

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANGÉLICA LUBASKI GARDENAL  
MARIANA KATO SGUÁRIO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2016**

**ANGÉLICA LUBASKI GARDENAL  
MARIANA KATO SGUARIO**

## **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe

Co-orientador: Priscilla dos Santos Gaschi Leite

**PONTA GROSSA**

**2016**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa  
Nome da Diretoria  
Nome da Coordenação  
Nome do Curso



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR**

por

**ANGÉLICA LUBASKI GARDENAL**  
**MARIANA KATO SGUARIO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 3 de Junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. As candidatas foram arguidas pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe  
Profa. Orientadora

---

Priscilla dos Santos Gaschi Leite  
Profa. Co-Orientadora

---

Everton Moraes Matos  
Membro titular

---

Simone Delezuk Inglez  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedicamos este trabalho às  
nossas famílias, pelo apoio e amor  
incondicional que nos é ofertado.

## AGRADECIMENTOS

### *Angélica*

Agradeço primeiramente a Deus por me guardar, me dar forças e saúde para sempre seguir em frente com meus objetivos e nunca desistir deles.

A minha mãe Suilene Aparecida Lubaski e meu pai Everson Gardenal, pelo apoio e amor incondicional e por sempre terem uma palavra sábia para me guiar.

Agradeço a orientadora Professora Doutora Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe e a co-orientadora Professora Doutora Priscilla dos Santos Gaschi Leite, pelos ensinamentos, conselhos, paciência e auxílio durante todo o período de trabalho.

De forma especial, agradeço a minha companheira de trabalho, minha amiga Mariana Kato Sguario, pela dedicação, pelo suporte, por todo o trabalho que partilhamos e por enfrentar comigo esta etapa tão importante de nossas vidas.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente proporcionaram que este trabalho fosse realizado.

### *Mariana*

Agradeço a Deus por sempre me proteger e dar forças em quaisquer momentos de minha vida e não me abandonar em nenhum de meus dias.

Agradeço imensamente minha família, que, apesar das diversas vezes em que não obtiveram resposta à pergunta “mas semestre que vem você se forma, né?”, nunca deixaram de me apoiar e de acreditar que este dia finalmente chegaria.. Em especial ao meu pai, Luiz José, que sempre me incentiva a ir em busca de um futuro melhor e é meu maior exemplo para a vida. À minha mãe Erica, pela constante torcida e por me guiar e orar pela minha felicidade e à minha irmã, Ana Clara, que insiste em sempre ver o melhor de mim, mesmo quando eu mesma não acredito nisso. Às três pessoas que me são fonte de amor incondicional e companheirismo verdadeiro, muito obrigada.

Agradeço também a orientadora Professora Doutora Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe e a co-orientadora Professora Doutora Priscilla dos Santos Gaschi

Leite, pela atenção e paciência a nós disponibilizada, e, sem as quais, não seria possível realizar este trabalho.

À minha amiga Angélica Lubaski, por ser base da vivência destes anos de universidade, me salvando em diversas situações, por sempre se importar comigo e por me auxiliar nestas últimas etapas. Foi com sua ajuda e suporte que tanto este trabalho, como o curso inteiro pôde ser concluído.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram presentes comigo nesses seis anos, que são parte essencial do suporte que recebi para enfrentar a faculdade.

Em especial, ao Eduardo Canteri, por sempre ver e trazer o melhor de mim à tona e garimpar meu próprio potencial. Ao Luis Vitorio, por diversas vezes ser guia e fonte de ensinamento pessoal e acadêmico. Ao Rodrigo Couto, por sempre estar ao meu lado e ser uma ótima companhia para tudo. Ao Guilherme Simonato, pela maior convivência sob o mesmo teto que alguém poderia me aguentar e ao Eduardo Kumagai, por me mostrar que uma amizade também é baseada na saúde e na doença e na alegria e na tristeza. O companheirismo do dia-a-dia e a paciência e carinho cedidos nos meus piores e melhores dias foram fundamentais para minha permanência na Universidade. Obrigada pelo constante apoio.

Por fim, a todos que estiveram presentes e puderam auxiliar na realização deste trabalho, o meu muito obrigada.

## RESUMO

GARDENAL, Angélica Lubaski; SGUARIO, Mariana Kato. **Análise do Desempenho de Trocadores de Calor**. 2016. 58. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Trocadores de calor são equipamentos utilizados em grande parte dos processos químicos e também físicos de uma linha de produção, sendo assim, matéria de constante estudo e atualização na área da engenharia. Dessa forma, o presente trabalho visou analisar e comparar a eficiência de dois tipos comumente utilizados, o trocador de calor de tubos concêntricos e o trocador de calor de placas em escala laboratorial. Para isso, foi realizado o planejamento experimental do tipo estrela para duas variáveis de entrada dos equipamentos, a primeira sendo a temperatura de entrada do fluido quente, que foi variada na faixa de 40 a 60°C, e a segunda variável estudada foi a vazão do fluido quente, sendo analisada entre 0,6 e 1,6L/min. Para ambos os equipamentos os fluidos de trabalho foi a água. Com a tomada dos 11 pontos para cada trocador, foi possível calcular a quantidade calor trocada por cada equipamento e assim constatar a maior eficiência do trocador de placas em relação ao trocador de tubos concêntricos. Também foi possível obter como resposta equações que representam a relação de temperatura e vazão do fluido quente para uma melhor troca de calor em ambos os experimentos dentro da faixa estudada com o auxílio do programa Statistica. Os dados do planejamento experimental foram utilizados para traçar as superfícies de resposta, nas quais foi possível visualizar a relação das variáveis independentes com a resposta. Além disso, pode-se analisar o comportamento do coeficiente global de troca térmica, que mediante a variação das condições de operação para cada um dos trocadores oscilou de maneira muito próxima quando calculado pelos dois métodos diferentes, sendo estes, o método das diferenças de temperaturas médias logarítmica e o método da efetividade-NUT.

