

# REDUÇÃO DO CONSUMO DE OXIGÊNIO EM UM ALTO-FORNO A PARTIR DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TROCADORES DE CALOR<sup>1</sup>

Charles Sóstenes Assunção<sup>2</sup>

## Resumo

Este trabalho relata o estudo de melhoria de desempenho dos trocadores de calor do tipo Glendon da V&M do Brasil. O objetivo é reduzir o consumo de oxigênio utilizado para enriquecer o ar que é soprado no Alto-Forno 2 a partir do aumento da eficiência energética dos trocadores de calor. Um modelo computacional em CFD (*Computer Fluids Dynamics*) foi desenvolvido para simular o comportamento termodinâmico dos fluidos nos Glendons. A partir deste modelo, foram simuladas algumas alterações geométricas no equipamento. As alterações tinham como objetivo modificar o escoamento dos gases da combustão, fazendo com que esses gases escoassem de maneira cruzada em relação ao fluxo de ar no interior das serpentinas. A simulação demonstrou um potencial de aumento de eficiência energética de 15,25%, o que representaria um aumento de temperatura de saída do ar de 115°C. As alterações simuladas foram implantadas em um dos três trocadores de calor que, juntamente com melhorias no controle do processo de combustão, geraram um aumento real de temperatura de 135°C. Após a implantação destas alterações nos outros Glendons, a redução esperada do consumo de oxigênio de enriquecimento do ar no Alto-Forno 2 é de aproximadamente 4.400.000Nm<sup>3</sup> por ano.

**Palavras-chave:** Trocador de calor; Eficiência energética; Consumo de oxigênio.

## REDUCTION OF OXYGEN CONSUMPTION IN THE V&M DO BRASIL'S BLAST FURNACE 2 THROUGH THE IMPROVEMENT OF THE HEAT EXCHANGERS

### Abstract

This work concerns the performance improvement study of the V&M do Brasil's Glendon heat exchangers. The objective is to reduce the consumption of the oxygen used to enrich the blown air in the Blast Furnace 2 through the improvement of the heat exchanger's energetic efficiency. A CFD (*Computer Fluids Dynamics*) model was developed in order to simulate the thermodynamic behavior of the fluids inside the heat exchangers. Some geometric alterations were simulated in the model, which objective was to change the parallel flow of the combustion gases to a cross flow. The simulation showed a potential of energetic efficiency improvement of 15,25%, which would mean an increase of 115°C in the outlet air temperature. The simulated alterations were implemented in one of three heat exchangers and the actual temperature increase was 135°C. After the implementation of the alterations in the others heat exchangers, the expected reduction of the oxygen consumption in the Blast Furnace 2 is about 4.400.000 Nm<sup>3</sup> per year.

**Key words:** Heat exchanger; Energetic efficiency; Oxygen consumption.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 30º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 24º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 19 a 21 de agosto de 2009, São Paulo, SP

<sup>2</sup> Engenheiro, V&M do Brasil S.A.

## 1 INTRODUÇÃO

A V&M do Brasil S.A., situada em Belo horizonte, tem produção anual de aço em torno de 670 mil toneladas. Seus principais produtos são tubos de aço sem costura, especialmente voltados para a indústria petrolífera, a indústria automotiva, e a indústria mecânica.

Para a obtenção do ferro gusa, matéria-prima na produção do aço, a V&M do Brasil possui dois altos-fornos a carvão vegetal, que juntos são capazes de produzir 1.900 toneladas por dia.

O processo nos altos-fornos requer determinados valores de temperatura de chama de combustão para que a redução do minério ocorra de maneira adequada. De modo geral, a temperatura de chama em um processo de combustão é diretamente proporcional a pelo menos duas variáveis, a concentração de oxigênio no ar de combustão e a temperatura do ar de combustão, conforme mostram as Figuras 1 e 2, respectivamente.

