

ANÁLISE FLUIDODINÂMICA TRIDIMENSIONAL DE CICLONES E ASSOCIAÇÕES DE CICLONES

Guilherme Maciel, guilherme.maciel@ufu.br
Mariana Vieira Silva, mariana.silva@ufu.br
Cassius Ricardo Nascimento Ferreira, cassiusferreira@ufu.br
Marcelo Braga dos Santos, marcelo.bragadossantos@ufu.br
Valério Luiz Borges, valerioluizborges@ufu.br
Solidônio Rodrigues de Carvalho, solidonio@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121- Santa Mônica, Uberlândia-MG, 38408-100

Resumo. Neste trabalho estudou-se o uso de ciclones individuais e em série para a separação de partículas e aumento do tempo de residência dos gases em reatores termoquímicos. Tais reatores são utilizados na termodegradação de biomassa e produção de combustível, denominado gás de síntese, que consiste em uma mistura multifásica, apresentando partículas sólidas em meio ao gás. Tais partículas precisam ser removidas para melhorar a qualidade do combustível. Portanto, o uso de ciclones separadores individualmente ou em série foram estudados, os quais realizam um processo de filtragem aumentando o tempo de residência do gás dentro do reator. Foram realizados estudos numéricos através da simulação deste sistema no ANSYS® Fluent, considerando os modelos de turbulência k- ω SST, as leis de conservação de massa, calor e energia. Os resultados foram avaliados pela análise de perda de carga, curvas de velocidade e taxa de partículas filtradas. De forma isolada o ciclone axial apresentou melhor desempenho retendo um número maior de partículas. De forma conjunta o uso do ciclone axial combinado aos ciclones radiais, fez com que as partículas maiores ficassem retidas em sua maioria no ciclone axial, enquanto as partículas menores fossem totalmente removidas pelos ciclones radiais em série.

Palavras chave: ciclone radial, ciclone axial, simulação, partículas, tridimensional.

Abstract. In this work, the use of individual and series cyclones for separating particles and increasing the gases residence time in thermochemical reactors was studied. Such reactors are used in the thermodegradation of biomass and production of fuel, called synthesis gas, which consists of a multiphase mixture, presenting solid particles in the middle of the gas. Such particles need to be removed to improve fuel quality. Therefore, the use of separator cyclones individually or in series was studied, which perform a filtering process increasing the residence time of the gas inside the reactor. Numerical studies were carried out through the simulation of this system in ANSYS® Fluent, considering the SST k- ω SST turbulence models, the laws of conservation of mass, heat and energy. The results were evaluated by analyzing pressure drop, velocity curves and filtered particle rate. Isolated, the axial cyclone presented better performance, retaining a larger number of particles. Together, the use of the axial cyclone combined with the radial cyclones, meant that the larger particles were mostly retained in the axial cyclone, while the smaller particles were completely removed by the radial cyclones in series.

Keywords: radial cyclone, axial cyclone, simulation, particles, three-dimensional.

1. INTRODUÇÃO

O ciclone separador é um dispositivo para a separação da fase densa de um fluxo multifásico, pela ação de forças centrífugas (Karagoz, 2005). Seu funcionamento é baseado na transformação das forças de inércia do fluido em uma força centrífuga e que, por meio da geometria cilíndrica-cônica do aparelho, gera um vórtice ascendente que carrega a parte menos densa da mistura, enquanto a parte mais densa se mantém na parte inferior do ciclone.

Existem dois tipos principais de ciclones separadores, os com entrada tangencial, que são mais comuns, e os de entrada axial. No primeiro, o vórtice é induzido pelo fluxo ser tangente a parede interna do cilindro. Enquanto no segundo, o movimento centrífugo é induzido pelas palhetas que guiam o fluxo de entrada (Tsai et al, 2004).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo capaz de realizar o tratamento do gás oriundo de um reator termoquímico que processa resíduos. Este processo possui grande relevância ambiental, por ser capaz de reduzir

as concentrações de substâncias poluentes presentes no syngas (gás de síntese) obtido pelo processo de termodegradação, utilizado em ciclos termodinâmicos de geração de energia térmica e/ou elétrica. Desta forma, os ciclones apresentam um papel importante na retirada dos particulados presentes no syngas, permitindo a separação da fase sólida da fase gasosa, utilizada na geração de energia.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar, numericamente, a eficiência de ciclones axiais e radiais na retenção de particulados durante o processo de termodegradação em reatores termoquímicos de biomassa e produção de gás de síntese para a produção de energia térmica e elétrica.

