Unisanta Science and Technology, **2014, 6, July**
Published Online 2014 Vol.3 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Eficiência Térmica de Misturador Estático Tipo LPD em Trocador de Calor de Tubo Duplo

M. M. Tavares & V. R. Santos

Unisanta – Universidade Santa Cecília – Departamento de Pós-Graduação
Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica
Rua Oswaldo Cruz- Santos-SP, Brasil
E-mail: *: marcio2005@hotmail.com*
Received January, 2014, *revised march,*2014

Resumo: Misturadores estáticos são dispositivos constituídos por elementos geométricos que fazem a mistura, fixados dentro de um tubo. Conhecidos também por misturadores de linha possuem uma tecnologia de pequena manutenção, fácil instalação e com finalidade de promover sensíveis melhoras de processo, além de permitir a mistura e dispersão de fluidos diferentes de forma homogênea, por onde irá escoar o produto desejado. Sua perda de carga não é considerada grande, tem possibilidade de agitar muitos tipos de fluido à vista que tanto o tubo como o misturador podem ser fabricados por vários tipos de materiais. Trocadores de calor são equipamentos utilizados para a transferência de calor e são classificados de acordo com o escoamento e tipo de construção. Diferenciam-se os trocadores por escoamento de correntes paralelas, onde o fluido quente e o frio entram e saem do trocador na mesma direção e sentido, os de contracorrentes, no qual a entrada e a saída do fluido quente são opostas às do fluido frio e os de escoamento cruzado, no qual um fluido escoa perpendicularmente ao outro. O presente trabalho teve por objetivo quantificar a perda de carga e a eficiência de troca térmica de um misturador estático tipo LPD (Low Pressure Drop) no interior de um trocador de calor tubo duplo. Os resultados obtidos na unidade experimental serão comparados com os obtidos sem misturador estático e com o misturador estático tipo Kenics. Tendo em vista que não é aconselhável utilizar um misturador estático tipo Kenics em fluidos com baixa viscosidade, este trabalho consiste em aumentar a eficiência de troca térmica na utilização destes tipos de fluidos, assim como analisar a relação da perda de carga entre ambos.

Palavras chave: Trocador de Calor, Misturador estático, Kenics, LPD, Troca térmica.

Heat Efficiency of Static Mixer Type LPD in a Dual-Tube Heat Exchanger

Abstract: Static mixers are devices consisting of geometrical elements that make the mixing, set inside a tube . Also known as mixers have a line of small technology maintenance, easy installation and of inducing considerable improvement process , and allows mixing and dispersion of different fluids evenly , where will drain the desired product . Their loss is not considered to be large, has the possibility of shaking many types of fluid to the view that both the tube and the mixer may be manufactured by several types of materials. Heat exchangers are devices used to transfer heat and are classified according to the flow and type of construction.

Copyright © 2014 ISESC.

Differentiate changers for cocurrent flow , where the hot and cold fluid entering and leaving the heat exchanger in the same direction , the counter flow , in which the input and output of the hot fluid are opposite to the cold fluid and the cross-flow in which a fluid flows perpendicularly to each other. This study aimed to quantify the pressure drop and heat transfer efficiency of a static mixer type LPD (Low Pressure Drop) within a double tube heat exchanger . The results obtained in the experimental unit will be compared with those obtained without static mixer and the static mixer type Kenics . Considering that it is not advisable to use a static mixer type Kenics in fluids with low viscosity , this work is to increase the efficiency of heat exchange in the use of these types of fluids as well as to analyze the relationship of the pressure drop between them .

Keywords: Heat Exchanger, static mixer, Kenics, LPD, thermal exchange.

1. Introdução

A otimização de energia utilizada em uma planta industrial é muito importante visando agregar valor ao produto final com baixo custo à empresa. Equipamentos como trocadores de calor são muito utilizados em indústrias em geral. Tais equipamentos têm por função efetuar a transferência de calor entre dois fluidos de diferentes temperaturas (KERN, 1999).

