21	0.09	0	0.16	0.07
%S	%C <sub>fixo</sub>	%H <sub>2</sub> O		
0.6	85.24	2		

**Tabela 3: Composição e massa de minério para produzir 1 tonelada de gusa.**

kg/t	%Fe	%Mn	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
243.75	67.62	0.185	0.89	0.767
%CaO	%MgO	%FeO	%TiO <sub>2</sub>	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
0.274	0.051	0.76	0	0
%S	%C <sub>fixo</sub>	%H <sub>2</sub> O		
0	0	2.8		

Durante a simulação os dados são adicionados de acordo com a solicitação do programa, então é feito o cálculo da perda térmica global desejada. Esse valor por sua vez serve de dado de entrada no programa AFA\_1 levando assim ao cálculo da quantidade de biogás a ser injetado para que as condições de operação do AF fiquem próximas das condições de operação com o uso de gás natural.

Além das perdas térmicas, o programa AFA\_1 utiliza o desvio de Rist e a diferença de temperatura da carga e dos gases no PINCH POINT como dados de entrada e calcula a temperatura dos gases de topo, a partir de dados de operação como leito de fusão, porcentagem de H<sub>2</sub> no gás de topo e perdas térmicas (calculadas no AFB\_1). Considerou-se que 85% das perdas térmicas ocorrem na zona de elaboração e 15% na zona de preparação. As outras entradas são semelhantes às entradas utilizadas no programa AFB\_1.

Os programas possuem algumas restrições, uma vez que não consideram fatores como a distribuição e permeabilidade da carga, a velocidade de produção e a profundidade do sopro.

Foram realizados os seguintes balanços:

1. 100% Injeção de gás natural;
2. 75% Injeção de gás natural e 25% de Injeção de Biogás;
3. 50% Injeção de gás natural e 50% de Injeção de Biogás;
4. 25% Injeção de gás natural e 75% de Injeção de Biogás;
5. 100% de Injeção de Biogás.

Utilizou-se uma taxa de injeção de gases de  $100 \text{ Nm}^3/\text{t}$ . Assim, os testes foram realizados com injeções de biogás e gás natural variando em proporções de 0-100% em quantidade injetada de volume de gás.

A taxa de injeção de carvão pulverizado ( $150 \text{ kg/t}$ ) e todos os outros parâmetros foram considerados os mesmos em todos os balanços, variando apenas as taxas de injeção de gás natural e biogás. A temperatura de injeção do biogás, do gás natural e do carvão mineral foi  $25^\circ\text{C}$ . O carregamento do alto-forno foi contínuo e com aproximadamente 50% pelota, 30% de sinter e 20% de minério.

No que se diz respeito à injeção de gases, o programa oferece apenas as opções de gás natural e gás de coqueria. Assim, alterou-se a composição do gás de coqueria para cada composição de biogás, e as suas entalpias foram consideradas as mesmas. A composição do gás natural usada foi 100% de  $\text{CH}_4$  para melhor viabilidade de estudo e foi considerado um volume de biogás com uma taxa de 60% de  $\text{CH}_4$  e 40% de  $\text{CO}_2$ , que é a proporção mais frequente desse gás.

## 4 RESULTADOS

Após a realização dos testes foi observado que quanto maior a injeção de biogás na composição da mistura do gás injetado, maior será o declínio da temperatura de chama. Assim, após a substituição completa de gás natural por biogás, por exemplo, haverá um declive significativo na temperatura de chama. Isso se deve ao fato de que o CO<sub>2</sub> presente no biogás ter o efeito endotérmico, devido a reação de Boudouard. Ou seja a presença de CO<sub>2</sub> implica que haverá a transformação a CO, gerando uma perda de energia na zona de combustão

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados feitos nos programas de simulação em duas etapas. A Tabela 4 consiste na injeção de biogás no alto-forno sem temperatura de chama fixa, ou seja, foi feita a simulação computacional livremente, para se obter os resultados provocados pela injeção. Verificados os resultados da primeira etapa, onde ocorreu uma baixa temperatura de chama no processo, fixou-se a temperatura de chama em torno de 2250°C com o auxílio da injeção de oxigênio, e assim se obtiveram coke-rates mais elevadas, conforme a Tabela 5.

