

Aplicação de CFD em precipitadores eletrostáticos para siderurgia e mineração¹

Renata Cristina Favall^{2,3}, Renato Greco⁴, Robson Olívio⁵, Marcelo Ozawa², Jorge Daher⁵

Resumo

Este artigo apresenta os resultados numéricos obtidos para o escoamento dos gases e do material particulado dentro de um Precipitador Eletrostático (PE) empregado no despoeiramento do processo de pelletização de minério de ferro. Após estabelecer o modelo matemático, as equações governantes do problema foram resolvidas pelo programa de CFD Fluent, da ANSYS, Inc. Primeiro, o precipitador originalmente projetado foi simulado. A partir da análise dos resultados obtidos nessa primeira etapa, alterações na área aberta das Placas Distribuidoras de Fluxo (PDFs) foram sugeridas e simuladas para esse equipamento. Os resultados obtidos nos experimentos numéricos indicaram que o fluxo de gases se tornou mais uniforme após as modificações em uma das PDFs. Como o perfil de velocidade se tornou mais uniforme, houve uma melhoria na coleta das partículas, mesmo sem a inclusão dos efeitos de campo elétrico na precipitação do pó. Para validar o modelo, comparou-se a perda de carga de flange a flange obtida experimentalmente com a obtida nos ensaios numéricos.

Palavras-chave: fluido dinâmica computacional, precipitadores eletrostáticos, controle ambiental.

CFD modelling of electrostatic precipitators for siderurgy and mining industry

Abstract

This paper presents numerical results obtained for the gas flow and the trajectories of the particulate material in an ElectroStatic Precipitator (ESP) used in the de-dusting system of the iron pelletizing process. Having established the models, the governing equations for the problem were solved using the CFD code Fluent – ANSYS, Inc. First, the equipment as it was originally projected was simulated. Afterwards, based on these results, the permeability of one of the perforated plate (PDF) was modified and the simulation was carried out for this case. The results of these numerical experiments for the modified plate indicated that the gas flow distribution was homogenised. As a consequence of a more uniform velocity profile, the particulate material precipitation was improved even not taking the effects of the electrical field into account. To validate the model, the pressure drop experimentally measured was compared to the pressure drop calculated numerically.

Key-words: CFD, electrostatic precipitator, environmental control.

¹ 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos – SP, Brasil.

² Enfil S/A – Controle Ambiental

³ IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

⁴ Greco-Enfil Equipamentos Termointerindustriais Ltda

⁵ Enfil – Engenharia e Serviços S/A

1 Introdução

A fluidodinâmica computacional – CFD na sigla em inglês para “Computational Fluid Dynamics” – é um ramo da mecânica dos fluidos que se utiliza de algoritmos e métodos numéricos para resolver e analisar problemas de escoamento de fluidos [1]. CFD é uma poderosa ferramenta amplamente empregada nas engenharias por permitir que se reduza o tempo gasto no desenvolvimento de um projeto, minimizando, dessa forma, seus custos.

As equações de transporte que expressam o princípio de conservação de quantidades (como massa, momento, energia cinética turbulenta, etc.) possuem a mesma forma, facilitando a resolução de problemas nos quais essas equações são acopladas. Denotando Φ como variável dependente (i.e., a variável que se deseja resolver) temos, em coordenadas cartesianas e notação tensorial:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) + S_\Phi. \quad (1)$$

Onde u_i é a componente da velocidade na direção x_i , ρ é a densidade do fluido e t é o tempo. O termo transiente dessa equação, o primeiro do lado esquerdo da equação, responde pelo acúmulo da quantidade Φ no volume de controle. O segundo termo do lado esquerdo é a parte convectiva, que é responsável pelo transporte de Φ que ocorre devido à existência do campo de velocidades. No lado direito, temos o termo de difusão que responde pelo transporte de Φ devido a seus gradientes, com Γ sendo o coeficiente de difusão do fluido. S_Φ é o termo fonte, que se encarrega de qualquer fonte ou sorvedouro que produza ou dissipe Φ ; termos sobressalentes da adaptação da equação diferencial à equação genérica acima apresentada ou ainda termos provenientes da transformação de coordenadas são também considerados termos fontes.

O método dos volumes de controle [2] é o método numérico utilizado para a obtenção das equações algébricas a partir das equações diferenciais que descrevem o problema. Esse método consiste em dividir o domínio de cálculo em volumes de controle, de modo que cada volume cerque um nó da malha computacional. O conjunto de equações diferenciais é, então, integrado sobre cada volume de controle e resolvido numericamente de forma iterativa.

