

ANÁLISE DE CICLONE COM FLEXIBILIDADE OPERACIONAL POR TÉCNICAS DE CFD

ANALYSIS OF A CYCLONE WITH OPERATIONAL FLEXIBILITY USING CFD TECHNIQUES

Jairo Haake¹
Leonardo Machado da Rosa²
Dirceu Noriler³
Henry França Meier⁴

Resumo: Ciclones são equipamentos robustos, utilizados para a separação de material particulado em escoamentos. Em contrapartida à sua robustez, ciclones são projetados para uma determinada condição operacional. Desta maneira, alterações na velocidade de entrada e na razão de carga podem prejudicar a eficiência de separação, devido a mudanças no comprimento natural do vórtice. O objetivo principal deste trabalho é estudar a eficiência de separação e a perda de carga em uma nova geometria capaz de estabilizar o vórtice interno do ciclone sem a utilização de um corpo cônico. Esta nova geometria de separador ciclônico possui uma mesa estabilizadora de altura variável, tornando-o flexível para uma ampla faixa de vazão e razão de carga. As simulações foram realizadas usando um modelo transiente, tridimensional com uma abordagem Euleriana-Euleriana. O modelo de tensores de Reynolds (RSM) foi utilizado para modelar a turbulência na fase contínua e a fase discreta foi considerada como inviscida. Os resultados demonstram a possibilidade de estabilizar o vórtice interno diante de alteração na velocidade e na razão de carga, preservando a performance operacional com níveis adequados de eficiência de separação. A comparação com a simulação de um ciclone convencional indica redução significativa na perda de carga para a nova geometria, requerendo menos energia para a separação do particulado presente no escoamento.

Palavras-chave: Ciclones. Vórtice. Perda de carga. Eficiência. Fluidodinâmica computacional.

Abstract: Cyclones are robust equipment, used for separation of particulate material in flows. In contrast to their robustness, cyclones are designed for a certain operational condition. Thus, changes in the inlet velocity and load ratio may impair the separation efficiency. The present study is aimed to evaluate the separation efficiency and the pressure drop in a new geometry capable of stabilizing the internal vortex of the cyclone without the use of a conical body. This new geometry has a flat-disk vortex stabilizer with variable height, making it flexible for a wide flow range and load ratio. Simulations were performed using a transient, three-dimensional model with an Eulerian-Eulerian approach. The Reynolds stress model (RSM) was used to model the turbulence in the continuous phase and the discrete phase was considered as inviscid. The results demonstrate the possibility of stabilizing the internal vortex due to changes in speed and load ratio preserving operational performance, with adequate levels of separation efficiency. Comparison with the simulation of a conventional cyclone indicates reduction in the pressure drop for the new geometry, requiring less energy to separate the particles present in the flow.

Keywords: Cyclones. Vortex. Pressure Drop. Efficiency. Computational Fluid Dynamics.

¹ Mestre em Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, jairo@haake.com.br.

² Doutor em Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, leorosa@gmail.com.

³ Doutor em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, dnoriler@feq.unicamp.br.

⁴ Doutor em Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, meier@furb.br.

1 INTRODUÇÃO

Separadores ciclônicos são equipamentos amplamente utilizados na indústria, devida à facilidade na sua construção e robustez por utilizar a energia do escoamento para promover a separação de particulado na corrente gasosa. Em contrapartida, ciclones possuem um escoamento complexo, observando-se a alta preservação do vórtice, zonas de reversão do escoamento, recirculação, interação gás-sólido e turbulência intensa entre outros (MEIER e MORI, 1999).

Os primeiros separadores ciclônicos datam de 1885. John M. Finch desenvolveu uma câmara de separação composta por um cilindro horizontal que utilizava a força centrífuga para separar particulados. Em 1905 Orville M. Morse propõe um ciclone no formato vertical inserindo uma região cônica que orienta os sólidos para a base (HOFFMANN e STEIN, 2010). Esta modificação tornou-se a base para os ciclones contemporâneos, sendo conhecida como geometria convencional, destacando-se as geometrias propostas nos trabalhos de Stairmand (STAIRMAND, 1949) e Lapple (LAPPLE, 1959).

