

APLICAÇÕES DA MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA¹

Joana Bretz de Souza²
Naminda Harisinghe Kandamby³
Frederick Charles Lockwood⁴

Resumo

O artigo resume as bases matemática e física do CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e descreve sua aplicação em três equipamentos da indústria siderúrgica: um forno de reaquecimento, um alto-forno e um forno de grelha. A análise fluidodinâmica do forno de reaquecimento via CFD indicou modificações geométricas de baixo custo efetivas para minimização da entrada de ar falso, resultando no aquecimento mais uniforme dos tarugos de aço e na redução do consumo de energia. A região de combustão de um alto-forno foi modelada para análise de parâmetros operacionais conduzindo a maximização de PCI (*Pulverized Coal Injection*) nas ventaneiras. A simulação do forno de grelha mostrou o potencial da adição de uma câmara de pré-combustão e de um novo queimador para significativa redução das emissões de NOx.

Palavras-chave: Mecânica dos fluidos computacional; Alto-forno; Forno de reaquecimento; Forno de grelha.

THE APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS IN THE IRON AND STEEL INDUSTRY

Abstract

The paper summarizes the mathematical and physical basis of the CFD (Computational Fluid Dynamics) technology and describes its application to three equipment items in the iron and steel making industry: a reheat furnace, a blast furnace and a process travelling grate furnace. CFD analysis of reheating furnace aerodynamics identified cost effective geometric modifications which successfully minimized the ingress of cold air resulting in more uniform billet heating and a reduction in energy consumption. The MI CFD is applied to assist the PCI design analyzing the effect of injection velocity and other parameters on the combustion of pulverized coal within the raceway region of a blast furnace. The travelling grate furnace simulation showed that the addition of a pre-combustor and a new burner design had the potential to significantly reduce NOx emission.

Key words: CFD; blast furnace; steel reheat; travelling grate furnace.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Gerente de Projetos, Cinar América Latina, Cinar Ltd., Londres, Inglaterra.

³ Diretor Técnico, Cinar Ltd., Londres, Inglaterra.

⁴ Diretor Técnico Sênior, Cinar Ltd., Londres, Inglaterra.

1 INTRODUÇÃO

A sigla CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics, refere-se à mecânica de fluidos computacional. A tecnologia CFD, em sua essência, consiste na solução computacional por métodos numéricos das equações diferenciais, conhecidas cientificamente como equações de Navier-Stokes, que regem a mecânica de fluidos. Em função dos processos investigados, o equacionamento e modelagem dos fenômenos de transferência de calor e combustão são incorporados as simulações tornando o CFD aplicável aos equipamentos industriais. Para aplicações envolvendo processamento mineral como ocorre nas indústrias de mineração, cimento, cerâmica e metalurgia, modelagem adicional é novamente empregada sob o título *Mineral-Interactive Computational Fluid Dynamics* (MI-CFD), desenvolvido pela Cinar Ltd, UK.

Antes do advento do CFD, além de anos de experiência prática, o projetista de equipamentos de combustão não tinha muitas ferramentas ao seu dispor. Métodos matemáticos para cálculo da transferência de calor por radiação, o modo dominante pelo qual calor é transferido em fornos industriais, consideravam zero – ou melhor, uma – dimensão apenas. As descrições matemáticas disponíveis para mecânica dos fluidos e combustão apresentavam simplificações ainda maiores da realidade. A busca por uma melhor metodologia de projeto tornou freqüente a utilização de miniaturas, em escala laboratorial, nos estudos dos equipamentos industriais. Tais estudos podem resultar em algumas melhorias no projeto, mas apresentam sérias limitações devido à forma como são conduzidos em condições isotérmicas, à temperatura ambiente e em escoamento monofásico. A introdução de partículas, ou de uma fase sólida, e a ocorrência de combustão introduzem no problema uma multiplicidade de escalas que compromete severamente os resultados obtidos com modelo laboratorial e fluxo a frio.⁽¹⁾ O número de Reynolds (adimensional que expressa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas) característico das escalas industriais normalmente assume valores altos, da ordem de milhões, simplesmente devido as dimensões envolvidas. Dado que o modelo laboratorial também seja caracterizado por elevados números de Reynolds, o escoamento no equipamento de laboratório será idêntico ao escoamento no equipamento industrial, pelo menos para a consideração de nenhuma combustão. Satisfazer essa condição usualmente impõe um limite de tamanho mínimo ao modelo laboratorial, que geralmente não é muito restritivo. A maior limitação do modelo físico, comparado a situação real, é a supressão da combustão. Excetuando as complicações óbvias da miniaturização, a questão principal é que uma vez introduzida a combustão, o escoamento e os processos de transferência de calor obedecem a leis de escala diferentes tal que a semelhança entre o modelo físico e o em grande escala, já não pode ser mantida. Por exemplo, enquanto as forças de inércia variam com o quadrado da dimensão característica ou tamanho do combustor, as forças de empuxo conseqüentes da combustão variam com o cubo dessa dimensão típica e a transferência de calor por radiação térmica obedece a uma lei de escala exponencial. Complicações adicionais aparecem na aplicação dessa modelagem às operações de uma fábrica de aço em que o escoamento é multifásico: em quase toda a parte, fases gasosa ou líquida co-existem com partículas sólidas de combustível ou minério de ferro. As trajetórias de partículas sólidas nem sempre coincidem com as da fase gasosa. Um exemplo extremo é o caso dos separadores e ciclones concebidos, naturalmente, para evitar essa coincidência o máximo possível.⁽²⁾ Escoamentos bifásicos envolvem ainda outro

