

ANÁLISE NUMÉRICA DA EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO GÁS-LÍQUIDO DO LAVADOR DE GÁS DA ARCELORMITTAL MONLEVADE¹

Hugo Leonardo de Freitas²
Leonardo Carneiro Vianna Schettini³
Roberto Eustáquio Valadares Duarte⁴
Vicente Aleixo Pinheiro Ribeiro⁵
Rudolf Huebner⁶

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise do comportamento da mistura de gases e gotas de água no sistema de despoeiramento primário do conversor BOF. A metodologia envolve CFD para simular a velocidade dos gases e das gotas, a pressão e a eficiência de separação gás-líquido no lavador de gás, mais precisamente no separador de gotas. Foi investigada a influência do tamanho das gotas, e do coeficiente de restituição para a colisão entre as gotas de água e as paredes do separador. Os dados numéricos foram validados com valores reais de processo e pela observação dos fenômenos que ocorrem no equipamento. O próximo passo é implantar sistemas de medição de umidade no fluxo gasoso para validação dos resultados relativos a eficiência de separação do equipamento na sua condição original e para monitoramento do processo após a implantação da solução aqui proposta.

Palavras-chave: Convertedor; Despoeiramento primário; CFD; Separação; Gás-líquido.

NUMERICAL ANALYSIS OF GAS-LIQUID SEPARATION EFFICIENCY OF GAS SCRUBBER OF ARCELORMITTAL JOÃO MONLEVADE

Abstract

In this work was developed an analysis of the behavior of a mixture of gases and droplets of water in the primary dedusting system of BOF converter. The methodology involves CFD to simulate the gas and droplet speed, the pressure and the efficiency of gas-liquid separation in the gas scrubber, more precisely in the droplet separator. The influence of the droplet size and the collision restitution coefficient between the water droplets and the separator walls was investigated. Numerical data were validated with process actual values and by observing phenomena that occur in the equipment. The next step is to install systems for measurement of moisture in the gas stream for validation of the results on the separation efficiency of the equipment in its original condition and monitoring process after the implementation of the solution proposed here.

Key words: Converter; Dedusting; Primary; CFD; Separation; Gas-liquid.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Manutenção, ArcelorMittal João Monlevade, MG, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Manutenção, ArcelorMittal João Monlevade, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Eletricista, Gerente da Área de Manutenção da Aciaria, ArcelorMittal João Monlevade, MG, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Manutenção e Consultor, ArcelorMittal João Monlevade, MG, Brasil.

⁶ Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor do Depto. de Eng. Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A aciaria da ArcelorMittal Monlevade possui dois convertedores, sendo que enquanto um convertedor está em operação o outro se encontra em “stand by” (em espera) e disponível para entrar em operação imediatamente, se necessário, para evitar a paralisação do processo de produção de aço. Os convertedores foram projetados em 1985 para operar com uma carga de 100 toneladas de produção de aço, recentemente (no ano de 2004) foi idealizado o projeto para aumentar a capacidade produtiva dos convertedores para 130 toneladas, este projeto foi denominado Projeto 130. O repotenciamento do sistema de tiragem primária dos gases do convertedor também foi contemplado neste projeto com aumento da vazão de água de lavagem de gás e redimensionamento do exaustor IDF, porém o separador de gotas não foi contemplado neste estudo.

Cada convertedor possui um sistema para direcionamento, resfriamento e tratamento dos gases (denominado sistema de despoeiramento primário), cada sistema é composto por uma chaminé refrigerada, um lavador de gás, um exaustor e uma chaminé de gás limpo, onde os gases provenientes do processo são queimados.

Nos sistemas úmidos os gases são parcialmente resfriados pelos dutos refrigerados e em seguida passam a sofrer lavagens, normalmente duas, para remoção do material particulado. A primeira lavagem tem o objetivo de remover a maior quantidade de partículas enquanto a segunda lavagem tem o objetivo de garantir os limites determinados pela legislação ambiental.

Os gases saem do conversor com temperatura de aproximadamente 1.700°C arrastando grande quantidade de partículas sólidas como FeO, escória, CaO, etc. Estes gases então entram em um sistema de chaminé e coifa refrigerados logo acima do conversor juntamente com uma pequena quantidade de ar.

Antes de entrar no lavador, o gás deve ser resfriado a uma temperatura de aproximadamente 900°C no sistema de coifa e chaminé refrigerada.

O lavador de gás é composto de dois estágios, sendo que o primeiro estágio tem como finalidade reduzir bruscamente a temperatura do gás e remover a fração mais grosseira das partículas e o segundo estágio remove as partículas menores por meio de pulverização de água no fluxo de gás à alta velocidade, em seguida o gás segue para o separador de gotas.

O separador de gotas é constituído basicamente por um rotor fixo e uma câmara circular. O rotor tem a função de acelerar e direcionar o gás contra a parede da câmara onde o líquido presente no gás é separado do fluxo.

