

Desenvolvimento de novas configurações para misturadores estáticos por meio da simulação computacional

Development of new settings for static mixers using computer simulation

Mikele Cândida Sousa de Sant'Anna

Mestre em Engenharia Química,
Universidade Federal de Sergipe.
São Cristóvão, SE – Brasil.
mikelecandida@gmail.com

Gabrielly Pereira da Silva

Engenheira Química, Universidade Federal de Sergipe.
São Cristóvão, SE – Brasil.
gabri3lly@gmail.com

Isabelly Pereira da Silva

Graduanda em Engenharia Mecânica, Universidade
Federal de Sergipe.
São Cristóvão, SE – Brasil.
bellynhaaa@msn.com

Ana Eleonora de Almeida Paixão

Doutora em Engenharia Química, Universidade
Federal de Sergipe.
São Cristóvão, SE – Brasil.
aepaixao@ufs.br

Gabriel Francisco da Silva

Doutor em Engenharia Química, Universidade
Federal de Sergipe.
São Cristóvão, SE – Brasil.
gabriel@ufs.br

Resumo

Os misturadores vortex possuem saliências triangulares em forma de espiral formadas na parede interna da tubulação, quando os fluidos escoam através desta região geram um fluxo em redemoinho, promovendo uma forte agitação. Esses fluxos promovem um maior contato entre os fluidos no interior do tubo misturador. Os misturadores vortex podem ser usados para sínteses de produtos alimentícios, fármacos, combustíveis, homogeneizar misturas físicas de compostos ou diluição de substâncias. Neste trabalho, objetivou-se estudar os perfis de mistura pela simulação de 14 configurações maiores do misturador vortex. Misturaram-se o óleo de soja e o etanol, usados na fabricação do biodiesel. O *software* utilizado foi o Ansys CFX 12.0. Avaliaram-se os valores da perda de carga, o volume total e com estes foram obtidos os gradientes de velocidade (parâmetro responsável por caracterizar o tipo de mistura). As configurações B1 e B4 apresentaram resultados significativos para o valor dos gradientes de velocidade $3926,24 \text{ s}^{-1}$ e $2536,77 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Palavras-chave: Biodiesel. CFX. Fluidodinâmica computacional. Grau de mistura. Misturadores estáticos.

Abstract

A vortex mixer comprises a series of spirally-shaped triangular protrusions on the inner wall of a pipe. When fluid flows through this region, it generates a swirl flow, which promotes vigorous stirring. This flow is responsible for promoting better contact between the fluids inside the tube mixer. The vortex mixer may be used for synthesizing food products, pharmaceuticals and fuels; homogenizing physical mixtures of compounds; and diluting substances. Our objective was to study mixing profiles through the simulation of 14 major configurations of the vortex mixer. The substances mixed were soybean oil and ethanol, used in the production of biodiesel. The software used was ANSYS CFX 12.0. We evaluated the values of load loss and total volume, which allowed obtaining the velocity gradients (the parameter for characterizing the type of mixture). Configurations B1 and B4 exhibited significant results for the value of the velocity gradient: 3926.24 s^{-1} and 2536.77 s^{-1} , respectively.

Key words: Biodiesel. CFX. Computational fluid dynamics. Degree of mixing. Static mixers.

1 Introdução

Os misturadores estáticos constituem-se de elementos defletores, montados no interior de trechos de tubos. A mistura ocorre pela ação de difusão do escoamento ao passar pelos elementos do misturador. A energia utilizada para a mistura é decorrente da perda de carga gerada pelo fluido ao percorrer os elementos de mistura por ação de bombeamento mecânico ou da gravidade (JOAQUIM JÚNIOR, 2008).

De acordo com a Empresa SNatural Ambiente (2011), o processo de mistura em misturadores estáticos pode ser compreendido quando se relacionam as variáveis de queda de pressão, distribuições de velocidade, tempo de residência, fator de atrito, viscosidade, densidade e outras relações de fase na homogeneização do misturador estático.

Segundo Etchells III e Meyer (2004), os misturadores estáticos podem ser utilizados em processos contínuos, em sistemas de alimentação uniforme, em reações com tempo de residência curto, com sólidos com pequenos tamanhos de partículas, em sistemas com altas pressões de operação, em sistemas com pouco espaço disponível, em locais de difícil acesso para manutenção.