O objetivo deste trabalho foi a modelagem e simulação CFD de um precipitador eletrostático utilizado para captação de material particulado proveniente do processo de pelletização de minério de ferro. Os resultados obtidos para os perfis de velocidades dos gases dentro do equipamento tal como projetado foram analisados, e sugestões para uniformização destes perfis puderam ser feitas a partir desse estudo. As alterações físicas sugeridas para o precipitador também foram simuladas e indicaram uma sensível melhoria na uniformidade destes perfis. O programa utilizado para a resolução das equações governantes para o escoamento dos gases e das partículas dentro do equipamento foi o Fluent, da ANSYS, Inc.

2 Domínio de cálculo e malha computacional para o precipitador eletrostático

O domínio de cálculo utilizado nas simulações do precipitador eletrostático pode ser visto na Figura 1. A entrada de gases é feita pelo duto circular do lado esquerdo da

figura e sua saída é efetuada pelo duto de seção quadrada, no lado direito da figura. Os componentes internos que foram incluídos na modelagem estão indicados nessa figura; PDF é a sigla para Placa Distribuidora de Fluxo. As dimensões totais aproximadas do equipamento são de 32 m de comprimento (eixo x), 21 m de profundidade (eixo y) e 20 m de altura (eixo z).

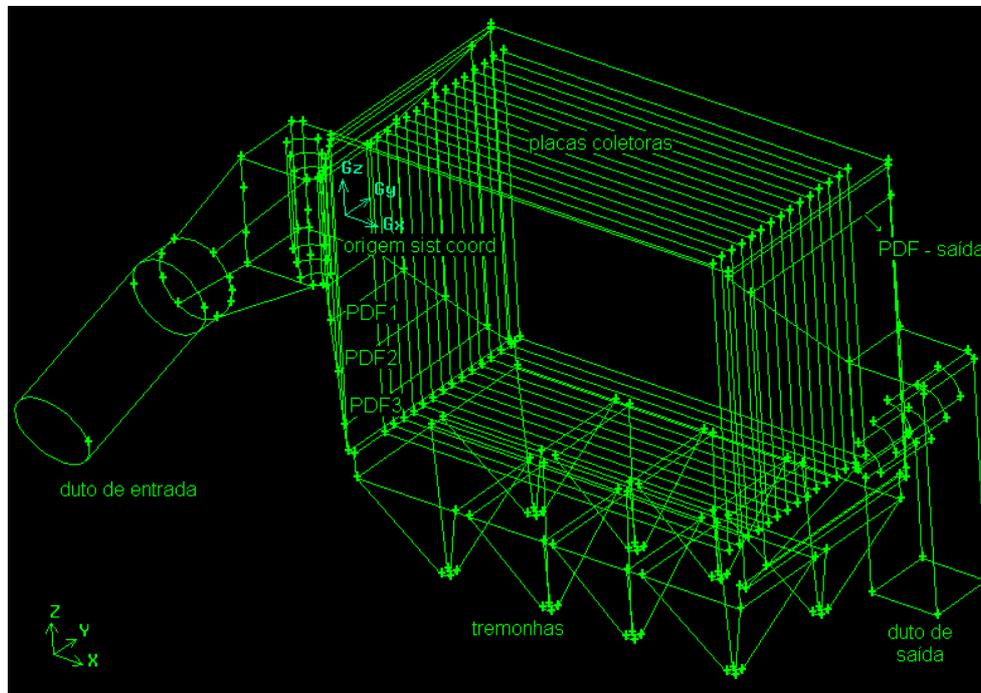


Figura 1: Domínio de cálculo para o precipitador eletrostático.

