



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## ANÁLISE COMPARATIVA DA TRANSMISSÃO DE CALOR NO AQUECIMENTO DE ÁGUA EM UM TANQUE COM IMPULSOR RADIAL UTILIZANDO CHICANAS TUBULARES VERTICAIS E SERPENTINA EM ESPIRAL

Vitor da Silva Rosa.\*<sup>1</sup>, Juliana Tofano de Campos Leite Toneli<sup>2</sup>, Marlene Silva de Moraes<sup>1</sup> e Deovaldo de Moraes Júnior<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Universidade Santa Cecília – Departamento de Engenharia Química – Rua Oswaldo Cruz 277 – Santos – São Paulo – Brasil. E-mail: victor@unisanta.br

<sup>2</sup> Universidade Federal do ABC – Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – Avenida dos Estados 5001 – Santo André – São Paulo – Brasil – E-mail: juliana.toneli.ufabc@gmail.com

### RESUMO

Os tanques com impulsores mecânicos são equipamentos utilizados na indústria química, petroquímica, alimentícia, mineral e têxtil, sendo empregados como reatores químicos e bioquímicos, como, na produção de polímeros, tintas, resinas, detergentes, antibióticos e margarinas. A transferência de calor em tanques é realizada através de jaquetas, serpentinas helicoidais, serpentinas em espiral e chicanas tubulares verticais. Informações sobre a variação do coeficiente global de transferência de calor em função da rotação do impulsor mecânico para determinação da rotação econômica é um parâmetro importante de projeto, entretanto, a literatura é carente dessas informações para unidades equipadas com serpentina em espiral e chicanas tubulares verticais, operando em regime contínuo. O trabalho teve por objetivo comparar a eficiência da transferência de calor em um tanque dotado com uma serpentina em espiral e chicanas tubulares verticais, usando água como fluido de aquecimento e um impulsor radial tipo turbina. A unidade experimental consistiu basicamente de um tanque de acrílico com volume útil de 50 litros, um impulsor radial tipo turbina, um motor de 2hp um banho termostaticado para controle de temperatura, uma serpentina em espiral e chicanas tubulares verticais, ambas de cobre e de mesma área. Foram realizados 10 experimentos, sendo 5 envolvendo a serpentina em espiral e 5 envolvendo as chicanas tubulares verticais. Cada ensaio teve a duração de 100 minutos, com coleta de temperatura de saída de ambos os fluidos a cada 2 minutos, visando obter a temperatura de estabilização, a qual foi em 88 minutos em todos os ensaios. Através dos dados coletados calculou-se o número de Reynolds e o coeficiente global de transferência de calor. A análise foi feita de forma gráfica. Foi possível concluir que a eficiência da transferência de calor utilizando a serpentina em espiral foi 30% superior em relação às chicanas tubulares verticais de mesma área.

**Palavras Chaves:** *Tanque, Impulsor radial, Chicana tubular vertical, Serpentina em espiral, Transferência de calor.*



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos processos envolvendo a agitação e a mistura, necessitam de aquecimento ou resfriamento dos fluidos. Quando esses processos ocorrem em tanques, são utilizadas superfícies de transmissão de calor especiais, dentre as quais pode-se destacar as jaquetas, as serpentinas helicoidais, as serpentinas em espiral e as chicanas tubulares verticais [1].

As jaquetas são superfícies de transferência de calor caracterizadas por envolver o tanque, sendo que o fluido térmico percorre o espaço entre a jaqueta e o tanque. Nesses equipamentos, a eficiência da transmissão de calor é baixa devido à fonte de calor estar na parede, o que causa um aquecimento desigual no fluido contido no tanque, além dos problemas estruturais em unidades com grandes dimensões. Por outro lado, as vantagens desse sistema são a facilidade na limpeza e a disponibilidade de dados de projeto fornecidos na literatura corrente [2].