Os misturadores estáticos consomem menos energia que os dinâmicos, uma vez que a energia utilizada no processo de mistura é decorrente da perda de carga gerada pela passagem do fluido pelos elementos de mistura (JOAQUIM JÚNIOR, 2008).

Segundo Joaquim Júnior (2008), os processos de mistura que usam dispositivos estáticos no interior de dutos de escoamento são uma opção aos processos convencionais. Contudo, sua aplicação ainda é restrita a alguns procedimentos específicos por questões tecnológicas e, principalmente, pelo pouco conhecimento de técnicos e engenheiros dos fenômenos físicos que regem sua aplicabilidade. A inexistência de tecnologia e co-

nhecimento nacional nessa área impõe a dependência diante das empresas estrangeiras, encarecendo e dificultando sua aplicação. Na última década, técnicas computacionais, com destaque para a Fluidodinâmica Computacional (CFD), têm sido utilizadas para o projeto e otimização de diferentes dispositivos, a exemplo, dos misturadores estáticos.

Para Fernandes (2005), outro fator importante a considerar é que a fluidodinâmica computacional permite visualizar os padrões de fluxo promotores da mistura, possibilitando o aprimoramento de geometrias, o desenvolvimento de novos misturadores e o entendimento dos padrões de fluxo que governam o processo de mistura.

A simulação computacional permite visualizar os perfis de escoamentos, entre outras características, antes que os equipamentos sejam construídos; com isso, é possível avaliar o desempenho dos equipamentos simulados, fazer alterações e otimizações sem maiores perdas de tempo.

O objetivo deste trabalho foi realizar 14 simulações, aumentando o tamanho das geometrias ótimas do misturador vortex, desenvolvido por Sant'Anna (2012), avaliando a variação no valor do gradiente de velocidade e possibilitando a usinagem do equipamento.

2 Fundamentação teórica

2.1 Fluidodinâmica computacional (CFD)

A CFD é a análise de sistemas envolvendo o escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995; RAMIREZ, 2009).

A CFD é definida por Fontes et al. (2005) como o conjunto de técnicas de simulação computacional usadas na análise de fenômenos físicos ou físico-químicos associados aos escoamen-

tos. O uso dessas técnicas tem-se difundido em diversas áreas de estudo nos últimos anos e permite tais análises sem as desvantagens de custo alto e tempo demasiado longo de experimentos laboratoriais (SANTOS; MEDRONHO, 2007; GUIDOLINI, 2009).

Existem diferentes pacotes computacionais para CFD, uns são para construção de geometria, como o ICFM CFD, outros já são mais completos, tais como o FLUENT® e o CFX®.

O CFX® é um *software* de CFD integrado, no qual é possível construir a geometria, fazer a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar posteriormente a simulação, sendo utilizado para a simulação de diversos tipos de escoamentos.

Como menciona Freitas (2009), o pacote computacional ANSYS CFX é composto basicamente de cinco programas que são: o *Design Modeler*, para a construção das geometrias e definição do domínio, no qual as equações de transferência de fluidos são resolvidas e obtidas as soluções; o *Meshing App*, para a geração dos volumes finitos ou elementos da malha numérica, em que podem ser criadas diferentes secções, cujo objetivo é encontrar o melhor resultado com o menor número de elementos; o CFX-Pre, para a definição do modelo físico, propriedades dos materiais ou condições de contorno, ou seja, o ajuste dos parâmetros de simulação; o CFX-Solver, para a resolução das equações e obtenção dos resultados, que podem ser obtidos utilizando um ou vários processadores; o CFX-Post para a análise dos resultados, que processa e apresenta os dados graficamente, podendo o usuário criar diferentes tipos de figuras e gráficos para melhor análise dos resultados.

Herckert e Neto (2004) referem que o CFX é um *software* comercial, modelo “caixa-preta”, mas apresenta uma boa interface *software*-usuário, tendo o usuário a possibilidade de incluir sub-

rotinas computacionais escritas em linguagem Fortran, e, além disso, apresenta a flexibilidade da inclusão de equações para o cálculo de certas variáveis. Para realizar os cálculos das equações envolvidas no fenômeno estudado, o CFX utiliza o método dos volumes finitos.