Permitindo assim, avaliar a utilização deste conjunto de ciclones em reatores de maior escala ou com formatos diferentes, com o intuito de apresentar a mesma aplicação para variáveis e necessidades diferentes de projeto.

3. METODOLOGIA

Este trabalho, teve como premissa inicial avaliar o uso de ciclones associados em série visando criar uma cadeia de filtragem dentro de um reator termoquímico. Para isso, foi necessário fazer um estudo preliminar dos ciclones em geral e suas variações. Na literatura existem diversas configurações de ciclones, contudo neste estudo foram escolhidos o tipo de ciclone tangencial Lapple (Massarani, 2001), que é uma configuração padrão e teoricamente mais eficiente, e o ciclone axial, que é caracterizado por apresentar uma estrutura simplificada com baixo custo construtivo e maximização do espaço interno do reator. (Chen et al, 2021).

Para a validação do modelo proposto por Chen, foram realizadas duas simulações na interface ANSYS® Fluent (versão 2023 R1), a primeira utilizando a geometria radial análoga ao ciclone Lapple, conforme Fig. 1. E uma segunda, onde se manteve as bases do modelo de Lapple, alterando parte da geometria de entrada, onde se considerou uma entrada axial.

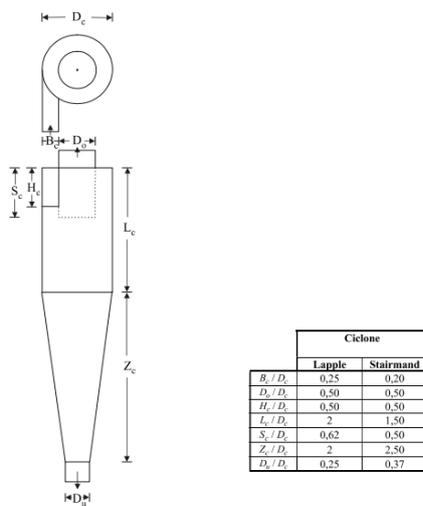


Figura 1: Referências construtivas para ciclones radiais (Massarani, 2001)

Ambos os ciclones foram dimensionados por meio de softwares de CAD, e a partir desses modelos foram elaborados um modelo numérico-computacional semelhante para cada, utilizando os modelos matemáticos de equações discretizadas, e um modelo computacional onde são definidos os parâmetros para a realização da simulação (R.G. Corrêa, 2022).

Foram desenvolvidos modelos numéricos em elementos finitos de ambos os ciclones. Para o modelo de turbulência utilizou-se a formulação k- ω -SST (Menter, 1994). Tal modelo, é uma combinação dos modelos k- ω (Wilcox, 1998) e o modelo k- ϵ (Launder e Spalding, 1974), tal formulação permite a solução de escoamentos próximos a paredes sem a necessidade de utilizar funções de amortecimento, conforme sugerido por Silveira Neto (2020).

Desta forma, o modelo se baseia em duas equações governantes, a equação de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e a equação de transporte para a frequência específica de dissipação (ω) (Eq.1 e Eq. 2). Além disso, para garantir o funcionamento do modelo também é usado o princípio de conservação da massa (Eq. 3).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j * \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta * k * \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j * \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\alpha \omega P_k}{k} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1-F_1) \alpha_\omega \omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$A_1 V_1 \rho - A_2 V_2 \rho = 0 \quad (3)$$

Nestas equações, ρ é a densidade do fluido, v é a viscosidade dinâmica, v_t é a viscosidade turbulenta, σ_k e σ_ω são coeficientes de Prandtl turbulento para k e ω , respectivamente, e P_k é a produção de energia cinética turbulenta. Enquanto os coeficientes α , β , α_ω e a função de mistura F_1 são parâmetros empíricos do modelo. Para as simulações realizadas, foram usadas todas as constantes do modelo SST-k- ω padrões de configuração do ANSYS®.

Na validação do modelo proposto, que considera dois modelos distintos de ciclone, foram adotados os seguintes parâmetros e condições de contorno: vazão mássica de 0.04 Kg/s e pressão nula na saída do ciclone. Desta maneira, seria possível avaliar a pressão de entrada, com base nos modelos utilizados, o que possibilitou determinar qual deles gastaria mais trabalho para realizar o mesmo transporte.

Após a verificação deste modelo, foram feitas alterações na geometria do ciclone axial, visando a otimização do espaço ocupado dentro do reator. As alterações de geometria consideram os ângulos de hélice, visto que a redução, geralmente, provoca um aumento na perda de carga do ciclone (Gong et al, 2012).

