

# ANÁLISE DA INJEÇÃO CONJUNTA DE CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO E CARVÃO MINERAL NACIONAL COM BASE EM BALANÇOS GERAIS E MODELO CFD <sup>1</sup>

*Emanoel do Nascimento Ferreira Junior*<sup>2</sup>  
*Jose Adilson de Castro*<sup>3</sup>  
*Alexandre Jose da Silva*<sup>3</sup>

## Resumo

Os processos baseados em biomassa vêm ganhando cada vez mais espaço devido a sua capacidade de capturar CO<sub>2</sub> da atmosfera. O uso direto do carvão vegetal granular e injeção de carvão vegetal pulverizado – ICP, ambos originado de florestas renováveis, é uma técnica promissora que é atualmente utilizada em mini altos fornos. Entretanto, se todos mini altos fornos utilizassem as técnicas de ICP, os finos produzidos seriam insuficientes para suprir suas necessidades. Surge então a necessidade de se utilizar técnicas de injeção simultânea de carvão vegetal e mineral. Este trabalho utiliza um modelo matemático do alto forno (CFD) para simular a injeção simultânea de carvão vegetal e mineral pulverizados. O modelo total do alto forno é baseado em equações de transporte de *momentum*, energia e espécies químicas em sistemas multifásicos, a saber: gás, sólidos, gusa, escória e fases pulverizadas. Quatro casos foram analisados com diferentes combinações de injeções. Os resultados indicaram que a produtividade e o poder calorífico do gás de topo podem ser aumentados em 11% e 8% respectivamente. Devido à pressão, temperatura e volume de gás de topo gerado foi avaliada a possibilidade de implantação da Turbina de Gás de Topo – TRT.

**Palavras-Chaves:** Mini alto-forno; Injeção de combustíveis; Turbina de gás de topo.

## ANALYSIS OF JOINT INJECTION OF PULVERIZED CHARCOAL AND NATIONAL COAL BASED IN GENERAL BALANCE AND MODEL CFD

### Abstract

The process-based biomasses have increasingly gained prominence due to its ability to capture CO<sub>2</sub> in the atmosphere. The direct use of granular charcoal combined with the pulverized charcoal injection - PCH, on both originated of forests renewable, is a promising technique that is currently used in mini blast furnace. However, if all mini blast furnaces used PCH, the fines produced would be insufficient to meet their needs. Then comes the need for the simultaneous injection of pulverized charcoal and coal. This work uses a mathematical model of the blast furnace (CFD) in order to simulate the simultaneous injection of mineral coal and charcoal. The total blast furnace model is based on transport equations of *momentum*, energy and chemical species for solids, gas, hot metal, slag and pulverized phases. Four cases are selected with different rates of injection. Simulated results indicate that productivity and calorific value of top gas could be increased around 12% and 8% respectively. Due to pressure, temperature and volume of gas generated was analyzed the possibility to implantation of Top-Pressure Recovery Turbine Plant – (TRT).

**Key-words:** Mini blast furnace; Fuel injection; Top-pressure recovery turbine plant.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Aluno de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense - UFF.

<sup>3</sup> Professor do Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica – PPGEM, Universidade Federal Fluminense – UFF.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de ferro gusa oriundo de altos fornos a carvão vegetal do mundo, em torno de 10 milhões t/ano.<sup>(1)</sup> Esta produção é realizada por mini altos fornos com capacidade de 40.000 t/ano a 300.000 t/ano.<sup>(1)</sup> Atualmente estes processos de produção de ferro-gusa baseados na utilização de carvão vegetal como agente redutor, vêm ganhando cada vez mais destaque devido a sua capacidade de recuperação de CO<sub>2</sub> da atmosfera. A utilização de carvão vegetal pelas usinas, quando proveniente de reflorestamento sustentável, pode contribuir para a redução dos gases do efeito estufa. Um alto forno operando a carvão vegetal retorna o oxigênio a atmosfera e diminui as emissões de CO<sub>2</sub> em um ciclo relativamente curto quando utilizadas técnicas de cultivo e produção de carvão vegetal, com completo aproveitamento da biomassa. Esta *tecnologia verde* sem emissão de CO<sub>2</sub> é possibilitada devido a grande extensão de terras em áreas tropicais no Brasil, onde a reação de fotossíntese é favorecida pela prática de plantio e cultivo de florestas destinadas para produção de carvão vegetal. Com a importante utilização de biomassa no processo, torna-se cada vez mais atrativo o aproveitamento e maximização da utilização dos finos gerados durante a colheita da madeira para carbonização e manuseio do carvão.