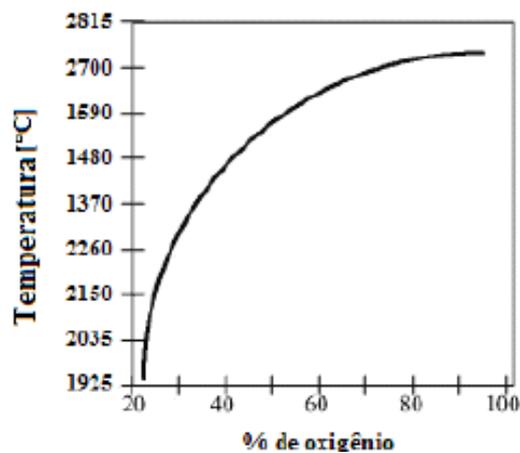


Figura 1. - Efeito da porcentagem de oxigênio na temperatura de chama de combustão. <sup>(1)</sup>

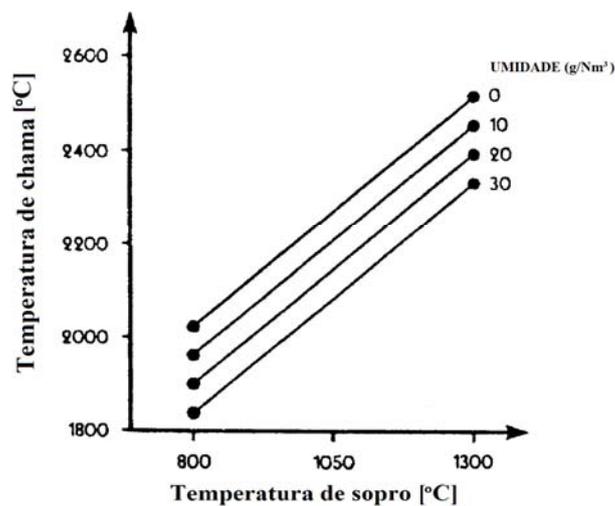
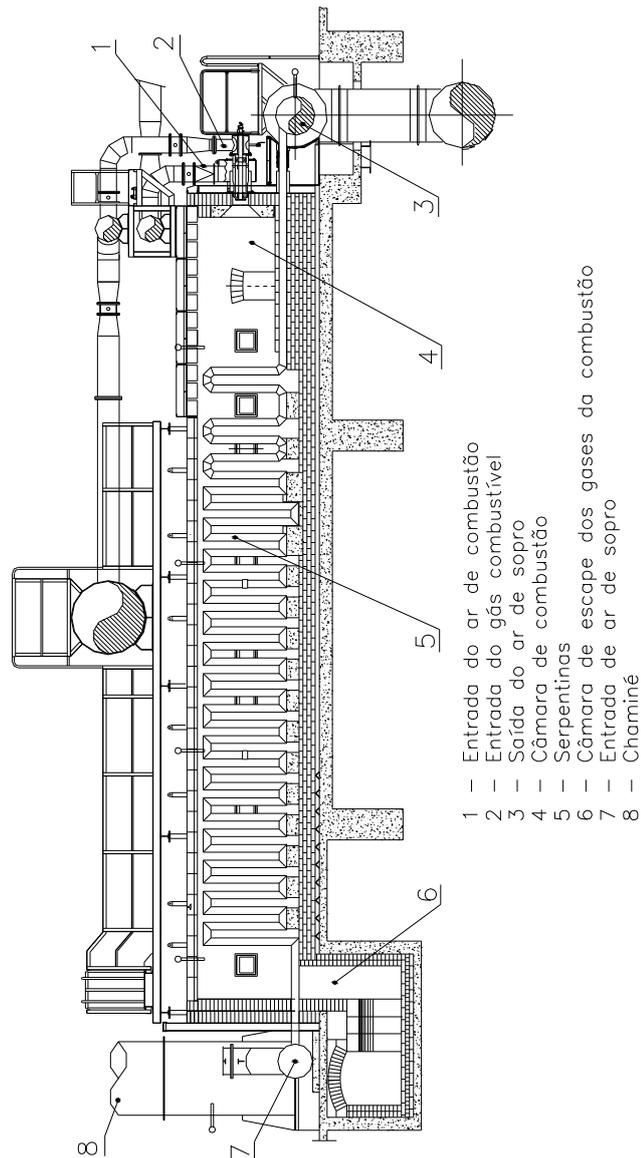