**Tabela 4: Relação Temperatura de Chama e Coke-Rate sem Temperatura de chama fixa**

<b>Injeção</b>	<b>CR (kg/t)</b>	<b>TC (°C)</b>
100% NG	383,6	1907,0
75% NG 25% BG	387,0	1896,3
50% NG 50% BG	390,5	1885,0
25% NG 75% BG	393,9	1862,5
100% BG	397,4	1843,9

**Tabela 5: Relação Temperatura de Chama e Coke-Rate com temperatura de chama fixa.**

Injeção	CR (kg/t)	TC (°C)
100% NG	274,7	2251,7
75% NG 25% BG	285,2	2250,0
50% NG 50% BG	291,7	2249,1
25% NG 75% BG	295,1	2250,0
100% BG	298,6	2250,1

Para o cálculo da temperatura de chama, utilizou-se a Equação (4):

$$T_{\text{chama}} = 1267,9 + 0,9742T_s + 57,64 E - 7,146U - 2 T_{\text{ICP}} - 4 V_{\text{GN}} \quad \text{Eq.(4)}$$

Onde as variáveis utilizadas na simulação foram:

$T_s$  = temperatura de sopro do ar (1200°C)

$E$  = enriquecimento do ar em oxigênio ( aproximadamente 2%)

$U$  = umidade do ar (18 g/Nm<sup>3</sup>)

$T_{\text{PCI}}$  = taxa de injeção de carvão (150 kg/t gusa)

$V_{\text{GN}}$  = volume de gás natural injetado (100 Nm<sup>3</sup>/t gusa)

O consumo de reductor variou nos testes, mostrando que a substituição de gás natural por biogás provoca uma variação no consumo teórico de coque e na temperatura de chama. A escolha da temperatura de chama fixa 2250°C, condiz com as temperaturas de chama reais encontradas nos altos-fornos a coque. Adotou-se a tática de enriquecimento do ar em oxigênio para manter os níveis térmicos na zona de combustão.

## 5 CONCLUSÕES

Conforme resultados apresentados, ou uma queda significativa de temperatura de chama e para solucionar o problema de redução da eficiência térmica de projeto é necessário aumentar o aporte térmico através enriquecimento do ar com oxigênio ou adicionando mais carbono no reator. Porém é preciso estar atento aos efeitos dessas alterações do rendimento do forno e vários parâmetros operacionais, para não prejudicar o funcionamento do Alto-Forno.

A injeção de gases no Alto-forno causa uma maior redução na temperatura adiabática de chama por unidade, se comparado a injeção de carvão, que permite taxas de injeção mais altas e conseqüentemente, coke-rates mais próximas as condições de idealidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. K. Biswas, Principles of Blast Furnace Ironmaking, University of Queensland, Brisbane, Australia, SBA Publications, 1981.

Amaral, C. M. C. D., Amaral, L. A. D., Lucas Júnior, J. D., Nascimento, A. A. D., Ferreira, D. D. S., & Machado, M. R. F. (2004). Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Ciência Rural*, 34(6), 1897-1902.

Assis, P. S. et alli. Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006, 292p

CAETANO (1985) CAETANO de um sistema modificado para quantificação de biogás. 1985. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, L. Proposição Botucatu, 1985.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. H. Análise de investimentos: matemática financeira engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial. 10.ed. São Paulo: Atlas, 2007 468 p.

C.K.N.CAVALIERO, G.M. JANNUZZI, A Importância do Segmento Siderúrgico nas Emissões de CO<sub>2</sub> Nacional e do Estado de São Paulo, In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 20, 1998, São Paulo. Anais: São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998. p. 53-67

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C.J.P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Anais eletrônicos. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em: 16 jul. 2010.

J. E. A Quintanilla, Reatividade ao CO<sub>2</sub> de Carvões Minerais de Biomassas e Coques.

Dissertação de Mestrado - Orientador: Prof. José Carlos D'Abreu – Rio de Janeiro, 2012.

J. H. N. Júnior, Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores; DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS E METALURGIA; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica. Rio de Janeiro, Setembro 2002.

I. C. F. Vasques, M. E. Martins, N. S. Lima, F. L. Toffolo, P. S. Assis. Brazilian potential of biogas use as fuels in Metallurgy

K. Ishii, Book: Advanced Pulverized Coal Injection Technology and Blast Furnace Operation, 1st Edition.

K.O. CALIXTO, L.C. SANTOS, V. RODOLFO, M.E. MÁRTINS, P.S. ASSIS, Potencial brasileiro do biogás usado como combustível na metalurgia, Congresso ABM, 68; Congresso Anual da ABM - Internacional, 68; ABM International Annual Congress, 68; Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 13; ENEMET, 13, Belo Horizonte MG BR.