parâmetro de escala, a “*relaxação dinâmica do tempo*” para partículas. Todavia, a ferramenta de modelagem a frio fornece dados relevantes e ainda é utilizada nos dias atuais. A literatura sobre o assunto é bastante extensa, bons exemplos podem ser encontrados nas referências.⁽³⁻⁵⁾ Pela resolução das equações diferenciais que regem os processos físicos e químicos relevantes em escala industrial, as simulações MI-CFD conduzem a resultados mais realistas.

Embora as equações diferenciais da mecânica dos fluidos sejam conhecidas há mais de 100 anos, a implementação de métodos numéricos para sua solução computacional apenas tornou-se representativa com o advento dos computadores digitais de terceira geração em 1970, devido a sua capacidade de processamento e armazenamento.⁽⁶⁾ As primeiras aplicações se deram na indústria aeroespacial, onde os benefícios foram progressivamente demonstrados e recebendo devido destaque. Conseqüentemente, sua utilização vem se estendendo continuamente no setor de indústrias de base como demonstrado pelos exemplos da indústria siderúrgica que compõem este trabalho.

2 METODOLOGIA

2.1 Mecânica dos Fluidos Computacional

A vantagem do CFD sobre modelagem experimental isotérmica convencional, especialmente em circunstâncias de maior complexidade como as de uma fábrica de aço, é que todos os processos pertinentes podem ser simulados. Estes processos incluem escoamento multifásico, transferências de calor por convecção e radiação, combustão e emissões de poluentes considerando toda sua escala.

Para fazer uso eficiente da modelagem CFD e tirar proveito dos avanços que a ferramenta proporciona o usuário deve compreender plenamente seus fundamentos teóricos. Aqui, resumidamente será descrita uma abordagem na qual as equações de transporte de massa, energia e quantidade de movimento são resolvidas pelo método de volumes finitos.

Geralmente, o processo se inicia com a criação da malha computacional ou discretização da geometria referente ao equipamento estudado. A malha é composta de um grande número de células ou pequenos volumes. As equações de conservação são reformuladas como expressões algébricas no modelo computacional, o qual permite relacionar as condições de cada célula com as células vizinhas. Essas equações algébricas são resolvidas para cada célula do chamado domínio de cálculo, ou seja, para toda a extensão do equipamento. Quanto menores as subdivisões da malha, maior o número de células e mais acurada é a solução correspondente. Em teoria, o conceito de cálculo diferencial requer que o número de células seja infinito para que seu tamanho seja infinitesimal. Na prática, em problemas de engenharia a solução é obtida para centenas de milhares ou milhões de células de forma que um computador de alto desempenho possa ser empregado. A discretização eficiente do domínio de cálculo requer a inserção de um maior número de células onde os gradientes das variáveis como velocidade e temperatura são mais intensos, sendo uma técnica que depende da experiência do usuário.

O procedimento de solução é iterativo, partindo de valores iniciais e de contorno, progredindo no sentido de uma “solução convergida” para a qual a diferença no valor das variáveis de uma iteração para outra é insignificante. Dada a complexidade dos problemas reais de engenharia, a convergência nem sempre é garantida podendo os valores das variáveis oscilarem indefinidamente durante o

processo iterativo. Quando isso ocorre o usuário precisa interferir nos parâmetros do programa, como o fator de relaxação, para facilitar a convergência. Para problemas complexos, típicos das aplicações industriais, mais de uma semana de cálculos pode ser necessária para obter convergência.⁽⁷⁾

A discretização do domínio de cálculo, reformulação e solução das equações são os aspectos numéricos do CFD. Há ainda outros aspectos na modelagem matemática dos fenômenos físicos e químicos envolvidos. A transferência de calor e o escoamento de fluidos foram mencionados anteriormente, mas em equipamentos de uma fábrica de aço há muito mais a modelar: as reações de combustão de uma ampla variedade de combustíveis, as emissões químicas, as interações entre partículas sólidas e fases gasosas e líquidas, a contribuição da radiação, entre outras. Informações e modelos completos para todos esses processos nem sempre se encontram disponíveis e premissas realistas precisam ser assumidas. Mais uma vez, experiência e conhecimento são necessários para que resultados úteis possam ser obtidos com CFD.