O misturador estático constitui uma alternativa aos tradicionais tanques de agitação e pode ainda ser utilizado nos processos de forma contínua, proporcionando um excelente ganho de produção (JAWORSKY & PIANKO-OPRYCH, 2008). Possui ainda, crescente aplicação e interesse, pois utiliza parte da energia cedida para o bombeamento dos fluidos para promover a mistura em processo contínuo, minimizando o custo com equipamentos e instalações industriais (MYERS et. al., 1997).
Também possui uma tecnologia de pequena manutenção (por não contar com partes móveis como selagem ou rolamentos), fácil instalação e com finalidades de promover sensíveis melhoras de processo além de permitir a mistura e dispersão de fluidos diferentes de forma homogênea por onde irá escoar o produto desejado (AZER, 1980).

Os custos operacionais e o capital investido para aquisição do equipamento são significativamente menores comparando-se aos dos misturadores dinâmicos (BAKKER et. al., 2000). Os misturadores estáticos podem ser utilizados em processos envolvendo *momentum*, troca térmica e transferência de massa (SANT'ANNA, 2012).

Apesar do misturador estático associado ao trocador de calor produzir maior atrito gerando maior perda de carga, conseqüentemente gera maior grau de mistura de camadas (BERKMAN, 1988). O aumento da eficiência de troca térmica não deve acarretar uma perda de carga excessiva, viabilizando uma otimização do consumo de energia.

O presente trabalho visou quantificar perda de carga e a eficiência de troca térmica de um misturador estático tipo LPD no interior de um trocador de calor tubo-duplo.

1. Revisão Bibliográfica

2.1 Misturadores Estáticos

A operação unitária de agitação ou mistura de fluidos desempenha importante papel nos processos industriais (CHEN, 1975). Os misturadores estáticos constituem uma alternativa aos vasos agitados tradicionais, sendo aplicados em processos contínuos. Os misturadores estáticos podem ser empregados em diversas finalidades, entre as quais destacam-se: produção de emulsões, mistura de líquidos miscíveis, formação de soluções ou suspensões e na aceleração de troca térmica (SANT'ANNA, 2012). A Tabela 1 ilustra as principais características de acordo cm cada aplicação dos misturadores estáticos.

Tabela 1 – Aplicações e características dos misturadores estáticos.

Aplicações	Características
Mistura de produtos químicos	Não possui partes móveis
Tratamento de água	Fácil instalação
Mistura de óleos	Manutenção zero
Dessanilização de petróleo	Baixo investimento
Injeção de aditivos	Economia de energia
Mistura de gases na água	Elimina tanques e misturadores mecânicos

Fonte: SNatural Ambiente, 2011

Os atuais fabricantes nacionais de misturadores estáticos têm apresentado dificuldade em definir o tipo adequado de misturador para as aplicações, de um modo geral, como selecionar um misturador que, apesar de promover a mistura, apresenta um baixo consumo de energia para a aplicação. São constituídos por elementos geométricos que fazem a mistura, fixados no interior de trechos pré-determinados de tubos (THAKUR, 2003). A mistura ocorre pela ação de difusão de escoamento ao passar pelos elementos do misturador. Sua perda de carga não é considerada grande, em relação a outros acessórios de linha, tem possibilidade de misturar qualquer tipo de fluido à vista que tanto o tubo como o misturador pode ser fabricado

Copyright © 2014 ISESC.

vários tipos de material. Utilizam a energia da corrente de fluxo para criar uma mistura entre dois ou mais líquidos, ou gases. São apresentados em diversos modelos (Figura 1), variando conforme o fabricante, em que se classificam de acordo com o tipo de regime e propriedades físicas dos fluidos.