2.2 Método dos volumes finitos

Neste método, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas de elementos. As equações são discretizadas e resolvidas numericamente em cada elemento. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos de todo o domínio podem ser obtidos. Desse modo, pode-se obter uma imagem completa do comportamento do escoamento (ANSYS INC, 2011).

Os métodos numéricos têm o objetivo de resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Algumas de suas vantagens, em relação a outros métodos, é que ao criar suas equações aproximadas, esse método realiza um balanço da propriedade em nível de volumes elementares que devem ser satisfeitos para qualquer tamanho de malha, ou seja, todos os princípios de conservação podem ser checados em uma malha grosseira, tornando as execuções no computador mais rápidas (MALISKA, 1995).

2.3 Parâmetros de eficiência de mistura

Segundo Etchells III e Meyer (2004), todos os misturadores estáticos utilizam o princípio de divisão do escoamento em correntes secundárias, as quais são distribuídas radialmente e recombinadas em uma sequência reordenada.

O número de camadas do escoamento é aumentado e sua espessura é diminuída a cada passagem pelos sucessivos elementos do misturador.

2.3.1 Perda de carga

Godfrey (1985) refere que a energia para a mistura é decorrente da perda de carga gerada pela passagem do fluido pelos elementos de mistura.

Rauline et al. (1998) definiram um fator (Z) para correlacionar a perda de carga gerada pelo misturador estático com a perda de carga gerada através do tubo vazio, nas mesmas condições de escoamento (Equação 1):

$$Z = \frac{\Delta P_{\text{misturador}}}{\Delta P_{\text{vazio}}} \quad (1)$$

Outro modo, segundo Rauline et al. (1998), é utilizar o fator de fricção $\phi/2$ ou o Número de Newton, Ne (Equação 2):

$$Ne = 4 \frac{\phi}{2} = \frac{\Delta P \cdot D}{\rho v^2 L} = \frac{\text{constante}}{Re} \quad (2)$$

em que L é o comprimento do misturador estático.

Rauline et al. (1998) citam que o produto $NeRe$ (K_p) é usado analogamente ao número de potência definido para os agitadores mecânicos convencionais. A perda de carga é obtida pela Equação 3:

$$\Delta P = K_p \frac{\mu v L}{D^2} = K_p \mu \frac{4Q}{\pi D^4} L \quad (3)$$

sendo Q a taxa de fluxo volumétrico ou capacidade efetiva.

De acordo com Etchells III e Meyer (2004), tanto em regime laminar como em turbulento, a adição de elementos defletores presentes nos misturadores estáticos aumenta a perda de carga gerada, demandando energia para que o efeito de mistura seja obtido. O valor do aumento na perda de carga gerado pelos elementos de mistura, em

relação à perda de carga gerada pelo tubo vazio, pode chegar a centenas de vezes, em decorrência da geometria dos elementos e do número de Reynolds do escoamento. Portanto, é necessário utilizar a energia de pressão para alcançar a mistura no interior do tubo. Quanto menor o tempo de mistura desejado, maior será a taxa de dissipação de energia.

2.3.2 Gradiente de velocidade

O gradiente de velocidade (G) é um parâmetro que avalia indiretamente o padrão de escoamento em unidades de mistura, tais como os misturadores estáticos. Esse gradiente é proporcional ao grau de agitação do sistema. A equação geral de cálculo de G , Equação (4), foi desenvolvida em 1943 por Camp e Stein apud Camp (1953), levando em conta a deformação de um elemento de volume de água devido às tensões tangenciais que atuam nesse elemento.

$$\Phi = \mu G_p^2 = \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

em que:

ϕ = trabalho realizado pelas forças viscosas, por unidade de volume, por unidade de tempo ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$);

μ = viscosidade absoluta ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);

G_p = gradiente de velocidade absoluto no ponto (s^{-1});

u, v e w = componentes da velocidade nas direções x, y e z , respectivamente ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Ao longo de uma câmara de mistura, os valores pontuais do gradiente de velocidade variam consideravelmente. Contudo, em regime estacionário, pode-se definir um gradiente médio de velocidade, que corresponde ao valor médio do tra-

balho ao longo do reator. Com isso, o gradiente médio pode ser expresso segundo a Equação (5).