As serpentinas helicoidais são formadas por tubos entre o eixo do impulsor e a parede do tanque. A área de contato com o fluido a ser aquecido ou resfriado é muito maior que nas jaquetas, o que aumenta a eficiência na transmissão de calor, entretanto, a dificuldade está na limpeza do equipamento. A maioria dos tanques com agitação envolvendo operações de transferência de calor são projetados com serpentina helicoidal em função de dados de projeto serem de fácil disponibilidade. As serpentinas em espiral são constituídas por tubos enrolados, em geral, no fundo do tanque. São utilizadas, principalmente, para o aquecimento de fluidos viscosos para transporte por bombeamento. Possuem como desvantagens, a transferência de calor localizada principalmente no fundo do tanque, promovendo um aquecimento desigual e a falta de dados de projeto na literatura corrente [3].

As três superfícies de transmissão de calor supracitadas necessitam de chicanas junto à parede do tanque para evitar a formação do vórtice, caracterizado por um afunilamento do fluido em agitação ao redor do impulsor mecânico. O vórtice é um indicador de uma ineficiente mistura e baixa transmissão de calor, devido às linhas de corrente serem circulares e ordenadas.

As chicanas tubulares verticais são superfícies que proporcionam elevadas taxas de transferência de calor e também eliminam a formação do vórtice, em função da sua estrutura espacial, o que torna desnecessária a alocação de chicanas adicionais junto à parede do tanque. A desvantagem dessa técnica é a falta de dados de projeto, principalmente em operação contínua [4].



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 2. OBJETIVO

O trabalho teve por objetivo comparar a eficiência da transferência de calor em um tanque dotado com uma serpentina em espiral e chicanas tubulares verticais, usando água como fluido de aquecimento e um impulsor radial tipo turbina

## 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Diversos processos industriais dependem da eficiência da agitação e da mistura de fluidos, entretanto, os termos agitação e mistura não designam o mesmo sentido. A agitação é uma operação que induz o movimento do fluido em um sentido especificado, geralmente em fluxos tangenciais, enquanto, que a mistura compreende uma operação na qual há uma distribuição aleatória de um fluido em outro, inicialmente separados em duas fases [5].

A escolha do tipo de impulsor mecânico a ser utilizado no processo irá influenciar totalmente as variáveis da operação de mistura supracitadas, principalmente no tipo de escoamento, os quais podem ser do tipo axial, radial e tangencial. Entretanto, os três tipos de escoamento estão presentes em toda operação de mistura, sendo que a classificação por escoamento é apenas em função da projeção do fluido a partir da ponta do impulsor mecânico. Na Figura 1, estão ilustrados os escoamentos possíveis no interior de um tanque com agitação.

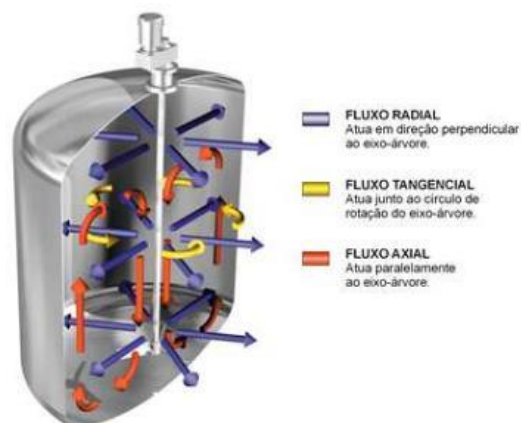


Figura 1 Tipos de escoamentos em tanques com agitação

Os impulsores mecânicos são divididos em algumas classes, baseadas nos padrões de fluxo, aplicações e geometria. Os impulsores do tipo axial são indicados para fluidos com baixas e médias viscosidades, enquanto que os impulsores do tipo radial são usados para para dispersão

de gases em líquidos e de líquidos em líquidos. Em relação aos impulsores do tipo axial, o tipo radial possui como vantagem uma maior turbulência em função da presença do escoamento radial e tangencial, propiciando uma maior eficiência de mistura, entretanto, o consumo de energia é maior e, por conseguinte opera em rotações inferiores às do impulsor do tipo axial [6].