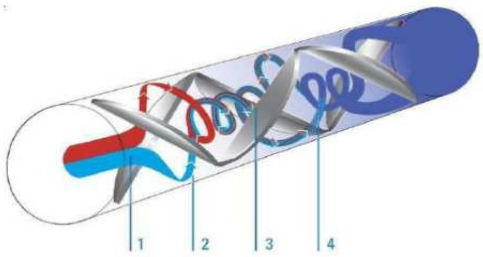


Figura 1 – Funcionamento de um Misturador Estático.

Fonte: SNatural Ambiente, 2011

O processo de misturadores estáticos está relacionado com perda de carga, distribuições, tempo de residência, fator de atrito, viscosidade, densidade e outras relações de propriedades durante a homogeneização.

Os misturadores estáticos são úteis em processos de troca térmica e transferência de massa. É reconhecido que as necessidades de energia para os misturadores estáticos são menores do que para os misturadores dinâmicos (BOSS & CZASTKIWICZ, 1982).

Os misturadores estáticos tipo Kenics e tipo LPD mencionados neste trabalho consistem de uma série de elementos estáticos de mistura, alinhados a 90º. Cada elemento promove um giro de 180º no fluxo, arranjado em sequência alternada (Medeiros, 2008). A Figura 2 mostra um misturador estático tipo Kenics:



Figura 2 – Misturador estático tipo Kenics

A figura 3 mostra um misturador estático tipo LPD:

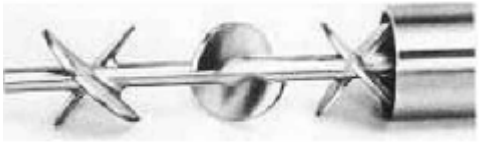


Figura 3 – Misturador estático tipo LPD

2.2 Trocador de Calor

Um trocador de energia térmica ou permutador de energia térmica, popularmente também chamado, de forma pouco adequada, por trocador de calor ou permutador de calor, é um dispositivo que visa à transferência de energia térmica de forma eficiente de um meio para outro. Tem a finalidade de propiciar calor de um fluido para o outro, encontrando-se estes a temperaturas diferentes. Os meios podem ser separados por uma parede sólida, tanto que eles nunca se misturam, ou podem estar em contato direto. Um permutador de calor é normalmente inserido num processo com a finalidade de arrefecer (resfriar) ou aquecer um determinado fluido. São amplamente usados em aquecedores, refrigeração, condicionamento de ar, usinas de geração de energia, plantas químicas, plantas petroquímicas,refinaria de petróleo, processamento de gás natural, e tratamento de águas residuais (MORAES JÚNIOR & MORAES, 2011). Em muitos textos em inglês é abreviado para HX (*heat exchanger*).

Um exemplo comum de trocador de calor é o radiador em um carro, no qual a fonte de calor, a água, sendo um fluido quente de refrigeração do motor, transfere calor para o ar fluindo através do radiador (*i.e.* o meio de transferência de calor). Noutras aplicações são usados para refrigeração de fluidos, sendo os mais comuns, óleo e água e são construídos em tubos, onde, normalmente circula o fluido refrigerante (no caso de um trocador para resfriamento). O fluido a ser resfriado circula ao redor da área do tubo, isolado por outro sistema de tubos (similar a uma serpentina (duto)) que possui uma ampla área geometricamente favorecida para troca de calor (PEREIRA, 2011).

O material usado na fabricação de trocadores de calor, geralmente possui um coeficiente de condutibilidade térmica elevado. Sendo assim, são amplamente utilizados o cobre e o alumínio e suas ligas (KERN, 1999).

Dentro da teoria em engenharia, é um volume de controle, sendo que este equipamento normalmente opera em regime permanente, onde as propriedades da seção de um fluido não se alteram com o tempo.

A eficiência de um trocador de calor depende principalmente: do material utilizado para construção, da característica geométrica e do fluxo, temperatura e coeficiente de condutibilidade térmica dos fluidos em evidência (GEANKOPLIS, 2009).

