

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO TERMODINÂMICO DE UM GLENDON¹

Charles Sóstenes Assunção²

Resumo

Este trabalho relata o estudo de melhoria de desempenho dos trocadores de calor do tipo Glendon da V&M do Brasil. Os objetivos deste estudo são aumentar a eficiência energética destes trocadores de calor, possibilitando aumentar a temperatura do ar de saída, e estender, por meio da redução da temperatura da câmara de combustão, a vida útil das serpentinas que estão submetidas a intensas cargas térmicas. 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 duas alterações geométricas no equipamento. A primeira alteração consistiu em reduzir a área de passagem dos gases da combustão, o que aumentou a eficiência energética de 59% para 61%. A segunda alteração consistiu em instalar placas defletoras que funcionam como chicanas, fazendo com que os gases da combustão escoem de maneira cruzada em relação ao fluxo de ar no interior das serpentinas. A segunda alteração aumentou a eficiência energética do Glendon para 68% e possibilita a operação do Glendon com temperaturas da câmara de combustão inferiores a 970°C (atualmente, esta temperatura é da ordem de 1050°C), aumentando sua vida útil. Este estudo viabilizou a aprovação da modificação nos trocadores de calor, que será executada durante a reforma do alto-forno em 2008.

Palavras-chave: Simulação computacional; Eficiência energética; Vida útil.

COMPUTER SIMULATION OF A GLENDON'S THERMODYNAMIC BEHAVIOR

Abstract

This work concerns to a performance improvement study of the V&M do Brasil's Glendon heat exchangers. The objectives are to increase the Glendon's energetic efficiency, allowing to increase the outlet air temperature, and to extend the useful life of the heating coil that are under heavy thermal loads, through the decrease of the temperature in the combustion chamber. A model that simulates the thermodynamic behavior of the Glendon fluids was constructed using CFD (*Computer Fluids Dynamics*). Two geometric modifications were simulated. The first modification is the reduction of the flow area of the combustion gases, which increased the energetic efficiency from 59% to 61%. The second modification is the assembling of five walls that work as bafflers, what make the combustion gases flow in a cross way with the air flow within the heating coil. This modification increased the energetic efficiency up to 68% and allowed decreasing the combustion chamber temperature to values lower than 970°C (Nowadays this temperature is about 1050°C), increasing the heating coil's useful life. This study made the modifications in the heat exchangers possible, what will be implemented in 2008, during the blast furnace stoppage.

Key words: Computer simulation; Energetic efficiency; Useful life.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

² *MSc, Engenheiro, V&M do Brasil S.A.*

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 1900 toneladas por dia.

O processo nos altos-fornos requer determinados valores de temperatura de chama para que a redução do minério ocorra de maneira adequada, e esta temperatura é diretamente proporcional à temperatura do ar que é soprado no interior dos altos-fornos, conforme Figura 1.