L.A. Araújo, Manual de siderurgia, São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997, v.1., Cap. 8: Alto forno. p. 195-258

LUCAS JÚNIOR, J. Estudo comparativo de biodigestores modelos Indiano e Chinês. Botucatu, 114p. (Tese de Doutorado), Universidade Estadual Paulista, 1987.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Biomassa, <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>, Accessed on 28/10/2014.

M.S.T. ESPERANCINI, F.COLEN, O.C. BUENO, A.E.B. PIMENTEL, E.J. SIMON, Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.1, p.110-118, 2007.

M. V. Fernandes, Efeito do Tipo de Carvão Injetado nas Ventaneiras do Alto-Forno no Consumo de Combustíveis (Fuel-Rate). Orientador: Prof. Dr. Ing. Varadarajan Seshadri UFMG. Setembro/2007.

NOGUEIRA, C.E.C.; ZÜRN, H.H. Modelo de dimensionamento otimizado para sistemas energéticos renováveis em ambientes rurais. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.341-348, 2005.

NOGUEIRA, E. Análise de investimentos. In: BATALHA, M. O. Gestão agroindustrial. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2001. v.1. 692 p.

R.A. SILVA JÚNIOR, P.S. Assis, Novos processos e aplicações para o biogás na metalurgia, Ouro Preto Universidade Federal de Ouro Preto 2010, Undergraduate These presented to the course of the School of Metallurgical Mines of Ouro Preto Federal University for the degree of Metallurgical Engineer / No circulates, Descr / Fl: 37, Book: CIM 1394.

R. G. CERVI, M. S. T. ESPERANCINI, O. C. BUENO, VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM GRANJA SUÍNÍCOLA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.5, p.831-844, set./out. 2010

ROYA, B., FREITAS, E., BARROS, E., ANDRADE, F., P. Michael, SILVA, D. J. A. Revista Eletrônica Novo Enfoque, ano 2011, v. 13, n. 13, p. 142 – 149.

SANTOS, P. Guia técnico de biogás. CCE - Centro para a Conservação de Energia. Guia Técnico de Biogás. AGEEN - Agência para a Energia, Amadora, Portugal, p.117, 2000.

S. E. Hosseini, M. A. Wahid, High-Speed Reacting Flow Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai, Johor, Malaysia <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.204> 1364-0321/& 2014 ElsevierLtd. Allrightsreserved.

S. E. Hosseini, M.A. Wahid, Development of biogas combustion in combined heat and power generation, Elsevier, Volume 40, December 2014, Pages 868–875.

S.J. Gerssen-Gondelach, D. Saygin, B. Wicke, M.K. Patel, A.P.C Faaij, Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2014, pp 964-998.

SOUZA, S.N.M.; PEREIRA, W.C.; NOGUEIRA, C.E.C.; PAVAN, A.A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor-gerador utilizando biogás da suinocultura. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v.26, p.127-133, 2004.

V. Smil, 2005, *Energy at the crossroads: Global perspectives and uncertainties*, MIT Press, Cambridge, UK.

The UK Energy Research Centre, 2014 – website: <http://www.ukerc.ac.uk/>

## APÊNDICE

## APÊNDICE A

### Tabela de Resultados do programa AFA\_1.

TABELA DE CARGA : i - as composições são expressas em porcentagem em peso, base seca  
 ii - a quantidade fornecida na coluna 1 representa a massa de matéria prima SECA requerida para a produção de 01 tonelada de gusa

	MASSA Kg	% Fe	% Mn	% SiO2	% Al2O3	% CaO	% MgO	% FeO	% TiO2	% P2O5	% S	% C. Fixo	% H2O
COQUE	499.49	.00	.00	3.90	2.56	.43	.14	.00	.00	.00	.00	90.22	4.00
C.VEGETAL	.00	.16	.10	.70	.68	2.22	.22	.00	.00	.12	.00	71.15	4.00
M.FERRO I	.00	67.62	.19	.89	.77	.27	.05	.76	.00	.00	.00	.00	2.80
M.FERRO II	.00	64.25	.03	6.23	1.42	.00	.00	.00	.00	.03	.00	.00	4.20
SINTER	1608.36	58.41	.57	4.52	1.73	6.58	.19	8.31	.00	.00	.00	.00	2.00
PELOTA	.00	66.36	.00	2.78	.79	1.23	.10	.00	.00	.04	.00	.00	3.00
CALCAREO	59.94	.42	.00	.44	.17	42.21	10.18	.00	.00	.00	.00	.00	.00
DOLOMITA	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
M.MANGANES	.00	31.80	34.20	3.89	3.90	.00	.00	.00	.00	.08	.00	.00	3.00
BAUXITA	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
QUARTZO	39.96	.00	.00	90.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
Pa NO TOPO	.00	36.50	.09	10.00	1.88	.50	.11	.00	.00	.10	.00	33.69	.00