As chicanas são empregadas em tanques com agitação e mistura com o objetivo de aumentar a turbulência do sistema, aumentando a eficiência da mistura e evitando a formação de vórtices, os quais são produzidos pela ação da força centrífuga que ocorre no líquido em rotação, devido à componente tangencial da velocidade do fluido. O vórtice geralmente ocorre em fluidos com baixas e médias viscosidades, sendo um indicador de uma mistura com baixa eficiência, em função de as linhas de fluxo serem predominantemente tangenciais e, portanto, não se misturarem de forma significativa. A configuração padrão das chicanas consiste em quatro placas verticais com lado de 1/10 do diâmetro do tanque alocadas de forma diametralmente opostas entre si rentes à parede do tanque [7].

A transferência de calor em tanques com agitação é realizada através de superfícies de transmissão de calor, como as jaquetas, serpentinas helicoidais, serpentinas espirais e chicanas tubulares verticais. As superfícies de transferência de calor são projetadas em função da área necessária para realizar o aquecimento ou resfriamento, baseado no coeficiente global de transferência de calor, o qual é função dos grupos adimensionais Reynolds, Prandtl e Nusselt. A clássica equação de projeto da área (A) de troca térmica em função da quantidade de calor (Q) e da média logarítmica da diferença de temperatura (LMTD) está apresentada na Equação 1.

$$A = Q/U.LMTD \quad (1)$$

Sendo que o coeficiente global de transferência de calor (U) é função de coeficientes locais de convecção interno em relação à área superficial externa ou coeficiente interno de convecção corrigido ( $h_{i0}$ ) e externo ( $h_o$ ), com relação ao fluido quente e frio, respectivamente.

Na Equação 2, é apresentada a dependência do coeficiente global U com os coeficientes de convecção. Segundo Bondy [8], a resistência térmica oferecida pela condução pode ser desprezada quando a espessura da parede da superfície for desprezível em relação ao diâmetro interno e externo do tubo e quando for constituída de um material com elevada condutividade térmica.

$$1/U = 1/h_{i0} + 1/h_o \quad (2)$$



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

As serpentinas em espiral são utilizadas, principalmente, em tanques de armazenamento de óleos pesados, para os quais, o escoamento é impossibilitado em condições de temperatura ambiente, devido à elevada viscosidade do óleo. Como solução, essas serpentinas são colocadas na base do tanque, onde vapor de aquecimento transmite calor ao óleo, sendo que a sua viscosidade naquele ponto diminui, possibilitando o transporte por bombeamento. Na Figura 2, está ilustrada a estrutura de uma serpentina em espiral.

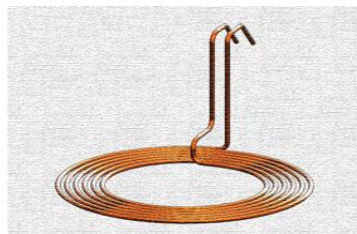


Figura 2 Serpentina em Espiral

Como essas superfícies de transferência de calor se encontram no fundo do tanque, apesar da intensa turbulência gerada pelo impulsor mecânico, é notório que a transmissão de calor ocorrerá de forma predominante no fundo do tanque e se propagará no eixo axial ao longo do tempo. Tendo em vista esse problema, Ho [9] simulou a transferência de calor no processo de desumidificação do ar com uma serpentina espiral e com simulações numéricas, ele determinou o coeficiente interno de transferência de calor ( $h_i$ ) e, como consequência, o desempenho da transmissão de calor no processo. Naphon [3] determinou uma correlação para o coeficiente  $h_i$  em um tanque sem impulsor mecânico para o resfriamento de água quente a partir de água fria. O modelo foi baseado no número de Prandtl e no número de Dean, porém, a expressão apresentada é de caráter totalmente particular às condições experimentais utilizadas, não sendo possível extrapolar para unidades industriais. A unidade operou de forma descontínua e com convecção natural, sendo que o modelo obtido está expresso na Equação 3.

$$Nu = 27,358 \cdot De^{0,287} \cdot Pr^{-0,949} \quad (3)$$

As chicanas tubulares verticais consistem em bancos de tubos conectados entre si, os quais são alocados no interior do tanque da mesma forma que as chicanas verticais utilizadas em tanques com jaquetas e serpentinas. As dimensões de construção dos bancos de tubos seguem as configurações padrões de agitação determinadas por Rushton [10], as quais determinam que o diâmetro dos bancos de tubos possua 1/10 do diâmetro do tanque para alcançar as melhores



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

eficiências térmicas e de mistura. Na Figura 3 está ilustrado um tanque equipado com chicanas tubulares verticais.