O comportamento do vórtice interno do ciclone tem sido objeto de estudo desde os primeiros trabalhos sobre o escoamento nestes equipamentos, pois o comprimento natural do vórtice influencia na eficiência de separação de separadores ciclônicos. Quando o comprimento natural do vórtice é maior que o comprimento do ciclone, tem-se um escoamento estável que resulta em uma separação eficiente. Quando ele for menor que o comprimento do ciclone, constata-se uma queda na eficiência de separação. Quando o comprimento natural do vórtice é igual ao comprimento do ciclone, o vórtice não é estável, mas sim oscilatório. As estimativas primordiais para o comprimento natural do vórtice utilizavam correlações empíricas, que consideravam apenas efeitos geométricos (ALEXANDER, 1949; BRYANT et al., 1983). Trabalhos posteriores consideram fatores adicionais que podem alterar o comprimento natural do vórtice, observando que este também pode ser influenciado pela velocidade na entrada, razão de carga e rugosidade da parede (AVCI et al., 2013; QUIAN e ZHANG, 2005). Estudos recentes propõem o uso de dispositivos que estabilizam o comprimento natural do vórtice, passíveis de ajustes para o ponto

ideal do comprimento natural do vórtice em separadores ciclônicos sem cone (KARAGOZ et al., 2013).

Com o surgimento dos métodos computacionais, destacando-se o método dos volumes finitos (PATANKAR e SPALDING, 1972), tornou-se possível a realização de estudos numéricos do escoamento em ciclones. Os primeiros estudos utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) para ciclones tinham o desafio de representar a anisotropia dos tensores de Reynolds, que inicialmente deu-se por modelos híbridos entre o modelo $k-\epsilon$ e o comprimento de mistura de Prandtl (BOYSAN et al., 1982; PERICLEOUS, 1987; DUGGINS e FRITH, 1987; MEIER e MORI, 1998). Com o advento computacional, o modelo de turbulência RSM (Reynolds Stress Model) passou a ser o mais utilizado entre os modelos para simulação de escoamentos rotatórios. O RSM é capaz de prever a anisotropia dos tensores de Reynolds, pois resolve uma equação de transporte para cada componente do tensor de Reynolds, bem como uma equação extra para o transporte da dissipação de energia cinética turbulenta. Isto resulta em sete equações adicionais para serem resolvidas para um modelo tridimensional, em contraste às duas equações resolvidas no modelo $k-\epsilon$.

Neste trabalho, apresenta-se uma avaliação numérica de uma nova geometria, utilizando uma abordagem transiente, tridimensional com o modelo de turbulência RSM, comparando os resultados com uma geometria do tipo Stairmand. Simulações foram conduzidas utilizando-se o código Star-CCM+, considerando escoamento bifásico e transiente, a fim de verificar a eficiência de separação e perda de carga na geometria proposta.

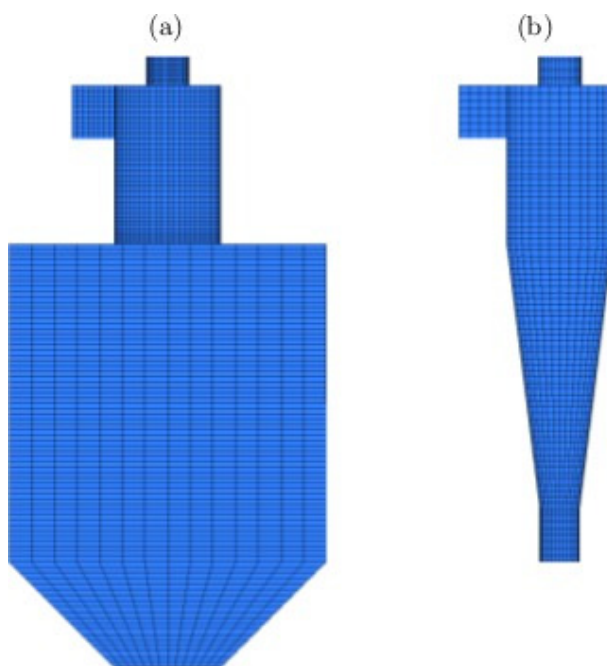
2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir é descrita a metodologia numérica utilizada para o projeto de uma nova geometria de ciclone. Além do projeto da nova geometria, será proposta a comparação dos resultados com uma geometria tipo Stairmand, muito utilizada na indústria e exaustivamente citada na literatura.