Com toda importância deste aproveitamento, muitos mini alto-fornos no Brasil, principalmente os menores, ainda operam ineficientemente, com baixo nível de controle do processo, o que prejudica o aproveitamento dos finos gerados. Porém algumas empresas vêm buscando desenvolver melhorias em seu processo aproximando-se das obtidas em grandes altos fornos a coque, tais como: Obtenção de elevadas temperaturas de sopro (utilização de regeneradores), enriquecimento do ar soprado, melhorias na preparação de matérias-primas, desenvolvimento de compostos aglomerados para mini AF, como também geração de energia elétrica através da utilização de turbina de gás de topo e obtenção de altas taxas de injeção de finos pulverizados. Esta última com objetivo de substituir o carvão granulado carregado, tornando-se atrativa do ponto de vista econômico e operacional. Os finos são mais baratos e muitas das vezes aproveitados do próprio processo de manuseio e produção do carvão. Conseqüentemente, a técnica de injeção de finos de carvão vegetal pulverizado aparece como uma tecnologia forte e consolidada no processo produtivo em altos fornos, diminuindo o custo de produção e possibilitando um aumento da produtividade, entre outras vantagens.

Segundo dados da Associação Mineira de Silvicultura (AMS), o Brasil em 2009 consumiu aproximadamente 4.328.000 toneladas de carvão vegetal para produção de ferro gusa. Alcançando uma produção anual de 6.271.100 toneladas de ferro gusa oriundos de mini altos fornos a carvão vegetal.<sup>(1)</sup> Isto remete a uma taxa de combustível redutor de aproximadamente 690 kg/t<sub>gusa</sub>. Realizando-se um balanço da quantidade de produção e/ou geração de finos de carvão vegetal com a quantidade necessária para suprir a demanda de injeção nos mini altos fornos do Brasil, considerando se todos utilizassem a técnica, a quantidade de finos produzidos seria insuficiente, considerando-se taxas de injeção de 100 kg/t<sub>gusa</sub> até 150 kg/t<sub>gusa</sub>. Surge a necessidade então, de se viabilizar técnicas alternativas de injeção conjunta de carvão vegetal e carvão mineral pulverizados,<sup>(2)</sup> analisando paralelamente a possibilidade de ganhos indiretos com a aplicação desta tecnologia, como aumento do poder calorífico do gás gerado, e implantação de turbina de gás de topo (TRT).

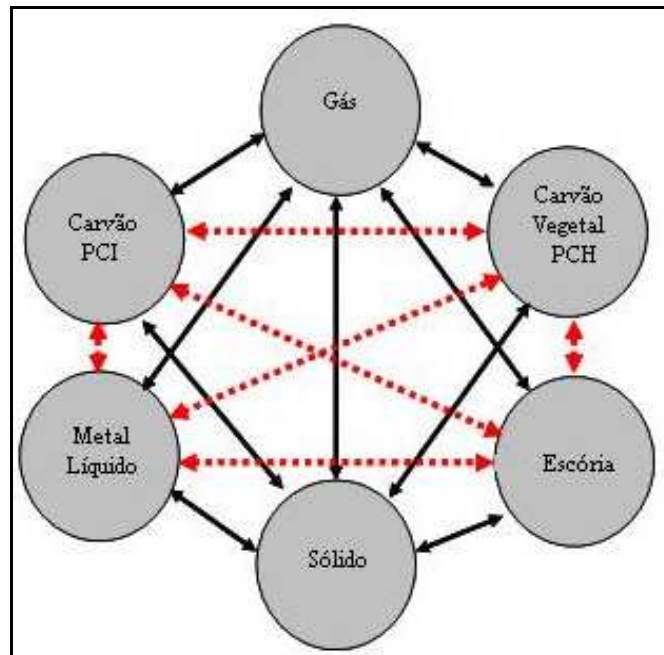
Este trabalho busca, através da utilização de um modelo matemático total do alto forno (CFD),<sup>(3)</sup> simular 4 situações de operação de um mini alto forno, com

diferentes taxas de injeção simultânea de finos de carvão vegetal e mineral. Avaliou-se e controlou-se os valores dos principais parâmetros de controle operacional, de acordo com os obtidos industrialmente. Uma análise integrada da técnica de injeção simultânea juntamente com a possibilidade de geração de eletricidade através do aproveitamento do volume, temperatura e pressão do gás de topo gerado pelo alto forno foi realizada.

## 2 MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1. Modelo Matemático Utilizado - CFD

Para a realização das simulações propostas, utilizou-se um modelo total do alto forno, tri dimensional e que analisa a região do leito no interior do alto forno desde a superfície do gusa no interior do cadinho até a superfície da carga na goela. O modelo utilizado para este trabalho foi desenvolvido em trabalhos anteriores.<sup>(2-5)</sup> São consideradas seis fases no modelo, onde todas as fases interagem entre si trocando massa, “momentum” e energia. O conceito das seis fases que interagem trocando momentum, energia e massa, é apresentado na Figura 1.