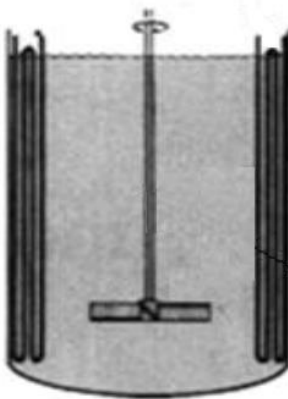


Figura 3 Tanque com chicanas tubulares verticais

Em estudos realizados no aquecimento de água e soluções de sacarose em tanques equipados com impulsor do tipo axial e radial tipo turbina, Rosa [11] determinou que a rotação em que a transferência de calor é máxima com o menor consumo de energia pelo impulsor mecânico é no intervalo de 200 a 300 RPM.

Rosa [12] realizou experimentos em um tanque com 0,4 metros de diâmetro no aquecimento de soluções de sacarose a 20% e 32% com água quente, através de quatro bancos de tubos utilizando um impulsor axial com 5 pás inclinadas a 45°, porém, esse é o primeiro modelo apresentado operando de forma contínua, conforme ilustrado na Equação 4.

$$Nu = 17,8848 \cdot Re^{0,2686} \cdot Pr^{0,2855} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,3645} \quad (4)$$

## 4. MATERIAL E MÉTODO

A unidade experimental utilizada nos experimentos, localizada no laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília em Santos, está apresentada na Figura 4, sendo constituída por um tanque de acrílico com volume útil de 50 litros, uma chicana tubular vertical de cobre com 4 bancos de tubos (Figura 5), uma serpentina em espiral de cobre (Figura 6), um impulsor radial tipo turbina com seis pás planas (Figura 7) e um motor elétrico em balanço



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

# FoDAMI

(rolamento extra na base) com potência nominal de 2,0 hp (Figura 8) para acionamento do impulsor mecânico.

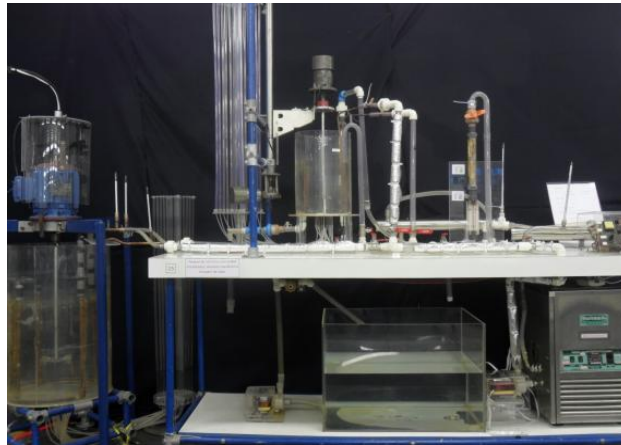


Figura 4 Unidade experimental (vista frontal)



Figura 5 Chicanas tubulares de cobre



Figura 6 Serpentina em espiral de cobre



Figura 7 Impulsor radial



Figura 8 Motor elétrico de 2,0 hp



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Foi utilizado como fluido quente, água com temperatura de entrada constante em 60°C e vazão constante de 1,4 litros por minuto. O fluido quente foi colocado no interior das superfícies de transmissão de calor. Como fluido frio utilizou-se água com temperaturas de entrada na faixa de 28°C a 45°C e rotação do impulsor mecânico no intervalo de 90 a 330 rpm. O fluido frio foi alocado no interior do tanque e submetido a agitação. O estudo foi realizado com a execução de 5 ensaios para as chicanas tubulares verticais e 5 ensaios análogos com a serpentina em espiral, totalizando 10 corridas experimentais. Cada ensaio teve a duração de 100 minutos, em regime permanente, e as respostas coletadas foram às temperaturas de saída de ambos os fluidos a cada 2 minutos.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as temperaturas de saída ( $T_s$ ) do fluido quente e frio, com as chicanas tubulares verticais e com a serpentina em espiral, no início de estabilização do regime permanente para os 10 ensaios.