GUSA a 1500.00 C			ESCORIA a 1550.00 C		
:	%	Massa kg	:	%	Massa kg
Fe	93.85	938.500	SiO2	37.57	115.557
C	5.15	51.500	Al2O3	13.24	40.714
Si	.60	6.000	CaO	43.33	133.258
Mn	.40	4.000	MgO	3.20	9.836
P	.00	.000	MnO	2.17	6.667
S	.00	.000	FeO	.50	1.538
Total	100.00	1000.000	TiO2	.00	.000
			P	.00	.000
			S	.00	.000
			Total	100.00	307.570

DADOS DE PERFORMANCE :  
 i - Desvio de Rist igual a .002  
 ii - Razão entre temperaturas da carga e gas no "pinch point" igual a .996  
 iii - consumo teórico de Coque igual a 386.99 kg/tonelada

VOLUME E COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA DOS GASES :

i - O ar é soprado com um teor de umidade correspondente a 25.00 gramas/Nm3 e grau de enriquecimento em oxigênio de 2.000 %. A temperatura de sopro é 970.000 C  
 ii - Admite-se que as temperaturas de zona de reserva térmica e do gas no topo sejam, respectivamente, 950.000 e 32.482 C  
 iii - Por hipótese .00\*100 % do CO, .00\*100 % do CO2 .00\*100 % do H2 e .00\*100 % do CH4 contidos nos voláteis do redutor carregado no topo são liberados na zona de preparação

:	Nm3	% N2	% O2	% CO	% CO2	% H2	% CH4	% H2O
Ar soprado	1213.275	74.675	22.306	.000	.000	.000	.000	3.019
Gas da zona elaboração	1751.559	51.726	.000	29.979	12.751	3.421	.000	2.123
Gas de topo (úmido)	1821.733	49.734	.000	21.856	19.414	2.333	.000	6.663
Gas de topo (seco)	1700.356	53.284	.000	23.416	20.800	2.500	.000	.000

#### COMBUSTÍVEIS AUXILIARES INJETADOS VIA VENTANEIRAS :

CARVÃO MINERAL E/OU VEGETAL : i - as composições são expressas em porcentagem em peso, base seca  
 ii - a quantidade fornecida na coluna 1 representa a massa do injetado ,SECO, por hora de operação do forno  
 iii - carvões mineral e vegetal são injetados a 25.000 e 25.000 C, respectivamente

	MASSA Kg	% Fe	% Mn	% SiO2	% Al2O3	% CaO	% MgO	% FeO	% TiO2	% P2O5	% S	% C. Fixo	% H2O
C.MINERAL	6250.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	65.48	.00
C.VEGETAL	.00	.16	.10	.70	.68	2.22	.22	.00	.21	.12	.00	65.48	.00

GAS DE COQUERIA E/OU NATURAL : i - Vazão é medida em Nm3 de gas por hora de operação do forno  
 ii - a composição é fornecida em porcentagem volumétrica  
 iii - gas de coqueria e natural são injetados respectivamente, a 25.000 e 25.000 C

:	Nm3	% N2	% O2	% CO	% CO2	% H2	% CH4	% C2H6	% H2O
Gas de coqueria	.000	6.900	.000	5.700	2.000	57.000	26.000	.000	.000
Gas Natural	4160.000						100.000	.000	

OLEO : i - Sfo injetados .000 quilos por cada hora de operaçfo, a uma temperatura média de 25.000 C  
 ii - A composiçfo, expressa em % em peso, corresponde a 84.00 % de carbono e 12.00 % de hidrogenio  
 enquanto que a variaçfo de entalpia de craqueamento totaliza .000 kcalorias/quilo

+++++

QUANTIDADE E COMPOSICfO DOS VOLfTEIS contidos no coque e/ou carvfo vegetal carregado no topo e, no carvfo mineral e/ou vegetal injetado via ventaneiras. Composiçfo expressa em % em peso, base seca