Figura 2. Relação da temperatura de chama com a temperatura de sopro. <sup>(2)</sup>

Quanto maior for a concentração de oxigênio no ar de sopro, maior será a temperatura de chama. Contudo, o enriquecimento do ar de sopro com oxigênio é uma prática indesejável, pois implica no aumento dos custos de produção. Por outro lado, a temperatura de chama no alto-forno pode ser elevada a partir do aumento da

temperatura do ar de sopro. Atualmente, o ar de sopro do alto-forno 2 é enriquecido com oxigênio em 4% do seu volume, pois a troca de energia nos Glendons não é suficiente para elevar a temperatura do ar de sopro a valores requeridos pelo processo.

O ar soprado no alto-forno 2 da V&M do Brasil S.A é aquecido em três aquecedores do tipo Glendon. Esses aquecedores possuem um regime de trabalho contínuo e consistem em câmaras de paredes refratárias, onde ocorre a combustão do gás de alto-forno recuperado. O calor gerado pela combustão aquece o ar que passa em tubos de aço, chamados de serpentinas, conforme Figura 3.



**Figura 3.** Corte longitudinal do Glendon.

Para obtenção da temperatura de chama desejada no alto-forno 2, é necessário que os Glendons tenham uma alta performance. Atualmente a eficiência energética é 59% e as temperaturas de saída do ar não são altas o suficiente para atender a demanda do alto-forno.

Este estudo foi desenvolvido com os objetivos de aumentar a eficiência dos Glendons, e conseqüentemente aumentar a temperatura do ar de saída, e adequar a temperatura da câmara de combustão. Um modelo dos Glendons foi desenvolvido em CFD (*Computer Fluids Dynamics*) e algumas modificações geométricas foram simuladas. Com base nos resultados, foi possível identificar alternativas para que os objetivos fossem alcançados.

## 2 METODOLOGIA

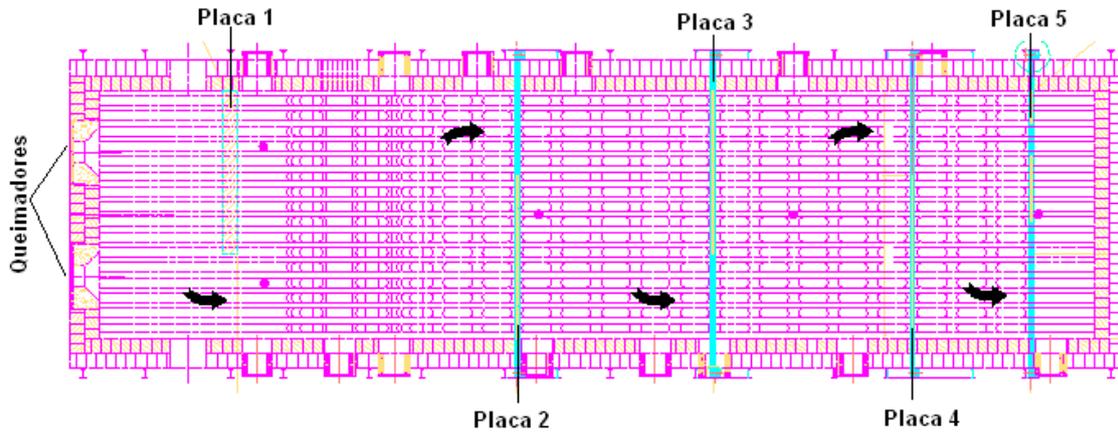
O sistema de aquecimento de ar de sopro do alto-forno 2 da V&M do Brasil S.A é constituído de três Glendons. Contudo, devido às condições de simetria de carregamento termodinâmico dos três Glendons (mesma geometria e mesmas condições de entrada e operação dos fluidos de trabalho), apenas um dos trocadores foi analisado e as conclusões foram estendidas para os demais. Este estudo foi dividido em três etapas, e em todas elas as mesmas condições operacionais foram consideradas.