Na Figura 1 é apresentado o esquema do sistema primário de acordo com a ArcelorMittal.⁽¹⁾

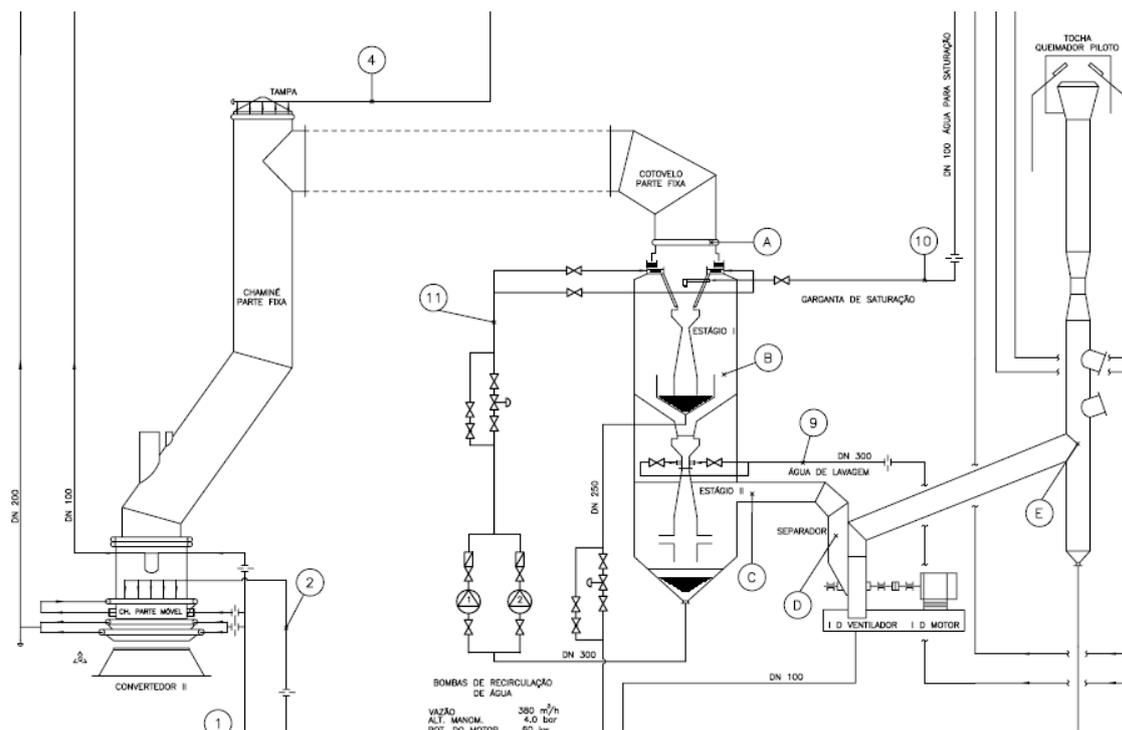


Figura 1. Representação esquemática do Sistema Primário.

A eficiência da separação gás-líquido é fundamental para garantir a eficiência geral do sistema de lavagem de gás como também para a garantia do processo produtivo, pois a umidade presente no gás provoca a agregação de material nas pás do rotor do exaustor IDF, e em função da variação normal do processo com maior ou menor demanda do exaustor, o material agregado nas pás do rotor se desprende de forma desordenada provocando o seu desbalanceamento com conseqüente aumento de vibração. A vibração do exaustor ao atingir determinados níveis exige a paralisação do processo de produção da aciaria para que seja realizada a limpeza do rotor por meio de jateamento de água a alta pressão.

Para aumentar a disponibilidade o exaustor IDF foi desenvolvido o estudo de eficiência no componente responsável pela separação gás-líquido do sistema de limpeza, o separador de gotas, focando na eficiência de separação gás-líquido. Serão analisados os processos de separação destas fases para maior entendimento do funcionamento do equipamento, bem como para identificação da solução mais adequada. Serão utilizadas técnicas de CFD para o modelamento do sistema e estudo das soluções propostas.

Foram realizados estudos para três situações. A primeira considerou o separador de gotas em sua configuração original. Nesta análise foram avaliados e definidos os parâmetros de processo e as condições de contorno a serem aplicadas ao modelo. A segunda foi uma modificação interna do separador de gotas com implantação de placas de impacto e a terceira considerou uma alteração na geometria externa do separador em relação à geometria original.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo utilizar simulação fluidodinâmica para estudar o escoamento multifásico no separador de gotas, sua eficiência de separação gás-

líquido e propor modificações neste equipamento que promovam um aumento na eficiência deste componente do sistema de limpeza de gás.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A análise computacional do separador de gotas neste trabalho se dividiu em três partes. A primeira simulação se baseou em dados do equipamento atualmente em operação e foi desenvolvida com o objetivo de identificar os parâmetros a serem adotados como base para a comparação dos modelos. A segunda simulação apresenta a opção de modificação do separador de gotas inserindo placas de impacto no seu interior. A terceira simulação apresenta a opção de modificação física do separador de gotas com aumento do seu diâmetro de acordo com a disponibilidade física da instalação atual. A Figura 2 representa o modelo gerado para cada uma das simulações realizadas.