A modelagem de um fenômeno físico específico, a turbulência, requer atenção particular. Praticamente quase todos os escoamentos em escala industrial são turbulentos, simplesmente porque o tamanho dos equipamentos implica em sua operação à grandes números de Reynolds. Outra característica da turbulência é a multiplicidade de escalas: a pluma de uma chaminé é um exemplo em que a turbulência é percebida a olho nu pelas ondulações e grandes flutuações exibidas, mas, há ainda toda uma gama de escalas que não são visíveis.⁽⁸⁾ Se uma sonda suficientemente sensível fosse convenientemente inserida em uma pluma, o caráter turbulento do escoamento ficaria imediatamente evidente. Seriam captadas em alguns pontos do escoamento variações da ordem de frações de milímetros. Para calcular todas essas escalas um número totalmente inviável de células seria necessário. Além disso, a dependência dessas flutuações com o tempo exige uma solução matemática dependente do tempo ou transiente. Uma vez que as escalas das menores flutuações são da ordem de 10^{-4} segundos, a solução precisaria avançar a passos de tempo impraticáveis. Conseqüentemente, a solução de problemas de engenharia depende de um modelo de turbulência. Tais modelos permitem obter informações dos efeitos da turbulência no escoamento na forma de um comportamento médio ou detalhado. Existem vários modelos de turbulência disponíveis, cabendo ao usuário balancear precisão e nível de detalhe requerido na solução com o custo computacional envolvido.

O CFD pode ser uma ferramenta de projeto e análise muito poderosa para aplicações industriais. Mas, enquanto uma tecnologia sofisticada sua utilização requer um profissional experiente e código próprio ou a contratação de uma empresa igualmente especializada em CFD e processos industriais.⁽⁹⁾

2.2 Modelo Cinar: MI-CFD

Resumidamente, o MI-CFD da Cinar é formulado para escoamentos permanentes, incompressíveis e a altos números de Reynolds. Antes da solução numérica das equações de transporte de massa, energia e quantidade de movimento, o domínio de cálculo é discretizado em uma malha não ortogonal onde cada volume de controle possui um sistema local de coordenadas que, por sua vez, se relaciona a um sistema global de coordenadas.

Na maioria dos casos são utilizados modelos de turbulência a duas equações do tipo $k-\epsilon$ nos quais a influência da turbulência no escoamento é relacionada à

energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação através da solução de equações de transporte. Modelos mais complexos estão disponíveis, mas apenas são empregados em aplicações muito específicas nas quais realmente se fazem necessários.

A abordagem escalar conservativa é usada no modelo de combustão, no qual as reações químicas entre as espécies elementares oriundas dos fluxos de entrada dependem da mistura entre as diferentes correntes.⁽¹⁰⁾ O estado termo-químico do escoamento é então relacionado a uma “fração de mistura”, um parâmetro escalar conservativo, na forma de relações de estado: equações de estado químico do modelo de combustão, equações de estado para entalpia e equação do gás ideal. As relações de estado químico são estimadas assumindo uma reação rápida e binária de única etapa para o desaparecimento do elemento combustível, o que resulta em um conjunto de funções lineares no espaço de fração de mistura. Ao acomodar várias frações de mistura, o programa da Cinar consegue processar a combustão de várias entradas e tipo de combustível, simultaneamente.

Para contabilizar a transferência de calor por radiação no domínio de cálculo, equações adicionais para os campos de entalpia e radiação são resolvidas. A radiação térmica é determinada pelo processo de “transferência discreta”, o qual é numericamente exato. Vários modelos de combustão e suas respectivas constantes de liberação de voláteis para diversos tipos de combustível estão disponíveis no banco de dados. Fatores de forma são empregados para caracterizar combustíveis de forma irregular.

3 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO MI-CFD NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

A seguir alguns exemplos ilustram a aplicabilidade do MI-CFD da Cinar ao processo de fabricação de aço. Os exemplos foram ligeiramente modificados para omissão de informações consideradas confidenciais por nossos clientes.