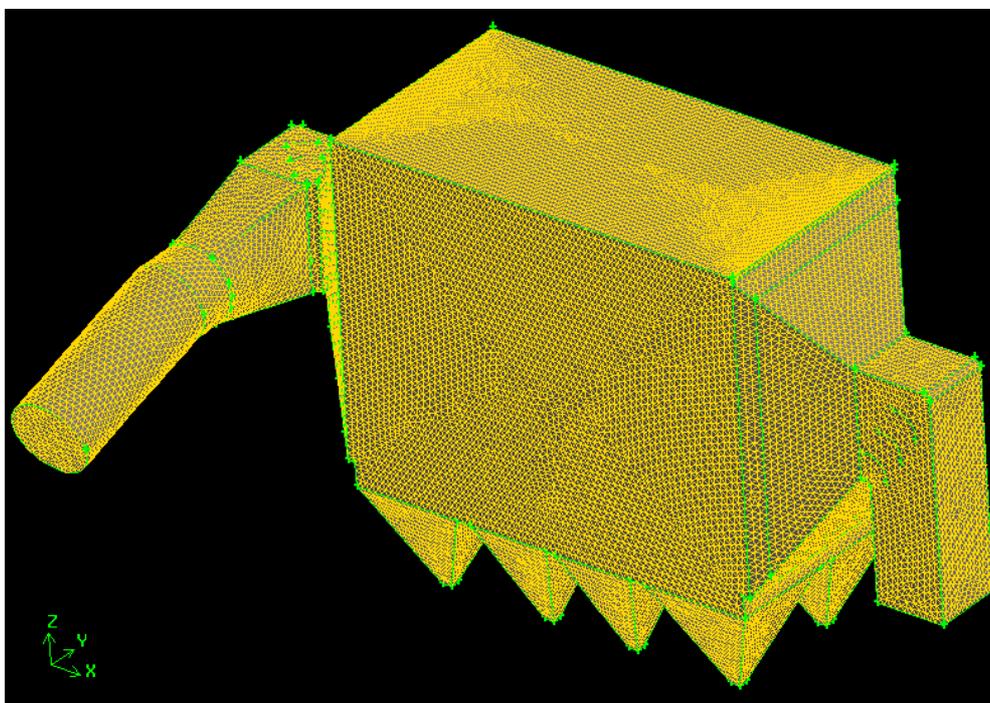


Figura 2: Malha computacional.

Na Figura 2, a malha computacional é apresentada. Essa malha é formada por elementos tetragonais com tamanho médio de 300 mm. Podemos ver claramente os

triângulos na Figura 3. Houve a necessidade de refinar essa malha na região das placas coletoras devido ao espaçamento entre elas ser de 300 mm, tamanho assumido para o elemento discreto. O refinamento da malha também pode ser visto na Figura 3.

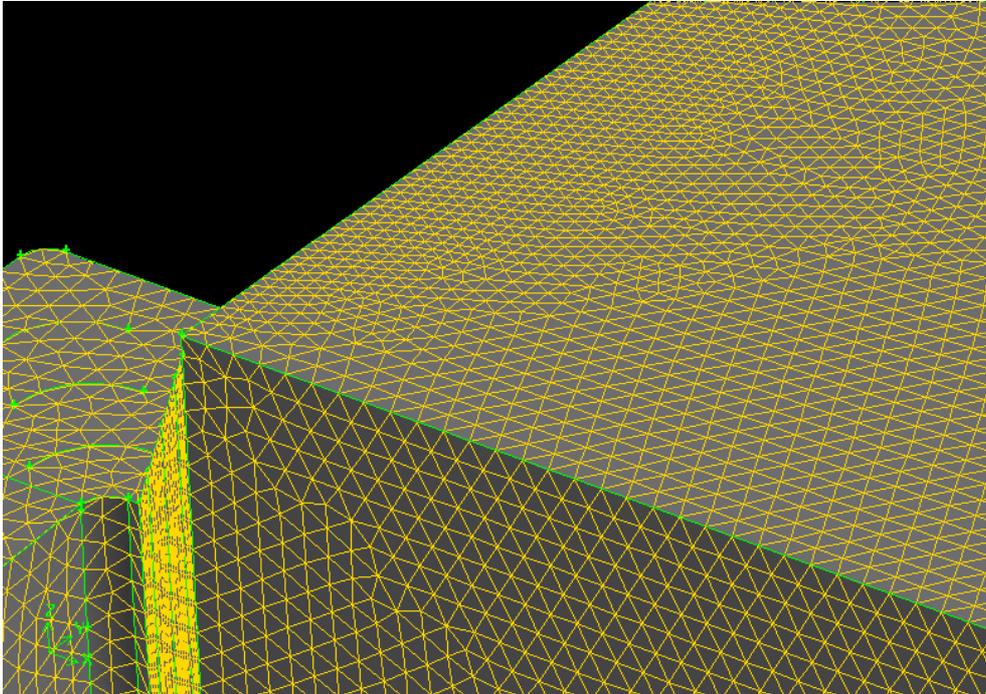


Figura 3: Detalhe da malha computacional.

