

Determinação da curva característica do número de Euler e do coeficiente global de troca térmica de uma nova configuração de ciclone

Determination of the Euler number characteristic curve and the overall heat exchange coefficient of a new cyclone configuration

DOI:10.34117/bjdv8n2-444

Recebimento dos originais: 07/01/2022

Aceitação para publicação: 28/02/2022

Daiane Ribeiro Dias

Mestre em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica, Uberlândia
MG, CEP : 38408-100

E-mail: daianedias2301@gmail.com

Grégori Ullmann

Mestre em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica,
Uberlândia - MG, CEP: 38408-100

E-mail: ullmann.g@ufu.br

Yanne Novais Kyriakidis

Doutora em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Rodovia BR-050, km 78 - Bloco 1DCG, Campus Glória, Uberlândia - MG,
CEP : 38410-337

E-mail: yanne@ufu.br

Danylo de Oliveira Silva

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica,
Uberlândia - MG, CEP: 38408-100

E-mail: danylo@ufu.br

Luiz Gustavo Martins Vieira

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica, Uberlândia
MG, CEP :38408-100

E-mail: luizgustavo@ufu.br

RESUMO

Ciclones são equipamentos normalmente utilizados na separação de partículas de uma corrente gasosa. Devido à sua geometria, o movimento do gás é turbulento, apresentando comportamento fluidodinâmico complexo, o que aumenta a viabilidade de utilização do ciclone como equipamento de mistura e troca térmica. Neste sentido, este trabalho teve como objetivos propor uma nova configuração de ciclone que promova maior troca térmica fluido-parede possível e determinar a curva característica, número de Euler e o coeficiente global de troca térmica da nova família de ciclone. Os resultados indicaram que a nova família de ciclone apresentava as seguintes proporções geométricas: $(D_o/D_c) = 0,21$; $(L_c/D_c) = (S_c/D_c) = 4,23$; $(D_i/D_c) = 0,125$; $(Z_c/D_c) = 2,67$ e $(D_u/D_c) = 0,17$. O ciclone proposto apresentou curva característica que corrobora com a literatura, em que a queda de pressão aumenta com incrementos na vazão de ar. O número de Euler apresentou valores entre 594052 e 49918. O coeficiente global de transferência de calor apresentou valores na faixa de 0,96 a 15,94 W/(m²°C). Portanto, o regime fluidodinâmico no interior do ciclone, associado à área útil de troca térmica, promoveu uma transferência de calor satisfatória entre as paredes do equipamento e o gás no escoamento interno.

Palavras-chave: ciclone, troca térmica, curva característica.

ABSTRACT

Cyclones are equipment commonly used in the separation of particles from a gas stream. Due to its geometry, the gas movement is turbulent, presenting a complex fluid dynamic behavior, which increases the feasibility of using the cyclone as mixing and thermal exchange equipment. In this sense, this work aimed to propose a new cyclone configuration that promotes greater fluid-wall heat exchange possible and to determine the characteristic curve, Euler number and overall heat exchange coefficient of the new cyclone family. The results indicated that the new cyclone family had the following geometric ratios: $(D_o/D_c) = 0.21$; $(L_c/D_c) = (S_c/D_c) = 4.23$; $(D_i/D_c) = 0.125$; $(Z_c/D_c) = 2.67$ and $(D_u/D_c) = 0.17$. The proposed cyclone presented a characteristic curve that corroborates with the literature, in which the pressure drop increases with increments in air flow. The Euler number presented values between 594052 and 49918. The overall heat transfer coefficient presented values in the range of 0.96 to 15.94 W/(m²°C). Therefore, the fluidodynamic regime inside the cyclone, associated with the useful heat exchange area, promoted a satisfactory heat transfer between the equipment walls and the gas in the internal flow.

Keywords: cyclone, heat exchange, characteristic curve.