3.1 Forno de Reaquecimento

3.1.1 Objetivos

Desenvolvimento de um modelo MI-CFD para um forno de reaquecimento visando a identificação da principal interferência que limita seu desempenho e buscando possíveis modificações geométricas que permitam redução do consumo de energia térmica e maior uniformidade de aquecimento dos tarugos de aço.

3.1.2 Escopo

No forno de reaquecimento modelado, os tarugos introduzidos pelo lado direito são transportados na horizontal para esquerda pelo movimento do fundo móvel até fundo inclinado que os conduz ao chute de saída. A geometria simulada consiste na seção transversal de um dos vários queimadores localizados na parede vertical esquerda, como mostrado na Figura 1(a).

3.1.3 Resultados

O escoamento oriundo de queimadores ocorre essencialmente na forma de jatos provocando zonas de recirculação em suas proximidades. Tal recirculação de gases gera uma região de pressão negativa ao redor dos queimadores do forno de reaquecimento ocasionando a sucção de gases de suas vizinhanças. Dada a proximidade entre os queimadores e a saída dos tarugos é fundamental a vedação

eficiente do chute de saída para que a recirculação dos gases quentes do interior do forno de reaquecimento ocorra preferencialmente, evitando a sucção de ar externo.

Uma evidência clara do ingresso de ar frio pode ser observada na Figura 1(b) pela cor azul que se estende do chute de saída por todo o fundo inclinado até as proximidades do queimador. Nessa figura a temperatura aumenta da temperatura ambiente, indicada pela cor azul, a temperaturas superiores a 1.000°C, representadas pela cor vermelha.

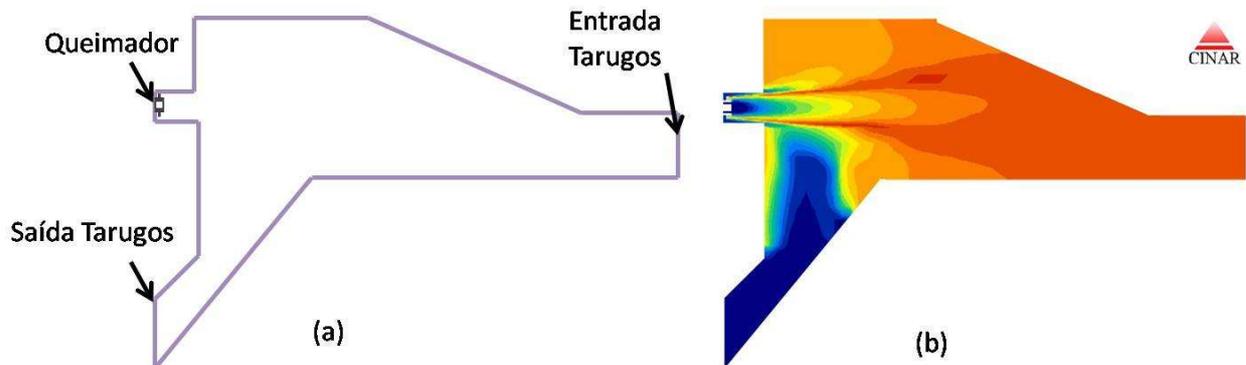


Figura 1. Forno de Reaquecimento: (a) desenho esquemático da geometria; (b) Temperatura no plano vertical que passa pelo centro do queimador.

A eficiência do forno de reaquecimento estava comprometida pela excessiva entrada de ar-falso pelo chute de saída dos tarugos que afeta a uniformidade da temperatura do tarugo, de vital importância no processo de laminação subsequente.

Embora bastante simples, a solução para o problema não foi implementada antes da análise com MI-CFD porque sua causa não havia sido identificada. Uma vez que a restrição da área do chute de saída foi introduzida, o ingresso de ar frio foi satisfatoriamente minimizado. A eficiência térmica do forno de reaquecimento foi otimizada resultando em um aquecimento mais uniforme dos tarugos e na redução do consumo de energia térmica.

3.2 Alto-forno

3.2.1 Objetivos

A injeção de carvão pulverizado em ventaneiras é prática comumente aplicada em altos-fornos modernos devido à crescente escassez de coque, com conseqüente aumento nos preços. O MI-CFD é aplicado no projeto de um sistema de PCI (do inglês, *Pulverized Coal Injection*) para analisar os efeitos da velocidade de injeção, entre outros parâmetros, na combustão do carvão pulverizado dentro da região de *raceway* ou zona de combustão. O foco está em favorecer a combustão do carvão no interior da região de *raceway*, ou em sua proximidade, minimizando assim problemas por bloqueios de fluxo de gás.