**Palavras-chave:** Trocadores de Calor. Coeficiente Global de Transferência de Calor. Eficiência de Troca Térmica .

## ABSTRACT

GARDENAL, Angélica Lubaski; SGUARIO, Mariana Kato. **Analysis of Heat Exchangers Performance**. 2016. 58. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Federal Technology University – Parana. Ponta Grossa, 2016.

Heat exchangers are equipments used in most of the chemical and physical processes in a production line, becoming a constant matter of studies and updates in the engineering area. This way, this paper aimed in comparing the efficiency of two common types often used, the concentric tubes and the plate heat exchangers. To this end, an experimental planning for two input variables was done, the first one being the input temperature of the hot fluid, which was varied from 40 to 60°C, and the second studied variable was the hot fluid flow rate, which was analyzed between 0,6 and 1,6L/min. As a result of this planning, the relation between temperature and flow rate that generated the biggest heat exchange was obtained, besides the comparison between both equipment heat exchanges, concluding which is the more effective one. For both equipments the chosen working fluids was water. Eleven experiments were made on both exchangers, and, with them, it was made possible to calculate the amount of exchanged heat and find the best efficiency of the plate heat exchanger compared to the concentric tubes one. It was also possible to obtain as a result equations that relate temperature and flux of the hot fluid within the studied zone for the best heat exchange in both equipments, with the help of the Statistica software. The experimental planning data was used to trace the response surfaces, on which it was possible to view the relationship between the independent variables as a result. Besides that, it was possible to analyze the behavior of the overall heat transfer coefficient, which, by the variation of the operation conditions for each of the exchangers, oscillated in a very similar way when calculated by the two different methods, which are, the logarithmic mean temperature difference and the number of transfer units methods.

**Keywords:** Heat Exchangers. Plates. Concentric Tubes. Comparison.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Regimes de Escoamento Paralelo e Contracorrente e Seus Perfis de Temperatura Associados. Fonte:Çengel e Ghajar (2012) .....	12
Figura 2 - Diagrama Demonstrando os Caminhos de Fluxo Em Um Trocador de Calor de Placas Vedadas. Fonte: Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012).....	14
Figura 3 - Diagrama das Extremidades de Um Trocador de Calor de Tubos Concêntricos na Configuração de Fluxo Contracorrente. Fonte: Çengel e Ghajar (2012).....	17
Figura 4 - Estratégia Inicial. Fonte: Calado e Montgomery (2003) .....	21
Figura 5 - Superfície de resposta para o trocador de calor de tubos concêntricos....	36
Figura 6 - Superfície de resposta para o trocador de calor de placas .....	37
Figura 7 – Cálculo do Coeficiente Global Pelos Diferentes Métodos para o Trocador de Calor de Tubos Concêntricos .....	41
Figura 8 – Cálculo do Coeficiente Global Pelos Diferentes Métodos Para o Trocador de Calor de Placas .....	41
Figura 9 – Quantidade de Calor Trocado nos Equipamentos.....	45
Figura 10 – Comparação Entre as Eficiências dos Trocadores de Calor .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis do Planejamento Experimental Estrela de Ambos os Trocadores de Calor.....	28
Tabela 2 - Dados do planejamento experimental estrela para o trocador de calor de tubos concêntricos .....	31
Tabela 3 - Dados do planejamento experimental estrela para o trocador de calor de placas.....	32
Tabela 4 - Efeitos das variáveis do processo para o trocador de calor de tubos concêntricos .....	33
Tabela 5 - Efeitos das variáveis do processo para o trocador de calor de placas.....	33
Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental estrela do trocador de calor de tubos concêntricos.....	35
Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental estrela do trocador de calor de placas .....	35
Tabela 8 – Resultados Para os Coeficientes Globais em $W/m^2.K$ de Transferência de Calor para Ambos os Trocadores de Calor .....	39
Tabela 9 – Ensaio Escolhido Para a Avaliação da Influência da Vazão no Coeficiente Global de Troca Térmica .....	43
Tabela 10 - Ensaio Escolhido Para a Avaliação da Influência da Temperatura no Coeficiente Global de Troca Térmica .....	43
Tabela 11 – Quantidade de Calor Trocado nos Equipamentos.....	44
Tabela 12 – Ensaio com as Maiores Quantidades de Troca Térmica em Ambos os Equipamentos .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

### LISTA DE ABREVIATURAS

CNI	Confederação Nacional da Indústria
TITC	Módulo do Trocador de Tubos Concêntricos
TIPL	Módulo do Trocador de Placas
DTML	Diferença de Temperatura Média Logarítmica
NUT	Número de Unidades de Transferência de Calor
SQR	Soma dos Efeitos da Regressão
SQr	Soma dos Efeitos dos Resíduos
MQR	Média Quadrática da Regressão
MQr	Média Quadrática dos Resíduos

### LISTA DE SÍMBOLOS

$A_s$	Área Superficial de Troca Térmica
$c$	Taxa entre as Capacidades Térmicas Mínima e Máxima
$C_{min}$	Menor Capacidade Térmica
$C_p$	Capacidade Calorífica
$\varepsilon$	Eficiência
$F$	Razão entre a $MQ_R$ e a $MQ_r$
$F_q$	Vazão de Entrada do Fluido Quente
$h$	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção
$k$	Coefficiente de Transferência de Calor por Condução
$\dot{m}$	Vazão Mássica
$p$	“p-valor”
$Q$	Quantidade de Calor

$\dot{Q}$	Taxa de Transferência da Calor
$Q_{m\acute{a}x}$	Quantidade de Calor Máxima Possível de Ser Trocada
$Q_{real}$	Quantidade de Calor Calculada
$R$	Regressão
$r$	Resíduos
$T_q$	Temperatura de Entrada do Fluido Quente
$U$	Coefficiente Global de Troca Térmica
$X_1$	Variável Codificada Para a Temperatura de Entrada do Fluido Quente
$X_2$	Variável Codificada Para a Vazão Volumétrica do Fluido Quente
$\Delta T$	Vario de Temperatura
$\Delta T_{ml}$	Diferença de Temperatura Média Logarítmica
$\Delta T_1, \Delta T_2$	Diferenças de Temperaturas do Fluido Quente e Frio Decrescidas Entre Si Com os Valores das Extremidade