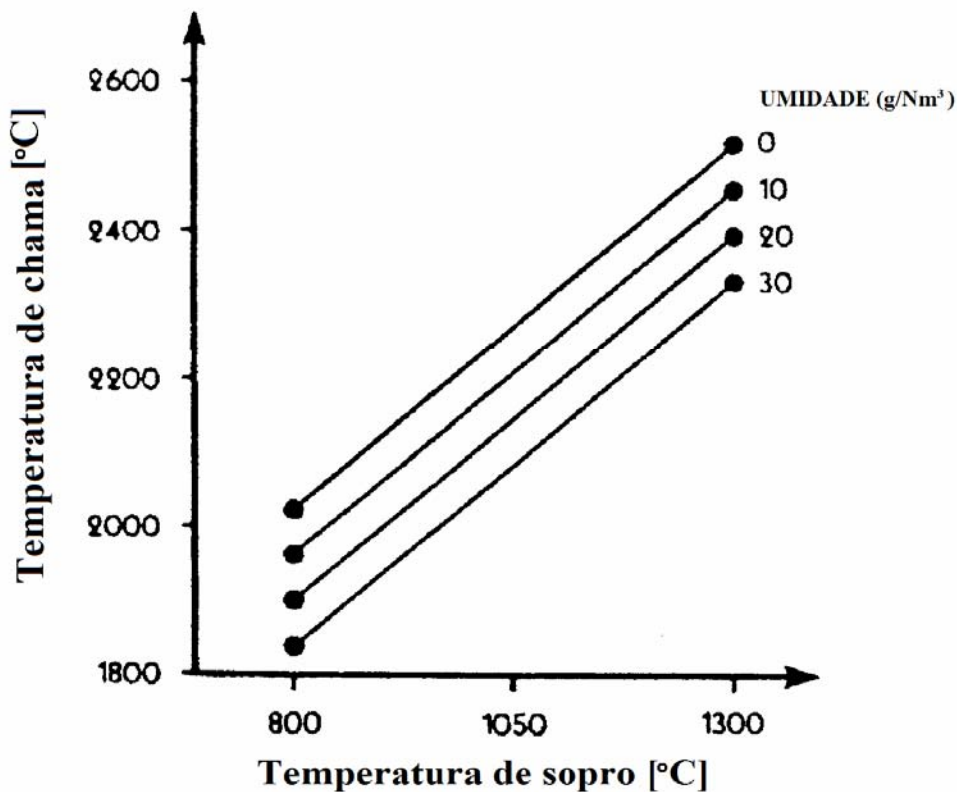


Figura 1 Relação da temperatura de chama com a temperatura de sopro.⁽¹⁾

A temperatura de chama mais elevada permite uma diminuição no consumo específico de carvão, uma maior produtividade e uma diminuição do volume de ar de combustão por tonelada de ferro gusa, além de permitir a injeção de combustíveis auxiliares, como finos de carvão. O carvão representa a maior parte do custo da produção do ferro gusa em altos-fornos a carvão vegetal, conforme Figura 2.