**Figura 1:** Modelo de interação entre as fases. Linhas sólidas: interações completas. Linhas pontilhadas: apenas interações químicas.

O modelo utilizado foi desenvolvido com base na teoria do multifluido e considera as seguintes fases: gás, sólidos granulados, metal líquido, escória líquida, carvão vegetal e mineral pulverizados. Todas as fases são consideradas simultaneamente, devido às interações multifásicas. Assim, as equações constitutivas de todas as fases, formam um grande conjunto de equações não-lineares, que estão fortemente acopladas e são resolvidas simultaneamente. As equações são resolvidas em código computacional e utiliza a técnica de volumes finitos para a solução em uma malha não-ortogonal discretizada. A equação de conservação para todas as fases é expressa via uma equação geral, a qual pode ser representada pela equação (1).

$$\frac{\partial \varepsilon_i \rho_i \phi_k}{\partial t} + \text{div} (\varepsilon_i \rho_i \vec{U}_i \phi_k) = \text{div} (\varepsilon_i \Gamma_\phi \text{grad} \phi_k) + S_\phi \quad (1)$$

Nesta equação,  $\Phi$  é a variável dependente, assumindo a componente da velocidade para as equações de momentum, energia e espécies químicas para cada fase,  $i$  representa a fase a ser considerada e  $k$  a variável da fase. O coeficiente  $\Gamma_\phi$  é o coeficiente efetivo de transferência, o qual assume diferentes significados para cada variável dependente a ser resolvida. Os termos fonte  $S_\phi$  surgem devidos a interações entre as fases que podem ser através de reações químicas, interações superficiais e forças externas. Cada fase é composta de um número de espécies químicas e as equações gerais de conservação são calculadas para o movimento da fase, energia e fração mássica das espécies químicas. A Tabela 1 mostra as fases consideradas no modelo e suas respectivas espécies químicas.

**Tabela 1:** Fases e espécies químicas consideradas no modelo

Fases	Componentes	
<b>Gás</b>	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , SiO	
<b>Sólidos</b>	<b>Minério</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, ganga
	<b>Sinter</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, MnO, TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	<b>Pelota</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , MnO, TiO <sub>2</sub>
	<b>Coque</b>	C, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, S <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, Voláteis
<b>Metal Líquido</b>	Fe, C, Si, S, P, Mn	
<b>Escória</b>	FeO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, ganga	
<b>Finos</b>	<b>PCI</b>	C, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO, S <sub>2</sub> , ganga, voláteis
	<b>PCH</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , ganga
	<b>Fluxantes</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeO, Fe, CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , ganga

Para entendimento e melhor avaliação das técnicas propostas inicialmente no processo do mini alto forno, quatro séries de cálculos foram selecionados e calculados. No primeiro caso (caso base), foi simulada e estabilizada a operação do alto-forno como é na indústria atual, com nenhuma injeção auxiliar de finos. Nos demais casos variaram-se as taxas de injeção de carvão vegetal e mineral e o percentual de enriquecimento de O<sub>2</sub>. Todos os casos utilizaram como carga metálica 20% pelota e 80% minério. As variações dos valores dos parâmetros operacionais de entrada comparados ao caso base podem ser visualizadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Valores de entrada

Parâmetros Analisados	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Enriquecimento de O <sub>2</sub> no sopro	1,8	3,2	5,2	6,0
Taxa de carvão vegetal pulverizado – PCH kg/t	-	100	100	100
Taxa de carvão mineral pulverizado – PCI kg/t	-	-	20	50

## 2.2. Turbina de Gás de Topo de Alto Forno – TRT

A turbina de gás de topo de alto forno é um equipamento de geração de energia elétrica, funcionando também como controlador de pressão do topo. A energia é gerada pelo funcionamento de uma turbina através do gás gerado pelo processo no topo do alto forno (BFG), se aproveitando das características como temperatura, pressão e volume. Não necessita de combustível para geração de energia e nenhum combustível é queimado, portanto não há emissão de CO<sub>2</sub> nem gases para o efeito estufa são gerados. A TRT ainda contribui para redução de emissão de CO<sub>2</sub> de acordo com o volume de gás gerado, o que a torna uma tecnologia atrativa do ponto de vista ambiental. Um outro grande atrativo desta tecnologia se baseia também no fato de nenhuma tecnologia sofisticada ser necessária para sua operação e manutenção e somente pequenas quantidades de água, nitrogênio, etc, são necessários para a operação, que pode ser facilmente protegido pelos atuais equipamentos do alto forno.<sup>(6)</sup>

Como pode ser visto na Figura 2, a TRT pode ser instalada na saída do equipamento de limpeza de gases do alto forno. Existem dois tipos de equipamentos de limpeza de gás: um tipo úmido, que usa a água e um tipo seco, que não usa água. A instalação do tipo de turbina depende do método de limpeza de gás do alto forno. A Figura 2 mostra um tipo úmido, também conhecido como *wet-type*.