### LISTA DE UNIDADES

$GWh$	Giga Watts Hora
$l/min$	Litros Por Minuto
$m^2$	Metros Quadrados
$mm$	Milímetro
$m^3/s$	Metros Cúbicos Por Segundo
$W$	Watts
$W/m^2.K$	Watts Por Metro Quadrado Kelvin
$^\circ C$	Graus Celsius

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
1.1 OBJETIVOS.....	7
1.2 JUSTIFICATIVA.....	8
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>9</b>
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	9
2.2 TROCADORES DE CALOR .....	11
2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	20
2.4 SOFTWARE DE ANÁLISE DE DADOS.....	24
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
3.1 LOCAL.....	25
3.2 EXPERIMENTOS NOS TROCADORES DE CALOR .....	25
3.3 COMPARAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR.....	29
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>30</b>
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
4.2 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	39
4.3 COMPARAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR.....	44
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As sociedades vêm se desenvolvendo continuamente ao longo do tempo por todo o mundo, fazendo com que a necessidade de recursos aumente cada vez mais. Dessa forma, a preocupação ambiental também é uma crescente. Nesse contexto, novas alternativas para a manutenção da sociedade atual vêm sendo desenvolvidas, desde novas fontes de energia até a otimização de processos para economia de recursos utilizados, como água e energia.

O Brasil se encontra em um forte período de crescimento industrial, fazendo com que mais recursos sejam necessitados para supri-lo, e apesar da matriz energética brasileira ser diferenciada por ser constituída, de acordo com o CNI (2007), por 45% de participação de energias renováveis, é necessário que se faça o uso consciente destas. Sabe-se que a energia é um fator vital para a indústria, e embora o Brasil tenha um grande potencial energético, as empresas são prejudicadas devido às altas tarifas cobradas no país, fazendo com que sua competitividade seja comprometida em relação ao mercado exterior.

No âmbito das indústrias brasileiras, os equipamentos de troca térmica, muitas vezes denominados trocadores de calor, são altamente utilizados em diversas áreas, como petroquímica, farmacêutica, alimentícia, entre outras. Portanto, pode-se ressaltar a importância da otimização da energia térmica quando se utiliza estes equipamentos.

Quanto à questão energética no cenário industrial brasileiro atual pode-se observar, segundo o Ministério de Minas e Energia (2013), que em 2012 o setor industrial teve um consumo de energia elétrica de 183475 GWh, e segundo a Associação Brasileira da Indústria Química (2012) a área química teve uma participação de 8,7% de consumo total de energia no setor industrial brasileiro. Também, de acordo com outra pesquisa realizada pelo Ministério de Minas e Energia (2010), o setor químico representa 11% na estimativa da capacidade de conservação de Energia nacional, e ainda, destes 11%, destaca-se a área de refrigeração, que tem potencial de conservação de energia de 540 GWh. É importante notar que a refrigeração é um processo de troca de calor, fazendo com que este potencial de economia de energia possa ser voltado no estudo da utilização eficiente dos trocadores de calor.

Trocadores de calor são equipamentos típicos da área de Engenharia. Estes estão envolvidos principalmente em processos que se objetivam a troca térmica entre fluidos, os quais são comumente encontrados em diversas indústrias e aplicações corriqueiras, tais como no aquecimento de ambientes, refrigeração, na produção de potência, no condicionamento de ar, no processamento químico e alimentício, eletrônicos, indústria de manufatura e na recuperação de calor em processos.

Assim, com este trabalho, buscam-se os melhores parâmetros de desempenho operacional dos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas, em escala laboratorial. Além disso, dentro da faixa de trabalho das variáveis de processo, será avaliado aquele que apresenta maior viabilidade em termos de troca térmica.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Avaliar a eficiência de troca térmica de trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas em escala laboratorial, em relação a temperatura de entrada e a vazão do fluido quente

### 1.1.2 Específicos

- Identificação dos intervalos de estudo das variáveis do processo, temperatura de entrada e a vazão do fluido quente, na utilização dos trocadores de calor;
- Avaliação das variáveis significativas do processo com a realização de ensaios experimentais nos trocadores de calor de tubo concêntrico e de placas em escala laboratorial, seguindo planejamento experimental estrela;

- Comparação dos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas em relação à eficiência de troca térmica, no intervalo de estudo especificado;
- Determinação experimental do coeficiente global de transferência de calor de ambos os trocadores de calor, para diferentes condições operacionais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Trocadores de calor são assuntos constantes em cursos de engenharia, seus tópicos de estudo vão desde seus parâmetros de projeto, configurações de fluxo e modelos, problemas de operação e manutenção, até seu princípio de funcionamento, contado para isso suas equações de fundamentação teórica e cálculos para eficiência.

O equipamento é fator presente na maioria das indústrias, justamente por ter várias configurações e várias aplicações, as vezes são encontrados até mais de um trocador em uma mesma linha, sendo eles interligados ou não. Portanto, conhecer como um todo e entender seu funcionamento é um quesito indispensável para a engenharia, pois, a partir desses conhecimentos pode-se escolher qual o melhor trocador para determinada aplicação e qual a faixa de trabalho proporciona as melhores trocas térmicas.

Quando se necessita a avaliação de um equipamento em escala industrial, o primeiro passo é a experimentação em escala laboratorial. Com os dados obtidos, pode-se fazer um estudo para ampliação deste e, assim, ter uma visão mais completa e segura do processo. Nesse trabalho, portanto, propõe-se um estudo sobre os trocadores de tubos concêntricos e de placas em escala laboratorial, com a determinação das variáveis otimizadas do processo para garantir uma troca térmica eficiente entre os fluidos. Além disso, essa pesquisa mostra a importância da compreensão e estudo desses equipamentos tão presentes no âmbito industrial.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para contextualizar o trabalho, o referencial teórico foi dividido de forma a contemplar conceitos relevantes acerca de fundamentos de transferência de calor, a sua aplicação em trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas, a determinação da taxa de transferência de calor e, com este dado, o cálculo do coeficiente global de troca térmica pelos métodos da diferença de temperatura média logarítmica e da efetividade-NUT. Além disso, são apresentadas informações sobre o software de análise de dados, o Statistica.