	% CO	% CO2	% H2	% CH4	% M.V.
Coque carregado	.000	.000	100.000	.000	1.081
Carv. Vegetal carregado:	35.800	40.500	12.100	11.500	24.330
Carv. Mineral injetado	.000	.000	.000	.000	.000
Carv. Vegetal injetado	35.800	40.500	12.100	11.500	30.000

BALANÇO TÉRMICO DA ZONA DE PREPARAÇfO

ENTRADAS (KCAL/TONELADA DE GUSA)	SAfDAS (KCAL/TONELADA DE GUSA)
CALOR CONTIDO	CALOR CONTIDO
GASES PROVENIENTES DA ZONA DE ELABORAÇfO A 950.00 C	CARGA A 946.24 C : 429969.50
N2	GASES DO TOPO A 32.48 C
CO	N2 : 2051.51
CO2	CO : 905.81
H2	CO2 : 1030.66
CH4	H2 : 96.51
H2O	CH4 : .00
	H2O : 57322.26
REAÇfES EXOTÉRMICAS	REAÇfES ENDOTÉRMICAS
2 CO (g) + O2 (g) => 2 CO2 (g) : 383291.70	FeO (s) => Fe (s) + 1/2 O2 (g) : 137430.00
2 H2 (g) + O2 (g) => 2 H2O (l) : 53116.17	Fe2O3 (s) => 2 FeO (s) + 1/2 O2 (g) : 372398.90
	MgCO3 (s) => MgO (s) + CO2 (g) : 3971.91
	MnO2 (s) => MnO (s) + 1/2 O2 (g) : .00
	PERDAS TÉRMICAS
TOTAL : 1035177.00	TOTAL : 30000.00
	TOTAL : 1035177.00

BALANÇO TÉRMICO DA ZONA DE ELABORAÇfO

ENTRADAS (KCAL/TONELADA DE GUSA)	SAfDAS (KCAL/TONELADA DE GUSA)
CALOR CONTIDO	CALOR CONTIDO
CARGA A 946.24 C : 429969.50	ESCfRIA A 1550.00 C : 183268.00
AR SOPRADO A 970.00 C	GUSA A 1500.00 C : 326764.50
N2	GASES PARA Z.P. A 950.00 C
O2	N2 : 279853.80
H2O	CO : 162712.30
OLEO INJETADO A 25.00 C	CO2 : 106984.00
GAS NATURAL INJETADO A 25.00 C	H2 : 17681.56
GAS DE COQUERIA INJETADO A 25.00 C	CH4 : .00
C. VEGETAL INJETADO A 25.00 C	H2O : 31537.21
C. MINERAL INJETADO A 25.00 C	
	REAÇfES ENDOTÉRMICAS
FORMAÇfO DO GUSA	FeO (s) => Fe (s) + 1/2 O2 (g) : 1029625.00
Fe (l) + C (s) => SOLUÇfO Fe-C : -31785.22	Fe2O3 (s) => 2 Fe (s) + 3/2 O2 (g) : 45587.63
Si (l) => Si (dissolvido) : 6087.58	SiO2 (s) => Si (s) + O2 (g) : 46137.42
Mn (l) => Mn (dissolvido) : -87.37	MnO2 (s) => MnO (s) + 1/2 O2 (g) : .00
1/2 P2 (g) => P (dissolvido) : .00	MnO => Mn (s) + 1/2 O2 (g) : 6698.22
1/2 S2 (g) => S (dissolvido) : .00	P2O5 (s) => 2 P (s) + 5/2 O2 (g) : .00
REAÇfES EXOTÉRMICAS	CaCO3 (s) => CaO (s) + C (s) + O2 (g) : 61716.65
C (s) + 1/2 O2 (g) => CO (g) : 619336.30	DISSOCIAÇfO DO OLEO, fGUA E VOLfTEIS
C (s) + O2 (g) => CO2 (g) : 937764.80	OLEO => C (s) + H2 (g) : .00
H2 (g) + 1/2 O2 (g) => H2O (l) : 113391.40	H2O (l) => H2 (g) + 1/2 O2 (g) : 111712.90
	CO (g) => C (s) + 1/2 O2 (g) : .00
	CO2 (g) => C (s) + O2 (g) : .00
	CH4 (g) => C (s) + 2 H2 (g) : .00
	C2H6 (g) => 2 C (s) + 3 H2 (g) : .00
	PERDAS TÉRMICAS
TOTAL : 2480279.00	TOTAL : 70000.00
	TOTAL : 2480279.00