Genericamente, para melhorar a troca de calor, são colocados aletas em toda a área da tubulação. Estas aletas fazem com que o fluido se disperse em áreas menores, assim, facilitando a troca de calor. Aletas consistem em células interligadas entre si, onde circulaofluido. São construídas em materiais de excelente condutibilidade térmica.

Copyright © 2014 ISESC.

Seu uso acarreta uma grande desvantagem em um sistema termodinâmico, pois reduzem drasticamente a pressão com relação a entrada e saída. Grande parte trocadores de calor utilizam tubos com geometrias que favorecem a troca de calor, onde internamente, pode haver em sua área aletas.

Os permutadores de calor existem em várias formas construtivas consoante a aplicação a que se destinam, sendo as principais: permutador de calor de carcaça e tubos (em inglês *shell and tube heat exchanger*), permutador de calor de placas (*plate heat exchanger*) e permutador de calor de placas brasadas com aletas (*brazed plate fin heat exchanger*) (PERRY, 2007).

Quanto às fases, existem 2 tipos de trocadores de calor: monofásico, onde não há mudança de fase no fluido a ser resfriado ou aquecido e multifase, onde há mudança de estado físico do fluido (PERRY, 2007). Exemplo de trocadores de calor monofásicos: radiador de água e *intercooler* (ou radiadores a ar).

Exemplo de trocadores de calor multifase: condensador e evaporadores.

De acordo com Pereira (2011) pode-se identificar os diferentes modelos de trocadores de calor quanto ao tipo de construção. Um deles é o duplo tubo, composto por dois tubos (um externo e um interno), fáceis de construir, montar, expandir a área de troca térmica e limpar. Há também, os trocadores casco e tubos, ou multi-tubulares, que apresentam um casco e tubos internos que são dispostos paralelamente à longitude do casco, eles se diferenciam quanto à quantidade de passes no casco e nos tubos, pode ser: um passe no casco e um nos tubos; um passe no casco e dois passes nos tubos; dois passes no casco e quatro passes nos tubos. Ambos os trocadores supracitados podem ou não conter chicanas, as quais são responsáveis por aumento da turbulência, eficiência da troca térmica e tempo de residência do fluido dentro do equipamento. Outro tipo de trocador existente são os compactos, estes podem conter matrizes de tubos ou placas aletados. Geralmente são utilizados quando pelo menos um dos fluidos é um gás.

2. Material e Métodos

3.1 Material

A unidade experimental consiste basicamente em um trocador de calor tubo-duplo de 93,5 centímetros de comprimento, com tubo interno de 2,04 cm e 25 chicanas, conectado a um sistema de bombeamento contendo uma calha Parshall para medição da vazão, uma torre de resfriamento, um aquecedor e dois tanques atmosféricos para armazenamento dos fluidos. Possui também duas bombas de 0,5 hp, um rotâmetro, quatro indicadores digitais de temperatura e um piezômetro.. e possui seu esboço apresentado na figura 4.

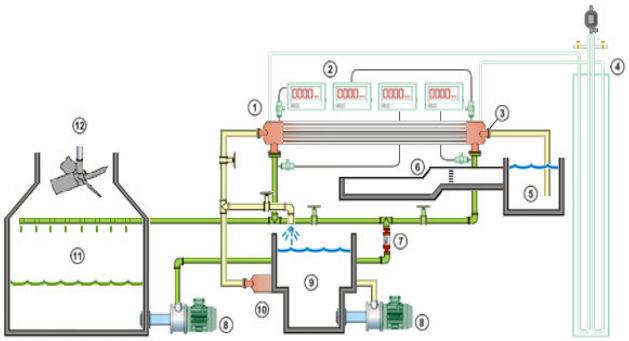


Figura 4 – Esboço da unidade experimental.

Tabela 2 – Componentes da unidade experimental

Item	Descrição
01	Trocador de Calor
02	Indicadores de Temperatura dos Termopares
03	Misturador Estático
04	Piezômetro
05	Tanque de alimentação da calha Parshall
06	Calha Parshall
07	Rotâmetro
08	Bombas de Drenagem
09	Tanque Saída de Fluido Quente
10	Resistência
11	Torre de Resfriamento
12	Impulsor

A figura 5 apresenta a foto da unidade experimental.