Tabela 1 - Temperaturas de estabilização

Ensaio	$T_s$ chicana (°C)	$T_s$ tanque (°C)	Ensaio	$T_s$ serpentina (°C)	$T_s$ tanque (°C)
1	45,80	43,80	1	50,80	46,40
2	48,20	47,00	2	50,20	47,80
3	49,80	49,20	3	52,40	51,00
4	51,80	51,00	4	54,00	53,00
5	53,20	52,80	5	55,00	54,20

Na tabela 2 estão dispostos os valores do coeficiente global de transmissão de calor e do número de Reynolds, para ambas as superfícies de transferência de calor, calculados a partir dos dados da Tabela 1.

Tabela 2 - Coeficiente Global de transmissão de calor e número de Reynolds

Chicana tubular vertical			Serpentina em espiral		
Ensaio	U (W/m <sup>2</sup> °C)	Reynolds	Ensaio	U (W/m <sup>2</sup> °C)	Reynolds
1	540,69	37206,43	1	647,67	37471,59
2	640,64	67205,15	2	725,44	66730,05
3	661,87	100762,62	3	831,79	100524,84
4	686,13	141045,98	4	800,70	141045,98
5	662,47	185030,34	5	797,00	185467,08



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

A Figura 9 apresenta o gráfico comparativo da variação do coeficiente global de transferência de calor em função do número de Reynolds para as duas superfícies de transmissão de calor utilizadas no estudo. Também é possível comparar a eficiência entre as duas superfícies supracitadas analisando o gráfico gerado na Figura 9.

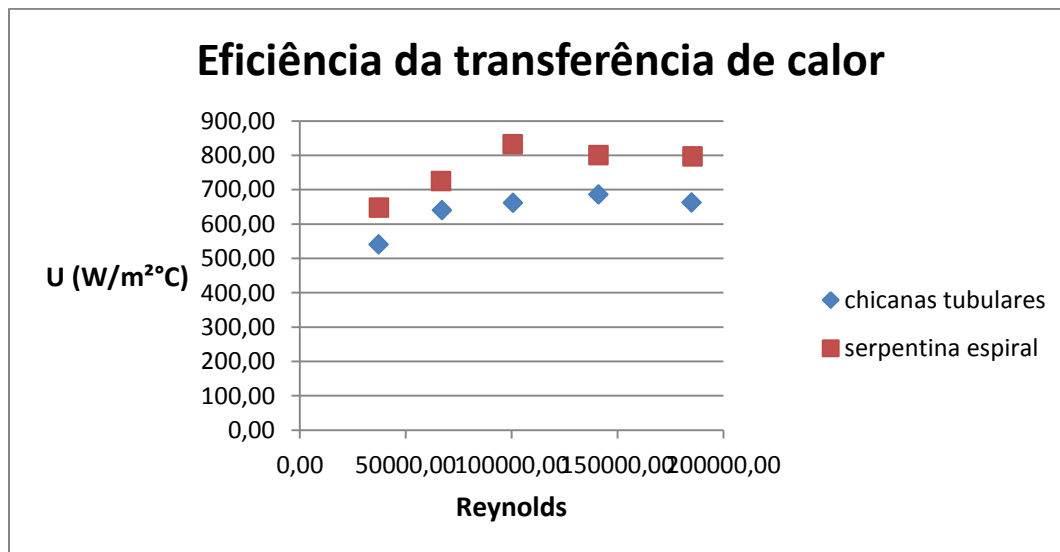


Figura 9 Comparação da eficiência da transferência de calor entre as chicanas tubulares verticais e a serpentina em espiral

## 6. CONCLUSÕES

O coeficiente global de transferencia de calor apresentou uma estabilização a partir de um número de Reynolds de 100000, o que corresponde a uma rotação do impulsor mecânico de 210 rpm, para as chicanas tubulares verticais e para a serpentina em espiral. Conforme a rotação do impulsor aumenta, a turbulencia gerada também aumenta proporcionalmente, entretanto, há o início de uma intensa aeração, o que provoca uma estabilização na transmissão de calor e em alguns casos uma redução da transferencia de calor, representada pelo coeficiente global.