1 INTRODUÇÃO

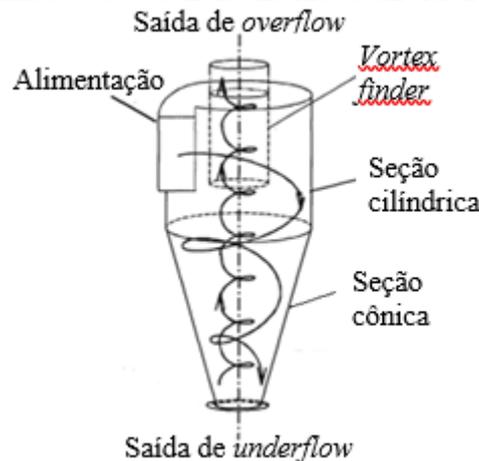
Ciclones são separadores centrífugos ordinariamente utilizados na separação de partículas líquidas ou sólidas presentes em uma fase gasosa contínua. Esses equipamentos são empregados em larga escala nas indústrias químicas, mineradoras, petroquímicas, farmacêutica etc.

Em geral, consistem na sua forma clássica de uma parte cilíndrica e uma cônica, com alimentação tangencial ao corpo cilíndrico e duas saídas orientadas no eixo central

do dispositivo. Uma saída de partículas, denominada *underflow*, então separada da corrente fluida, situa-se na parte inferior do dispositivo que dá acesso ao coletor de partículas. Por sua vez, a outra saída, denominada *overflow*, promove a descarga da corrente fluida com baixa concentração de partículas, geralmente as menores, pelo topo do equipamento (Cremasco, 2014). Apresenta-se um exemplo de um ciclone na Figura 1.

Apesar das características construtivas bastante simples, os separadores centrífugos são dispositivos caracterizados por apresentar escoamento de grande complexidade, anisotrópico e turbulento. Ao adentrar tangencialmente à região cilíndrica, o ar adquire aceleração centrífuga e realiza um movimento helicoidal (Gonçalves *et al.*, 2022; Cavalcanti *et al.*, 2019). Esse movimento acarreta a separação de partículas, que se dirigem para as paredes e, em seguida, para o *underflow*, sendo coletadas na parte inferior do equipamento e removendo o material particulado do gás.

Figura 1: Esquema simplificado do escoamento interno de um ciclone com entrada tangencial.



Fonte: Adaptado de Hoffmann; Stein (2008).

A depender do processo no qual o ciclone será empregado, diferentes relações geométricas, ou também chamadas de famílias, podem ser utilizadas. Além das famílias clássicas, Lapple e Stairmand, novos ciclones vêm sendo estudados e novas relações geométricas estão sendo propostas para atender as demandas industriais. Com o objetivo de melhorar a eficiência de separação, novos ciclones foram propostos por: Zhu *et al.* (2001), Caragoz *et al.* (2013); Safikhani; Mehrabian (2016) e Sun *et al.* (2019).

Independentemente do poder de separação de partículas dispersas em uma fase gasosa contínua, os ciclones podem ser também empregados como bons misturadores ou trocadores térmicos devido ao escoamento interno ou à área superficial, respectivamente. Com base nas relações geométricas entre as principais dimensões desse dispositivo, é

possível obter uma maior área de contato parede-fluido, assim como um satisfatório tempo de residência do gás. O parâmetro “tempo de residência” fornece o tempo médio em que o gás mantém contato com a parede do ciclone, auxiliando na interpretação física do fenômeno de troca térmica.

Nos processos de transferência de calor, a área útil de troca térmica entre o fluido refrigerante e equipamento é um fator de extrema importância. Essa característica, aliada ao tempo de residência satisfatório, e ao regime de escoamento altamente turbulento, favorecem a troca de calor entre o fluido interno e as paredes do equipamento.