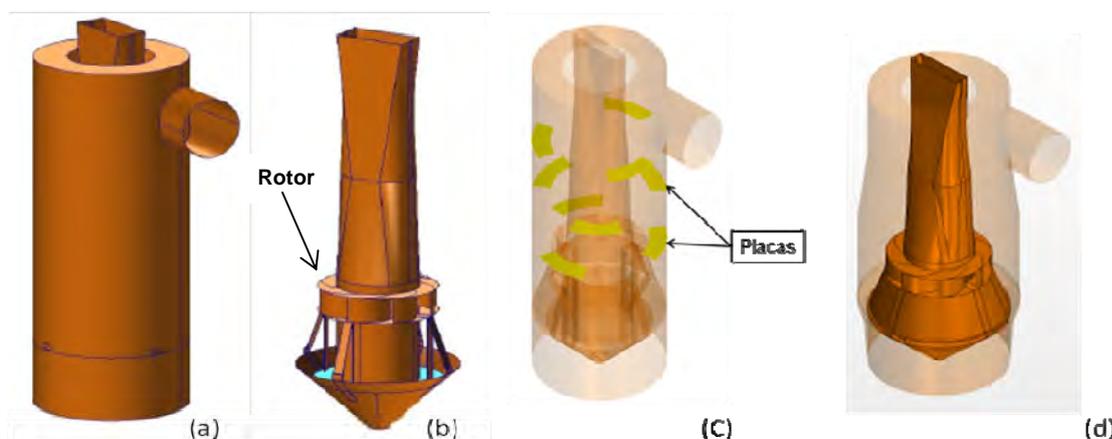


Figura 2. Modelo do separador de gotas, (a) vista externa; (b) vista interna; (c) modificação interna – placas; e (d) modificação externa.

A malha definida para os modelos é hexaédrica, sendo que nas regiões de contorno ou paredes foram gerados elementos tipo *prism layers*, que permitem refinamento da malha nestes pontos. Para uma boa aproximação dos resultados da simulação computacional com as informações coletadas na área, utilizou-se uma adaptação da geometria, para uma malha não-estruturada favorável para o acompanhamento das partículas através da descrição Lagrangeana, ou seja, o acompanhamento individual considerando a gravidade, a força de arraste e a dispersão turbulenta, conforme Goniva, Tukovic e Feilmayr.⁽²⁾

Para modelagem da fase gasosa, o gás composto por CO, CO₂ e N₂ foi considerado como um gás ideal e, por representar a fase contínua do escoamento, será adotada uma abordagem euleriana conforme descrito por Goniva⁽²⁾. Foi considerado também, inicialmente, que o escoamento ocorre em regime permanente, a fim de descrever o campo de velocidade e formação do núcleo principal. Nesta análise, considera-se que não há troca térmica entre o gás, as paredes e as gotas, e ambas as fases se encontram à mesma temperatura. A pressão atmosférica foi adotada em 101,3 kPa e a viscosidade dinâmica de 1,9x10⁻⁵ Pa-s (a 65°C).

Para a modelagem da fase dispersa (gotas), foi assumido que a densidade é constante em 1.000 kg/m³ e as partículas se movimentam devido à força de arraste exercida pelo gás e dispersão turbulenta. Como a fase dispersa é formada por partículas (gotas), será adotada uma abordagem lagrangeana que permite rastrear o caminho percorrido pelas partículas.

Após a simulação da fase gasosa, foi inserida a fase dispersa e o escoamento foi considerado regime transiente para permitir observar as partículas ao longo de sua trajetória. Para o regime transiente, foi adotado tempo de escoamento igual a 2 s e passo de tempo de 0,005 s.

Para a elaboração do modelo, o tamanho da gota gerada no lavador Venturi é muito importante. Por não haver medição deste parâmetro no processo e devido a dificuldade de se fazer esta medição em um equipamento real e em condição normal de operação, optou-se por adotar valores teóricos obtidos através da bibliografia utilizada neste trabalho. Devido à variação do tamanho da gota no processo de atomização do jato de água na garganta Venturi, deve-se adotar os valores médios ou característicos para definição do diâmetro de gota.

Guerra⁽³⁾ desenvolveu um estudo referente ao tamanho das gotas em um lavador Venturi e apresenta um histograma típico de distribuição do tamanho de gota nesses lavadores na Figura 3. Percebe-se pela curva que a maior distribuição das gotas está próxima ao tamanho de 90 μm .