3.2.2 Escopo

Como mostra o desenho esquemático da Figura 2, apenas uma das 20 ventaneiras de um alto-forno é modelada como uma seção transversal simétrica nesse exemplo. Os seguintes fenômenos foram modelados: o escoamento do gás no queimador e na zona de combustão; o leito empacotado composto por coque e minério de ferro; combustão e transferência de calor; e as interações entre o escoamento de gás e partículas e o leito empacotado.

Foram desenvolvidos especialmente para essa aplicação um modelo de turbulência (k-lm) e um método para modelagem de combustão em leito empacotado, aplicando uma abordagem Euler-Euler para o gás e o leito empacotado e uma abordagem Lagrangeana para PCI.

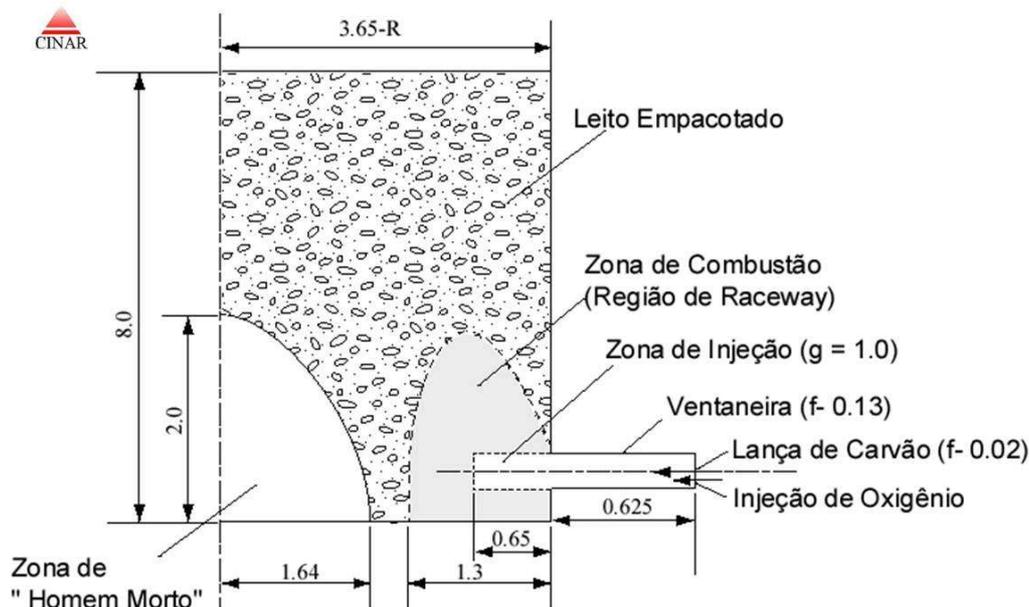


Figura 2. Desenho esquemático da geometria do alto-forno.

3.2.3 Resultados

Os resultados da simulação para os efeitos médios ou tendências das alterações em cada parâmetro poderiam ser intuitivamente antecipados. No entanto, para que os resultados de simulação possam ser convertidos em ações efetivas, a magnitude relativa da influência de cada parâmetro precisa ser corretamente avaliada, incluindo a influência das propriedades do carvão. Em função da complexidade dos processos modelados e para garantir sua confiabilidade, cada resultado foi validado com dados de laboratório disponíveis como, por exemplo, medidas da dispersão de micro pérolas de vidro em um jato.

Com o modelo desenvolvido e validado, um caso de referência foi simulado e comparado a situações envolvendo a variação de diversos parâmetros como a velocidade de injeção por exemplo.

Aumentos consideráveis da eficiência de combustão das partículas de carvão foram observados com: enriquecimento do ar secundário com oxigênio, aumento do diâmetro externo da lança de injeção e aumento da zona de combustão via aumento da velocidade de injeção, como indicado na Figura 3.