Posteriormente realizou-se a associação entre os ciclones. Devido a geometria dos bocais de entrada dos ciclones axiais serem complexas, dificultando a conexão entre os ciclones, optou-se pela utilização de ciclones radiais, simplificando desta forma a interligação do conjunto.

Para a realização da simulação deste acoplamento de 4 ciclones foram consideradas uma vazão de 0.1985Kg/s de ar e de 0.1073 Kg/s de partículas, as quais apresentam uma variação de 10 diâmetros entre 150 μ m e 50 μ m, distribuídas pelo modelo de distribuição granulométrica de Rosin-Rammler e com velocidades iguais a de entrada de ar, sendo todo o sistema aquecido a 500°C. As partículas são insufladas por um tempo de 0.1s permitindo assim a observação do comportamento de cada “grupo” delas, uma vez que essa determinação permite uma melhor visualização e identificação do funcionamento correto dos ciclones.

As adequações no modelo de acoplamento foram feitas tanto na entrada quanto na saída, diferenciando do modelo da Fig. 1. A entrada retangular foi substituída para um tubo com mesma área e as saídas foram trocadas para apresentar o mesmo diâmetro que a entrada do ciclone seguinte, reduzindo os custos de montagem. Foram realizados testes para garantir o pleno funcionamento deles com as mudanças e avaliadas as características do sistema após a associação.

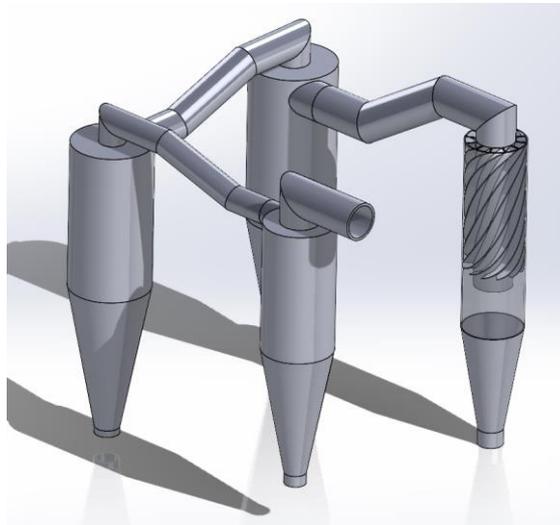


Figura 2: Geometria da associação de ciclones

4. Resultados

4.1. Comparação entre os ciclones

As Figuras 3 e 4 apresentam as linhas de corrente, coloridas pelas velocidades obtidas durante as simulações, dos ciclones radial e axial. Em ambos os casos foram utilizados a mesma vazão mássica, no entanto, as velocidades iniciais foram diferentes, sendo a do axial igual a 0.4265 m/s e a do radial 2 m/s devido a área da seção de entrada. O ciclone axial apresentou um maior campo de turbulência quando comparado ao modelo radial, e um pico de velocidade também maior, a diferença de pressão no ciclone axial de 9.9 Pa, enquanto o delta do tangencial foi de 9 Pa, ligeiramente menor.