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

(5)

sendo:

P = Potência dissipada na mistura (W);

V = volume da câmara (m³);

μ = viscosidade absoluta (kg.m⁻¹.s⁻¹);

A potência dissipada na mistura em misturadores estáticos pode ser definida como a perda de carga gerada no escoamento multiplicada pela vazão volumétrica do fluido. Dessa forma, a Equação (6) pode ser expressa em termos da vazão volumétrica e perda de carga:

$$G = \sqrt{\frac{Q \cdot \Delta P}{\mu V}}$$

(6)

Esta equação permite obter um valor médio para o gradiente de velocidade de um misturador estático. Entretanto, na prática, observa-se uma elevada variação do gradiente de velocidade ao longo do misturador. Essa variação é proporcionada pela própria mudança de direção imposta à corrente líquida, pois, de acordo com Camp (1953), a maior parte da perda de carga ocorre nas mudanças de direção impostas ao fluxo, fazendo com que os gradientes de velocidade sejam muito maiores nessas regiões e pouco significativos ao longo do misturador.

Segundo Metcalf e Eddy (1991), valores típicos de gradiente de velocidade para mistura rápida, para contato inicial efetivo e dispersão de produtos químicos está na faixa de 1500-6000s⁻¹ para um tempo de retenção menor que um segundo.

De acordo com Haarhoff e Van Der Walt (1998), a interpretação física do valor de G , no entanto, não é um gradiente de velocidade, mas mais propriamente, a raiz média da taxa de dissipação de energia por unidade de volume. Desse modo, a Equação (6) também pode ser escrita em termos da dissipação de energia por unidade de volume (Equação 7).

$$G = \sqrt{\rho \frac{\epsilon}{\mu}}$$

(7)

sendo:

ϵ = taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m².s⁻³);

μ = viscosidade dinâmica da água (kg.m⁻¹.s⁻¹);

ρ = massa específica da água.

3 Metodologia

3.1 Software e Hardware

O *software* comercial utilizado foi o ANSYS CFX 12.1, que usa o método dos volumes finitos para a simulação numérica. Nessa técnica, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas de volumes de controle. As equações de conservação são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle, obtendo-se como resultado uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos do domínio.

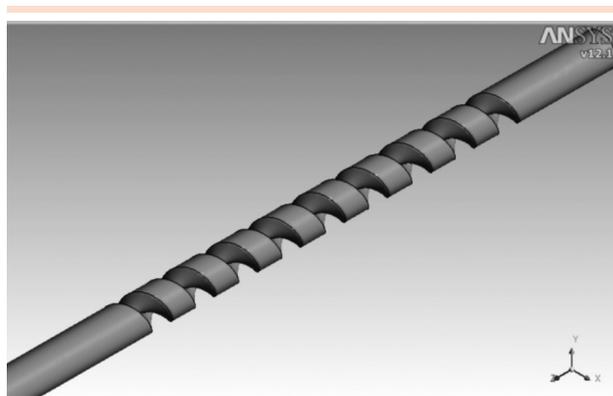
As simulações foram realizadas em um computador com configuração básica de processador de oito núcleos de 2,32 GHz da Intel (Core i7) e memória RAM de 4 Gb.

3.2 Dados do misturador

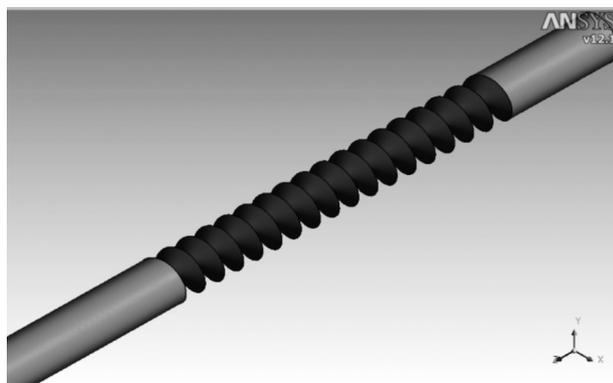
Devido às limitações tecnológicas dos equipamentos que estavam disponíveis para fabricação dos misturadores, as configurações ótimas

do misturador vortex (Figura 1) não puderam ser construídas.

As configurações ótimas desenvolvidas por Sant'Anna (2012) foram obtidas por meio da simulação de 27 configurações de um planejamento fatorial 2^4 , com três pontos centrais e oito pontos axiais, variando o comprimento equivalente do misturador (L), espessura das saliências (e), altura das saliências (h) e a distância entre as saliências (p) para obtenção do gradiente de velocidade como resposta.