2.1 Descrição das Geometrias

A nova geometria tem como base um modelo híbrido, com a região de separação cilíndrica e a região de coleta de particulado (*hopper*) retangular, substituindo a parte cônica dos ciclones convencionais. O dispositivo de controle do vórtice foi baseado em um conceito proposto na literatura (KARAGOZ et al., 2013). Simulações computacionais foram utilizadas para a definição da configuração mais adequada deste dispositivo (Figura 1a). Para fins de comparação dos resultados obtidos nesta nova configuração de separador ciclônico, também foi simulado um ciclone do tipo Stairmand (Figura 1b). Todas as geometrias avaliadas possuem as mesmas dimensões para a entrada, corpo cilíndrico e para o cilindro na região superior (*vortex finder*).

Figura 1 – (a) geometria projetada e (b) geometria convencional Stairmand.



Para a experimentação numérica do escoamento gás-sólido, foram utilizadas partículas de catalisador suportado em zeólita de unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC), com massa específica de 1400 kg/m^3 e diâmetro médio superficial de $55 \text{ }\mu\text{m}$.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

As equações de conservação decompostas sob as médias temporais de Reynolds (RANS) são representadas por um conjunto de equações, duas para conservação da massa (Equações 1 e 2) e duas para a conservação da quantidade de movimento (Equações 3 e 4), sendo:

Conservação da massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_g \rho_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s) + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0 \quad (2)$$

Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -f_g \nabla p + \nabla \cdot (\mathbf{T} + \mathbf{T}^t) + f_g \rho_g \mathbf{g} + F_D \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (f_s \rho_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = -f_s \nabla p + f_s \rho_s \mathbf{g} - F_D \quad (4)$$

com:

$$f_s + f_g = 1 \quad (5)$$

onde f representa a fração volumétrica da fase, ρ a massa específica da fase, p a pressão, \mathbf{v} o vetor velocidade, \mathbf{g} a força da gravidade e F_D a força de arraste. Os subscritos g e s indicam se a propriedade pertence à fase gás ou sólida, respectivamente. O tensor tensão turbulento \mathbf{T}^t , presente na Equação 3, necessita ser modelado para o fechamento do problema. Conforme mencionado, O modelo de turbulência RSM, também conhecido como modelo de fechamento de segunda ordem, não adota a hipótese de Boussinesq. Desta forma, neste modelo é resolvida uma equação de transporte para cada um dos tensores de Reynolds, sendo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_g \rho_g \mathbf{T}^t) + \nabla \cdot (f_g \rho_g \mathbf{T}^t) = \mathbf{D} + \mathbf{P} + \mathbf{\Pi} - \frac{2}{3} \rho \delta \varepsilon \quad (6)$$

onde \mathbf{D} compreende a difusão molecular e turbulenta, \mathbf{P} representa a taxa de produção de turbulência, e $\mathbf{\Pi}$ representa a deformação devido as forças de

pressão. O último termo representa a dissipação turbulenta, no qual δ é o tensor identidade.

A energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação turbulenta (ε) também requerem modelagem. A primeira resulta da Equação 7, sendo a metade do traço do tensor tensão de Reynolds. A segunda resulta da Equação 8, sendo esta equação de transporte análoga a do modelo k - ε padrão.

Energia cinética turbulenta:

$$k = \frac{1}{2} tr(T^t) \quad (7)$$

Taxa de dissipação turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (v\rho\varepsilon) = \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - \rho\varepsilon C_{\varepsilon 2}) \quad (8)$$

onde μ e μ_t são as viscosidades dinâmica e turbulenta, respectivamente, e $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k são constantes do modelo.

Para o modelo de arraste, que representa a interação entre as fases para o escoamento gás-sólido, foi utilizado o modelo de Gidaspow (GIDASPOW, 1994).