A literatura relata estudos experimentais de troca térmica em ciclones e, entre eles, o trabalho de Peres (1997), que realizou um estudo experimental de troca térmica gás-parede, com e sem a presença de particulados, em ciclones tipo Lapple. Nesse estudo, ar quente foi introduzido no equipamento, juntamente com uma alimentação de sólidos. Trabalho similar ao de Peres foi realizado por Szekely e Carr (1966), que utilizaram uma manta de aquecimento na parte externa do ciclone para aquecer a carcaça e, conseqüentemente, o sistema fluido-partículas no interior do equipamento.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivos: (1) identificar uma família de ciclone que promova, simultaneamente, o máximo de tempo de residência do gás em seu interior com a máxima área superficial disponível para troca de calor, para condições experimentais de queda de pressão fixa; (2) determinar a curva característica (queda de pressão em função da vazão de ar) para essa nova família; (3) determinar o número de Euler e (4) determinar o coeficiente global de troca térmica do ciclone.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Configuração do Ciclone

A nova família de ciclones foi inspirada no trabalho de Salvador (2017). Para tanto, realizaram-se investigações da matriz de planejamento da autora, analisando critérios científicos, para identificação da melhor configuração geométrica para ser aplicada ao ciclone a ser usado como trocador de calor. Foram considerados critérios decisivos as geometrias que proporcionaram o maior tempo de residência do fluido interno e maior área superficial disponível. A condição operacional da autora foi a queda de pressão, mantida fixa para todos os hidrociclones.

Manufatura do ciclone

A construção do cilindro e tronco de cone, constituintes do corpo do equipamento, foi feita com chapa de alumínio meia dura apresentando 0,30 mm de espessura. Devido às facilidades de usinagem os dutos de alimentação e *overflow* foram construídos em PVC e a tampa do orifício de *underflow* do ciclone em acrílico. As variáveis geométricas do ciclone foram o diâmetro de *overflow* (D_o), o comprimento da parte cilíndrica (L_c), o comprimento do duto de *vortex finder* (S_c), o diâmetro da alimentação (D_i), o comprimento do tronco de cone (Z_c), o diâmetro de *underflow* (D_u) e o comprimento total do ciclone (L), conforme apresentado na Figura 2. Os valores dessas variáveis estão descritos Tabela 1.

Figura 2: Ciclone com dimensões utilizadas.

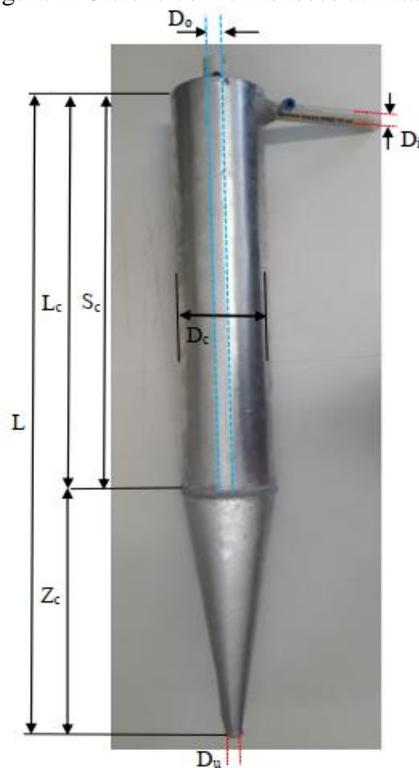


Tabela 1: Dimensões do ciclone.

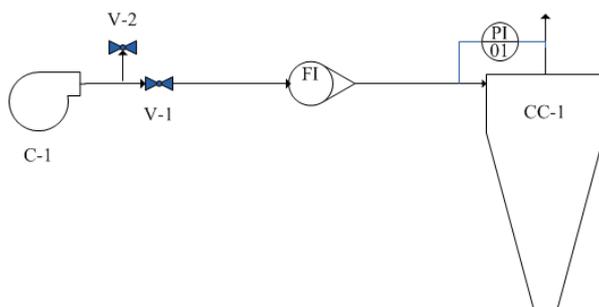
Dimensão	Valor (m)
D_c	0,120
D_o	0,025
L_c	0,508
S_c	0,508
D_i	0,015
Z_c	0,320
D_u	0,020
L	0,828

A área superficial disponível para a troca térmica foi de 0,2627 m².