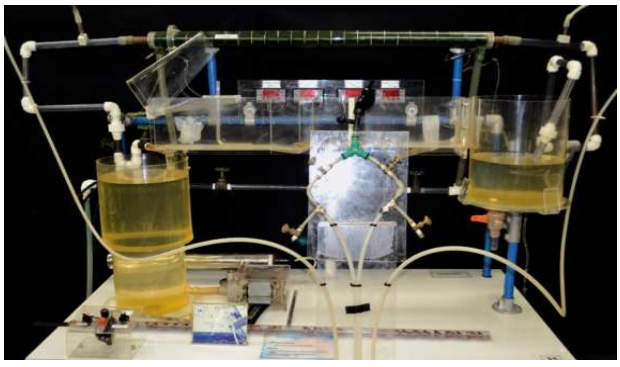


Figura 5 – Foto parcial da unidade experimental.

Copyright © 2014 ISESC.

3.2 Método

Para se determinar a eficiência da troca térmica de um trocador de calor utilizando o misturador estático, foram realizados oito ensaios na unidade experimental, sendo dois ensaios para cada amostra. Os experimentos eram alternados, de acordo com a solução de água e açúcar, com misturador estático e sem o misturador.

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições: as vazões do fluido frio (água) eram controladas no rotâmetro em função da altura do nível do fluido quente na Calha Parshall. Estes valores foram adotados iguais para todos os ensaios para que assim fosse possível realizar comparações nos resultados e nas discussões.

As vazões mássicas foram calculadas através da massa em função do tempo, utilizando um recipiente para determinar a massa e dois cronômetros para medir o tempo, assim com uma média do tempo a margem de erro se torna menor.

O misturador estático utilizado foi do tipo Kenics e possui 10 módulos.

Com os resultados das temperaturas de saída, obtidos através de termopares e apresentados no painel, foi possível determinar a influência do misturador estático em relação à troca térmica.

3. Resultados e Discussão

Os dados obtidos em todos os ensaios experimentais estão expostos nas Figuras 6 a 13:

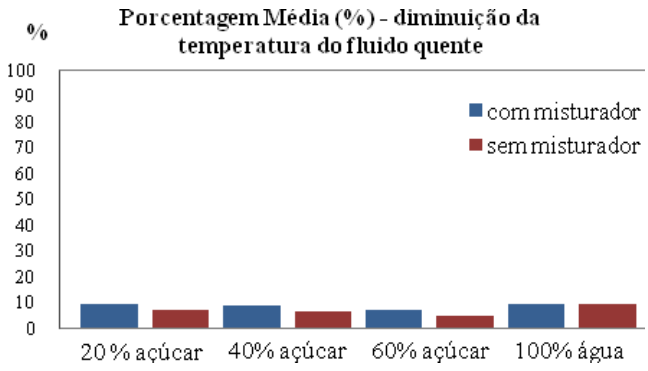


Figura 06 – Gráfico das porcentagens médias para diferentes concentrações mássicas.

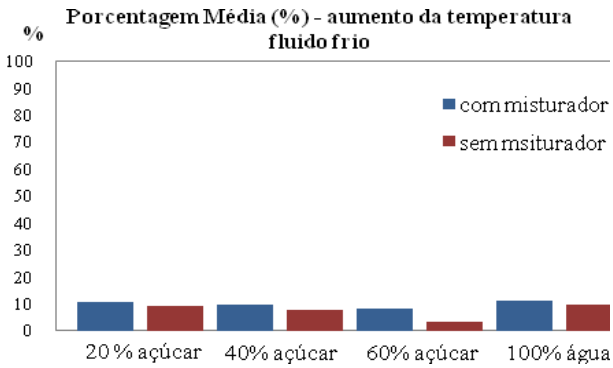


Figura 07 – Gráfico das porcentagens médias para diferentes concentrações mássicas.