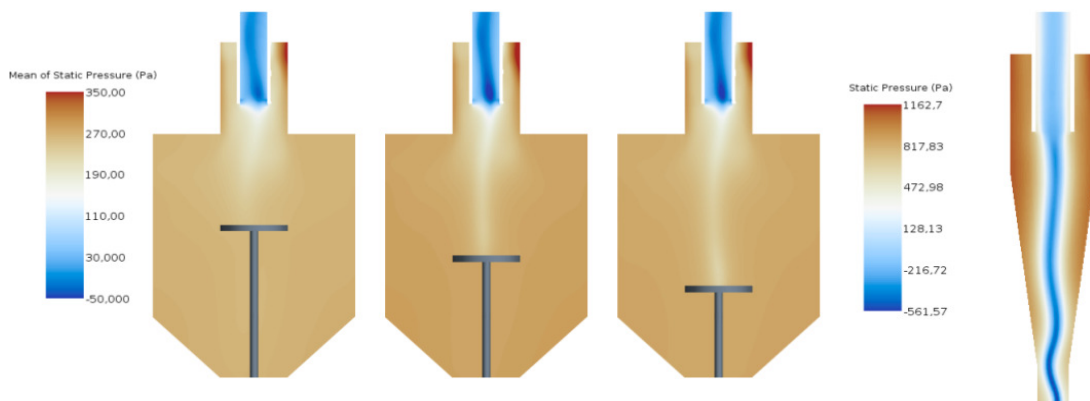
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulações numéricas foram conduzidas para cada caso. Inicialmente, foi avaliado o escoamento monofásico no interior de cada ciclone. Foi possível observar que o ciclone convencional tipo Stairmand, possui uma oscilação do vórtice interno (Figura 2d). Entretanto, esta oscilação é controlada devido ao fato deste ciclone ser simétrico. Assim, o vórtice mantém-se confinado. Nos resultados obtidos para o separador ciclônico proposto (Figuras 2a, 2b e 2c), observa-se que o vórtice pode ser estabilizado por um dispositivo limitador (mesa).

A Figura 2 representa o contorno da pressão estática nos ciclones avaliados. Esta é uma informação importante para se avaliar o comportamento do vórtice interno. Para uma distância do corpo cilíndrico em relação à mesa de 150 mm (Figura 2a), nota-se uma estrutura vorticial distorcida, indicando que o

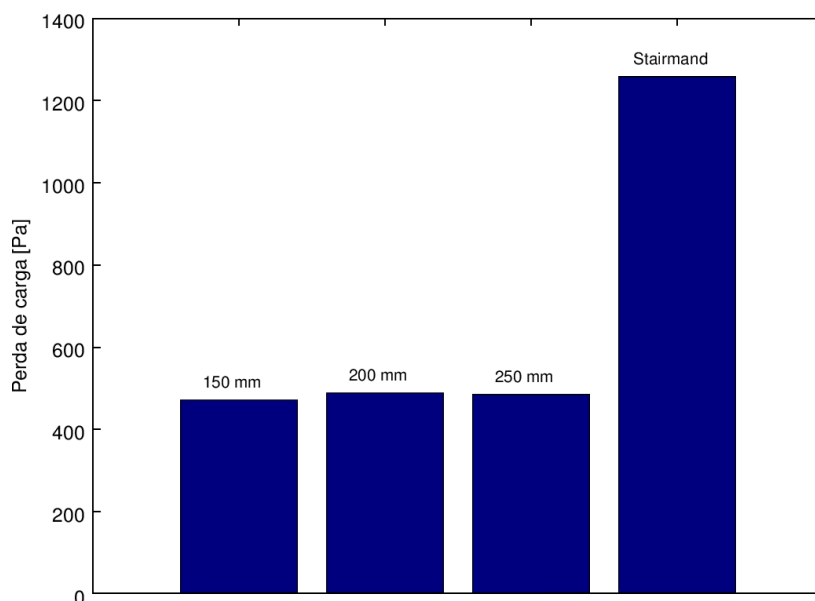
comprimento natural do vórtice para esta condição é maior que a distância limitada. Para a distância de 200 mm (Figura 2b), observa-se uma estrutura vorticial desenvolvida, indicando que esta é uma distância adequada para estabilidade do vórtice. Na distância de 250 mm (Figura 2c), nota-se uma estrutura vorticial oscilatória, indicando que o comprimento natural do vórtice está menor que a distância entre o corpo cilíndrico e a mesa limitadora. É evidente a versatilidade da nova geometria proposta, visto que a geometria convencional dificulta a instalação de um dispositivo limitador para controle da estabilidade do vórtice.

Figura 2 – Pressão estática média com (a) 150 mm; (b) 200 mm; (c) 250 mm; (d) Stairmand.