Unidade Experimental

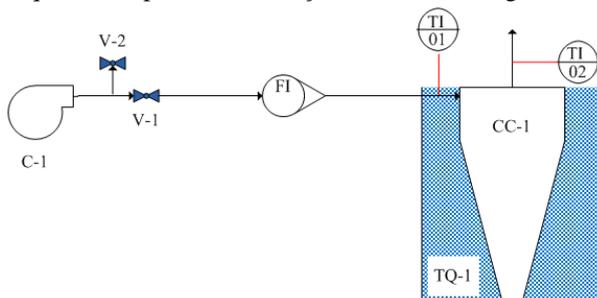
O fluxograma do processo para determinação da curva característica do ciclone é apresentado na Figura 3. O sistema era composto por uma chave de liga/desliga para o compressor C-1 (Modelo CR – 6, motor radial, potência 4.0 CV, vazão máxima 3,9 m³/min e pressão máxima 2500 mmCA), um ajuste de velocidade para este compressor, que é feito através de uma válvula tipo globo V-2 e uma válvula tipo globo V-1, que ficava totalmente aberta. Faziam parte ainda do sistema um rotâmetro (FI) que indicava os valores de vazão volumétrica de ar, um manômetro em U (PI-01) para medida de queda de pressão no ciclone.

Figura 3: Representação esquemática da unidade experimental para determinação da curva característica do ciclone.



A montagem experimental para determinação do coeficiente global de troca térmica do ciclone é similar à utilizada no levantamento da curva característica. Logo, apenas alguns detalhes são dados no ciclone, conforme apresentado na Figura 4. O ciclone foi inserido dentro de um recipiente com gelo TQ-1 e foram utilizados também dois termopares do tipo J (TI-01 e TI – 02), um para indicação da temperatura de entrada e outro para indicação da temperatura de saída do ciclone.

Figura 4: Representação esquemática para determinação do coeficiente global de troca térmica no ciclone.



Curva Característica do Ciclone

Nessa etapa levantou-se a curva de queda de pressão no ciclone, variando-se vazão de ar no equipamento. Inicialmente, o compressor (C-1) era ligado e a vazão de ar alimentada controlada por uma válvula (V-2). Uma vez que o sistema estivesse em condições estáveis de vazão de ar iniciavam-se as medidas experimentais. Assim, eram registrados os pares de vazão volumétrica de ar (Q) alimentada no ciclone e a respectiva queda de pressão ($-\Delta P$) quantificada pelo manômetro de tubo em U .

Número de Euler e Reynolds

O número de Euler (Eu) expressa a relação entre a queda de pressão e a energia cinética por volume, cuja determinação deu-se pela Equação 1.

$$Eu = \frac{-\Delta P}{\frac{\rho v_c^2}{2}} \quad (1)$$

Em que $-\Delta P$ é a queda de pressão entre a alimentação e o *overflow*, ρ é a densidade do fluido e v_c e a velocidade do fluido na seção cilíndrica, representada pela Equação 2.

$$v_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2} \quad (2)$$

O número de Reynolds (Re) foi determinado pela Equação 3.

$$Re = \frac{\rho v_c D_c}{\mu} \quad (3)$$

Em que μ é a viscosidade do fluido.

Coefficiente Global de Troca Térmica do Ciclone

Nessa etapa, levantou-se a curva do coeficiente global de troca térmica do ciclone, variando-se a vazão de ar alimentada no dispositivo.

Com o compressor ligado, a vazão de ar alimentada no ciclone era controlada por uma válvula (V-2). Uma vez que o sistema estivesse em condições estáveis de temperaturas de alimentação e de *overflow* iniciavam-se as medidas experimentais. Assim, a vazão volumétrica de ar alimentada no ciclone era registrada. Em seguida, as

temperaturas de alimentação e de *overflow* indicadas pelos termopares eram lidas e devidamente registradas.

O Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) foi determinado a partir da aplicação de balanços globais de energia no fluido interno no ciclone e na vizinhança (carcaça resfriada). Sabe-se que em estado estacionário, o calor sensível cedido pelo fluido é equivalente ao calor transportado do fluido para a carcaça resfriada. Logo, o coeficiente global de troca térmica, U , pôde ser estimado por:

$$U = \frac{mc_p(T_1 - T_2)}{A(T_m - T_0)} \quad (4)$$

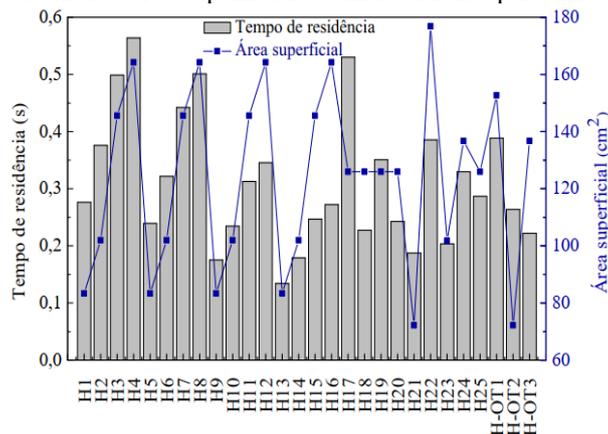
$$T_m = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)} \quad (5)$$

4 RESULTADOS

Configuração do ciclone

De posse dos resultados experimentais de Salvador (2017), determinaram-se o tempo de residência do fluido interno e a área superficial (lateral) de cada hidrociclone. Esses resultados estão apresentados na Figura 5.

Figura 5: Tempo de residência e área superficial dos hidrociclones para uma queda de pressão fixa.



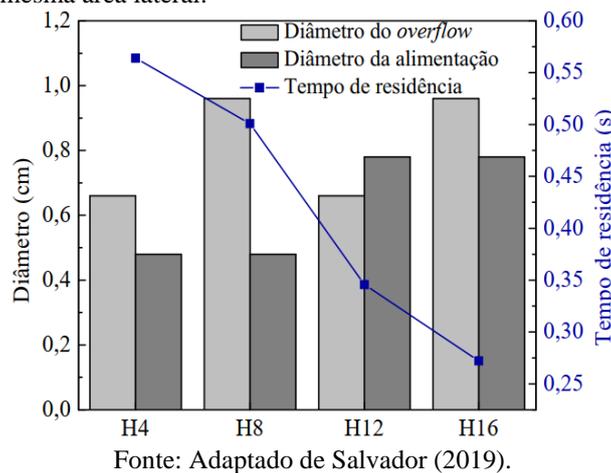
Fonte: Adaptado de Salvador (2019).

Analisando a Figura 5, verificou-se que o hidrociclone na configuração 4, destacou-se por apresentar o maior tempo de residência do fluido interno e grande área superficial. Portanto, essa configuração foi a escolhida, por analogia, para inspirar a nova

família de ciclones. No entanto, foram realizadas algumas modificações: (1) redução do diâmetro do duto de alimentação, (2) redução do diâmetro do duto de *overflow* e (3) prolongamento do *vortex finder* até o final da parte cilíndrica do equipamento. Essas modificações foram realizadas com o intuito de obter maior tempo de residência do ar no interior do dispositivo ciclônico.

Para explicitar a decisão de redução dos diâmetros de alimentação e do *overflow* para a nova família de ciclones, tomou-se o conjunto de dados de quatro hidrociclones com mesma área lateral que o de índice 4 e dispôs-se o comportamento do tempo de residência do ar interno em relação às mudanças de diâmetros de *overflow* e alimentação, conforme descrito pela Figura 6. Observou-se que o tempo de residência aumentava conforme os diâmetros de alimentação e *overflow* decresciam.

Figura 6: Influência dos diâmetros de alimentação e do *overflow* no tempo de residência médio do fluido para hidrociclones com mesma área lateral.