A primeira etapa consistiu em construir um modelo do comportamento termodinâmico nas condições atuais em CFD (*Computer Fluids Dynamics*) e validá-lo com medições em campo. Os modelos geométricos foram gerados no aplicativo GAMBIT a partir de desenhos de projeto dos Glendons, e as malhas foram geradas no aplicativo FLUENT. Nesta análise, algumas hipóteses foram adotadas:

- regime do escoamento: estacionário, compressível e turbulento;
- fluido de trabalho: ar (dentro e fora das serpentinas) tratado como um gás ideal;
- queimadores: a combustão não foi modelada diretamente. Adotou-se a entrada de ar com uma temperatura elevada que permitisse introduzir no modelo uma energia equivalente à energia injetada pelos queimadores;
- material das serpentinas: aço padrão do Fluent;
- material das paredes dos Glendons: refratários (paredes isoladas);
- temperatura do ar na entrada das serpentinas: 95°C;
- pressão do ar na entrada das serpentinas: 1,12 kgf/cm<sup>2</sup>;
- vazão do ar no interior das serpentinas: 9969,3 m<sup>3</sup>/h;
- temperatura do ar nos queimadores: 1.033°C;
- pressão do ar nos queimadores: 1 kgf/cm<sup>2</sup>;
- emissividades: 0,8 (aço) e 1 (refratários);
- vazão do ar nos queimadores: 10063 m<sup>3</sup>/h; e
- Coeficiente de absorção do ar (dependência linear da temperatura, em 1/m): 0°C a 95°C e 0,2°C a 1.100°C.

A segunda etapa consistiu em simular a redução da área de passagem dos gases da combustão na seção transversal do Glendon, com o objetivo de aumentar sua velocidade e melhorar sua distribuição. O teto foi rebaixado em 100 mm e cada parede lateral foi aproximada das serpentinas em 50 mm.

A terceira etapa incluiu as alterações simuladas na etapa anterior e incluiu a introdução de cinco barreiras, que bloqueiam dois terços da seção transversal dos Glendons, funcionando como chicanas conforme Figura 4. O objetivo foi fazer com que o fluxo dos gases da combustão fosse cruzado ao fluxo de ar no interior das serpentinas e a turbulência do escoamento externo fosse aumentada, aumentando assim a troca de calor.



**Figura 4.** Esquema das cinco barreiras trabalhando como chicanas.

### 3 RESULTADOS

O modelo do comportamento termodinâmico do Glendon não foi totalmente validado. Na situação real a temperatura do ar de sopra é de 734°C enquanto na simulação a temperatura encontrada foi de 693°C. Este desvio pode ser corrigido com o ajuste da emissividade dos gases da combustão. Assim, devido à exiguidade de tempo para apresentação das alternativas de melhoria nos Glendons, os resultados das simulações da segunda e terceira etapas foram comparados com os resultados não corrigidos da primeira etapa. Contudo, este procedimento não invalida as conclusões advindas dessas comparações.

A Tabela 1 mostra os resultados do balanço de energia para as três simulações.

**Tabela 1** – Resultado dos balanços energéticos

Posição	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Queimadores (MW)	3,67	3,67	3,67
Entrada de ar nas serpentinas (MW)	0,232	0,232	0,232
Saída dos gases da combustão (MW)	1,5	1,434	1,181
Saída do ar nas serpentinas (MW)	2,4	2,464	2,706

É possível observar que para as mesmas condições de entrada (energia dos queimadores e entrada de ar nas serpentinas) existe um gradativo aumento da energia que é transferida dos gases da combustão para o ar no interior das serpentinas.

Desta forma, a eficiência energética dos Glendons que era 59% passou para 68%. Este aumento pode ser atribuído a dois fatores, o aumento da turbulência dos gases e a alteração do escoamento dos gases da combustão, que passou de um escoamento paralelo para um escoamento cruzado em relação ao escoamento de ar.

O aumento na eficiência energética é evidenciado no aumento da temperatura de saída do ar nas serpentinas, conforme Tabela 2.