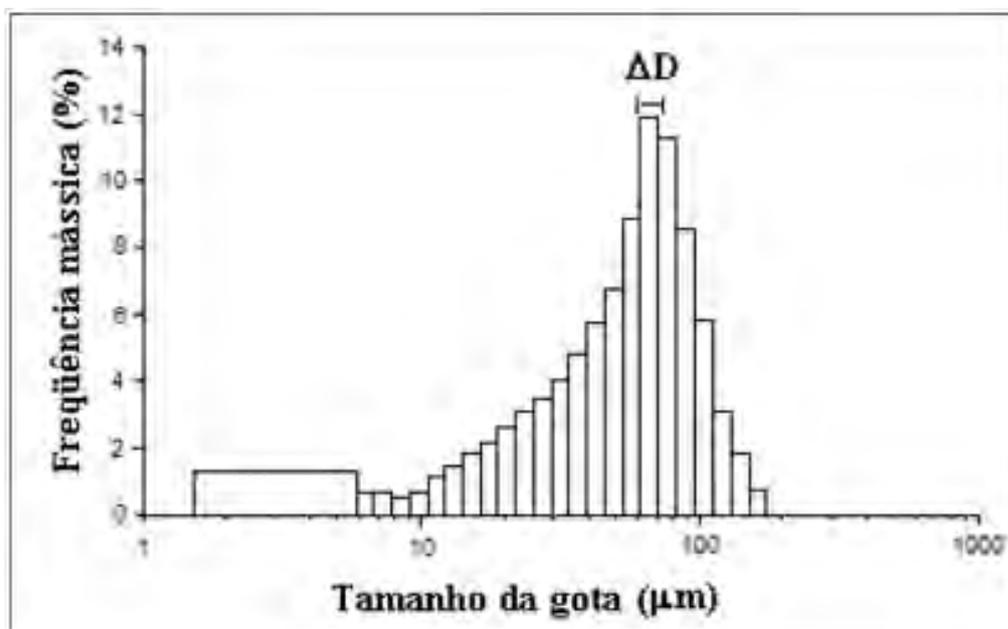


Figura 3. Distribuição do tamanho de gota.

O número de Reynolds calculado para a entrada do separador é $1,37 \times 10^6$ e para a saída é $1,17 \times 10^6$, comprovando que o escoamento é turbulento tanto na entrada quanto na saída do separador de gotas.

A definição do coeficiente de restituição também é um parâmetro importante para o desenvolvimento do modelo. De acordo com Wal⁽⁴⁾ o número de Weber influencia o valor do coeficiente de restituição. O número de Weber (We) é obtido a partir da tensão superficial do líquido e do diâmetro da gota. Considerando-se um diâmetro de gota médio de 95 μm obtém-se um número de Weber igual a 273. Wal⁽⁴⁾ apresenta um gráfico que mostra a relação entre o coeficiente de restituição e o número de Weber para um e dois impactos consecutivos, este gráfico é representado na Figura 4. Nota-se, por extrapolação, que o coeficiente de restituição para água no primeiro choque com $We=273$ fica entre 0,15 e 0,2.

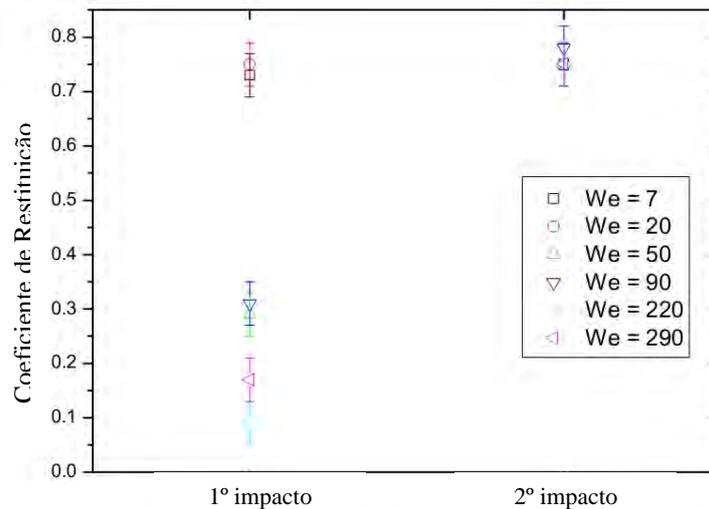


Figura 4. Distribuição do tamanho de gota.

Diante da complexidade do equipamento e dos riscos envolvidos no processo de manuseio e experimentação com o gás de LD, devido a sua característica explosiva (risco de acidentes com pessoas e danos a equipamentos), optou-se por aplicar as ferramentas de modelamento e simulação numérica que permitem uma representação aproximada da situação real do processo. O software adotado como ferramenta para a realização deste estudo foi o Star CCM⁺.⁽⁵⁾

As características do modelo adotado são as seguintes:

- Regime permanente e transiente
 - o modelo foi rodado em regime permanente, somente com a fase Euleriana (gás), para a formação do núcleo principal do escoamento;
 - as partículas (água) foram adicionadas e o modelo foi rodado em regime transiente por 2 s (*time-step* : 0,005 s). Essa análise transiente permite contabilizar o movimento das partículas, além de captar as condições físicas transientes do escoamento;
- Escoamento de gás composto por CO, CO₂ e N₂ (Euleriana);
 - gás ideal;
 - viscosidade dinâmica: 1,935e-5 Pa-s (65°C)
 - pressão atmosférica: 101,325 kPa;
- Escoamento de água e particulado (Lagrangiana);
 - densidade constante: 1.000 kg/m³;
 - tamanho das partículas: 95 μm;
 - não há interação partícula – partícula;
 - movimentação das partículas por força de arrasto e dispersão turbulenta;
- Escoamento turbulento (Re ≈ 1e5)
 - modelo de turbulência: Reynolds Averaged Navier-Stokes: Reynolds Stress Transport Turbulence.