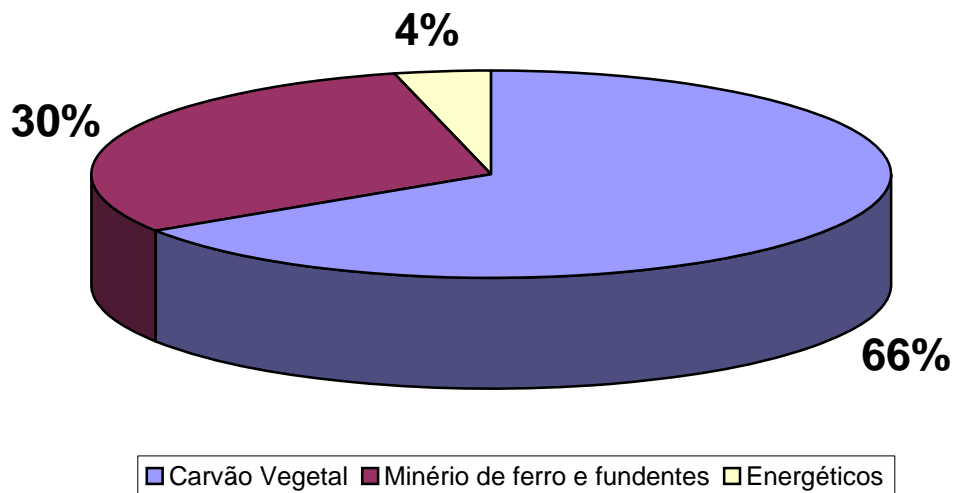
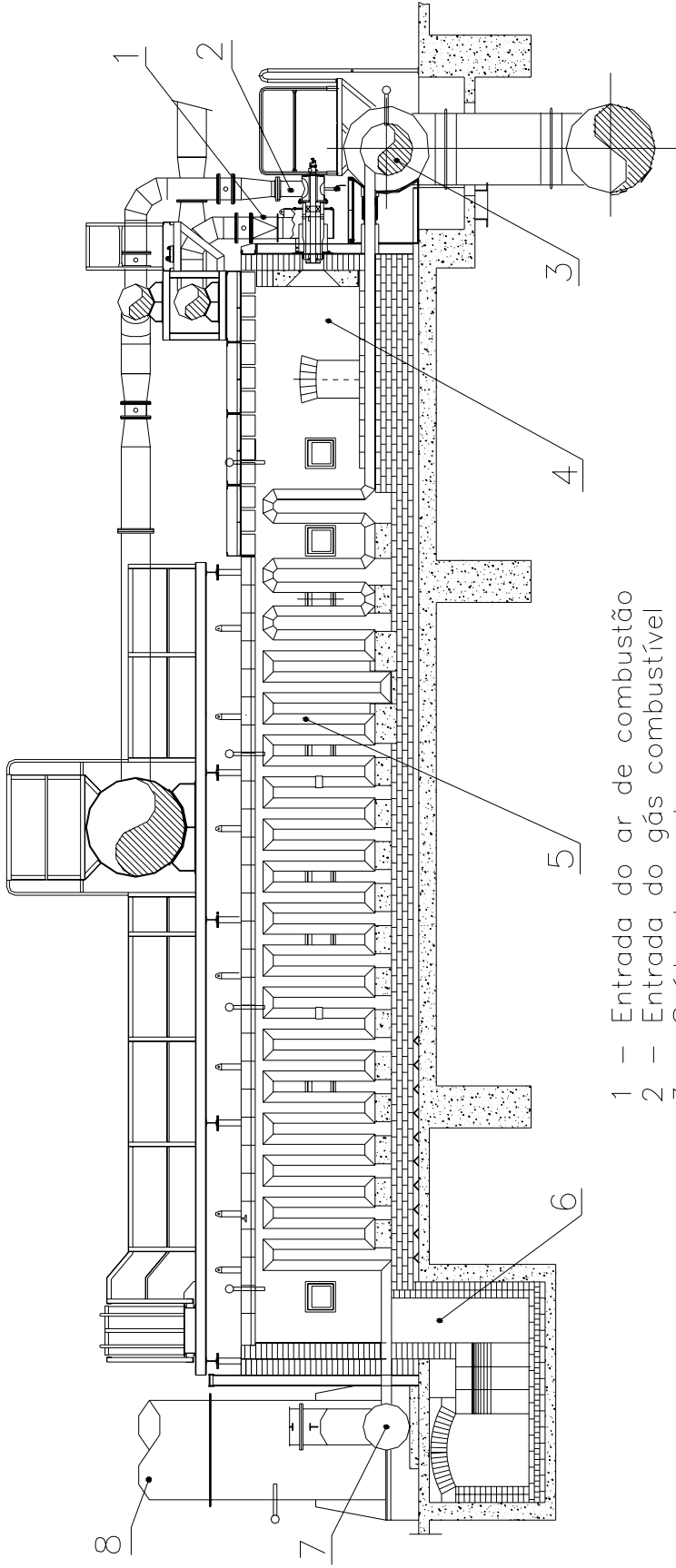


Figura 2 Estratificação dos custos de produção de ferro gusa. Valores médios para o período entre janeiro e abril de 2006.⁽²⁾

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.

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. Além dos aspectos operacionais, um outro problema é a vida útil das primeiras filas de tubos, próximos à câmara de combustão. Estes tubos são intensamente solicitados termicamente, devido às altas temperaturas da região onde se encontram, sofrendo deformações plásticas e aumentando os custos de manutenção, conforme Figura 4.



- 1 — Entrada do ar de combustão
- 2 — Entrada do gás combustível
- 3 — Saída do ar de sopra
- 4 — Câmara de combustão
- 5 — Serpentinhas
- 6 — Câmara de escape dos gases da combustão
- 7 — Entrada de ar de sopra
- 8 — Chaminé

Figura 3 Corte transversal de um Glendon



Figura 4 Trecho da serpentina danificada devido à cargas térmicas

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, aumentando a vida útil das serpentinas. 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.

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/cm²
- Vazão do ar no interior das serpentinas: 9969,3 m³/h
- Temperatura do ar nos queimadores: 1033°C
- Pressão do ar nos queimadores: 1 kgf/cm²
- Emissividades: 0,8 (aço) e 1 (refratários)
- Vazão do ar nos queimadores: 10063 m³/h
- Coeficiente de absorção do ar (dependência linear da temperatura, em 1/m): 0 a 95°C e 0,2 a 1100°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 5. 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.