**Tabela 2** Resultados de temperatura do ar de saída e dos gases na chaminé

Posição	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Saída do ar nas serpentinas (°C)	693	710	808
Saída dos gases da combustão (°C)	381	378	317

As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a evolução do perfil de temperatura ao longo do Glendon e em uma seção transversal, nas 3 etapas de simulação.

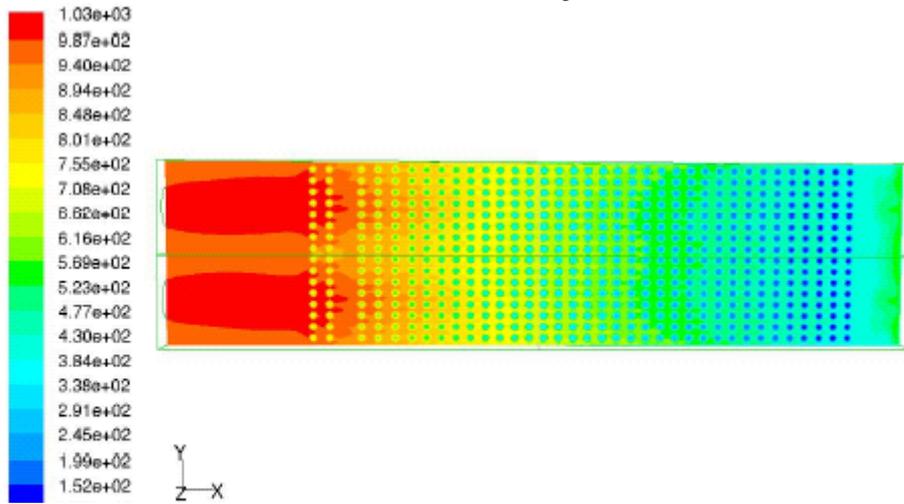
A configuração do Glendon na primeira simulação apresenta na câmara de combustão duas regiões de concentração de temperatura em frente a cada queimador e temperaturas relativamente elevadas na saída para os gases de combustão, conforme Figura 5. Isto se deve à ineficiente troca térmica entre os fluidos.

Na seção transversal é possível notar uma concentração de temperatura na região superior, conforme Figura 6. Esta concentração é devido à preferência de escoamento dos gases da combustão por esta região, assim os gases não trocam calor com o ar e permanecem a temperaturas mais elevadas. A altura entre o topo das serpentinas e o teto é de 150 mm. O gradiente de temperatura é mais acentuado na direção vertical.

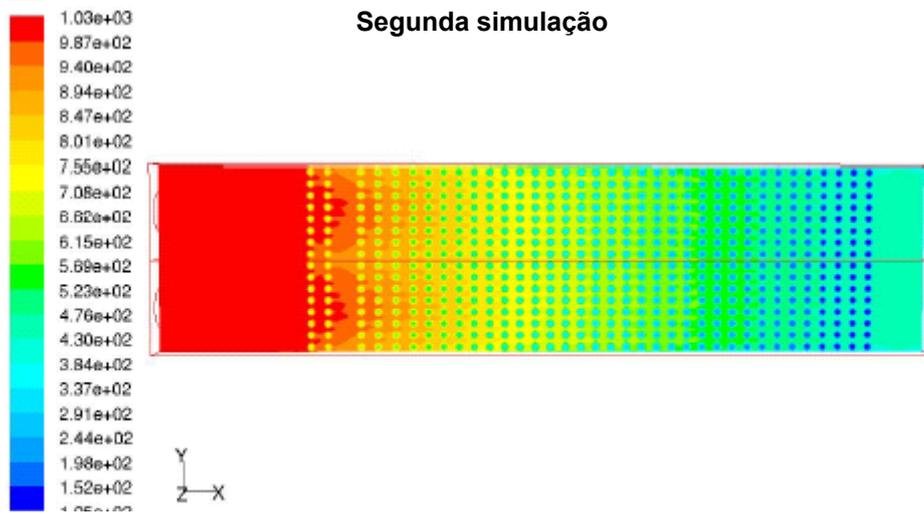
A partir da verificação da concentração de energia existente na parte superior do Glendon, foram modelados na segunda simulação o rebaixamento do teto e a aproximação das paredes em relação às serpentinas. É possível perceber uma maior homogeneização da temperatura na câmara de combustão devido ao aumento da turbulência nesta região. Mas, pouca diferença pode ser percebida ao longo de todo o Glendon.