### 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor é o processo pelo qual a energia é transportada sempre que dois sistemas em temperaturas diferentes entram em contato, ou ainda quando existir um gradiente de temperatura dentro de um sistema. A energia em transporte nestes casos é chamada de calor e esta não pode ser medida diretamente, nem observada, mas sim os efeitos causados pela sua adição ou remoção. Assim, a transferência de calor não visa apenas expressar a quantidade de calor transferida, como no caso da termodinâmica, mas sim o tempo e o modo pelo qual esse fenômeno ocorre.

Segundo Çengel e Ghajar (2012), os problemas de engenharia que envolvem a transferência de calor podem ser classificados em dois tipos, de avaliação ou de dimensionamento. No primeiro caso, deseja-se encontrar a taxa de troca de energia para um determinado sistema em temperaturas definidas, enquanto que no segundo, deseja-se projetar um sistema para que haja a taxa de transferência de calor desejada em certas temperaturas. Estes podem ser estudados de forma experimental, quando os sistemas são testados e são tomadas medidas para posterior análise, ou de forma analítica, utilizando-se de cálculos e análise matemáticas.

Desse modo, pode-se classificar o presente trabalho como um problema de engenharia de avaliação, pois os equipamentos já estão disponíveis e deseja-

se analisar seu desempenho, além de ser feito de forma experimental, com a disponibilidade de testar de modo físico as variáveis do sistema.

## 2.2 TROCADORES DE CALOR

Trocadores de calor são equipamentos vastamente utilizados pelas indústrias em geral e são responsáveis por fazer com que ocorra a troca térmica entre duas substâncias. A força motriz responsável pela troca de calor é a diferença de temperatura entre dois meios. Dessa forma, pode-se dizer que estes aparelhos trabalham sempre com dois materiais, geralmente fluidos, em diferentes temperaturas.

No presente trabalho, serão utilizados dois tipos específicos de trocadores de calor, sendo estes o de tubos concêntricos (podendo também ser chamado de trocador de calor de tubos duplos, bitubulares ou ainda tubulares) e o de placas.

### 2.2.1 Trocadores de Calor de Tubos Concêntricos

O primeiro dos trocadores de calor estudados neste trabalho é o trocador de calor de tubos concêntricos, que são, no geral, o tipo mais simples de projeto dentre esses equipamentos.

Pela definição de Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), trocadores de calor de tubos concêntricos são tipicamente constituídos por um tubo inserido concentricamente em outro de diâmetro maior com medidas apropriadas de forma a direcionar o fluxo de uma seção para a outra, fazendo com que um dos fluidos passe por dentro do tubo menor, enquanto o outro passa pela cavidade entre os tubos.

Dessa forma, existem duas configurações de fluxo para estes trocadores, sendo o primeiro deles a contracorrente, ou seja, quando o fluido dentro do tubo menor flui em um sentido e o fluido do espaço entre os fluidos flui no sentido oposto deste, e a segunda configuração seria a paralela, ou concorrente, quando ambos os fluidos fluem na mesma direção. (KAKAÇ, LIU E PRAMUANJAROENKIJ, 2012)

Seu projeto é bastante flexivo, pois podem ser mudados diversos fatores, como o diâmetro dos tubos, seu comprimento e o arranjo, como, por exemplo,

podendo se conectar várias séries e arranjos paralelos de trocadores. (KAKAÇ, LIU E PRAMUANJAROENKIJ, 2012)

Observando a Figura 1, pode-se notar como a variação de temperatura se comporta em relação ao comprimento do trocador de calor para escoamento dos fluidos em paralelo e em contracorrente. Por estes perfis, pode-se analisar que a configuração contracorrente é mais efetiva, pois a temperatura de saída do fluido frio pode ultrapassar a do quente, mas, obviamente, não a temperatura de entrada do quente, enquanto que na configuração paralelo, ambos os fluidos de saída tende, à mesma temperatura.

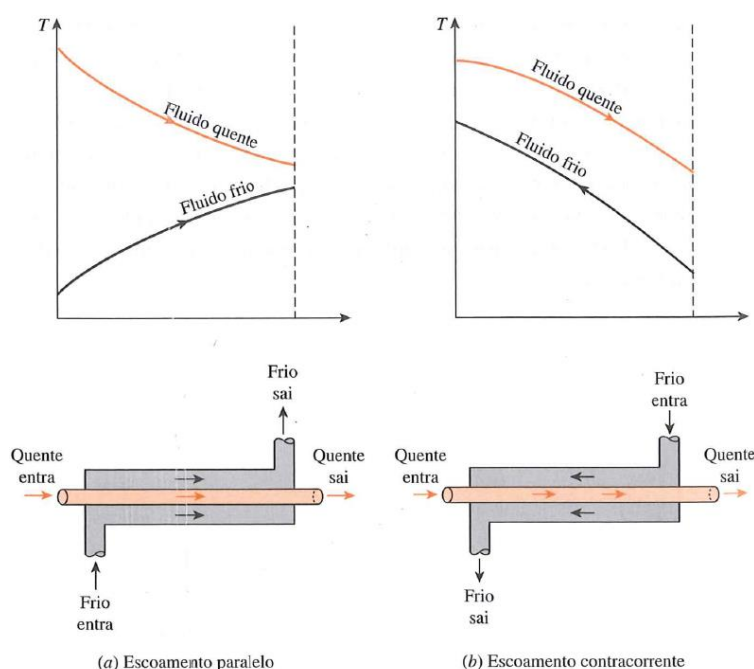


Figura 1 - Regimes de Escoamento Paralelo e Contracorrente e Seus Perfis de Temperatura Associados.

Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012) citam que o principal uso deste tipo de trocador é para o aquecimento ou resfriamento de fluido onde pequenas áreas de transferência (até 50m<sup>2</sup>) são requeridas. Alguns exemplos citados por Khedkar, Sonawane e Wasewar (2014) são usinas, ar condicionados, indústria petroquímica, refrigeração, indústrias de processos, aquecedores solares, reatores químicos e reatores nucleares. Pode-se deduzir que devido a esta vasta

gama de aplicação é que foram realizados tantos estudos sobre os trocadores de calor de tubos concêntricos nas últimas décadas.

Devido a este ser o trocador de calor mais prático e de projeto mais simples dentre os existentes, a maioria dos cálculos que envolvem as trocas térmicas dentro dos equipamentos são baseados em suas características, para, então, serem adaptados para as outras configurações e projetos.

## 2.2.2 Trocadores de Calor de Placas

O outro equipamento a ser utilizado no trabalho é o trocador de calor de placas, que tem seu projeto mais elaborado que o de tubos concêntricos, trazendo diversas vantagens em sua utilização, como será exemplificado neste tópico.

De acordo com Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), os trocadores de calor de placas podem ser classificados como sendo de placas vedadas, placas espirais ou ainda de lamelas. O tipo de trocador utilizado neste presente trabalho é de placas vedadas, que será explicado mais detalhadamente a seguir.

Os trocadores de placas vedadas são descritos por Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012) como sendo equipamentos constituídos de séries de placas finas com superfícies onduladas que separam os fluidos de trabalho. Estas placas possuem partes de canto que são dispostas de tal forma que os dois meios de comunicação entre as placas por onde o calor deve ser trocado, flui alternadamente nos espaços entre as placas. Se os equipamentos forem adequadamente projetados e as placas forem corretamente vedadas, é possível que os pacotes de placas possam ser mantidos juntos por parafusos de compressão. As vedações são o agente responsável por manter os fluidos de trabalho sem se misturar, bem como previne que haja vazamentos no equipamento e direciona os fluidos nos espaços entre as placas, onde ocorrerá a troca térmica. A Figura 2 ilustra essa característica de fluxo entre placas.

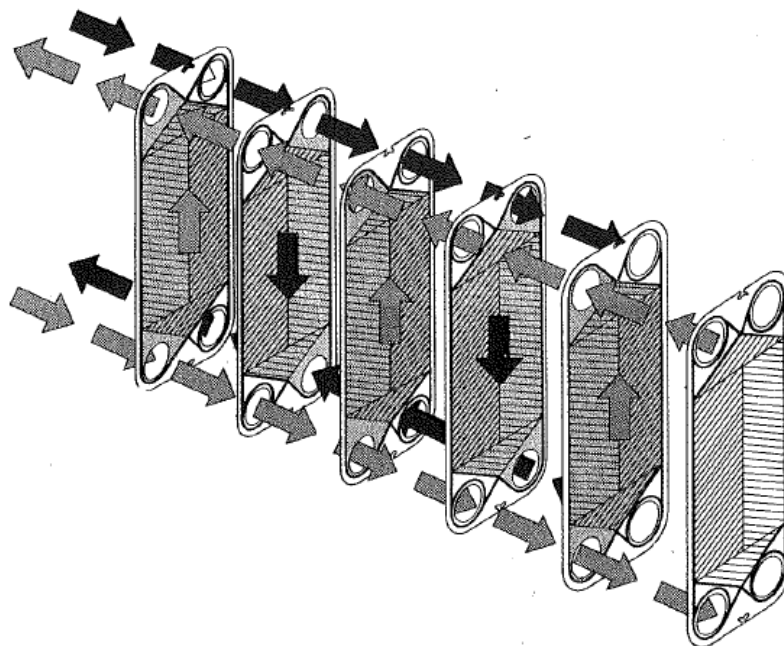


Figura 2 - Diagrama Demonstrando os Caminhos de Fluxo Em Um Trocador de Calor de Placas Vedadas.

Fonte: Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012)

De forma análoga aos trocadores de calor de tubos concêntricos, o fluxo dos fluidos pode ser contracorrente ou paralelo, porém, por ser tratar de uma configuração mais eficiente, normalmente os projetos dos trocadores de placas são realizados de forma que o fluxo seja sempre contracorrente. (KAKAÇ, LIU e PRAMUANJAROENKIJ, 2012)

As principais características destes equipamentos, de acordo com Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), são a temperatura de trabalho de até 250 °C, altos coeficientes de troca térmica, elevadas queda de pressão, e uma alta tensão de cisalhamento local, o que faz com que se diminuam as incrustações. Além disso, estes trocadores fornecem uma superfície de troca térmica leve e compacta. Por fim, eles têm manutenção bastante fácil, pois são totalmente desmontáveis, fazendo com que a limpeza e esterilização deles sejam fácil e efetiva, motivo pelo qual estes trocadores são tão utilizados em indústrias alimentícias.

Segundo Kechichian (2011), as aplicações do trocador de calor de placas envolvem geralmente processamento de produtos como leite e sucos de fruta, pelas características anteriormente citadas. Alguns processos, como no suco de laranja, eles apresentam inúmeras vantagens, por exemplo, a minimização das propriedades sensoriais.

Agora que as principais características dos equipamentos utilizados para a realização deste trabalho foram expostas, serão explanados os parâmetros utilizados para analisá-los.

### 2.2.3 Análise de Trocadores de Calor

Como pode ser observado até agora, os trocadores de calor exercem duas formas para a troca de calor: a convecção dos fluidos de trabalho para a parede dos equipamentos e a condução de um lado ao outro das paredes.

Para analisar a eficiência de operação dos trocadores de calor existem alguns parâmetros pré-estabelecidos que podem ser testados e calculados para os equipamentos de forma separada, para que seus funcionamentos possam ser comparados entre si. Estes parâmetros serão demonstrados a seguir.

#### *Balanço de Energia de Trocadores de Calor*

O balanço de massa é a relação entre a matéria que entra, sai, é gerada e acumulada no equipamento. Dessa forma, o balanço de massa visa representar os fluxos e transformações da massa dentro de um sistema, levando em consideração a primeira lei de Lavoisier, que diz que a matéria não pode ser criada nem destruída, e sim, transformada.