(a)



(b)

Figura 1: Representação de duas configurações ótimas do misturador vortex

Fonte: Sant'Anna (2012).

A geometria do misturador vortex (Figura 2) é constituída de uma série de saliências triangulares em forma de espiral formadas na parede interna da tubulação, quando os fluidos escoam através desta

região, geram um fluxo em redemoinho, promovendo uma forte agitação (Sant'Anna, 2012).

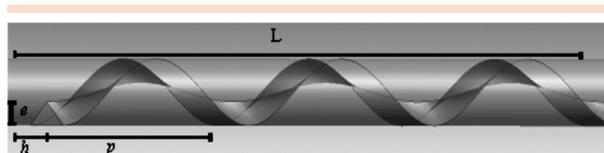


Figura 2: Representação das variáveis do misturador vortex

Fonte: Sant'Anna (2012).

Neste trabalho, foram realizadas novas simulações para a construção de configurações maiores, possibilitando a usinagem do equipamento. Nessa etapa, utilizaram-se, como base, as configurações ótimas do misturador vortex (intituladas neste estudo de A0 e B0).

A Tabela 1 descreve as dimensões utilizadas nas configurações ótimas; e nas 14 simuladas.

Tabela 1: Modificações na geometria

Modelos ótimos	BASE (cm)	0	1	2	3	4	5	6	7
A	D	1,27	5,08	2,54	5,08	5,08	2,54	2,54	5,08
	L	15,24	60,96	30,48	60,96	60,96	30,48	15,24	30,48
	e	0,55	2,2	1,1	1,1	0,55	0,55	0,55	0,55
	p	0,8	3,2	1,6	1,6	0,8	0,8	0,8	0,8
	h	1,69	6,76	3,38	3,38	1,69	1,69	1,69	1,69
B	D	1,27	5,08	2,54	5,08	5,08	2,54	2,54	5,08
	L	10,16	40,64	20,32	40,64	40,64	20,32	10,16	20,32
	e	0,45	1,8	0,9	0,9	0,45	0,45	0,45	0,45
	p	0,6	2,4	1,2	1,2	0,6	0,6	0,6	0,6
	h	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

3.3 Teste de malha

A malha é a principal responsável pela qualidade da solução, e deve-se atentar à sua construção, a fim de que ela não influencie no resultado, sendo, tão somente, um instrumento para obtê-lo. Devido a isso, realizou-se um teste de malha para garantir que a malha não estava influenciando nos resultados. Na Tabela 2, estão representadas as condições de contorno utilizadas nas simulações.

Tabela 2: Condições de contorno utilizadas no teste de malha

Variáveis	Condições
Número de Reynolds (óleo)	4000
Fase óleo	Fluido contínuo
Fração molar inicial do óleo	0,5
Fase álcool	Fluido disperso
Fração molar inicial do álcool	0,5
Diâmetro da gota dispersa (álcool)	0,055 mm ⁽¹⁾
Modelo de superfície livre	Nenhum
Homogeneidade	Não homogêneo
Modelo de turbulência	Contínuo (óleo): k- ϵ Disperso (álcool): Nenhum
Coefficiente de tensão superficial	0,0292 N/m ⁽²⁾
Força de arraste	Ishii-Zuber
Modelo matemático	Euleriano
Esquema de interpolação	<i>Upwind</i>
Critério de convergência final	10 ⁻⁴ <i>Root Mean Square</i> (RMS)

Fonte : ⁽¹⁾ Allen et al. (1999); ⁽²⁾ Stamenkovic et al. (2007 e 2008).

Para a parede, recomenda-se *free slip* (condição em que há deslizamento) (ANSYS INC, 2011), para as partículas; e *no slip* (condição de não deslizamento), para o fluido contínuo. A implementação da condição de não deslizamento faz com que o fluido, imediatamente junto à parede, tenha velocidade igual a ela, sendo as paredes estáticas nas simulações realizadas. As propriedades físicas das substâncias estão descritas na Tabela 3.