3 Condições de contorno e de operação do precipitador eletrostático

A vazão de ar quente considerada para o precipitador foi de $468.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Para o diâmetro do duto de entrada, que é de 3,4 m, temos que o número de Reynolds do escoamento é de $3,27 \times 10^6$, o que caracteriza escoamento em regime turbulento. O modelo de turbulência adotado foi o k- ϵ realizável implementado no Fluent v6.3.26 [3] com base no artigo de Shih, Liou, Shabbir, Yang e Zhu [4].

O efeito das Placas Distribuidoras de Fluxo (PDFs) no escoamento do gás dentro do precipitador eletrostático é feito através da inclusão de um termo fonte nas equações de movimento. Este termo fonte é composto de duas partes: um termo de perdas viscosas – Lei de Darcy, e um termo de perdas inerciais. Para escoamento em meio poroso homogêneo [3], como é o caso das PDFs, temos:

$$S_i = -\left(\frac{\mu u_i}{\alpha} + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (2)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, α é a permeabilidade do meio poroso, C_2 é o fator de resistência inercial.

O fator C_2 foi calculado a partir da perda de carga ζ_{Re} [5] para todas as PDFs existentes no precipitador, conforme a equação abaixo:

$$C_2 = \frac{\zeta_{Re}}{l_p} = \left(\zeta_\phi + \bar{\varepsilon}_0^{Re} \zeta_0 + \lambda \frac{l_p}{d_f} \right) \frac{1}{\bar{f}^2} \quad (3)$$

onde ζ_ϕ , ε_0^{Re} e ζ_0 são dados por diagramas e tabelas apresentados em [5]. $\lambda=64/Re$, l_p é a espessura da placa, d_f é o diâmetro do poro, e $\bar{f} = F_0 / F_1$ com F_0 sendo a área livre da placa e F_1 a área total da placa.

As condições de operação e de contorno utilizadas na modelagem são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Dados para o gás.

Vazão	468.000 m ³ /h
Temperatura	110 °C
Densidade	0,9229 kg/m ³
Viscosidade	2,44e-05 kg/(m.s)
Energia cinética turbulenta	0,214m ² /s ²
Dissipação da energia turbulenta	0,4149 m ² /s ³

Tabela 2: Dados para as placas perfuradas.

	Placa 1 (entrada)	Placa 2 (entrada)	Placa 3 (entrada)	Placa 1 (saída)
l_p (m)	0,0047	0,0032	0,0032	0,0019
d_f (m)	0,070	0,070	0,070	0,070
ζ_{Re} (1/m)	1828	2800	2800	4560
F_0 (m ²)	12	23,8	40	39
F_1 (m ²)	29,8	63	108	104

As equações das partículas são resolvidas no esquema de referência lagrangeano. Somente a influência do gás nas partículas foi considerada, i.e., o acoplamento entre as fases dispersa (partículas) e contínua (gás de arraste) é unidirecional (*one-way coupling*). A concentração de particulado considerada na entrada do precipitador foi de 1g/Nm³, considerando um único tamanho de partículas – 50 µm de diâmetro.

4 Resultados e discussão

A Figura 4 apresenta os vetores de velocidade do gás no plano xz, em y=0,3 m. Percebe-se nesta figura que há uma região de quase-estagnação na parte central do precipitador, e que a magnitude da velocidade é maior nas regiões inferior e superior do equipamento (de 3 a 3,5 m/s). Esse comportamento não homogêneo do perfil de velocidades é verificado ao longo de todo o eixo y, podendo implicar numa menor eficiência de coleta do material particulado.

Uma maneira de se homogeneizar o fluxo de gases dentro do precipitador eletrostático seria através da modificação da permeabilidade das PDFs, reduzindo-se a área aberta das placas. As PDFs existentes possuíam furos de 70 mm de diâmetro homogeneamente distribuídos nas placas. A PDF3, placa em que as alterações foram efetuadas, tinha originalmente 36,8% de área aberta. Esta placa, PDF3, foi dividida em três regiões: superior, central e inferior. Os dados utilizados nas simulações para essas três regiões são apresentados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Dados para a PDF3.

	PDF3 – superior	PDF3 – central	PDF3 – inferior
S_{Re} (1/m)	10560	2800	10560
F_0 (m ²)	4,84	18,8	4,84
F_1 (m ²)	24,2	51	24,2
$\bar{f} = F_0 / F_1$	0,2	0,368	0,2

Os resultados simulados para a placa modificada são apresentados abaixo. Nota-se que os perfis de velocidade se tornaram mais homogêneos dentro do precipitador, como mostra a Figura 5. Essa maior uniformidade no perfil de velocidades é verificada ao longo de todo o eixo y. A velocidade em y=0,3 m, Figura 5, é de 1.1 m/s na região central. Essa velocidade é considerada ideal para a operação deste equipamento.