Dessa forma, o balanço de massa para um trocador de calor se dá pela (Equação 1):

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (1)$$

Levando em conta as seguintes considerações:

- Processo em regime permanente, uma vez que as propriedades do fluido em um ponto fixo permanecem constantes com o tempo, portanto,  $\frac{dE_{CV}}{dt} = 0$ , ou seja, não há acúmulo de energia dentro do equipamento.

- As variações de energia cinética e potencial são desprezíveis ao longo das tubulações:  $e_c \approx e_p \approx 0$ .

- Não existe interação de trabalho no interior do trocador de calor.

Com estas considerações, obtém-se a equação de calor trocado pelos fluidos. Idealmente, os fluidos trocariam a mesma quantidade de calor entre si, porém, na prática, há também a troca de calor do fluido mais quente com o ambiente. Dessa forma, foi utilizado o calor trocado pelo fluido quente para os outros cálculos citados adiante, que pode ser obtido pela Equação 2 a seguir:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{quente}(Cp_{quente} \cdot \Delta T_{quente}) \quad (2)$$

Onde  $\dot{Q}$  é o fluxo de calor,  $\dot{m}$  é a vazão mássica dos fluidos,  $\Delta T$  é a diferença de temperatura na entrada e na saída do equipamento e  $Cp$  é a capacidade térmica dos fluidos.

A (Equação 2) visa representar o balanço de energia de um trocador de calor, e esta relação será utilizada para determinar a troca térmica obtida nos equipamentos.

#### *Coeficiente Global de Transferência de Calor*

O coeficiente global de transferência de calor (U), como o próprio nome sugere, é um valor calculado para que sejam englobados em uma única constante todos os valores de coeficientes de troca térmica pelos métodos empregados. Em outras palavras, no trocador de calor, este coeficiente é calculado para que o coeficiente de transferência de calor que passa pela parede do tubo do trocador por condução (k) e o coeficiente de transferência de calor que passa de um fluido para o outro por convecção (h) não precisem ser calculados separadamente, mas sim que seus efeitos sejam convertidos para apenas uma constante calculada. Como a condução depende da espessura da fronteira por onde o calor é trocado e h depende da velocidade na qual o fluido passa para a troca de calor, pode-se dizer que U é diretamente influenciado por diversas características de escoamento, desde a geometria de tubulação até o número de Reynolds do fluido.



### Diferença de Temperatura Média Logarítmica

Em situações reais de utilização de trocadores de calor, é possível imaginar que a diferença de temperatura entre os fluidos de trabalho não se mantém constante por todo o comprimento do equipamento, pois conforme o fluxo percorre uma distância, mais calor é trocado, e mais diferente a temperatura se torna. Dessa forma, é adequado que se utilize uma análise diferente da variação de temperatura dos fluidos, e não apenas a temperatura do fluido quente decrescida da temperatura do fluido frio.

Para isso, segundo Çengel e Ghajar (2012), utiliza-se a diferença de temperatura média logarítmica (ou  $\Delta T_{ml}$ , ou ainda DTML), pois ela é uma estimativa melhor da temperatura que se encontram os fluidos de trabalho considerando todas as seções do trocador. Esta temperatura corrigida se dá por (Equação 3):

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3)$$

Onde  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  são as diferenças de temperaturas do fluido quente e frio, porém decrescidas entre si com os valores das extremidades. No caso, como ambos os trocadores serão analisados com o fluxo contracorrente, uma extremidade terá a entrada do fluido frio e saída do quente, enquanto a outra extremidade trabalhará com a saída do fluido frio e entrada do fluido quente. Isto pode ser visualizado na Figura 3.

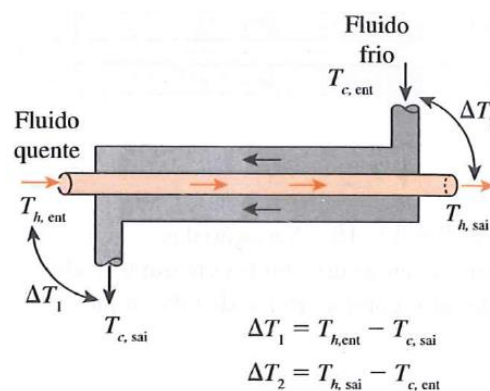


Figura 3 - Diagrama das Extremidades de Um Trocador de Calor de Tubos Concêntricos na Configuração de Fluxo Contracorrente. Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Çengel e Ghajar (2012) ressaltam a importância de se utilizar a diferença de temperatura média logarítmica pelo fato desta ser obtida através do perfil de temperatura dos fluidos ao longo do trocador, sendo assim uma representação bastante fiel da diferença de temperatura entre os fluidos de trabalho, motivo pelo qual, não se utiliza a média aritmética das temperaturas de entrada e saída dos fluidos de trabalho.

Dessa forma, estando disponível o valor da taxa de transferência de calor e da área de troca térmica, é possível calcular o coeficiente global de troca térmica, de acordo com a Equação 4:

$$U = \frac{\dot{Q}}{A_s \Delta T_{ml}} \quad (4)$$

O método da DTML é mais indicado para determinar o tamanho necessário do trocador para que este obtenha temperaturas de saída pré-determinadas quando se tem conhecimento das temperaturas de entrada.

#### *Método da Eficiência-NTU*

Um dos modos de calcular a eficiência de troca térmica do equipamento é pelo método da Eficiência-NTU (Number of transfer units) ou NUT (Número de unidades de transferência).

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), a taxa de transferência de calor real se dá pela influência da efetividade de cada equipamento, que se relaciona intimamente com NUT, que pode ser interpretado como um fator de correção do cálculo do Coeficiente Global de Troca Térmica (U) para análise real dos trocadores de calor.