4 Resultados e discussão

4.1 Teste de malha

O teste de malha foi realizado utilizando quatro níveis de refinamento crescente. A malha utilizada é composta por elementos tetraédricos, contendo camadas de células prismáticas próximo às paredes. Dados estatísticos das malhas refina-

Tabela 3: Propriedades físicas das substâncias

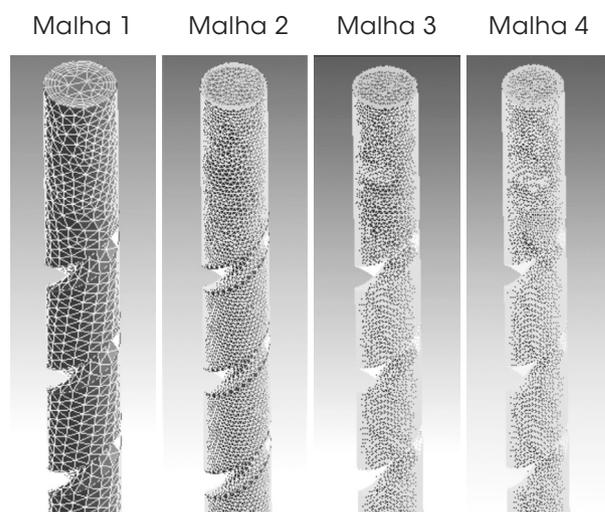
	Óleo de soja	Metanol
Massa Molar (kg/kmol)	873 ⁽¹⁾	32,04 ⁽³⁾
Densidade (kg/m ³)	919 ⁽²⁾	791 ⁽³⁾
Viscosidade (Pa.s)	0,059 ⁽²⁾	0,594 x 10 ⁻³ ⁽³⁾

Fonte: ⁽¹⁾Demirbas (2005); ⁽²⁾Santos (2009); ⁽³⁾ Banco de dados do CFX.

das são apresentados na Tabela 4. A Figura 3 ilustra o desenho comparativo do refino nas malhas; e a Figura 4, a malha 3.

Tabela 4: Estatísticas das malhas

Malha	1	2	3	4
Número total de nós	31373	198884	262829	347642
Número total de tetraedros	34535	412398	594249	868269
Número total de pirâmides	763	9	0	0
Número total de primas	45023	232527	292130	360710
Número total de elementos	80321	644934	886379	1228979

**Figura 3: Desenho comparativo do refino nas malhas**

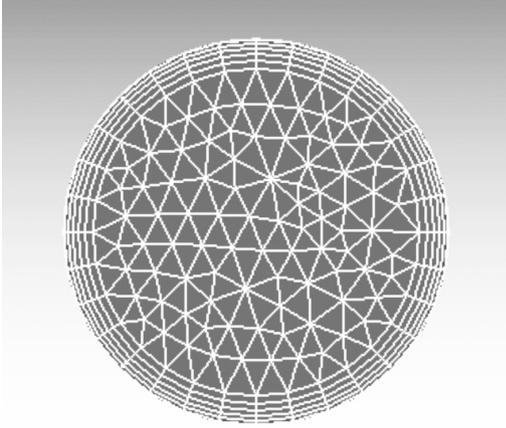


Figura 4: Desenho demonstrativo do refino na malha 3

Para analisar a melhor malha, foi observado o perfil radial de velocidade tangencial do óleo, uma vez que essa velocidade determina o campo centrífugo no interior do misturador, ou seja, o poder de mistura do equipamento.

Pode-se observar, no gráfico da velocidade tangencial em função do raio do misturador, para as diferentes malhas testadas (Figura 5), que as curvas das malhas 3 e 4 estão bem próximas, quase coincidentes. Optou-se, então, pela malha 3 em virtude dessa malha apresentar um menor número de elementos.