As condições de contorno adotadas foram:

- entrada: vazão mássica de água: 300.000 kg/h (água+partículas); vazão mássica de gás: 90.000 kg/h (Gases);
- saída: pressão: -1.900 mmca (manométrica);
- interação gás-parede: *no-slip wall*
- interação partícula-parede = *rebound*; coeficiente de restituição: 0,15

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados das simulações computacionais, devidamente separadas em quatro partes, sendo que as três primeiras partes se referem aos resultados de cada uma das simulações desenvolvidas e a última parte se refere ao resumo e discussão dos resultados.

5.1 Simulação – Configuração Original

Os resultados da simulação numérica para o escoamento multifásico considerando a configuração original do sistema são apresentados nas Figuras 5 e 6.

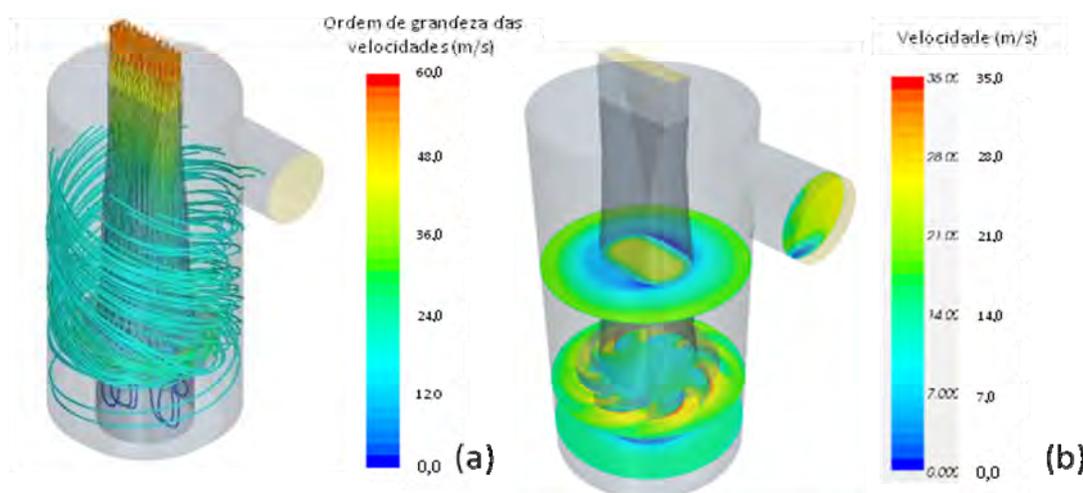


Figura 5. Resultados para linhas de corrente (a) e campos de velocidades (b).

As linhas de corrente na secção inferior da torre de lavagem, após a passagem do fluxo pelo rotor fixo (separador) apresenta a forma de turbilhão ascendente. Observando-se o campo de velocidades é percebido que a velocidade do escoamento é maior no duto interno (antes do rotor), o que se justifica pela menor área de secção transversal e nas pás do rotor a velocidade também é aumentada, forçando o choque entre o gás e partículas contra a parede externa da torre. Além disso, na tubulação de saída, o perfil do campo de velocidade é desbalanceado, apresentando velocidades maiores, seguindo o alinhamento da tangente à parede externa da torre. Esse desbalanceamento do campo de velocidades favorece a deposição de partículas no duto, pois se apresentam regiões com velocidades muito baixas que favorecem a sedimentação gravitacional das partículas. Essa situação realmente se observa no equipamento existente. Ao longo da sua vida, em operação, tem ocorrido redução de secção transversal nesse duto, devido à deposição de partículas.