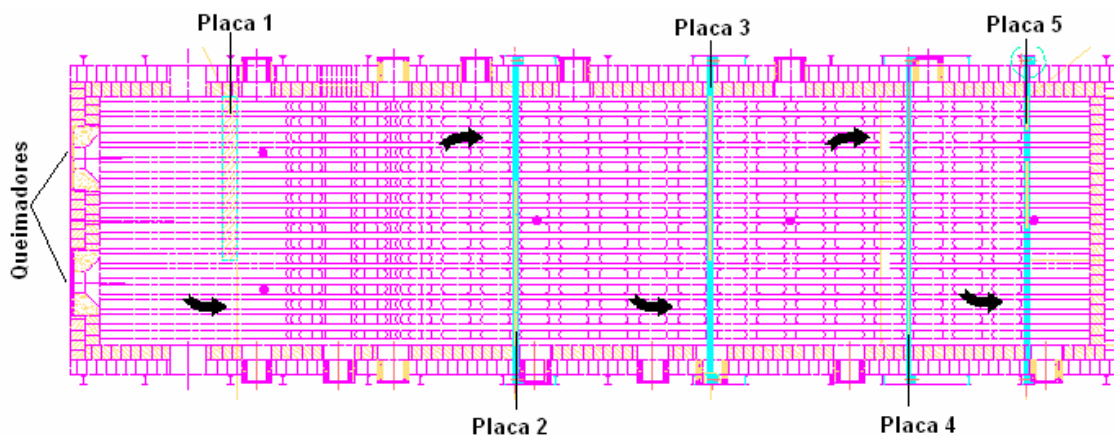


Figura 5 Esquema das cinco barreiras trabalhando como chicanas

RESULTADOS

O modelo do comportamento termodinâmico do Glendon não foi totalmente validado. Na situação real a temperatura do ar de sopro 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 exigüidade 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.

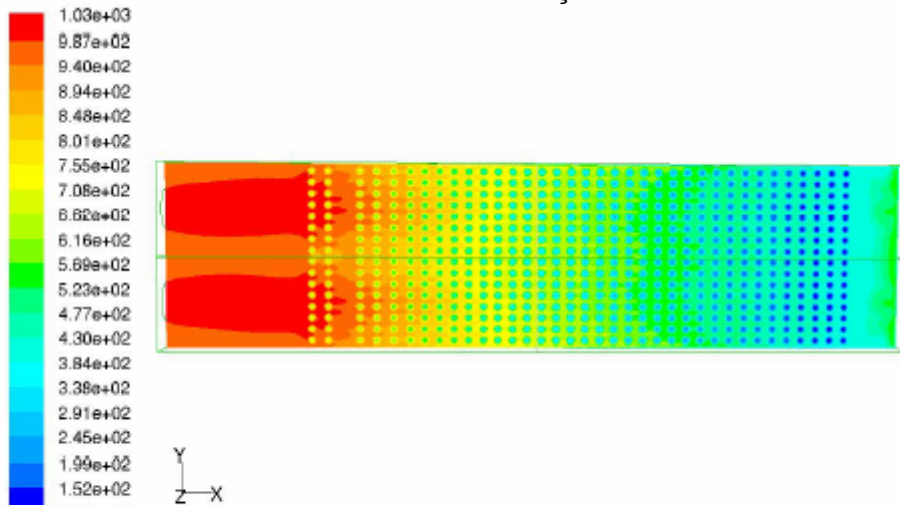
O aumento na eficiência energética é evidenciado no aumento da temperatura de saída do ar nas serpentinas, conforme Tabela 2.