Apresentam-se na Tabela 2 as relações geométricas da nova família de ciclones proposta neste trabalho. É importante ressaltar que a escolha dessa configuração foi baseada nas condições operacionais de pressão constante e com fluido de trabalho líquido. No entanto, mudando-se o fluido, os parâmetros relacionados também mudam, mas as razões geométricas mantêm-se constantes.

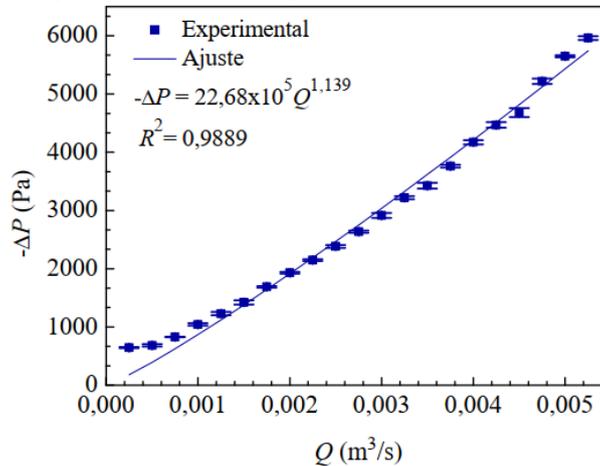
Tabela 2: Proporções geométricas da nova família de ciclone.

Relação	Valor
D_o/D_c	0,210
L_c/D_c	4,230
S_c/D_c	4,230
D_i/D_c	0,125
Z_c/D_c	2,670
D_u/D_c	0,170

Curva característica do ciclone

Apresentam-se os resultados das médias das triplicatas com seus respectivos erros padrões para a queda de pressão na Figura 7.

Figura 7: Queda de pressão ($-\Delta P$) em função da vazão volumétrica de ar (Q) do ciclone.

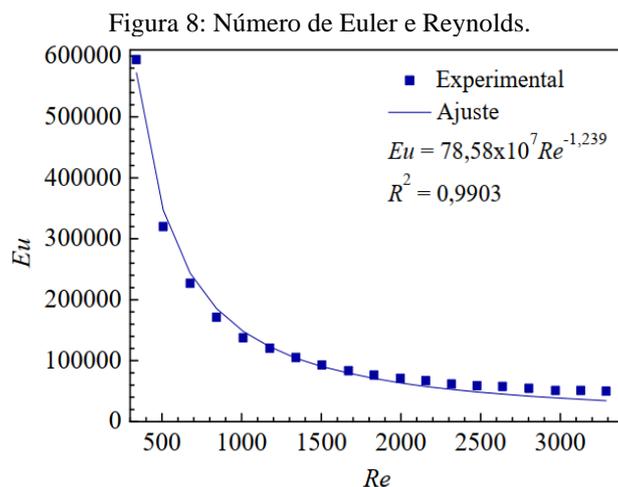


A queda de pressão indica a diferença entre a pressão estática na alimentação e saída de *overflow* do ciclone. Portanto, analisando a Figura 7 observou-se que a queda de pressão aumenta com o incremento da vazão de ar alimentada no ciclone, comportamento também observado por outros autores trabalhando com outros tipos de ciclones (Wang *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019). Isso pode ser explicado, basicamente, devido ao aumento de vazão de ar intensificar a componente tangencial de velocidade do fluido conforme indicado nos estudos de fluidodinâmica computacional desenvolvidos por Fu *et al.* (2019). Esse acréscimo, por sua vez, resulta em um aumento da diferença de pressão do equipamento.

A importância de conhecer a capacidade do ciclone em termos de vazão de ar (Q), bem como a queda de pressão ($-\Delta P$), proveniente da fluidodinâmica do dispositivo, é a possibilidade de determinar o valor da potência requerida pelo equipamento sob determinada condição técnico-operacional.

Número de Euler e Reynolds

Os resultados experimentais para o número de Reynolds estiveram entre 339,4 e 3288 para o ciclone e o número de Euler entre 594052 e 49918. De acordo com a Figura 8 o número de Euler apresentou comportamento não linear em função do número de Reynolds.