Na Figura 6 são mostradas as trajetórias das partículas antes das alterações na PDF3. O tempo de residência da maioria dessas partículas é de 25 s. Importante lembrar nesse ponto que foge ao escopo deste trabalho a simulação da precipitação das partículas devido ao campo elétrico. Mesmo com essa simplificação do modelo, 55% das partículas terminaram suas trajetórias nas tremonhas.

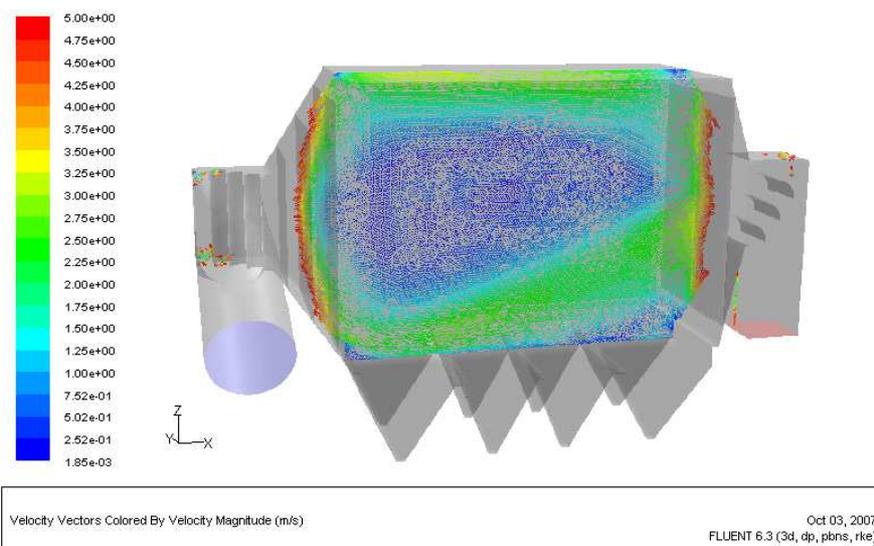


Figura 4: Vetores de velocidade em y= 0,3 m antes das alterações na PDF3.

As trajetórias das partículas depois das alterações na placa são apresentadas na Figura 7. O tempo de residência é de aproximadamente 20 s, e mesmo sem a inclusão dos efeitos de campo elétrico no modelo, mais de 80% das partículas foram naturalmente captadas.

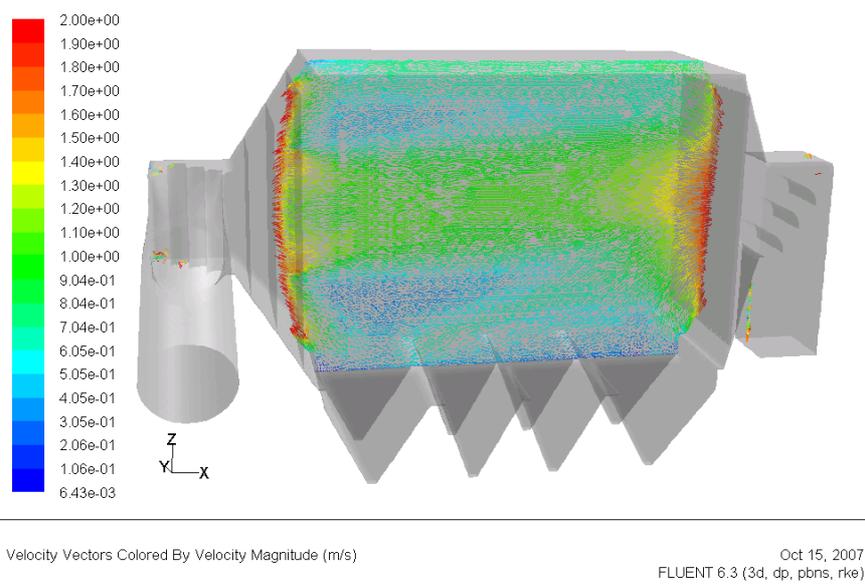


Figura 5: Vetores de velocidade em $y = 0,3$ m depois das alterações na PDF3.