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

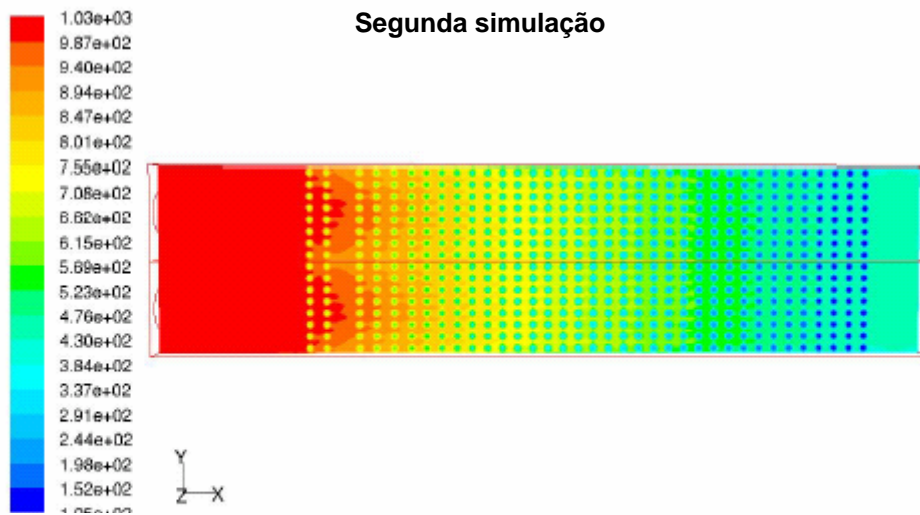
Posição	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Saída do ar nas serpentinas (°C)	693	710	808
Saída dos gases da combustão (°C)	381	378	317

As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a evolução do perfil de temperatura ao longo do Glendon e em uma seção transversal, nas 3 etapas de simulação.