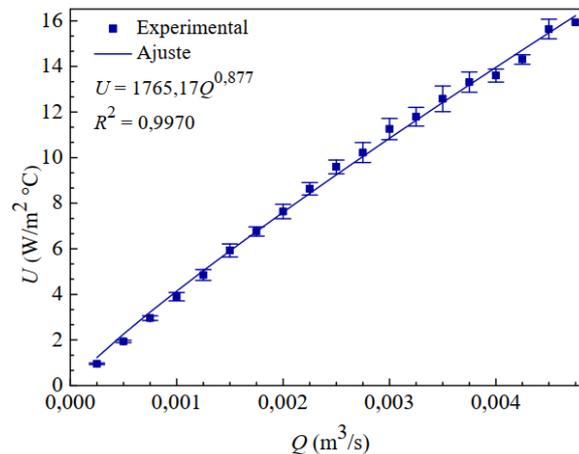
Sabe-se que o número de Euler está diretamente relacionado com a razão entre a queda de pressão e a vazão de alimentação do ciclone. Assim, a desejada diminuição do número de Euler foi obtida por incrementos na vazão de alimentação do ciclone e consequentemente no número de Reynolds. A importância de determinar o valor do número de Euler é que ele indica as necessidades energéticas, sendo este valor dependente da geometria do ciclone.

Coefficiente Global de Transferência de Calor do ciclone

O ajuste realizado para o modelo do coeficiente global de transferência de calor em função da vazão de ar da alimentação do ciclone é apresentado na Figura 9, em que se podem ver também as barras de erro padrão dos valores dos coeficientes de transferência de calor medidos experimentalmente.

Analisando os resultados apresentados na Figura 9, o coeficiente global de transferência de calor aumenta com incrementos na vazão de ar alimentado no ciclone. Em altas vazões de ar o escoamento interno fica mais turbulento, resultando em uma intensificação dos fenômenos de troca térmica entre fluido e parede do ciclone. Dessa forma, maiores taxas de transferência de calor são obtidas. Nota-se que o coeficiente global de transferência de calor apresentou magnitudes entre 0,96 e 15,94 W/(m²°C) para a faixa de vazão estudada.

Figura 9: Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) em função da vazão volumétrica de ar (Q) do ciclone.



O comportamento observado mostra que as características do escoamento interno em ciclones propiciam boa área de contato entre o fluido e as paredes do equipamento e bom tempo de residência, que juntos intensificam o processo de troca térmica devido aos satisfatórios coeficientes de película gerados.

5 CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que o ciclone a ser aplicado nos estudos de transferência de calor apresentem as seguintes proporções geométricas: $(D_o/D_c) = 0,21$; $(L_c/D_c) = (S_c/D_c) = 4,23$; $(D_i/D_c) = 0,125$; $(Z_c/D_c) = 2,67$ e $(D_u/D_c) = 0,17$.

A curva característica do novo ciclone apresentou comportamento que corrobora com a literatura. A queda de pressão aumenta com incremento na vazão de ar alimentada no dispositivo, indicando aumento das perdas por atrito interno.

O número de Euler para o ciclone apresentou valores entre 594052 e 49918. Tal parâmetro apresentou comportamento não linear em função do número de Reynolds.

O coeficiente global pôde ser satisfatoriamente estimado. O coeficiente global de transferência de calor do ciclone aumentou com incrementos na vazão volumétrica de ar alimentada no ciclone.

De maneira geral, o ciclone proposto neste trabalho mostrou-se adequado para sua utilização como trocador térmico, devido ao regime fluidodinâmico no interior do ciclone associado à área útil de troca térmica.