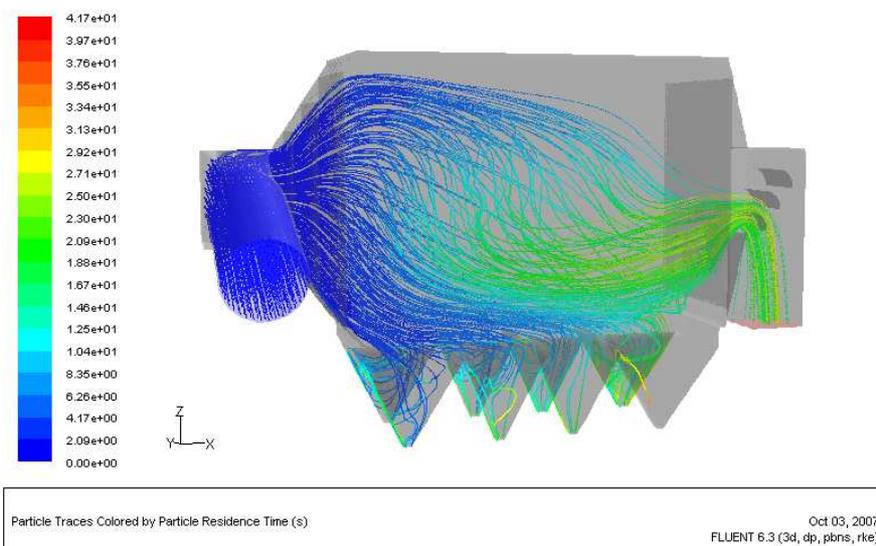


Figura 6: Trajetória das partículas antes das alterações na PDF3.

Os contornos das velocidades nas placas perfuradas são apresentados nas Figuras 8 e 9. A homogeneidade na distribuição dos furos nas placas faz com que, devido à expansão do bocal de entrada, a velocidade no centro seja menor do que nas bordas da placa, pois a pressão nas bordas é menor. Essa não homogeneidade das velocidades vista na placa da Figura 8 é também verificada dentro do precipitador (Figura 4).

Na placa modificada, PDF3, o perfil de velocidades se tornou mais homogêneo, com gradientes de apenas 1,5 m/s, como mostra a Figura 9.

Para validação dos resultados numéricos, comparou-se a queda de pressão do equipamento calculada pelo programa com a obtida experimentalmente. O valor da queda de pressão de flange a flange calculado foi de aproximadamente 22 mmca tanto antes quanto depois das alterações na PDF3. Experimentalmente, esse valor é de aproximadamente 30 mmca. A diferença entre os valores experimental e teórico deve-se provavelmente às hipóteses assumidas no modelo, como, por exemplo, a hipótese de que as PDFs comportam-se como placas porosas. No entanto, o valor

de perda de carga calculada para o precipitador indicou que os modelos adotados para a simulação do equipamento são consistentes.

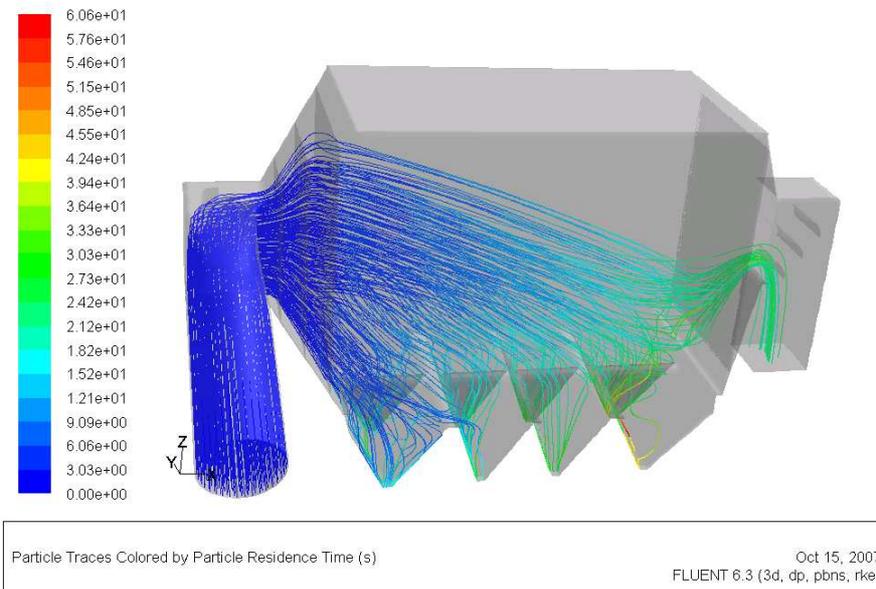


Figura 7: Trajetórias das partículas depois das alterações na PDF3.