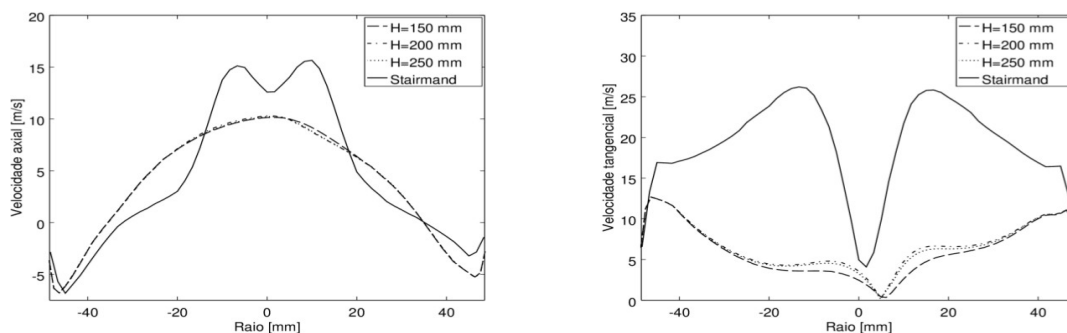
Avaliando-se a perda de carga, observa-se a vantagem em termos de economia energética para a nova geometria, com uma perda de carga muito menor diante do ciclone tipo Stairmand. Na Figura 3 são apresentadas as diferentes perdas de carga para cada ciclone, onde visivelmente a perda de carga para a nova geometria torna-se mais atrativa diante da perda de carga da geometria convencional.

Figura 3 – Perda de carga média (monofásico).



Os perfis de velocidade obtidos 2,0 cm abaixo do *vortex finder* (Figuras 4a e 4b) também apresentam distinção. No separador ciclônico sem cone, a velocidade axial é ligeiramente menor e com uma curva mais suave diante da geometria tipo Stairmand. A velocidade tangencial apresenta uma grande diferença entre o separador ciclônico sem cone e a geometria tipo Stairmand. A máxima velocidade tangencial atinge aproximadamente 12,0 m/s no separador ciclônico sem cone, com uma pequena variação causada pelas diferentes distâncias da mesa limitadora. No ciclone tipo Stairmand, a maior velocidade tangencial atinge aproximadamente 26,0 m/s. Isto deve-se à aceleração por parte da mudança de seção, o que colabora com o aumento da perda de carga. Ressalta-se que a velocidade na entrada do ciclone é a mesma para todos os casos.

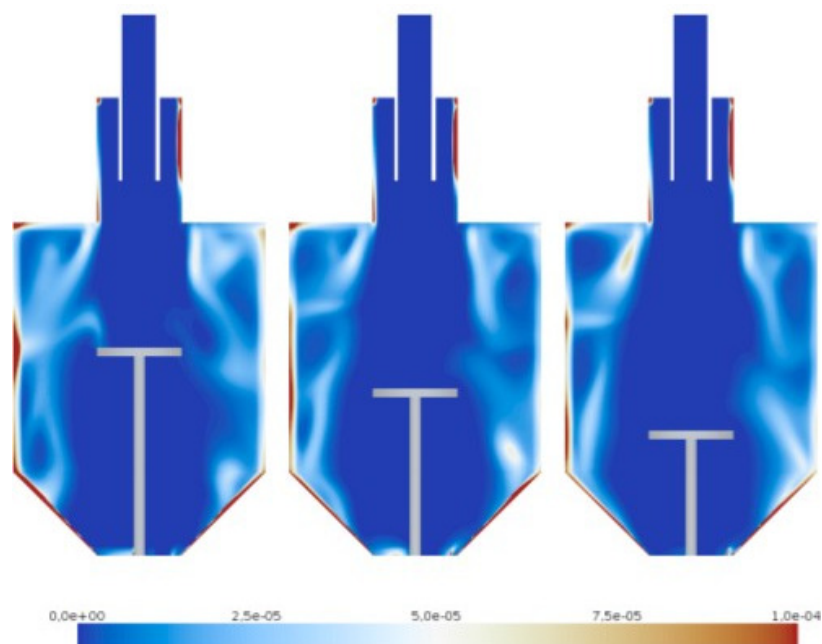
Figura 4 – Perfis de velocidade (a) axial e (b) tangencial, coletadas a 2,0 cm abaixo do *vortex finder*.