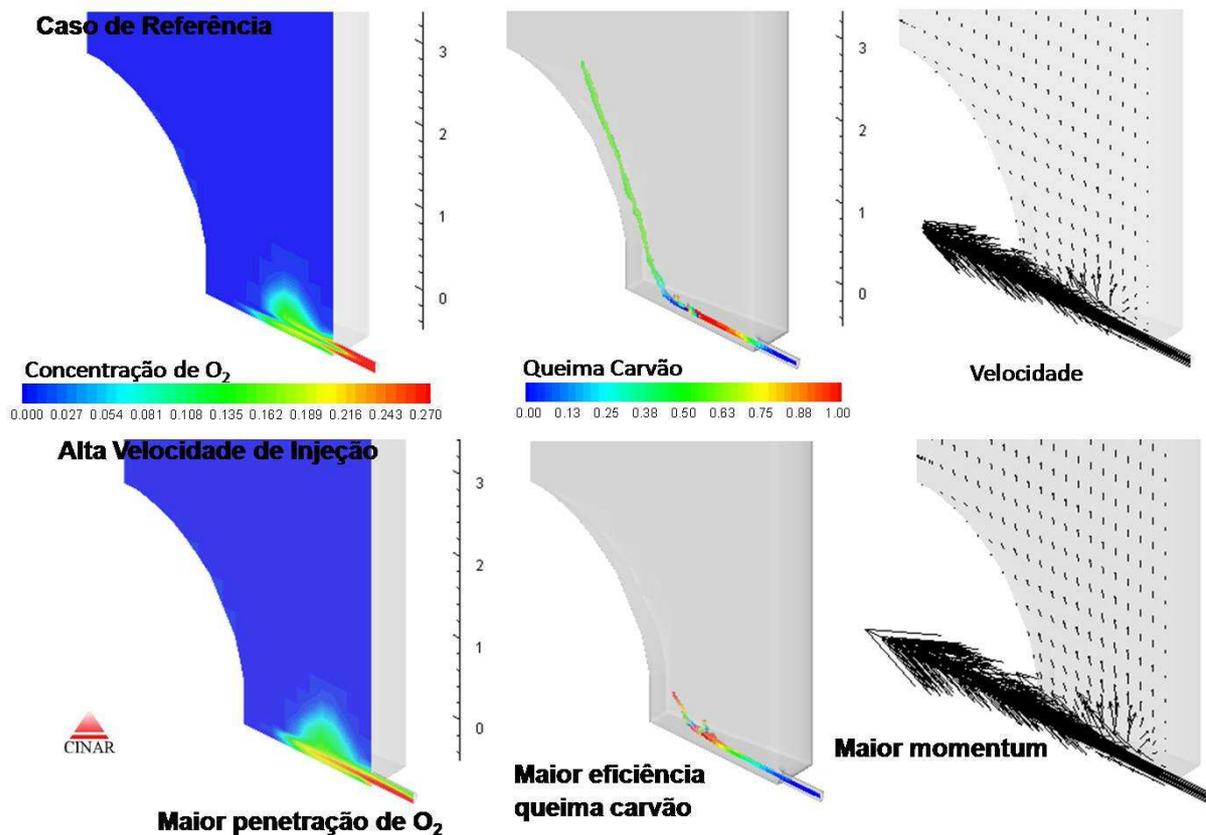


Figura 3. Resultados de simulação do alto-forno.

As partículas de carvão estão sujeitas as flutuações do escoamento turbulento dos gases, de tal forma que foi necessário modelar a dispersão dessas partículas pela turbulência com a utilização de um modelo estocástico. No entanto, as altas velocidades de injeção de partículas incorrem em alta dispersão inicial das partículas nos gases circundantes, que resulta em maiores taxas de combustão na região de *raceway* do que um forno convencional.

3.3 Forno de Gelha

3.3.1 Objetivos

Um forno de grelha utilizado na produção de pelotas de minério de ferro foi modelado com os propósitos de: 1) avaliar o comportamento da combustão identificando a estratégia adequada para redução das emissões de NO_x ; 2) auxiliar no projeto de um novo queimador que permita a expansão da capacidade de produção da planta.

3.3.2 Escopo

Utilizando a condição de simetria, a geometria modelada nesse exemplo corresponde a metade da seção transversal de 1 dos 10 estágios axiais que compõem o sistema de combustão do forno de grelha. A geometria e malha computacional empregadas são mostradas na Figura 4. Óleo do tipo HFO (Heavy-fuel-oil) é utilizado para fornecer o calor necessário para produção de pelotas no forno de grelhas, sendo queimado a altas temperaturas na presença de uma grande quantidade de ar de recuperação recirculado no sistema. Embora o excesso de ar e altos níveis de pré-aquecimento sejam desejáveis no processo formação das

pelotas, essas condições são inadequadas para manutenção de baixos níveis de emissões de NOx. Uma série de simulações foi realizada visando a redução das emissões de NOx, e algumas soluções envolvendo a utilização de uma câmara de pré-combustão e um novo queimador são apresentadas nesse exemplo. Tais modificações implicam em investimentos consideráveis que precisaram ser justificados por uma avaliação prévia dos benefícios via CFD.