Copyright © 2014 ISESC.

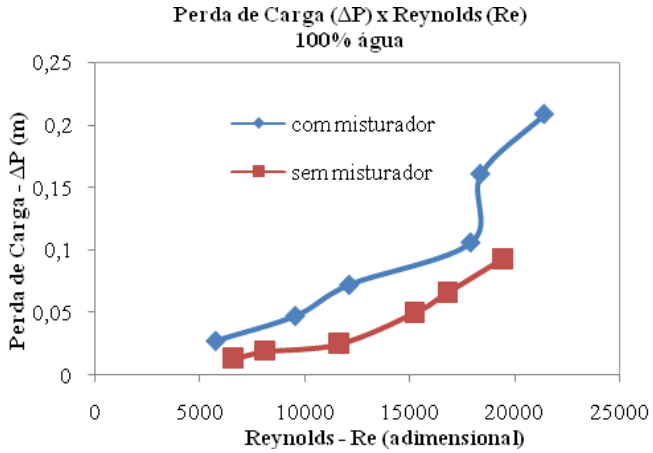


Figura 08 – Gráfico do ensaio realizado com e sem misturador estático com 100% de água..

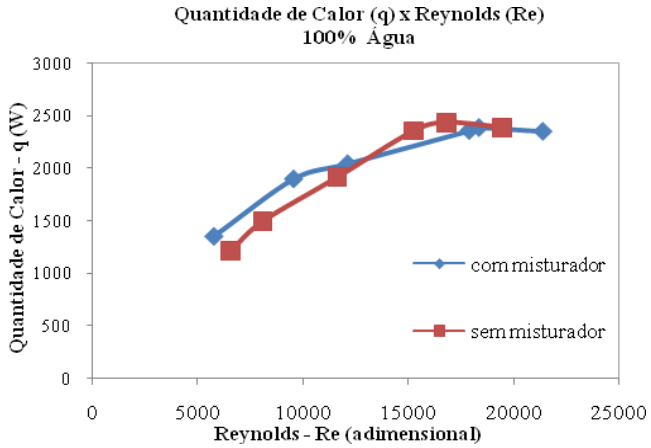


Figura 09 – Gráfico do ensaio realizado com e sem misturador estático com 100% de água.

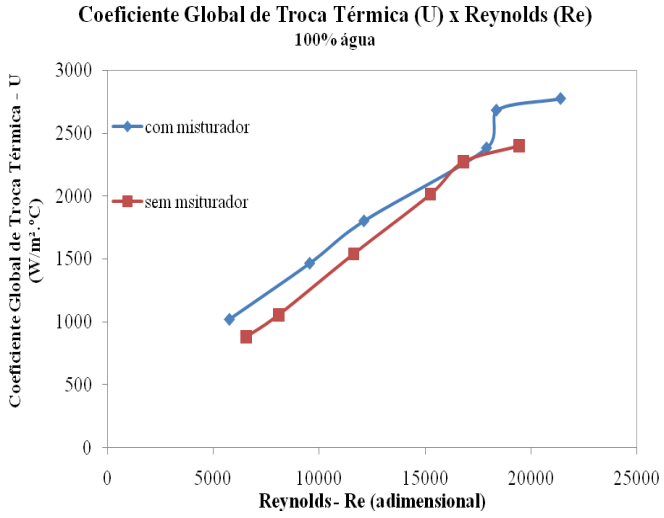


Figura 10 – Gráfico do ensaio realizado com e sem misturador estático com 100% de água.

Copyright © 2014 ISESC.