Como citado neste capítulo, os trocadores de calor de tubos concêntricos são os mais comuns e utilizados desde sempre, motivo pelo qual, estão disponíveis mais dados e estudos sobre estes. Por se tratar de um equipamento tão usual, existem relações predefinidas para este trocador em ambos os

arranjos de escoamento, sendo que o contracorrente foi o escoamento utilizado neste trabalho. Dessa forma, o NUT se dá pela Equação 5:

$$NUT = \frac{1}{c-1} \ln \left( \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon c-1} \right) \quad (5)$$

Onde  $\varepsilon$  é a efetividade do trocador, e  $c$  é a taxa entre a capacidade térmica máxima e mínima dos fluidos, ou seja, os fluidos que tem a maior e menor capacidade térmica, respectivamente.

Neste caso, a efetividade ( $\varepsilon$ ) pode ser calculada pela relação entre o calor real que ele trocou no experimento ( $Q_{real}$ ), e o calor máximo que o equipamento poderia trocar ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), que é calculado relacionando a menor capacidade térmica ( $C_{min}$ ) entre o fluido quente e frio e maior diferença de temperatura possível entre os fluidos pela Equação 6:

$$\varepsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

No caso do trocador de placas, utilizando o manual do equipamento fornecido pela Edibon (2011), a equação para encontrar o NUT é análoga à equação do Trocador de Calor de Tubos Concêntricos.

A partir deste fator, é possível calcular o Coeficiente Global de Troca Térmica corrigido do equipamentos através da Equação 7:

$$U = \frac{NUT * C_{min}}{A} \quad (7)$$

Onde  $C_{min}$  é a menor capacidade térmica entre os fluidos e  $A$  é a área de transferência de calor.

Com estes métodos é possível encontrar valores do coeficiente global de troca térmica dos equipamentos para os experimentos que foram realizados e associar como a variação dos parâmetros de entrada do fluido quente interferem no cálculo dessa constante.

As técnicas para realizar estes experimentos e coletar os dados que foram utilizadas no trabalho serão apresentados a seguir.

## 2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

No estudo experimental dos trocadores de calor, uma forma de se estudar diferentes níveis das variáveis do processo, minimizando o número de experimento é a utilização de um planejamento experimental. Este tipo de ferramenta permite correlacionar os parâmetros de estudo, neste caso a temperatura e a vazão volumétrica do fluido quente, para determinar as condições otimizadas do processo em termos de troca térmica.

O interesse em buscar saber quais as variáveis são importantes em algum estudo e também os limites inferiores e superiores dos valores dessas variáveis, são quesitos indispensáveis para qualquer área de pesquisa. (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

O planejamento experimental é uma técnica estatística utilizada para relacionar a dependência entre as variáveis e suas relevâncias nos experimentos, determinando assim as variáveis que tem maior influência em um determinado processo, de forma a reduzir as variações do processo e melhoria na concordância entre os valores titulares e os valores requisitados, reduzir o tempo do processo, reduzir o custo operacional e melhoria no rendimento do mesmo. (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

O planejamento de experimentos é geralmente aplicado para avaliação e comparação de configurações simples de projetos, avaliação de distintos materiais, seleção e determinação de parâmetros de projeto que aprimorem o desempenho de produtos e para conseguir produtos através de uma forma mais simples de se fabricar, sendo estes projetados, desenvolvidos e produzidos em um menor tempo e com melhor desempenho e conformidade que os produtos dos competidores. (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

O planejamento experimental se resume em três princípios a replicação, aleatoriedade e blocagem. Existem dois motivos pelos quais fazer um experimento com réplicas é importante: primeiro por permitir a obtenção do erro experimental (verifica se as desigualdades observadas nos dados são estatisticamente desiguais) e o segundo por permitir a obtenção de uma estimativa mais precisa caso a média de uma amostra seja usada para estimar o efeito de um fator no experimento. Sendo assim, os métodos estatísticos

necessitam que as observações sejam variáveis aleatórias e suas réplicas feitas de forma também aleatória, garantindo assim uma melhor distribuição de todos os fatores que não foram observados. A blocagem é utilizada industrialmente e tem por objetivo o aumento da precisão de experimentos, quando estes são operados por pessoas diferentes, ou por diferentes bateladas, levando a uma possível não igualdade dos dados ou produtos, assim esse método trata cada pessoa ou batelada como um bloco. (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

Portanto para começar os experimentos deve-se ter os objetivos e as especificações bem claras de forma que assim se possa escolher as variáveis envolvidas nos experimentos, a faixa de variação das mesmas, os níveis para essas variáveis, a variável de resposta e por fim o planejamento experimental (número de réplicas, ordem de realização dos experimentos e métodos de análise dos resultados) (CALADO; MONTGOMERY, 2003). Na figura 4, pode-se observar um diagrama que representa a estratégia inicial para o planejamento a ser realizado.

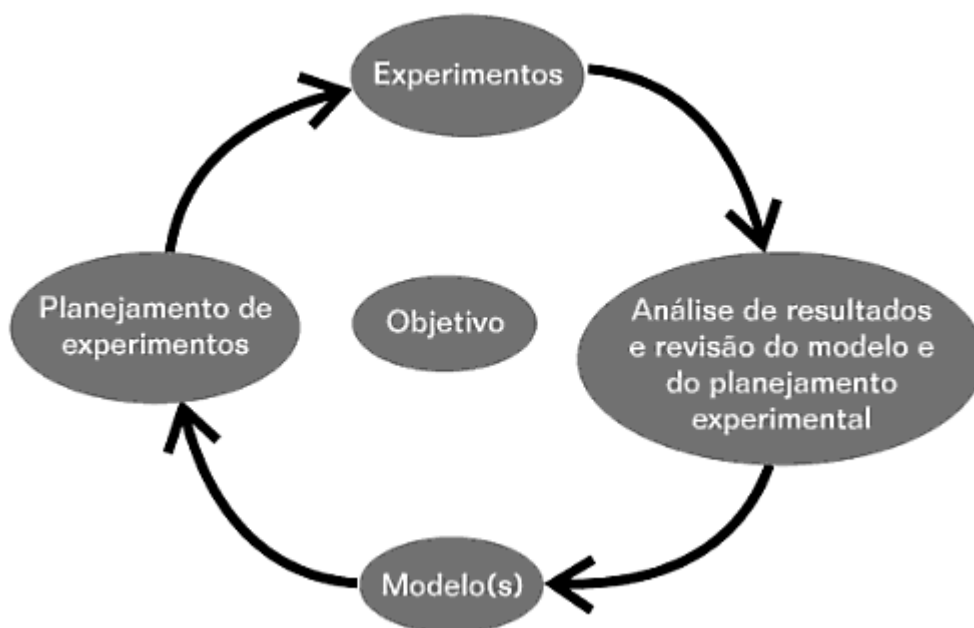


Figura 4 - Estratégia Inicial. Fonte: Calado e Montgomery (2003)

Dessa forma, um dos métodos utilizados para realizar o planejamento experimental é a o planejamento fatorial, que será explanado a seguir no tópico 2.3.1.