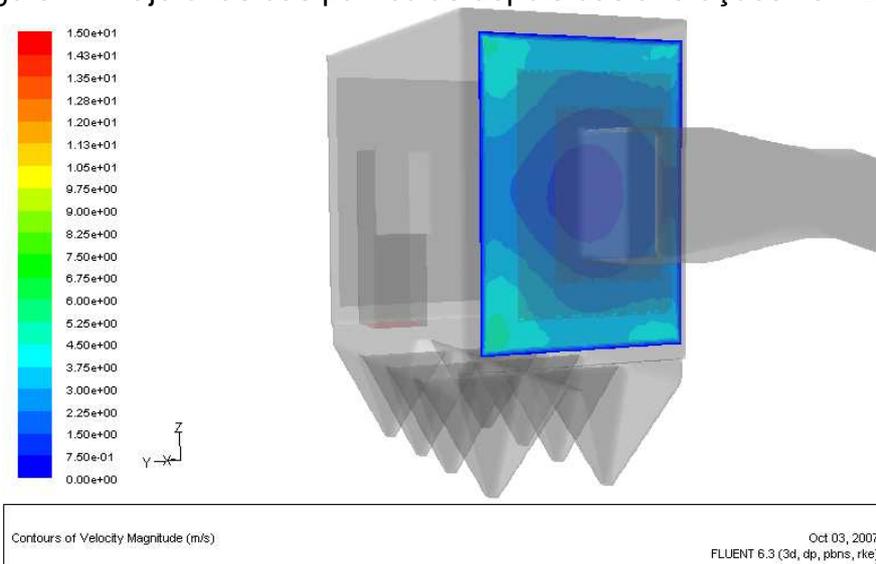


Figura 8: Contorno de velocidades antes das alterações na PDF3.

Antes das alterações na PDF3, tínhamos que 56% das velocidades pontuais eram menores que 1,25 m/s, com a maioria dos vetores de velocidade na faixa de 0,25 a 2,5 m/s, como mostra o histograma da Figura 10. Após as alterações na placa, 68% dessas velocidades pontuais são menores que 1,25 m/s, com a maior parte dos vetores de velocidade na faixa de 0,5 a 1,5 m/s, como apresenta o histograma da Figura 11.

O desvio padrão calculado para uma amostra de 25 pontos de velocidade obtida nas simulações foi de 0,173 m/s antes das modificações na placa, e de 0,097 m/s após as alterações. A região do equipamento onde se fez a amostragem situa-se em $x=4,2$ m, $-2 < y < 2$ e $-2 < z < 2$, considerando a origem do sistema de coordenadas apresentado na Figura 1. Essa redução no valor do desvio padrão indica que o perfil de velocidades se tornou mais uniforme após as alterações na área aberta da PDF3.

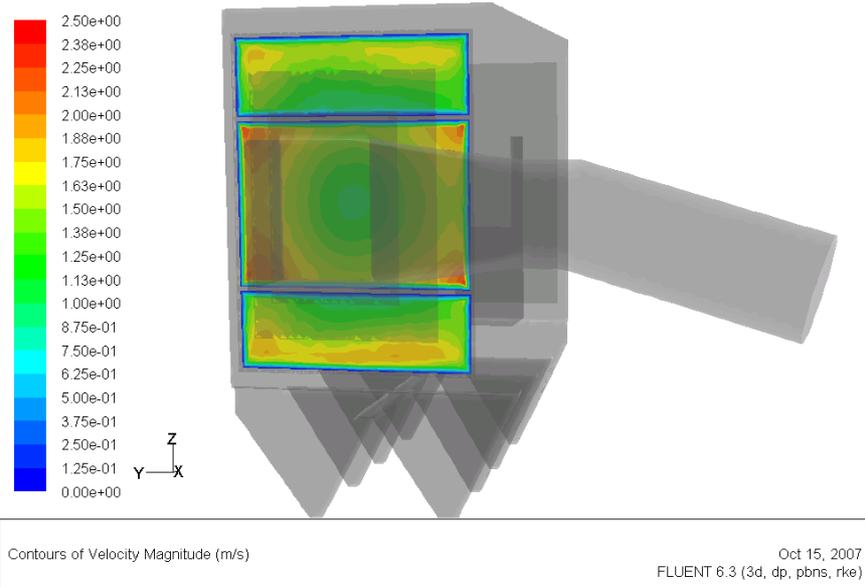
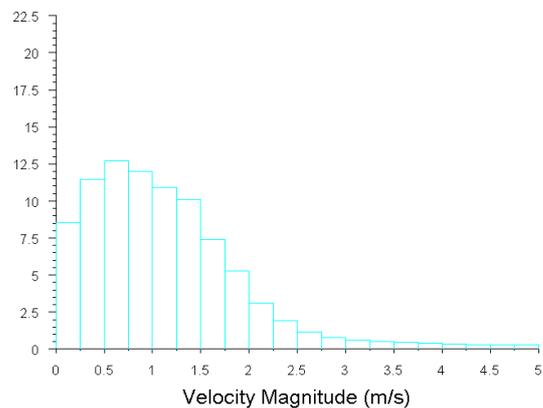