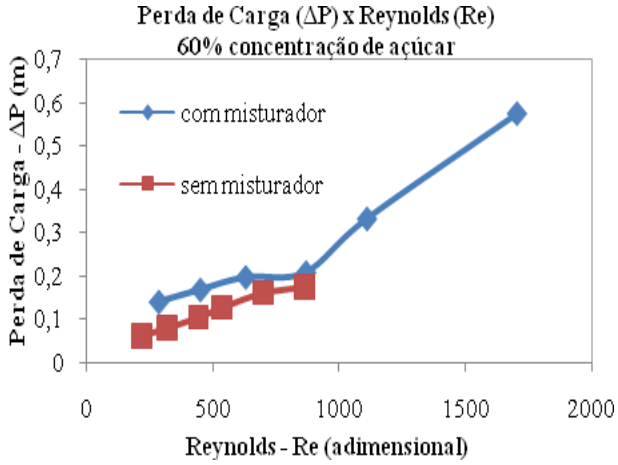


Figura 11 – Gráfico do ensaio realizado com e sem misturador estático com concentração mássica de 60% de açúcar.

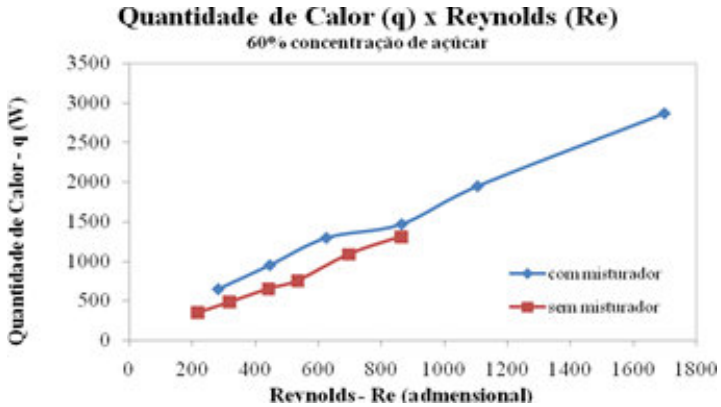


Figura 12 – Gráfico do ensaio realizado com e sem misturador estático com concentração mássica de 60% de açúcar.

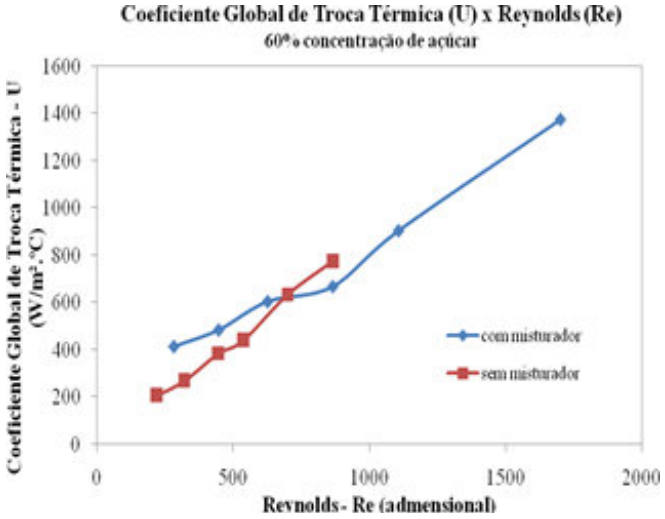


Figura 13 – Gráfico do ensaio realizado com e sem misturador estático com concentração mássica de 60% de açúcar.

Copyright © 2014 ISESC.

4. Conclusão

A partir dos resultados obtidos experimentalmente foi possível concluir que: Baseado nos resultados experimentais, nos ensaios com misturador nota-se que não houve aumento significativo do número adimensional de Reynolds,; Já nos ensaios sem misturador, existe um aumento mais significativo de Reynolds porque não ocorre tanta perda de energia do fluido, pois o mesmo não colide tanto quando existe um misturador inserido no tubo. Verificou-se ainda que, das variáveis analisadas, a que influenciou mais na eficiência de troca térmica do trocador envolvendo o uso de misturador estático foi a viscosidade do fluido, o que nos levou a concluir que este tipo de dispositivo é recomendável apenas para fluidos viscosos. O uso deste equipamento para troca térmica de fluidos com viscosidade baixa não garante maior eficiência e ainda provoca aumento de perda de carga, exigindo maior desempenho da bomba. Esta conclusão é válida para a unidade experimental "Trocador de calor duplo tubo com misturador estático" do Laboratório de Operações Unitárias e utilizando a mesma condição de operação descrita em materiais e métodos, sendo assim, para determinação da eficiência de troca térmica para outras condições, recomenda-se refazer as experiências.