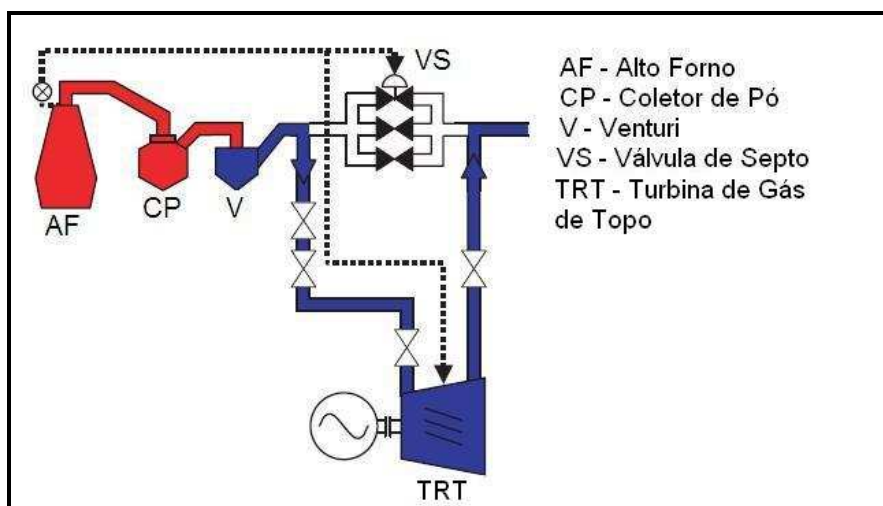


Figura 2: Turbina de Recuperação de Gás de Topo tipo úmida – *Wet-type*.<sup>(7)</sup>

Depois do pó carregado pelo gás de topo ser recolhido pelos equipamentos de limpeza de gás, o gás é levado à turbina. A energia gerada é transferida para o gerador e convertido em energia elétrica. Na prática convencional, a energia do gás de alto forno é desperdiçada por redução de pressão na válvula de septo, com a TRT, esta é agora recuperada como energia elétrica, realizando economias significativas dependendo do tamanho do alto forno.

Geralmente de 1.300 kW a 37.500 kW de energia elétrica pode ser gerado, dependendo do tamanho do alto forno, e dos valores das variáveis de entrada na turbina. O rendimento da turbina é influenciado pelas variações de vazão de BFG que podem ocorrer diariamente na operação do alto forno.<sup>(8,9)</sup>

O projeto TRT utiliza-se da diferença de pressão do BFG existente entre o topo do alto forno e a linha de gás da usina. A disponibilidade e a quantidade de BFG são funções exclusivas do ritmo operacional do próprio alto forno<sup>7</sup>. Dados de um modelo de TRT que possa ser posteriormente implantada: altos fornos com volumes de 300

– 5.500 m<sup>3</sup>, pressão de entrada de 0,69 atm– 2,96 atm, com temperaturas a partir de 30°C a 250°C. A eficiência pode chegar a 90% máximo .<sup>(8)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da operação do alto forno operando com injeções simultâneas de carvão vegetal e mineral pulverizados foi conduzida por meio de 4 condições operacionais distintas:

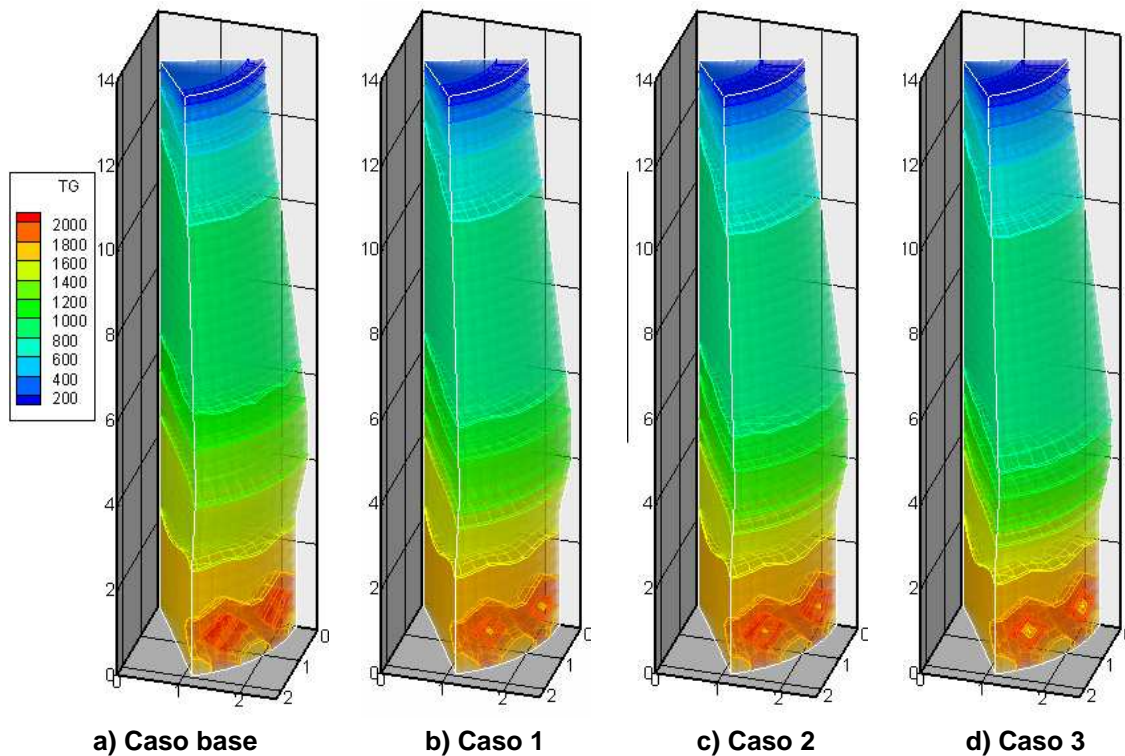
- Caso Base: correspondente a operação atual de um mini alto forno, sem nenhuma injeção auxiliar de finos;
- Caso 1: Taxa de Injeção de carvão vegetal de 100 kg/t<sub>gusa</sub>;
- Caso 2: Taxa de injeção de 100 kg/t<sub>gusa</sub> de carvão vegetal e 20 kg/t<sub>gusa</sub> de carvão mineral; e
- Caso 3: Taxa de injeção de 100 kg/t<sub>gusa</sub> de carvão vegetal e 50 kg/t<sub>gusa</sub> de carvão mineral.

O principal objetivo da seleção dos casos apresentados é comparar novas possibilidades com condições atuais de operação do processo. Os resultados são obtidos após tentativas de ajustes dos principais parâmetros operacionais que influenciam diretamente nas taxas de injeção e na estabilidade operacional, tais como enriquecimento de oxigênio, temperatura de sopro entre outros. Os resultados de simulação apresentaram operações estáveis indicados pelo fechamento do balanço de massas (erro percentual < 1%) e equilíbrio térmico local de todas as fases previstas. Na Tabela 3, são apresentados os principais parâmetros operacionais para os casos simulados. Como pode ser observado, obteve-se para o gás de topo uma elevação em sua temperatura, bem como um aumento de seu volume, o que possibilita a implantação da Turbina de Gás de Topo de alto forno – TRT, pois os valores obtidos se enquadram dentro das características possíveis de implantação encontradas no mercado. Um aumento na produtividade foi encontrado, resultado de uma maior geração de gás redutor na região das ventaneiras, fruto da elevação das taxas de injeção aliado ao aumento do enriquecimento de oxigênio no ar soprado. Como era de se esperar, o aumento das taxas de injeções de finos acarretaram em uma sensível elevação nos valores do poder calorífico do gás de topo em 7,9%. A pressão de topo manteve-se constante o que para a implantação de uma TRT é de fundamental importância, pois um dos parâmetros para se obter uma elevada eficiência, é a manutenção da estabilidade operacional.