Comparando as duas superfícies utilizadas no estudo, verificou-se que a serpentina em espiral apresentou uma transmissão de calor superior, em aproximadamente, 30% em relação as chicanas tubulares verticais. A serpentina em espiral por se localizar no fundo do tanque, concentra a transmissão de calor numa única zona do tanque, favorecendo a um rápido aquecimento do fluido, a pesar do escoamento ser radial.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] GODSTEIN, R. J., ECKERT, E. R. G., IBELE, W. E., PATANKAR, T. W., SIMON, T. H., KUEHN, P. J., STRYKOWSKI, K. K., TAMMA, A., BAR-COHEN, J. V. R., HEBERLEIN, J. H., BISCHOF, F. A., KULACKI, U., KORTSHAGEN, S. G., Heat Transfer – a review of 1999 literature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, p.3579-3699, 2001;
- [2] PAUL, E.L.; ATIEMO-UBENG, V.A.;KRESTA, S.M.; Handbook of Mixing, 1ªEd., Wiley-Interscience, 2004;
- [3] NAPHON, P. W., An Experimental Study the in-Tube Convective Heat Transfer Coefficients in a Spiral-Coil Heat Exchanger, *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*, 29, p. 797-809, 2002
- [4] TATTERSON, G. B., Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks, 2ª Ed., McGraw Hill, North Carolina, 1991;
- [5] LAMBERTO, D. J., SWANSON, P. D., TONKOVICH, A. L., Using Time-Dependent RPM to Enhance Mixing in Stirred Vessels. *Chemical Engineering Science*, 51, p. 733, 1996;
- [6] JO, M. C., PENNEY, W. R., FASANO, J. B., Backmixing into Reactor Feedpipes Caused by Turbulence in an Agitated Vessel, *AIChE Symp. Ser.: Chemical and Biological Applications*, 90, p. 41, 1994;
- [7] SOSSA-ECHEVERRIA, J. AND TAGHPOUR, F., Mixing of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in a Cylindrical Mixer Equipped with a Side-Entry Impeller. *Industrial & Chemical Engineering Research*, 51, p. 15258-15267, 2012;
- [8] BONDY, F. AND LIPPA, S., Heat Transfer in Agitated Vessels. *Chemical Engineering*, 1989;
- [9] HO, J. C., AND WIJEYSUNDERA, N. E., An Unmixed-Air Flow Model of a Spiral Coil Cooling Dehumidifying Unit, *Applied Thermal Engineering*, 19, p. 865-883, 1999;



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

[10] RUSHTON, J.H.; LICHTMANN, R.S.; MAHONY, L.H., Heat Transfer to Vertical Tubes in a Mixing Vessel, Industrial and Engineering Chemistry Vol. 40, No 6, Chicago, 1950;

[11] ROSA, V. S.; SANTOS A. R.; ROSENO, K. T. C.; SOUZA PINTO, T. C.; MOINO, C. A.; FERNANDES, F. M.; LOPES, M. D. e MORAES JÚNIOR, D., Rotação Ideal em Tanque com Impulsor Axial e Chicanas Tubulares Verticais para o Aquecimento de Soluções, Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Buenos Aires, 2012;

[12] ROSA, V. S., SOUZA PINTO, T. C., SANTOS, A. R., MOINO, C. A. A., ROSENO, K. T. C., LIA, L. R. B., TAMBOURGI, E. B., DIAS, M. L., TONELI, J. T. C. L., MORAES JÚNIOR, D., External Coefficient of Heat Transfer by Convection in Mixed Vessels Using Vertical Tube Baffles, Industrial & Engineering Chemistry Research, 52, p. 2434-2438, 2013;

## Agradecimientos

Os autores do presente estudo agradecem a Universidade Santa Cecília por todo o apoio técnico durante a realização do trabalho.