Na segunda simulação, o perfil de temperatura na seção transversal foi alterado sensivelmente. A concentração de temperatura na região superior não é tão intensa quanto àquela mostrada na primeira simulação. A altura entre o topo das serpentinas e o teto foi reduzida para 50 mm. O gradiente de temperatura predominante é na direção vertical.

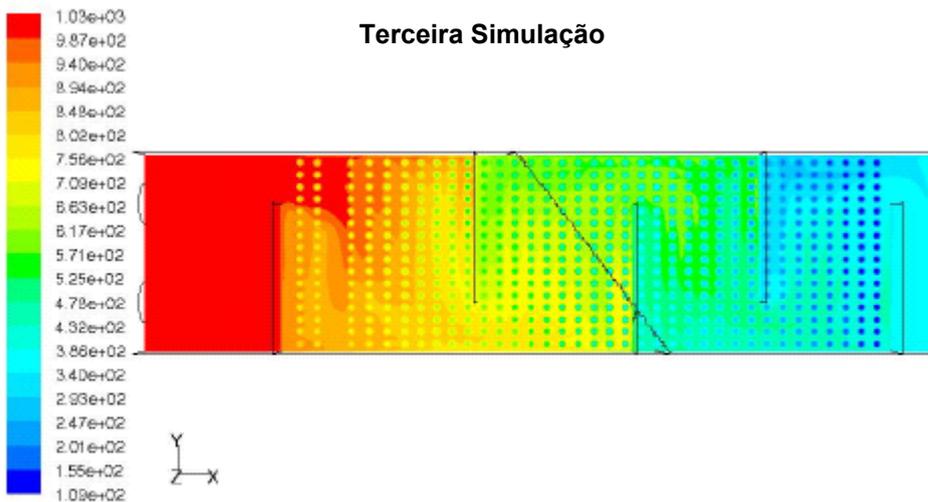
### Primeira simulação



### Segunda simulação



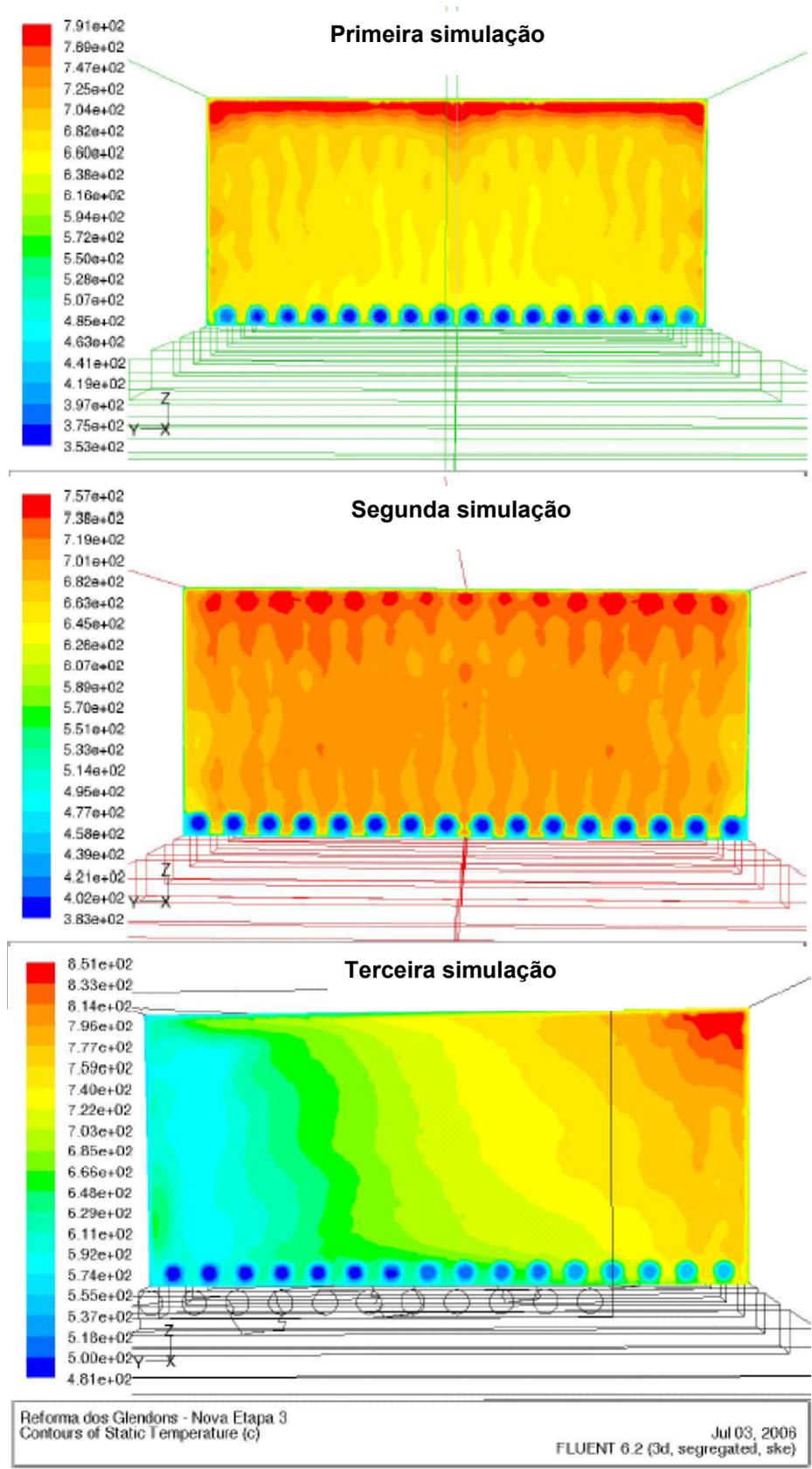
### Terceira Simulação



Reforma dos Glendons - Nova Etapa 3  
Contours of Static Temperature (c)

Jul 03, 2006  
FLUENT 6.2 (3d, segregated, snc)

Figura 5. Evolução do perfil de temperatura ao longo do Glendon – Vista de planta.