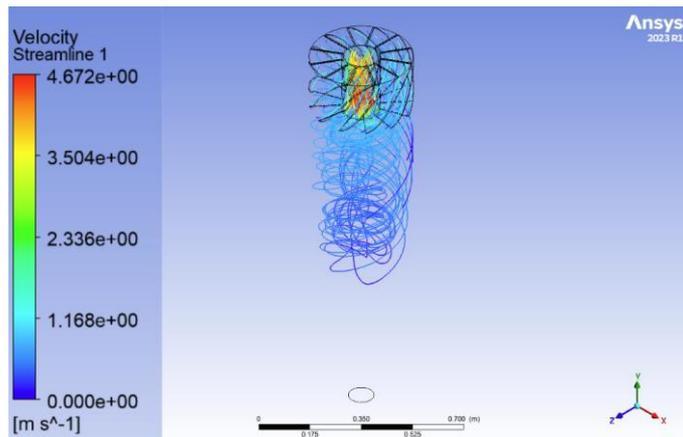


Figura 3: Linhas de corrente coloridas pelas velocidades no Ciclone Axial

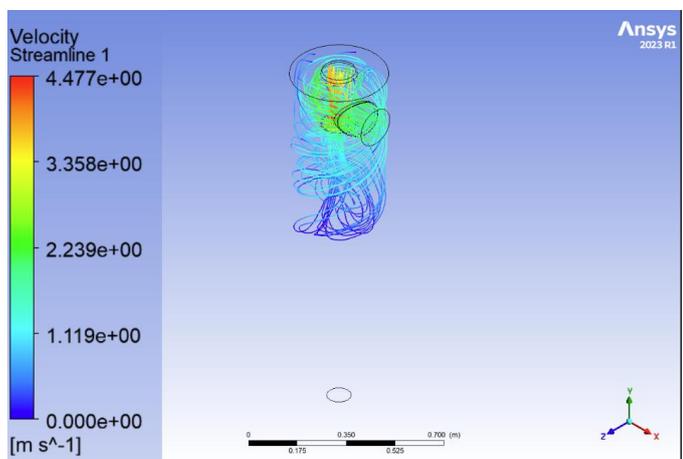


Figura 4: Linhas de corrente coloridas pelas velocidades no Ciclone Tangencial

4.2. Associação dos ciclones

Para a simulação dos 4 ciclones colocados em série, considerou-se uma velocidade de entrada de 17.78 m/s. A diferença de pressão encontrada para o sistema foi de 6762.63 Pa. A Fig. 5, apresenta as linhas de corrente, coloridas pelas velocidades, representando o fluxo de gás no interior dos ciclones e ao longo da tubulação que interliga os mesmos. Um aumento da velocidade pode ser observado principalmente nas saídas e entradas de cada ciclone, algo esperado devido à redução de área nestas regiões e à vazão mássica que se mantém constante, conforme demonstra a Tab. 1.

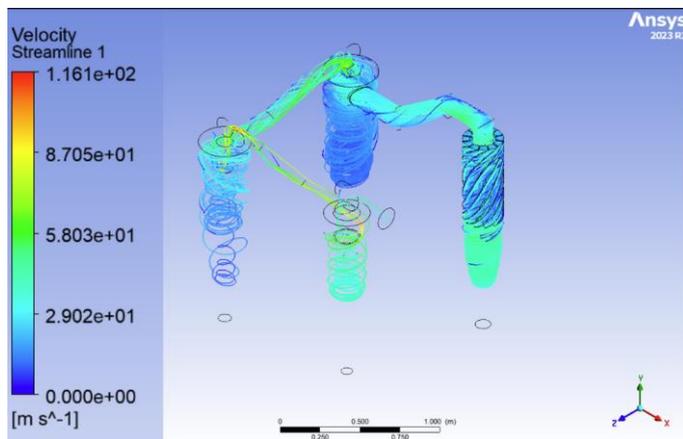


Figura 5: Linhas de corrente coloridas pelas velocidades na associação de ciclones

Vazão Mássica [Kg/s]	
Entrada	0.19853765
Saída	-0.1979386
Balanco	0.000599052

Tabela 1: Balanço de massa reportado pela plataforma após 80 iterações

As Figs. 6 e 7 demonstram a retenção de partículas ao longo dos 4 ciclones associados, sendo possível observar que partículas com maiores diâmetros são retidas em sua maioria no ciclone axial, e as partículas com menores dimensões conseguem seguir durante o conjunto de ciclones, sendo retidas nos dois primeiros ciclones radiais.

À partir da análise da Fig. 7 também é perceptível que não há partículas residuais no último ciclone. O que permite inferir que a associação de 4 ciclones proposta demonstra ser a mais correta, uma vez que todas as partículas foram retidas no conjunto até o terceiro ciclone, enquanto o último apresentaria um papel de segurança, garantindo a remoção de partículas menores que eventualmente poderiam escapar dos ciclones anteriores.

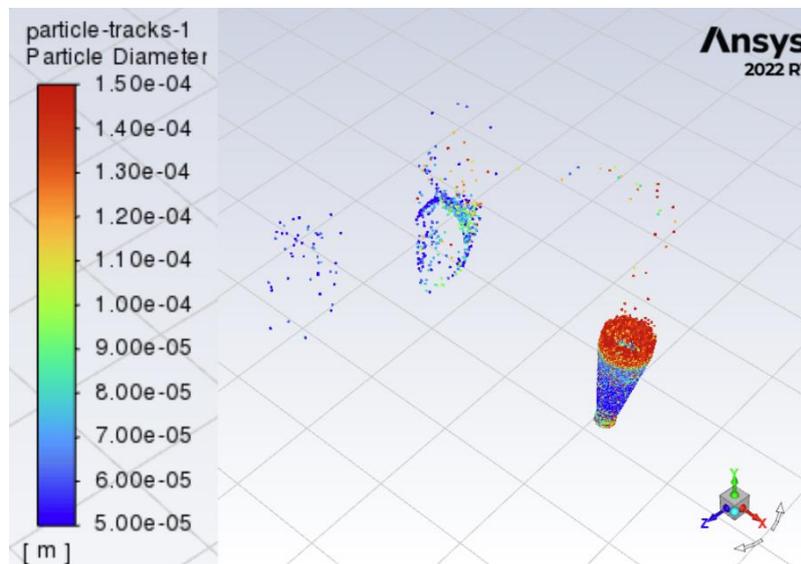


Figura 6: Medição do diâmetro das partículas e suas posições quando as partículas alcançam o terceiro ciclone