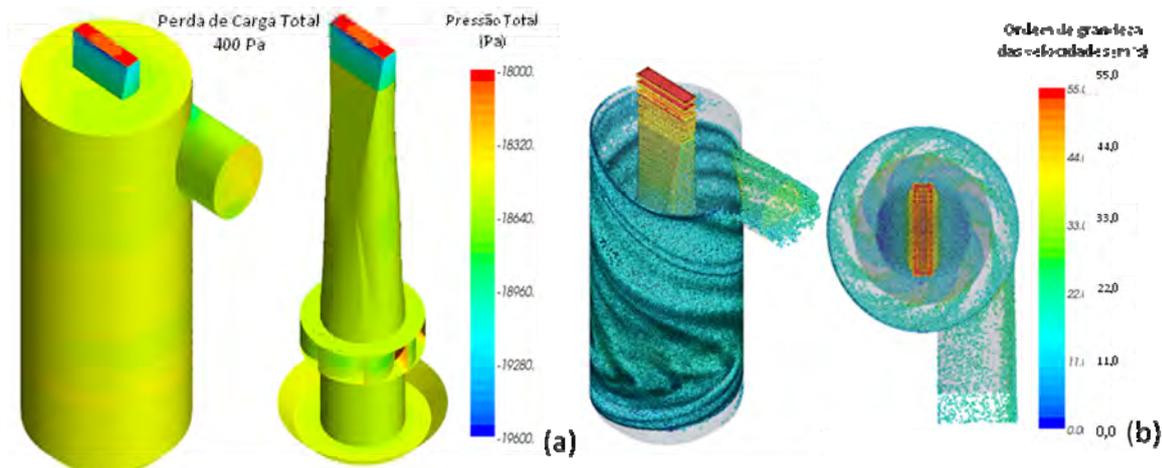


Figura 6. Resultados para pressão e perda de carga (a) e trajetória das partículas (b).

É possível observar que a pressão é bem distribuída na região ascendente do escoamento. Esse parâmetro é importante para avaliar se as modificações propostas irão aumentar, diminuir ou manter a perda de carga no sistema, pois o ventilador não será substituído. Pela análise de trajetória das partículas é possível avaliar a eficiência de separação gás-líquido, esta simulação apresentou uma eficiência da ordem de 76% e a vazão mássica das partículas que não ficam retidas é da ordem de 22 kg/s.

Esta simulação foi definida como sendo o modelo base para comparação com as soluções propostas.

5.2 Simulação – Placas de Impacto

Para esta situação foi adotada para a interação partícula-placas a mesma condição adotada para a interação partícula-parede com coeficiente de restituição igual a 0,15. Os resultados da simulação numérica para o escoamento multifásico considerando a instalação de placas de impacto no interior do separador de gotas são apresentados nas Figuras 7 e 8.

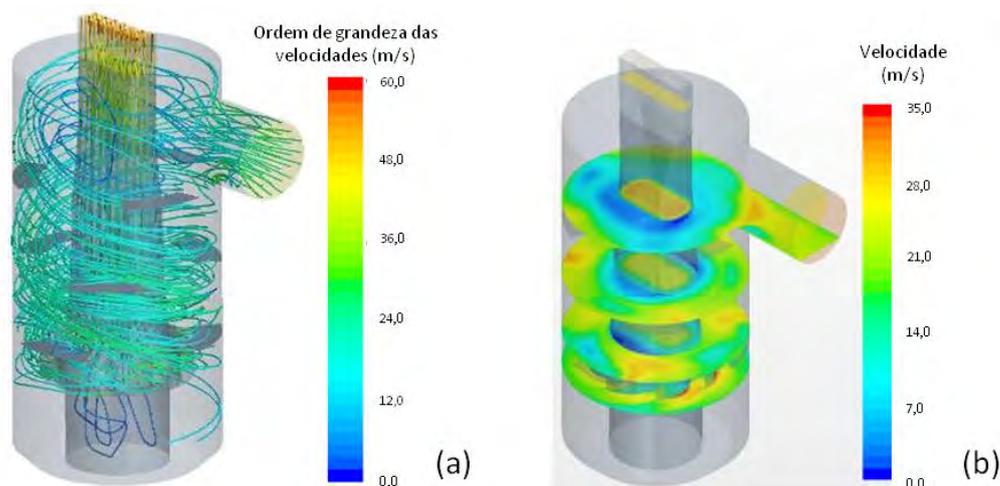


Figura 7. Resultados para linhas de corrente (a) e campos de velocidades (b).

Observa-se pelas linhas de corrente que as placas de impacto provocam maior desordenação no escoamento (turbulência), quando comparado ao modelo base.

Analisando os campos de velocidades, percebe-se que a velocidade do escoamento na região de fluxo ascendente é aumentada devido à redução na área da secção transversal da torre, ficando em faixas de velocidade bem próximas às da região do duto interno (antes do rotor), porém logo acima das placas observa-se uma redução na velocidade do escoamento. Nesses locais há um favorecimento a deposição de partículas por sedimentação gravitacional.

Esse aumento de velocidade, associado com a fixação alternada e defasada das placas, favorece o mecanismo de separação gás-líquido por impactação direta, pois o fluxo é sempre desviado em direção às placas do alinhamento superior. Observa-se também maior redução de velocidade na região antes do duto de saída da torre e melhor distribuição do campo de velocidades (velocidades mais homogêneas) neste duto, o que reduz a possibilidade de deposição de partículas ao longo deste duto.