Sugestões para continuação do trabalho

Visando a continuidade do trabalho sugere-se:

1) Repetir os ensaios utilizando misturador estático tipo LPD, para comparação de eficiência de troca térmica e perda de carga;
2) Trocar o rotâmetro utilizado na medição de fluido frio, para que se possa trabalhar com maiores vazões;
3) Utilizar intervalos de vazões menores, porque quanto maior o número de pontos em uma curva, maior será sua precisão.
4) Utilizar aquecedor de maior capacidade para se trabalhar com delta de temperatura maior.
5) Utilizar este tipo de equipamento em unidades operacionais com espaço delimitado, onde não há possibilidade de substituir um trocador de calor por um maior (casa de máquinas de navios, por exemplo), onde se utilize fluidos viscosos (óleo, sal fundido, soluções aquosas de açúcar,etc.); SHREVE, Indústrias de Processos químicos.
6) Instalar manômetros digitais visando a automação do sistema, para se trabalhar com informações de referência, bem como redundância.

5. Agradecimentos

Ao educador Thiago César de Souza Pinto, ao professor Deovaldo de Moraes Júnior, à equipe de montagem e manutenção do laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília composta principalmente por Gilmar, Irineu e Wolney, aos colegas de estudo Bárbara Carolina Araújo, Willian Ishimine, Lívia Hiromi Yonamine, Flávia Azevedo Soares Novaes, Roberta Giorgetti Gonçalves, Thiago Torres dos Santos, Vinícius Teodósio Alves e Jaqueline Ferreira Justo.

5. Referências Bibliográficas

KERN, D. **Processos de transmissão de calor**, Trad. Nicolás Ambossi, 31º Ed., México, Celsa, 1999.

MYERS K. J.; A. BAKKER and D. RYAN. **Avoid agitation by selecting Static Mexers**, 1997.

AZER, N.Z. and LIN, S.T. **Augmentation of forced flow boiling heat transfer with Kenics motionless mixers;** Ind. Eng. Proc. Des. Dev., 1980.

BAKKE, A.., R. D. LAROCHE; E. M. MARSHALL. **Laminar flow in static mixers with helical elements***, 2000.*

SANT'ANNA, M. SOUZA de. **Otimização de um misturador estático para produção de Biodiesel**, São Cristóvão – SE , 2012.

BERKMAN, P.D. and CALABRESE, R.V. **Dispersion of viscous liquids by turbulent flow in a static mixer.** *AIChE J*, 1988.

J. ZDZISLAW; P. PIANKO-OPRYCH **Two-Phase, laminar flow simulations in a Kenics static mixer, the standard eulerian and Lagrangian approaches**, 2008.

CHEN, S.J. **Static mixing of polymers**; Chem. Eng. Prog., 1975.

THAKUR, R. K.; *et al*. **Static Mixers in the Process Industries.** Institution of Chemical Engineers. Trans IChemE, Vol 81, Part A, August 2003.

MELO L. R. S., D. MORAES Jr, SANTOS A. R., Oil-water bifasic flow in a bench scale experimental unit, UNISANTA – Science and Technology, ISSN: 2317-1316, Vol 1, No 2,p.p.1-5, 2012.

MORAES JR, D.; SILVA, E. L.; MORAES, M. **S.Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Fluidos I**, Santos, 2011.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Separation Process Principle**, 4º Ed., Massaschusetts, Prentice Hall, 2009.

Copyright © 2014 ISESC.