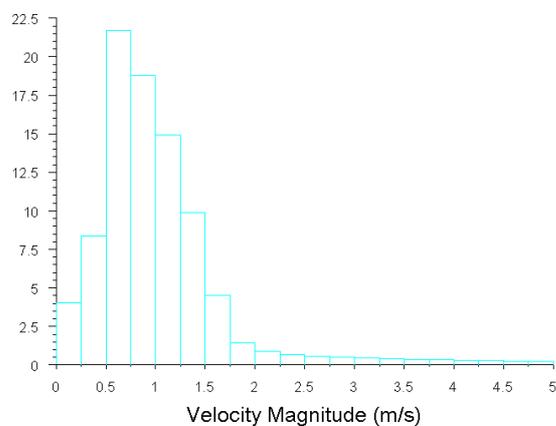
Figura 9: Contorno de velocidades depois das alterações na PDF3.



Histogram of Velocity Magnitude

Oct 24, 2007
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 10: Distribuição da magnitude da velocidade **antes** das alterações na PDF3.



Histogram of Velocity Magnitude

Oct 22, 2007
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 11: Distribuição da magnitude da velocidade **depois** das alterações na PDF3.

5 Conclusões

O Precipitador Eletrostático (PE) é um equipamento bastante dependente da velocidade interna dos gases. Quando se dimensiona um PE, uma importante variável de controle é a velocidade interna, que deve variar de 0,8 a 1,5 m/s em PEs industriais. Além disso, uma distribuição uniforme de velocidade, na seção transversal do PE é fundamental para uma coleta eficiente de material particulado.

As principais conclusões do estudo de CFD são:

- as placas distribuidoras de fluxo (PDFs) existentes possuíam furos homogeneamente distribuídos nas placas, sendo que a PDF3 possuía originalmente uma área aberta de 36,8%. O estudo de CFD demonstrou – após algumas tentativas, que variando-se a área das partes superior e inferior dessa placa, a distribuição de velocidade tornava-se mais uniforme;
- o tempo de residência das partículas antes era de 25 s e depois das alterações passou a ser de 20 s. Isto significa que antes, uma partícula com diâmetro de 50 μm precisava de 25 s para precipitar ou passar ao longo do PE. Após as alterações, com um perfil de velocidade mais uniforme, bastam 20 s para que a partícula precipite. Este é um resultado bastante relevante, pois implica que se a coleta de material particulado dependesse somente da velocidade interna, seria possível reduzir o comprimento do PE em aproximadamente 5 metros ($\sim 1\text{m/s} \times 5\text{ s} = 5\text{ metros}$);
- com as modificações na PDF3, o perfil de velocidades dentro do precipitador se tornou mais uniforme e, como consequência dessa maior uniformidade, 80% do material particulado foi naturalmente captado;
- com as PDFs existentes, tínhamos um índice de 56% com velocidades pontuais menores que 1,25 m/s, velocidade esta considerada ideal para a de coleta de pó proveniente do processo em questão. Após as alterações na placa, este índice subiu para 68%, indicando portanto maior uniformidade dos perfis de velocidade;
- a distribuição percentual da magnitude da velocidade antes das alterações na PDF3 mostra que boa parte dos vetores velocidade encontra-se na faixa de 0,25 a 2,5 m/s. Após as alterações, a maior parte destes vetores de velocidade estão entre 0,5 a 1,5 m/s, próxima da ideal.

Referências

[1] WHITE, F.M. Viscous fluid flow. New York: McGraw-Hill, 1991.

[2] PATANKAR, S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Pub. Corp.: McGraw-Hill, 1980.

[3] Fluent v6.3.26 User's Guide.

[4] Shih, T-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. A new k- ϵ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – Model development and validation. *Computers Fluids*, 24(3):227-238, 1995.

[5] IDELCIK, I. E. Memento des pertes de charge. Paris: Eyrolles Editeur, 1960.