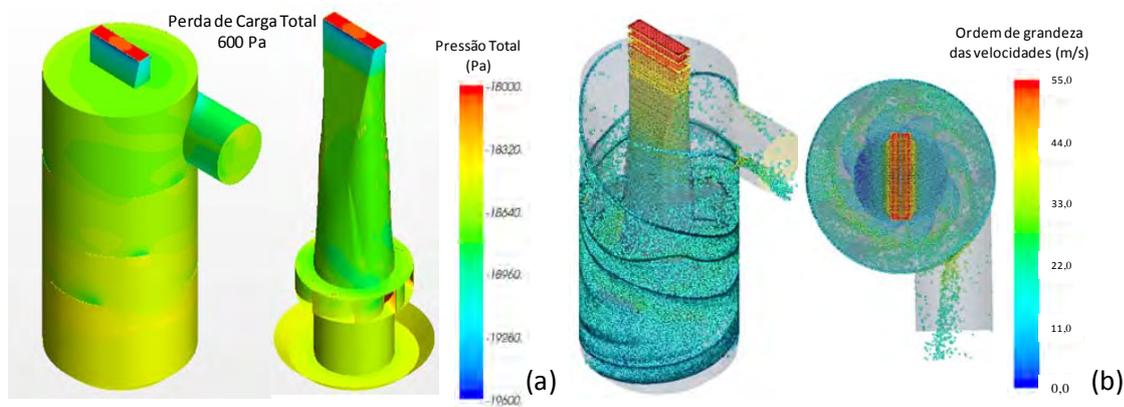


Figura 8. Resultados para pressão e perda de carga (a) e trajetória das partículas (b).

A Figura 8a apresenta a distribuição de pressão na secção inferior da torre de lavagem, comparando-se com a Figura 6a observa-se maior valor de pressão na região inferior da torre e a perda de carga também sofreu um aumento de 50% em relação ao resultado do modelo de base. Essa solução irá aumentar a carga sobre o ventilador o que poderá limitar a sua faixa de operação. Analisando a trajetória das partículas observa-se que esta simulação apresentou uma eficiência da ordem de 95% e a vazão mássica das partículas que não ficam retidas é da ordem de 5 kg/s, o que representa um ganho em relação ao modelo base.

5.3 Simulação – Nova Geometria

As condições de contorno são as mesmas adotadas para a simulação da geometria original. Os resultados da simulação numérica para o escoamento multifásico considerando a nova geometria do separador de gotas são apresentados nas Figuras 9 e 10.

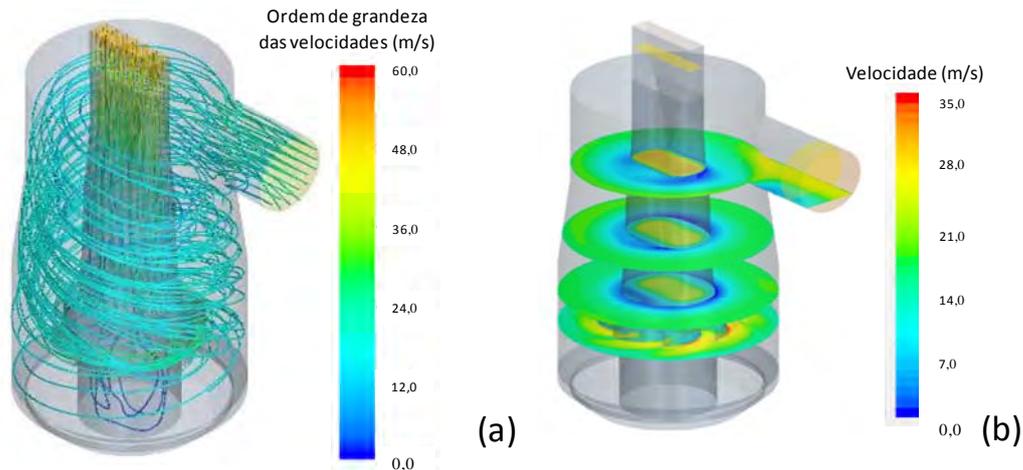


Figura 9. Resultados para linhas de corrente (a) e campos de velocidades (b).

Observa-se pelas linhas de corrente que a mudança na geometria não aumenta a turbulência do escoamento, porém, apresenta uma pequena redução na velocidade do escoamento na saída do rotor, proporcionada pelo aumento da área da seção, quando comparado ao modelo base (Figura 5). Analisando os campos de velocidades, percebe-se que a mudança na geometria externa da torre não provoca alteração no campo de velocidade da região do duto interno (antes do rotor) e no rotor. A velocidade do escoamento, na região de fluxo ascendente, sofre uma pequena redução, devido ao aumento na área da seção transversal da torre. Porém, no centro da torre, a redução de velocidade é mais significativa. Na região antes da entrada no duto de saída da torre, as velocidades são um pouco maiores que o observado na Figura 7b e também observa-se desbalanceamento do campo de velocidades no duto de saída da torre, situação semelhante a encontrada na Figura 5b e que também favorece a deposição de partículas neste duto.