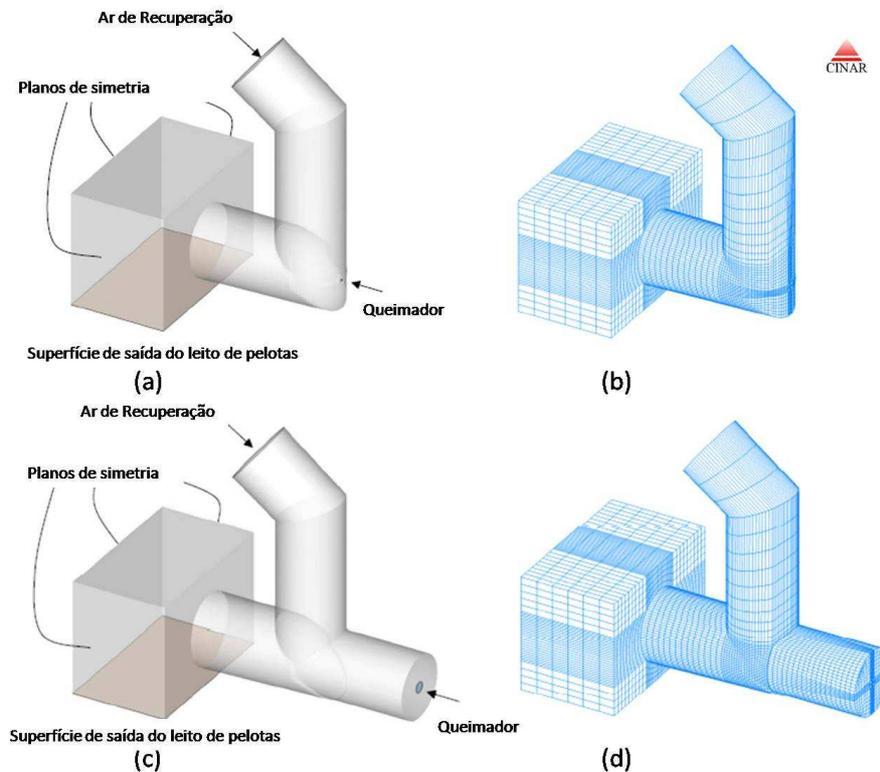


Figura 4. Forno de grelha: (a) geometria existente (c) geometria existente com câmara de pré-combustão proposta; (b) e (d) malha computacional com e sem câmara de pré-combustão.

3.3.3 Resultados

O mecanismo do NOx térmico foi identificado como a rota principal de formação de NOx no forno de grelhas. Assim sendo, a estratégia adotada para redução das emissões de NOx foi reduzir a temperatura da chama de HFO e, ao mesmo tempo, expor a chama a níveis moderados de ar de excesso. Os resultados de simulação revelam que isso pode ser obtido com a instalação de uma câmara de pré-combustão devidamente projetada (Tabela 1).

Tabela 1. Emissões de NOx para forno de grelhas nas condições operacionais existentes e nas condições do sistema otimizado pela adição de câmara de pré-combustão e novo queimador

Casos	Medidas na Fábrica	Geometria Existente	Pré-Combustão	Pré-Combustão e novo queimador
NO [ppmv]	257	274	90	50
O ₂ [% vol./vol]	16.5%	16.7%	16.7%	16.4%

Embora a utilização do queimador existente na câmara de combustão não garanta níveis moderados de temperatura em toda a extensão da chama, os resultados indicam que substancial redução das emissões é obtida simplesmente pela adição da câmara de pré-combustão. A Figura 5 mostra que empregando um queimador devidamente projetado para a nova configuração é possível manter a chama inteiramente confinada a câmara de pré-combustão reduzindo ainda mais as emissões de NO_x oriundas do forno de grelha.