A Figura 5 ilustra a distribuição das partículas no interior do equipamento. Nota-se que as partículas são dispersadas da região do vórtice no momento em que saem do corpo cilíndrico e se chocam com as paredes do *hopper*, descendo sob a ação da força gravitacional. Após sair da região vorticial, as partículas tendem a acomodar-se no fundo do equipamento.

A eficiência de coleta para a nova geometria manteve-se alta em todas as configurações avaliadas, excedendo 99,99% de eficiência devido ao diâmetro médio de 55 μm ultrapassar o diâmetro de corte para este ciclone. A razão de carga considerada foi de 50 g/m^3 . Observou-se que o melhor resultado de eficiência de coleta foi para a distância de 200 mm do corpo cilíndrico em relação a mesa. Embora a eficiência tenha se mantido elevada, a distância de 150 mm apresentou uma eficiência de separação pouco menor; a distância de 250 mm teve uma eficiência próxima à obtida com a distância de 200 mm, porém também inferior a esta.

Figura 5 – Fração volumétrica de sólidos resultantes para mesa posicionada nas distâncias de (a) 150 mm, (b) 200 mm e (c) 250 mm.



5 CONCLUSÕES

Observou-se que o vórtice interno influencia na separação sendo que um vórtice estabilizado proporciona melhores resultados de eficiência. Há uma região onde a separação ocorre com maior eficiência e esta está relacionada com o comprimento natural do vórtice para as condições de alimentação utilizadas. A perda de carga no separador ciclônico sem cone é inferior à perda de carga de ciclones tipo Stairmand. A baixa perda de carga é comercialmente atrativa por economia energética e a mesa limitadora fornece flexibilidade operacional para diferentes condições de alimentação, visto que o comprimento natural do vórtice aumenta com o incremento na vazão de gás e diminui com a adição de particulado ao escoamento. Para trabalhos futuros, deve-se realizar simulações com diferentes diâmetros de partículas, pois esta é a característica de particulados em geral, para avaliar a eficiência de separação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a PETROBRAS pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, R. M. Fundamentals of cyclone design and operation in **Proceedings of the Australian Institute of Minerals and Metals**. v. 1, n. 152/153, p. 202-228, 1949.
- AVCI, A.; KARAGOZ, I.; SURMEN, A. Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators. **Powder Technology**. v. 1, n. 235, p. 460-466, 2013.
- BOYSAN, F.; AYERS, W. H.; SWITENBANK, J. A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. **Institution of Chemical Engineers**. v. 60, p. 222-230, 1982.
- BRYANT, H. S.; SILVERMAN, R. W.; ZENZ, F. How dust in gas affects cyclone pressure drop. **Hydrocarbon Process**. v. 1, n. 62, p. 87-90, 1983.
- DUGGINS, R. K.; FRITH, P. C. W. Turbulence anisotropy in cyclones. **Filtration and Separation**. p. 394-397, 1987.
- GIDASPOW, D. **Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions with applications**. San Diego: Academic Press, 1994.
- HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. **Gas cyclones and swirl tubes: principles, design, and operation**. Berlin: Springer, 2010.
- KARAGOZ, I.; AVCI, A.; SURMEN, A.; SENDOGAN, O. Design and performance evaluation of a new cyclone separator. **Journal of Aerosol Science**. v. 1, n. 59, p. 57-64, 2013.
- LAPPLE, C. E. Gravity and centrifugal separation. **American Industrial Hygiene Association Quarterly**. v. 11, p. 40-47, 1950.
- MEIER, H. F.; MORI, M. Gas-solid flow in cyclones: The eulerian-eulerian approach. **Chemical Engineering Science**. v. 22, p. 641-644, 1998.
- MEIER, H. F.; MORI, M. Anisotropic behavior of the reynolds stress in gas and gas-solid flows in cyclones. **Powder Technology**. v. 101, p. 108-119, 1999.
- PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer and fluid flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 15, p. 1787-1806, 1972.
- PERICLEOUS, K. A. Mathematical simulation of hydrocyclones. **Applied Mathematical Modelling**. v. 11, p. 242-255, 1987.
- QIAN, F.; ZHANG, M. Study of the natural vortex length of a cyclone with response surface methodology. **Computers and Chemical Engineering**. v. 29, p. 2155-2162, 2005.
- STAIRMAND, C. J. Pressure drop in cyclone separators. **Engineering**. v. 168, p. 409-412, 1949.