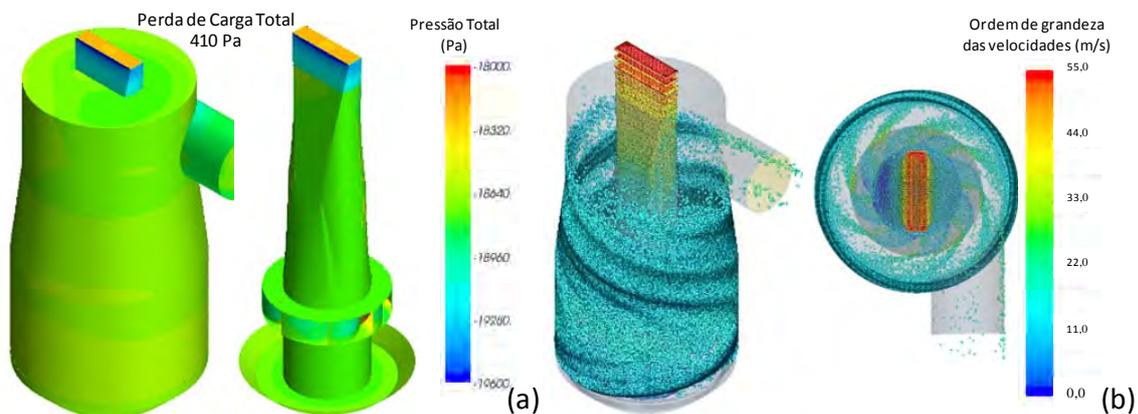


Figura 10. Resultados para pressão e perda de carga (a) e trajetória das partículas (b).

A Figura 10a apresenta a distribuição de pressão na seção inferior da torre de lavagem, comparando-se com a Figura 6a observa-se distribuição de pressão de forma homogênea e a perda de carga apresentou um resultado praticamente igual ao apresentado no modelo de base. Esta solução poderá manter o mesmo regime de trabalho ao qual o ventilador está sujeito atualmente. Analisando a trajetória das partículas observa-se que esta simulação apresentou uma eficiência da ordem de 97% e a vazão mássica das partículas que não ficam retidas é da ordem de 2,5 kg/s,

o que representa um ganho maior ainda em relação ao modelo base se comparado à utilização de placas de impacto.

5.4 Resumo E Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos com as simulações são apresentados resumidamente na Tabela 1, que proporciona uma avaliação global dos resultados individuais de cada simulação.

Tabela 1 - Quadro resumo dos resultados

Modelo	Perda de carga	Partículas que Escapam (kg/s)	Eficiência (%)
Base	400 Pa	22	76%
Placas	600 Pa	5	95%
Nova Geometria	410 Pa	2,5	97%

Pode-se que considerar tanto a proposta de inserção das placas quanto à mudança na geometria da torre respondem positivamente à eficiência na separação gás-líquido e na mesma ordem de grandeza. Entretanto, uma resposta importante da simulação é que precisa ser considerada para definição de qual proposta implantar, trata-se da perda de carga do sistema. Embora a solução com a inserção das placas de impacto seja a mais simples e de menor custo de execução, ela também resulta em maior perda de carga, o que pode ser prejudicial ao processo produtivo e à eficiência de captação do sistema, pois esse aumento na perda de carga pode deslocar a curva de operação do ventilador. Em contra partida, a proposta com as placas provoca uma maior equalização das velocidades no duto de saída, o que pode reduzir a manutenção e limpeza deste duto. A solução com alteração da geometria, praticamente, não altera a perda de carga do sistema. Por outro lado, é mais cara e complexa de se executar.

6 CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho são:

- A simulação realizada considerando a geometria original, apresentou resultados numéricos próximos às condições reais de operação do equipamento, permitindo assim validar um modelo base para comparação com os resultados numéricos das simulações das propostas de melhoria ao equipamento;
- ambas soluções propostas apresentam resultados favoráveis à melhoria da eficiência na retenção do líquido pela torre de lavagem chegando a valores bem próximos de 100%; e
- o objetivo geral do trabalho foi atendido, pois foram identificadas soluções para aumento da eficiência de separação gás-líquido do sistema de limpeza de gases do convertedor 2, resultando, assim, em maior intervalado entre as limpezas do rotor do ventilador IDF.

Agradecimentos

Os componentes do trabalho agradecem a equipe da Arcelor Mittal João Monlevade pelo trabalho de validação dos resultados e ao PPGMEC - UFMG pelo incentivo a pesquisa continuada.

REFERÊNCIAS

- 1 ARCELORMITTAL MONLEVADE; Informações Gerais da Usina, João Monlevade, 2008.
- 2 GONIVA, C.; TUKOVIC, Z.; FEILMAYR, C.; Simulation of Offgas Scrubbing by a Combined Eulerian-Lagrangian Model, Artigo - Seventh International Conference on CFD in the Mineral and Process Industries, Melbourne, 2009.
- 3 GUERRA, V. G; Investigação do Efeito de Injeção de Líquido por Orifícios Múltiplos na Formação de Gotas em um Lavador Venturi, Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- 4 WAL, V. D.; Static and Dynamic Wetting of Porous Teflon® Surfaces – Department of Polymer Chemistry, University of Groningen, Nova Zelândia, 2006.
- 5 STAR-CCM+ User Guide, Version 6.04.016, CD-Adapco, 2011.