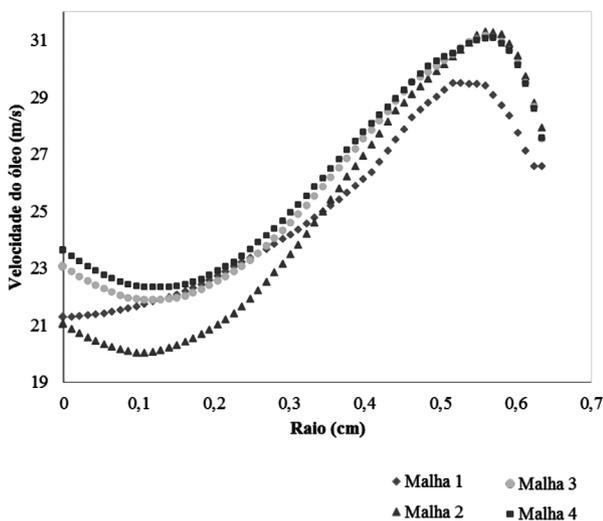


Figura 5: Gráfico da velocidade tangencial em função do raio do misturador

4.2 Resultados das simulações numéricas

As simulações realizadas e os resultados obtidos para os valores de volume (m^3), perda de carga (Pa) e gradiente de velocidade ($G^{s^{-1}}$) estão descritos na Tabela 5, sendo os valores satisfatórios. Verificou-se que entre as geometrias desenvolvidas as configurações B1 e B4 apresentaram valores significativos para o valor do gradiente de velocidade $3926,24 s^{-1}$ e $2536,77 s^{-1}$, respectivamente.

Tabela 5: Resultados das simulações para obtenção das geometrias usináveis

Simulações	Volume (M^3)	Perda de carga (PA)	Gradiente de velocidade ($G^{s^{-1}}$)
A0	9,91E-05	52521,18	1765,70
B0	9,77E-05	373441,18	4741,79
A1	1,39E-03	801,59	465,78
A2	3,75E-04	1345,54	411,02
A3	3,75E-04	1345,54	1162,53
A4	1,54E-03	1448,08	595,03
A5	3,84E-04	3460,07	651,09
A6	3,97E-04	1942,03	479,55
A7	1,60E-03	786,97	430,50
B1	1,23E-03	50571,45	3926,24
B2	3,65E-04	16054,47	1438,96
B3	1,43E-03	8512,08	1496,71
B4	1,54E-03	26328,15	2536,77
B5	3,85E-04	46520,59	2384,61
B6	3,95E-04	28539,99	1843,07
B7	1,60E-03	7742,10	1351,62

Mesmo com a diminuição no valor do gradiente de velocidade, a geometria B1 e B4 apresentaram um grau de mistura alto, pois se encontra no intervalo $1500-6000s^{-1}$ de mistura rápida para dispersão de produtos químicos, segundo Metcalf e Eddy (1991).

A Figura 6 apresenta o perfil ao longo do misturador B1; e a Figura 7, as linhas de fluxo da velocidade do óleo ao longo do misturador B1.



Figura 6: Perfil da fração molar de óleo na geometria B1

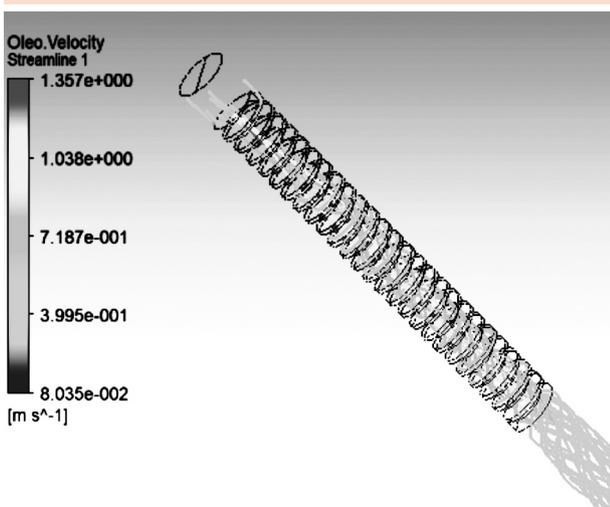


Figura 7: Linhas de fluxo da velocidade do óleo ao longo do misturador B1

Observando-se as Figuras 6 e 7, é possível perceber que mesmo modificando as medidas específicas da configuração ótima do misturador vortex, pode-se visualizar que os fluidos escoam em fluxo de redemoinhos, os quais facilitam o aumento do contato entre os reagentes, promovendo a mistura.

5 Conclusões

Neste trabalho, a fluidodinâmica foi utilizada para comparar o funcionamento de 14 configurações modificadas do misturador vortex, tendo sido possível identificar as vantagens e desvantagens dos modelos estudados. Estes estudos foram necessários para a compreensão do fenômeno de mistura, da sua importância, dos elementos necessários à um bom perfil de mistura do óleo de soja e do álcool, na obtenção do biodiesel.