NOMENCLATURA

c_p – Calor específico [kJ/kg°C]

D_c – Diâmetro da seção cilíndrica [m]

D_i – Diâmetro do duto de alimentação [m]

D_o – Diâmetro do tubo de *overflow* [m]

D_u – Diâmetro do orifício de *underflow* [m]

FI – Indicador de vazão [--]

L – Comprimento total do ciclone [m]

L_c – Comprimento da parte cilíndrica [m]

m – Vazão mássica do fluido [kg/s]

PI – Indicador de pressão [--]

Q – Vazão volumétrica de ar [m³/s]

S_c – Tubo de *vortex finder* [m]

TI – Indicador de temperatura [--]

T_0 – Temperatura da mistura água-gelo [°C]

T_1 – Temperatura do gás na alimentação do ciclone [°C]

T_2 – Temperatura do gás na saída do ciclone [°C]

T_m – Temperatura média logarítmica do gás [°C]

U – Coeficiente Global de Troca Térmica [W/m²°C]

v_c – Velocidade do ar na seção cilíndrica [m/s]

Z_c – Comprimento do tronco de cone [m]

$-\Delta P$ – Queda de pressão [Pa]

ρ – Densidade do ar [kg/m³]

μ – Viscosidade do ar [kg/ms]

REFERÊNCIAS

- CARAGOZ, I.; AVCI, A.; SURMEN, A.; SENDOGAN, O. (2013). "Design and performance evaluation of a new cyclone separator", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 59, p. 57-64.
- CAVALCANTE, I. R. M.; STORTI, F. C.; COSTA FILHO, J. A.; NOLETO, L. G. (2019), Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone via CFD. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 9, p. 15362-15378, DOI:10.34117/bjdv5n9- 122
- CREMASCO, M. A. (2014), Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos (2ª ed.), Blucher, São Paulo.
- HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. (2008), Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design and operation (2ª ed.), Springer, New York.
- FU, S.; HUA, W.; YUAN, H.; LING, J.; SHI, Q. (2019). "Study on the light medium separation of waste plastics with hydrocyclones", *Waste Management*, Vol. 91, p. 54-61.
- GONÇALVES, S. M.; KYRIAKIDIS, Y. N.; SALVADOR, F. F.; BARROZO, M. A. S.; VIEIRA, L. G. M. (2022), "Análise do impacto da filtração sobre um hidrociclone concentrador de geometria otimizada", *Brazilian Journal of Development*, v. 8, p. 10018-10029, DOI: 10.34117/bjdv8n2-217.
- PERES, A. P., (1997), Estudo experimental da transferência de calor em ciclones. PPGEQ/UNICAMP – Campinas – SP. (dissertação de mestrado).
- SAFIKHANI, H.; MEHRABIAN, P. (2016). "Numerical study of flow field in new cyclone separators", *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, p. 379-387.
- SALVADOR, F. F., (2017), Otimização geométrica de hidrociclones com cilindros e cones permeáveis. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG. (dissertação de mestrado).
- SALVADOR, F. F.; BARROZO, M. A.S.; VIEIRA, L. G. M. (2019). Filtering cylindrical-conical hydrocyclone. *Particuology*.
- SUN, Z.; SUN, G.; PENG, P.; LIU, Q.; YU, X. (2019). "A new static cyclonic classifier: Flow Characteristics, performance evaluation and industrial applications", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 145, p. 141-149.
- SZEKELY, J.; CARR, R. (1966). "Heat transfer in a cyclone", *Chemical Engineering Science*, Vol. 21, p. 1119-1132.
- ZHOU, H.; HU, Z.; ZHANG, Q.; WANG, Q.; LV, X. (2019). "Numerical study on gas-solid flow characteristics of ultra-light particles in a cyclone separator", *Powder Technology*, Vol. 344, p.784-796.
- ZHU, Y.; KIM, M. C.; LEE, K. W.; PARK, Y. O.; KUHLMAN, M. R. (2001), "Design and performance evaluation of a novel double cyclone", *Aerosol Sci. Technol.* Vol. 34, p. 373-380.

WANG, S.; LI, H.; WANG, R.; WANG, X.; TIAN, R.; SUN, Q. (2019) “Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM”, *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, p. 227–239.