**Tabela 3:** Parâmetros operacionais de saída dos casos simulados

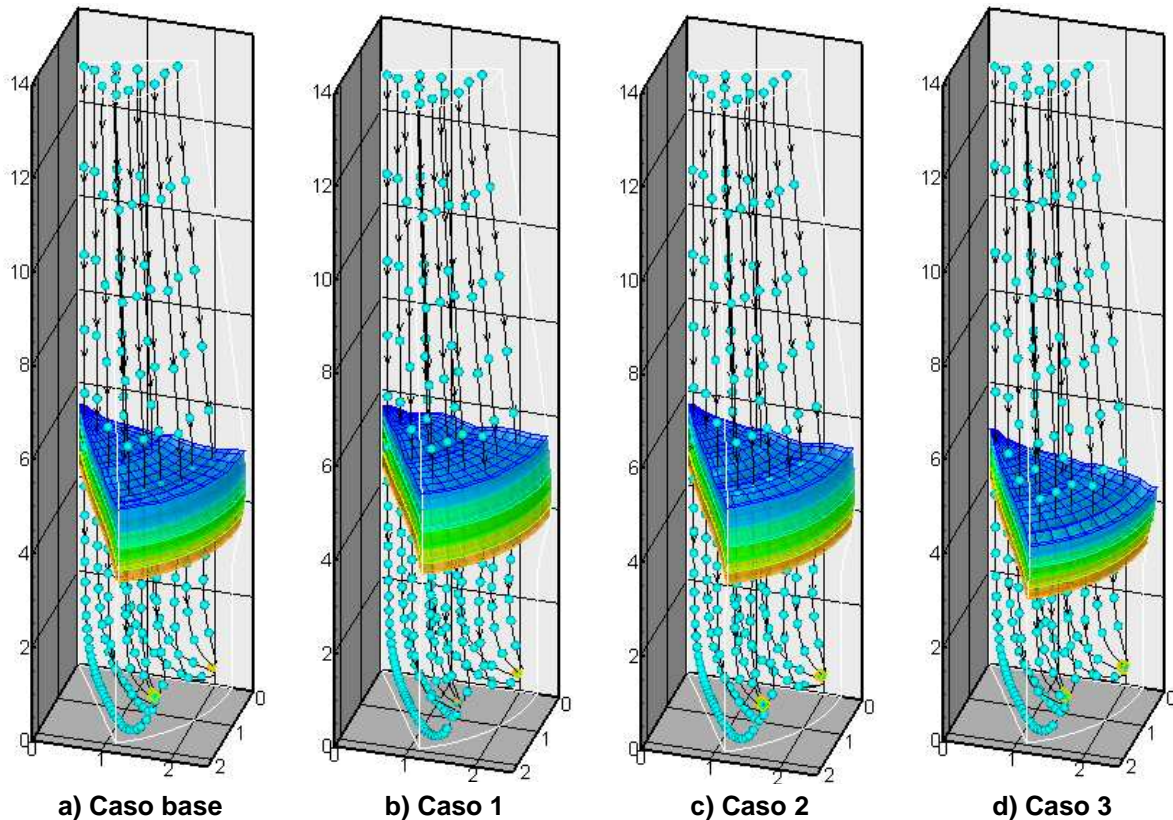
Parâmetros operacionais	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Temperatura de Sopro (°C)	950	950	950	950
Taxa de injeção de carvão vegetal (kg/t)	-	98,63	98,82	98,84
Taxa de injeção de carvão mineral (kg/t)	-	-	19,8	48,98
Enriquecimento de oxigênio (%)	1,44	3,84	5,37	6,02
Produtividade (t/dia/m <sup>3</sup> )	2,24	2,32	2,48	2,52
Taxa de carvão vegetal (kg/t)	612,9	520,9	495,4	471,2
Poder Calorífico Gás topo (Kcal/Nm <sup>3</sup> )	1050,47	1091,18	1101,82	1140,67
Volume de Gás de topo (Nm <sup>3</sup> /t)	1935,2	1961,7	1969,9	1985,2
Temperatura do gás de Topo (°C)	148,2	189,5	192,3	214,2
Pressão do Gás de topo (atm)	1,83	1,83	1,83	1,83

A Figura 3 apresenta a distribuição de temperatura do gás para os casos analisados. Nela são observadas as mudanças relacionadas ao perfil térmico no interior do reator. Considerou-se uma seção longitudinal do alto forno operando com duas ventaneiras. Percebe-se algumas mudanças, mas que não interferem no ritmo de produção quando avaliados os casos 1, 2 e 3 com o caso base. Como resultado do aumento do ritmo de produção, destaca-se um pequeno abaixamento das isotermais próximas a região da cuba do alto forno. Isto porque um ritmo de produção mais acelerado tende a fazer com que as temperaturas da zona de amolecimento e fusão fiquem mais próximas, resultado de uma maior rapidez nas etapas de redução da carga metálica.