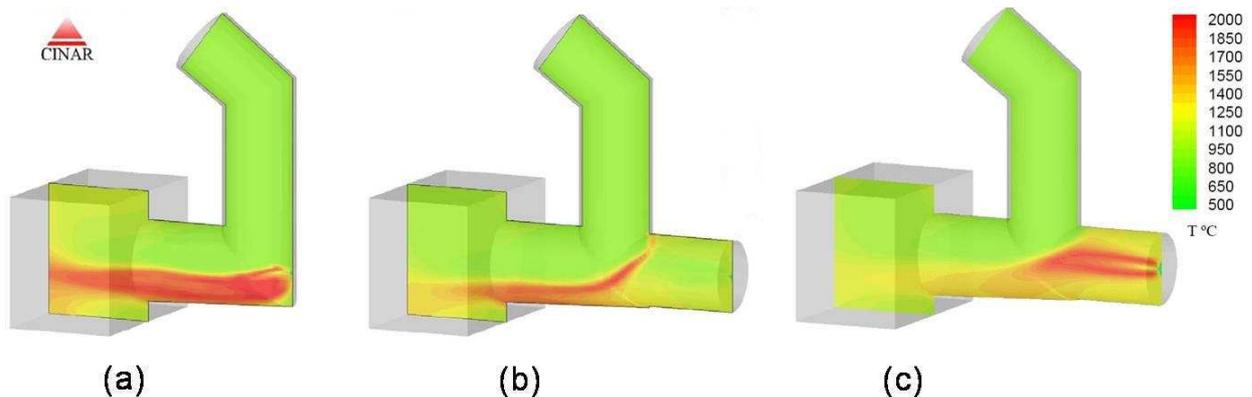


Figura 5. Perfil de Temperatura no Forno de grelha: (a) geometria existente (b) geometria existente com câmara de pré-combustão proposta e queimador existente; (c) geometria existente com câmara de pré-combustão proposta e novo queimador.

4 CONCLUSÕES

A modelagem matemática via CFD, evoluiu bastante desde sua primeira utilização 30 anos atrás, configurando se atualmente como ferramenta efetiva para processos industriais complexos como o de produção de aço. A tecnologia permite a simulação da fluidodinâmica da combustão, formação e redução de emissões, assim como a análise das melhores condições de injeção no caso de mudanças na matriz de combustível. A simulação numérica permite a visualização dos detalhes do processo e sua otimização sem custos e riscos excessivos. Os exemplos apresentados demonstram que o MI-CFD pode ser aplicado na solução tanto de problemas simples, como o caso do forno de reaquecimento, quanto problemas mais complexos, como nos casos do alto-forno e forno de grelhas. No caso do forno de reaquecimento a análise fluidodinâmica indicou modificações geométricas de baixo custo que minimizaram com sucesso a entrada de ar falso resultando na redução do consumo de energia e aquecimento mais uniforme dos tarugos. A região de combustão de um alto-forno foi modelada para análise de parâmetros operacionais conduzindo a maximização de PCI nas ventaneiras. A simulação de um forno de grelhas comprovou que a redução de emissões de NO_x pode ser alcançada pela adição de uma câmara de pré-combustão, seja mantendo o queimador existente ou empregando um novo queimador com projeto apropriado. Em suma, a modelagem MI-CFD quando aplicada a processos industriais fornece resultados efetivos e de fácil implementação que geram retorno financeiro suficiente para cobrir os custos associados. Como qualquer outra tecnologia sofisticada, no entanto, sua utilização requer conhecimento específico. Portanto, os produtores de aço interessados devem selecionar e contratar especialistas ou investir suficientemente na formação de um profissional ou equipe.

REFERÊNCIAS

- 1 ABBAS, T., AKHTAR, S. LOCKWOOD, F. Plant Performance Improvement through Mathematical Modelling. *ZKG International*, No 12, Vol 59, pp 49, 2006.
- 2 MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 2ª ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2002. 152 p.
- 3 SMART J.P., MULLINGER, P.J., JENKINS, B. A Perfect Model? : The correct modelling of the combustion process in rotary kilns can help lower costs, increase profits, and reduce the environment impact. *Cement Americas*, pp. 14, Jan. 1998.
- 4 MARKATOS, N.C. Mathematical Modelling of Single and Two-Phase Flow Problems in the Process Industries. *Revue de L'Institut Francais du Petrole* 48 (1993), 631.
- 5 AVGEROPOULOS, T, GLEKAS, J.P., PAPADOPOULOS, C. Numerical Simulation of the Combustion Aerodynamics inside a Rotary Cement Kiln. in: *Pilavachi (Ed.), "Energy Efficiency in Process Technology,"* Elsevier, London, 1993, p. 767.
- 6 FONSECA, C.F. *História da Computação – O caminho do pensamento e da tecnologia*. EDIPUCRS, 2007. p.204
- 7 PERIC, M., FERZIGER, J.H. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd Edition. London: Springer, 2002. p.423
- 8 SILVEIRA NETO, A. *Turbulência nos Fluidos Aplicada*. Uberlândia, 2006. (Apostila).
- 9 HILL, S. Optimised Combustion: A cost effective path to improved profits. *The Asian Cement Conference "Recovery II"*, Bangkok 2003.
- 10 VERSTEG, H.K. MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. 2nd Edition. London: Prentice Hall, 2007. p.503.