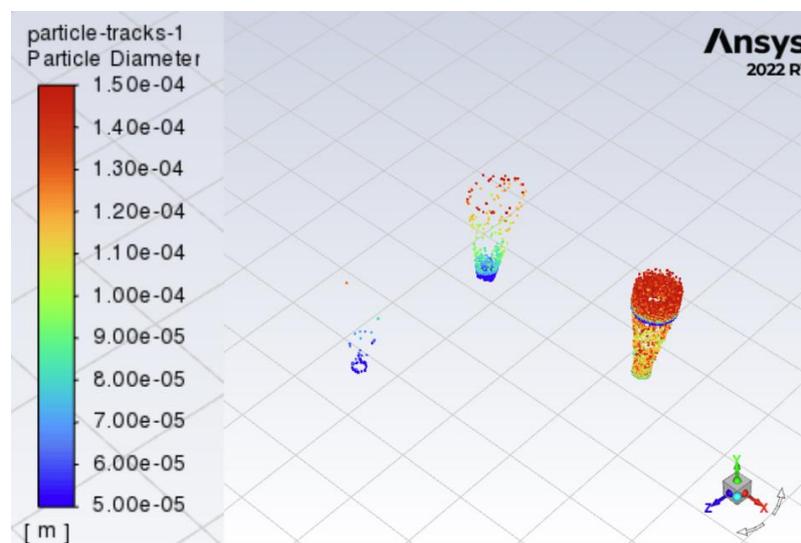


Figura 7: Medição do diâmetro das partículas e suas posições ao final da simulação

5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir, de forma isolada, que o ciclone axial apresenta um melhor desempenho em comparação aos ciclones radiais, por, apresentar uma maior velocidade e reter um número maior de partículas. Pela análise realizada pode-se inferir que o ciclone axial possibilita uma maior economia de energia ao transportar e separar partículas ao se comparar com o outro ciclone, devido a sua menor perda de pressão, que exige menos trabalho para o transporte do gás.

A utilização do ciclone axial combinado com os ciclones radiais permite uma maior retenção de partículas maiores, que em sua maioria são retidas no ciclone axial, enquanto as partículas menores seguem nos demais ciclones, removidas parcialmente pelo primeiro e completamente pelo segundo ciclone radial. Ademais, o último ciclone serviria como um aparato de segurança para garantir a limpeza do gás, ao garantir que eventuais partículas que escapassem do terceiro ciclone também fossem filtradas. Da mesma forma que este protegeria também contra partículas ainda menores as quais não foram analisadas neste estudo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Chen, X., Yu, J. e Zhang Y., 2021. "The use of axial cyclone separator in the separation of wax from natural gas: A theoretical approach". *Energy Reports*, Vol. 7, p. 2615-2624.
- Gong, G., Yang, Z. e Zhu, S., 2012. "Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator". *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, p. 3916-3930.
- Karagoz, I. e Avci, A., 2005. "Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators". *Aerosol Science and Technology*, Vol. 39, p. 857-865.
- Launder, B.E. e Spalding, D.B., 1974. "The numerical computation of turbulent flows". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, p. 269-289
- Massarani, G., 2001. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2º Edição
- Menter, F.R., 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*, Vol. 32, p. 1598-1605.
- R. G. Corrêa. "Proposta de um modelo de turbulência híbrido LES-URANS para escoamentos em ciclones". Dissertação de mestrado. UFU, 2022.
- Silveira Neto, A., 2020. *Escoamentos Turbulentos Análise Física e Modelagem Teórica*. Composer, Uberlândia, 1º Edição
- Tsai, C.J., Chen, D.R., Chien, H.M., Chen, S.C., Roth, J.L., Hsu, Y.D., Li, W. e Biswas, P., 2004. "Theoretical and experimental study of an axial flow cyclone for fine particle removal in vacuum conditions" *Journal of Aerosol Science*, Vol. 35, p. 1105-1118.
- Wilcox, D.C., 1998. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc., La Canada, California.