**Figura3:** Perfil Térmico no interior do reator

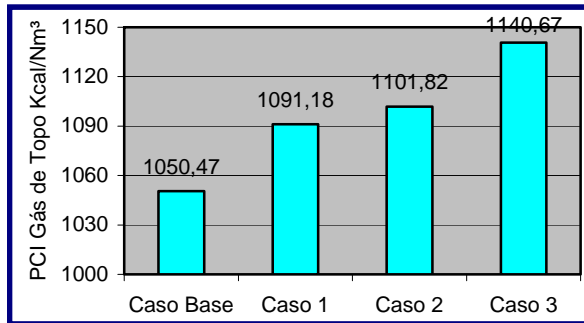
Na Figura 4 são apresentados o posicionamento da zona coesiva no interior do alto forno. Para os casos 1 (Figura 4b) ao 3 (Figura 4d) era esperado um abaixamento da zona coesiva, visto que a substituição gradativa do carvão mineral granulado pelos finos ocorreu em maior quantidade. Este abaixamento também se deve, como citado na figura 3 ao aumento do ritmo de produção.



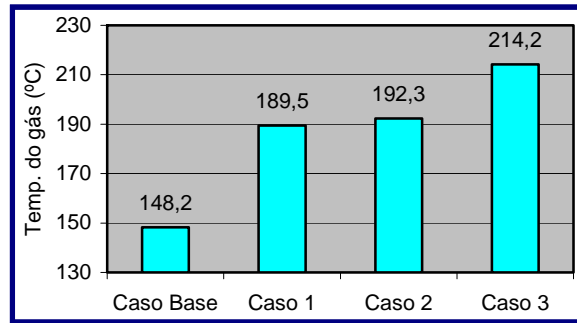
**Figura 4:** Posicionamento da zona coesiva

Na Figura 5 são apresentados os gráficos comparativos dos valores encontrados das principais variáveis operacionais de interesse. No gráfico 5a percebe-se uma elevação de 7,9% no poder calorífico do gás gerado no caso 3, quando comparado ao caso base, resultado de uma maior geração de gás na região das ventaneiras devido à queima dos finos injetados. Em consequência, um maior volume e uma maior temperatura do gás de topo foram obtidos, como visto nos gráfico 5c e 5b. Com a injeção de finos, era de se esperar uma diminuição significativa do consumo de carvão vegetal granular entre os casos (gráfico 5d). Esta redução no consumo se dá pela substituição do carbono do carvão vegetal correspondente a porcentagem de carbono dos finos injetados. Pode-se obter uma diminuição de aproximadamente 30%. Observou-se um aumento de 11% na produtividade do caso 3 (gráfico 5e). Este aumento pode ser explicado por vários fatores, um fator principal é o aumento do enriquecimento do oxigênio no volume de ar soprado, com o objetivo de compensar a perda térmica na zona de combustão causada pela injeção dos finos. Os finos são injetados a temperatura ambiente, o que causaria uma queda na temperatura de chama, prejudicando o ritmo de produção. No gráfico 5f, são colocadas as taxas de injeção de carvão vegetal – CV e carvão mineral – CM, considerando os valores totais de injeção, atingindo valores de injeção conjunta de até 147,82 kg/t (caso3), sem prejudicar as principais variáveis de processo, mostrando confiabilidade nos resultados.

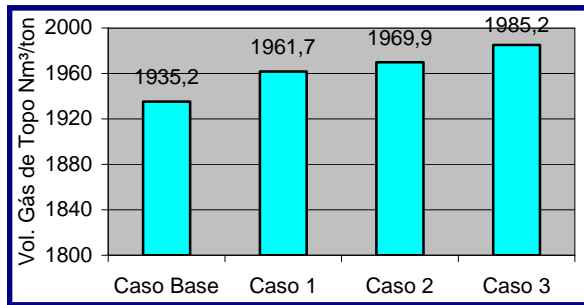




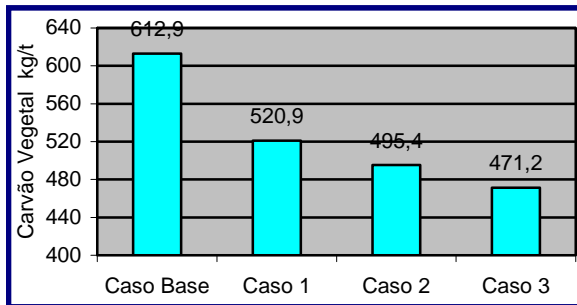
a) Poder calorífico do gás de topo Kcal/Nm³



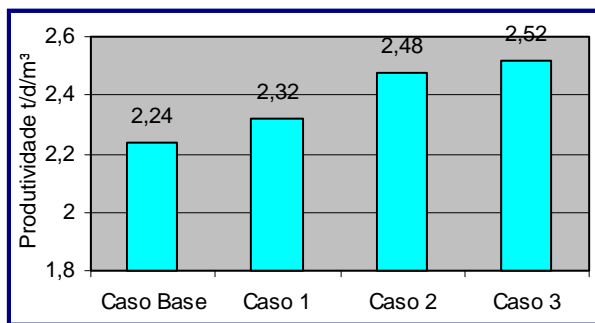
b) Temperatura do gás de topo (°C)