O parâmetro utilizado para avaliar os misturadores estáticos foi o gradiente de velocidade, quanto maior o valor deste gradiente melhor é a eficiência da mistura. Os maiores valores deste parâmetro foram obtidos para as configurações B1 e B4, sendo $3926,24s^{-1}$ e $2536,77s^{-1}$, respectivamente, o que demonstra um alto grau de mistura do óleo e do álcool, na obtenção do biodiesel.

Referências

- ANSYS INC., CFX – Solver Theory Guide – ANSYS. USA, 2011. Disponível em: <http://www1.ansys.com/customer/documentation/130/cfx_thry.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2011.
- ALLEN, C. A. W. et al. Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid Ester composition. *Fuel*, v. 78. p.1319-1326, 1999.
- CAMP, T. R. Flocculation and flocculation basins. *American Society of Civil Engineers*. n. 2.722, p.1-15, 1953.
- DEMIRBAS, A. Biodiesel production from vegetable oil via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 31, p. 466-487, 2005.
- ETCHELLS III, A.W.; MEYER, C. F. Mixing in pipelines. In: Paul, E. L. *Handbook of Industrial Mixing*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- FERNANDES, L. A. G. *Ensaio experimentais com misturadores estáticos*. 2005. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- FONTES, C. E. et al. *Introdução à fluidodinâmica computacional*. Escola Piloto Virtual da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. RJ. Brasil. 2005.
- FREITAS, A. G. B. *Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclones*. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2009.
- GODFREY, J. C. Static mixers. In: Harnby, N. *Mixing in the Process Industries*. London: Robert Hartnoll, 1985.

GUIDOLINI, I. P. *Análise fluidodinâmica e do efeito de misturadores estáticos em um reator tubular de polimerização usando ferramentas de CFD*. 2009. Dissertação (Mestrado)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HAARHOFF, J.; VAN DER WALT, J. J. Design of around-the-end hydraulic flocculators. *Journal of water supply: research and technology – AQUA*, v. 47, n. 3, p.142-152, 1998.

HERCKERT, M. G. R.; S. NETO, A. *Fluidodinâmica computacional e suas aplicações*. 2004. (Trabalho de Monografia)– Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Uberlândia, 2004.

JOAQUIM JÚNIOR, C. F. *Desenvolvimento e otimização de misturador estático com o uso da fluidodinâmica computacional*. 2008. Tese (Doutorado)–Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional – Fundamentos e coordenadas generalizadas*. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1995.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment disposal, and reuse*. 3th ed. Edit.Tchobanoulous, G.; Burton, F. L. USA: Metcalf e Eddy, Inc, McGraw-Hill, 1991.

RAMIREZ, M. V. *Simulação da perda de carga e da eficiência da coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD)*. Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, p. 15-16, 2009.

RAULINE, D. et al. Numerical investigation of the performance of several static mixers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 76. p. 527-535, 1998.

SANTOS, W. L. *Produção não catalítica de biodiesel etílico em meio supercrítico contínuo com e sem solvente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos)–Universidade Tiradentes – UNIT. Aracaju, 2009.

SANTOS, F. P.; MEDRONHO, R. A. Simulação numérica da fluidodinâmica de Riser de craqueamento catalítico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS – PDPETRO. 4., 2007, Campinas. *Anais...* Campinas: PDPETRO, 2007.

SANT'ANNA, M. C. S. *Otimização de um misturador estático para a produção de biodiesel*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2012.

SNatural AMBIENTE. Misturadores estáticos. Folheto técnico. São Paulo, SP, Brasil. 2011. Disponível em:< www.snatural.com.br>. Acesso em: 4 maio 2011.

STAMENKOVIC, O. S. et al. The effect of agitation intensity on alkali-catalyzed methanolysis of sunflower oil. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 2688-2699, 2007.

STAMENKOVIC, O. S. et al. Kinetics of sunflower oil methanolysis at low temperatures. *Bioresource Technology*, v. 99, p.1131-1140, 2008.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to computational fluid dynamics*. Malaysia: Longman Group, 1995.

Recebido em 22 dez. 2011 / aprovado em 19 jun. 2012

Para referenciar este texto

SANT'ANNA, M. C. S. et al. Desenvolvimento de novas configurações para misturadores estáticos por meio da simulação computacional. *Exacta*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 259-268, 2012.