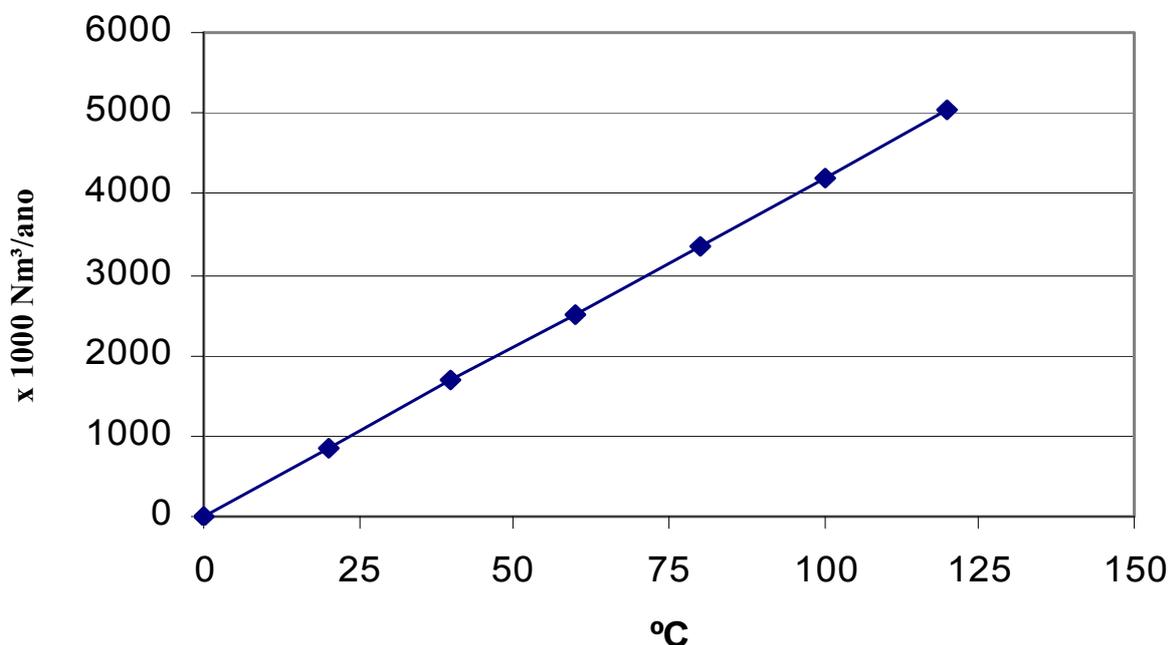


**Figura 6.** Evolução do perfil de temperatura em uma seção transversal do Glendon – Corte transversal.

Na terceira simulação, foi modelada a inserção de cinco barreiras, que funcionam como chicanas. Estas barreiras alteraram completamente o escoamento dos gases da combustão, que passou de paralelo para cruzado. A Figura 6 mostra que o gradiente de temperatura na vista de planta é predominantemente longitudinal, na primeira e na segunda simulações. Na terceira simulação, o gradiente de temperatura não possui uma única direção. As chicanas promoveram uma troca de calor mais eficiente, e isso pode ser observado pela diminuição dos valores de temperatura dos gases na saída do Glendons.

O perfil de temperatura na seção transversal também sofreu uma profunda alteração. O gradiente de temperatura mais significativo está em uma direção oblíqua, e não mais na direção vertical, como nas simulações anteriores. Apesar de algumas regiões “frias” numa mesma seção transversal, o ganho global de temperatura na terceira simulação foi de 115°C.

Com base nos resultados do modelo computacional, as barreiras que funcionam como chicanas foram montadas em um dos três Glendons e algumas melhorias foram realizadas no controle do processo de combustão. O aumento de temperatura real após as modificações foi de 135° C, não podendo ser maior devido a limitações de outras partes do equipamento. A FIGURA 7 mostra o potencial de redução do consumo de oxigênio em função do aumento de temperatura do ar de sopro na saída dos Glendons, considerando a mesma temperatura de combustão no Alto-Forno.



**Figura 7.** Economia anual de oxigênio em função do aumento de temperatura do ar de sopro.

## 4 CONCLUSÃO

O modelo computacional se mostrou uma ferramenta importante para o entendimento do comportamento termodinâmico dos Glendons da V&M do Brasil. A partir deste modelo foi possível simular duas modificações geométricas no equipamento objetivando o aumento de sua eficiência energética e vida útil.

A primeira alteração consistiu em reduzir a área de passagem dos gases da combustão através do rebaixamento do teto e da aproximação das paredes em relação às serpentinas. A segunda alteração consistiu na inclusão de cinco barreiras (chicanas) que bloqueiam dois terços da área da seção transversal dos Glendons.

A inclusão das chicanas se mostrou mais efetiva do que a redução da área de passagem dos gases da combustão, e promoveu um aumento na eficiência energética do Glendons de 59% para 68%.

Em termos de temperatura, o modelo computacional forneceu um aumento de 115°C na saída do ar das serpentinas, mantendo-se as mesmas condições de entrada. No teste experimental este aumento de temperatura chegou a 125°C. Considerando o aumento teórico de 115°C, a redução do consumo de oxigênio no Alto-Forno 2 será de aproximadamente 4.400.000 Nm<sup>3</sup> por ano, mantendo a mesma temperatura de chama no Alto-Forno.

## REFERÊNCIAS

- 1 GASIN. Técnicas Oxigênio-Combustível. Disponível em: <[http://www.gasin.pt/htm/your\\_business/Glass\\_OxyFuelTech.htm](http://www.gasin.pt/htm/your_business/Glass_OxyFuelTech.htm)>. Acesso em: 01 de junho de 2006.
- 2 CASTRO, L. F. A. Melhorias operacionais em Altos-Fornos com Stave-Cooler. Belo Horizonte: Vallourec&Mannesmann do Brasil, 2005