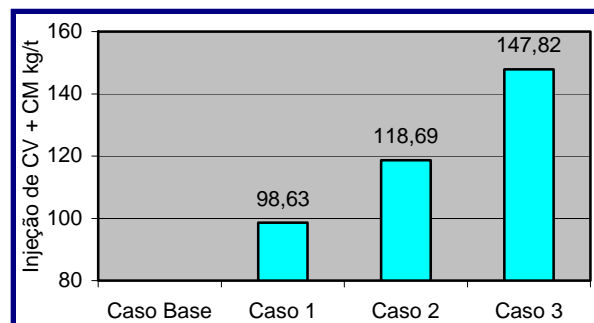
c) Volume de gás de topo Nm³/t



d) Taxa de carvão vegetal granular kg/ton



e) Produtividade t/d/m³



f) Taxa de Injeção Conjunta de CV + CM kg/t

**Figura 5:** Gráficos das principais variáveis operacionais de interesse.

As situações aqui apresentadas de operação de um mini alto forno operando com múltiplas injeções de carvão mineral e carvão vegetal, mostraram-se compatíveis com as práticas realizadas industrialmente (caso base). Embora ainda em período de consolidação em escala industrial, a injeção simultânea pode ser implementada apresentando valores de saída satisfatórios para futuras implantações de Turbina de gás de Topo – TRT, visando a recuperação da energia contida no gás.

#### 4 CONCLUSÃO

O modelo mostrou-se capaz de analisar o desempenho do alto-forno com a múltipla injeção de carvão mineral e vegetal. As injeções destes materiais com o enriquecimento do sopro com oxigênio nos deram resultados satisfatórios tais como: I) Aumento da produtividade em 11% (2,24 para 2,52 t/d/m³), II) Diminuição do consumo de coque por tonelada de metal líquido produzido (612,9 para 471,2) III) Aumento do poder calorífico do gás de topo em 7,9%, IV) Estabilidade do alto forno trabalhando a múltiplas injeções pelas ventaneiras, V) E como era de se esperar, os

valores de pressão, temperatura e volume de gás de topo encontrados, com a múltipla injeção de finos, mostraram que a Turbina de Gás de Topo – TRT é uma tecnologia viável a ser implantada, de grande importância do ponto de vista econômico como também operacional.

## Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da EEIMVR que forneceu toda infra-estrutura para desenvolvimento da pesquisa e a Capes por fomentar e incentivar o desenvolvimento tecnológico.

## REFERÊNCIAS

- 1 Dados retirados do site da Associação Mineira de Silvicultura (AMS), endereço eletrônico [http://www.silviminas.com.br/NumerosSetor/Arquivos/numerosetor\\_513.pdf](http://www.silviminas.com.br/NumerosSetor/Arquivos/numerosetor_513.pdf), no dia 02/05/2010.
- 2 CASTRO J. A., et al., "Estudo do comportamento do alto-forno operando com injeções auxiliares de carvões mineral e vegetal pulverizados" Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 2006.
- 3 CASTRO J. A., NOGAMI H. & YAGI J., "Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high PCI operation", ISIJ Int., 40 (2000), 637.
- 4 AUSTIN P. R., NOGAMI H. & YAGI J., "A mathematical model for blast furnace reactions analysis based on the four fluid model", ISIJ Int., 37 (1997), 748.
- 5 CASTRO J. A., NOGAMI H. & YAGI J., "Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multi fluid Model", ISIJ Int., 42 (2002), 44.
- 6 Dados retirados do site da Japanese Business Alliance for Smart Energy Worldwide, endereço eletrônico [http://www.jase-.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron\\_steel/S-6.pdf](http://www.jase-.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron_steel/S-6.pdf), no dia 05/06/2010.
- 7 Dados retirados do site da Japanese Business Alliance for Smart Energy Worldwide. Ltd, endereço eletrônico [http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron\\_steel/S-6.pdf](http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron_steel/S-6.pdf), no dia 05/06/2010.
- 8 RODRIGUES, P.E.; LOBÃO, D.; PONTES, J.R.M. & CARDOSO, P.A. *Aproveitamento de características físicas dos gases de alto forno para geração de energia elétrica em uma siderúrgica: O Caso da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST)*. Ouro Preto: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2003
- 9 Dados retirados do site da Bei Jing New Metallurgical Machine & Equipment CO., Ltd, endereço eletrônico <http://www.bnmme.com/en/products/detail.php?ilnfoID=120>, no dia 07/06/2010.