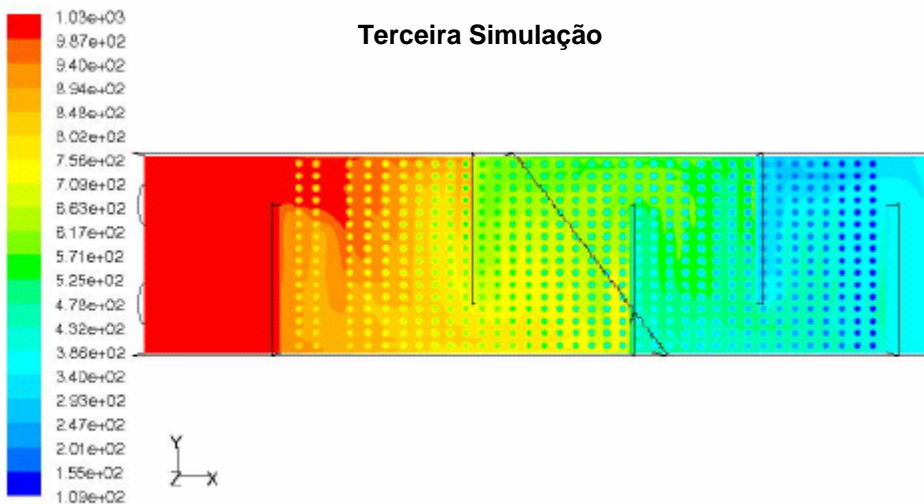
Primeira simulação



Segunda simulação



Terceira Simulação



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

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

Figura 6 Evolução do perfil de temperatura ao longo do Glendon – Vista de planta

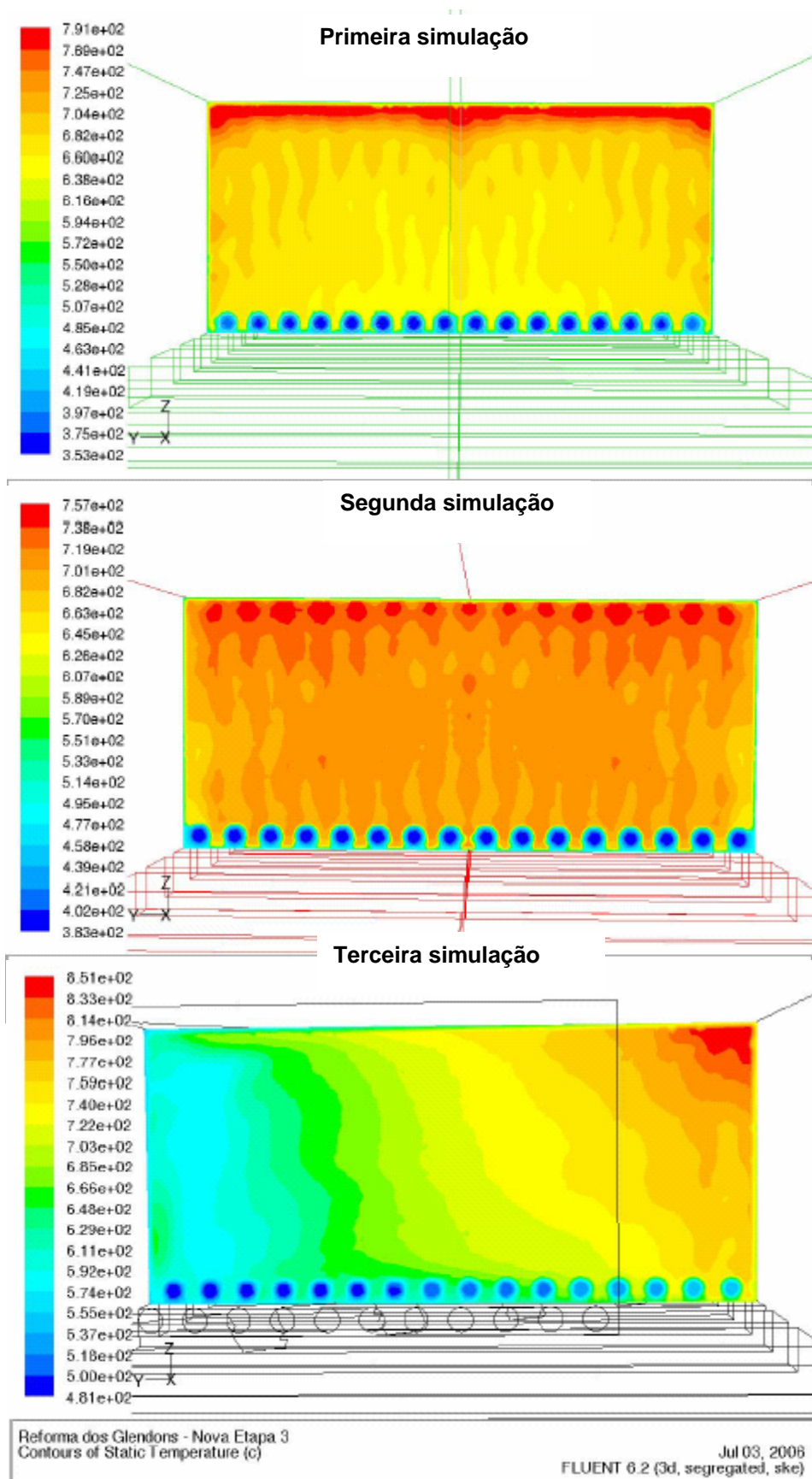


Figura 7 Evolução do perfil de temperatura em uma seção transversal do Glendon – Corte transversal

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 6. 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 7. 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.

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.

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, houve um aumento de 115°C na saída do ar das serpentinas, mantendo-se as mesmas condições de entrada. Este aumento supera as necessidades operacionais, o que permite que a temperatura de trabalho na câmara de combustão seja da ordem de 970°C (atualmente esta temperatura é da ordem de 1050°C), diminuindo a carga térmica à qual as serpentinas próximas aos queimadores estão sujeitas e aumentando sua vida útil.

Agradecimentos

Às equipes de manutenção e operação da área siderúrgica da V&M do Brasil S. A, pelo apoio na coleta de dados; ao Professor Geraldo Augusto Campolina França pela orientação no trabalho; e à equipe da ESSS pelo empenho na simulação do modelo.

REFERÊNCIAS

- 1 CASTRO, L. F. A. Melhorias operacionais em Altos-Fornos com Stave-Cooler. Belo Horizonte: Vallourec&Mannesmann do Brasil, 2005
- 2 RELATÓRIO DE CUSTOS DA CONTROLADORIA DA SUPERINTENDÊNCIA SIDERÚRGICA DA V&M DO BRASIL. Belo Horizonte, 2006.