### 2.3.1 Planejamento Fatorial

Este tipo de planejamento é derivado do planejamento experimental e é muito útil em investigações preliminares quando se precisa saber se os fatores que estão sendo trabalhados são ou não relevantes na resposta desejada e quando não se está interessado com uma descrição muito exata dessa relevância.

Quando se tem dois ou mais fatores, o planejamento fatorial é a técnica mais indicada, pois permite combinações de todos esses fatores ou variáveis independentes em todos os níveis, obtendo assim, todas as combinações possíveis para análise. Além disso, são muito úteis para quantificar os efeitos de uma ou mais variáveis na resposta de um sistema. (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

Um planejamento fatorial e dois níveis é representado por  $2^k$ , o 2 indica o número de níveis e k o número de fatores. Para três níveis, temos  $3^k$ . Tem-se que quanto maior o número dos níveis, menor é a correlação entre os parâmetros. Porém, a correlação diminui lentamente com o aumento do número de níveis. (CALADO; MONTGOMERY, 2003)

### 2.3.2 Superfície de Respostas

O planejamento fatorial aliado às análises de superfície de respostas fornecem dados seguros sobre o sistema e diminuem o empirismo de técnicas como a de tentativa e erro.

Esta metodologia é uma técnica de otimização fundamentada no planejamento fatorial e tem sido muito utilizada com sucesso para modelagem de vários sistemas. A superfície de resposta, nada mais é do que um gráfico de resposta que apresenta o comportamento da resposta em relação aos fatores selecionados para o sistema. (TRINDADE, 2009)

Em geral, processos industriais dependem de muitos fatores ou variáveis que determinam a qualidade final de um produto. Dessa forma, vem sendo

estudado, desde meados de 1970, a metodologia de superfícies de resposta, que consiste em aproximar coeficientes de regressão polinomial para gerar um modelo empírico que conecte os fatores e as respostas do sistema. Sendo assim, se torna útil quando não se sabe a relação precisa dos fatores envolvidos. Tem como principal vantagem seus resultados consistentes em relação às condições não ideais, assim como erros aleatórios e pontos significativos. Além disso, tem uma simplicidade analítica da superfície obtida. (SARAMAGO; SILVA, 2008)

## 2.4 SOFTWARE DE ANÁLISE DE DADOS

A fim de analisar os dados obtidos experimentalmente, foi utilizado um software de auxílio para a melhor análise dos resultados obtidos, para obter um resultado mais concreto e coerente de acordo com a pesquisa.

### 2.4.1 Statística

O software utilizado é o Statística 7.0 da Statsoft Inc (2004), que além de ser responsável por criar o planejamento experimental a ser utilizado, também analisa os valores obtidos das variáveis e mostra de que melhor forma elas se relacionam.

É um software de caráter estatístico que contém um conjunto de ferramentas para efetuar análises estatísticas. Além de possuir também, ferramentas de gestão e visualização de bases de dados e *Data Mining*. Inclui técnicas de seleção de modelação preditiva, *clustering* ou agrupamentos e ferramentas exploratórias. A versão 12 é compatível com Windows XP, Windows Server 2003, Windows Vista, Windows 8 e 7. (UFRGS, 2015)

É efetivo para conduzir uma análise precisa, pois apresenta uma ampla faixa de procedimentos estatísticos, técnicas integradas que garantem a preparação de dados para análises mais rápidas e fáceis, apresenta também um relatório de funcionalidade sofisticado para desenvolvimento e gráficos com alta eficácia, contém recursos de visualização eficientes que apresentam de forma clara a importância dos resultados obtidos e um suporte para todos os tipos de dados incluindo aqueles com conjunto de dados bem grande. (IBM, 2015)



### 3 METODOLOGIA

A seguir, serão demonstradas as diretrizes metodológicas que foram utilizadas para a realização do presente projeto de pesquisa, descrevendo o local onde foram realizados os experimentos e como foram tomados e analisados os dados.

#### 3.1 LOCAL

O local utilizado para a realização deste trabalho foi o Laboratório de Engenharia Química I, que se situa nas instalações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, no estado do Paraná.

#### 3.2 EXPERIMENTOS NOS TROCADORES DE CALOR

Para avaliar a eficiência de troca térmica foram utilizados trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas de escala laboratorial. Os dados foram coletados e analisados a partir dos experimentos nestes equipamentos com a variação das temperaturas de entrada e vazões volumétricas do fluido quente, sendo que o fluido utilizado é água, que no caso passa em maior temperatura para ceder calor, e é obtido através de uma caixa de aquecimento do equipamento, enquanto que o fluido frio é o que passa em menor temperatura e foi obtido diretamente de uma fonte de água do laboratório à temperatura ambiente.

Foi utilizado planejamento estrela e a metodologia de superfície de resposta para análise das variáveis significativas do processo e sua otimização em relação a troca térmica, em ambos os trocadores de calor. Além disso, comparou-se o desempenho e o coeficiente global de transferência de calor de ambos os trocadores de calor.

### 3.2.1 Coleta dos Dados

Para realização da coleta de dados referentes às tomadas de temperatura e vazão foram utilizados os módulos de trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas e a unidade base de operação destes, ambos da Edibon. O fluido escolhido para os testes, tanto o quente quanto o frio, foi a água.

A unidade base consiste em um tanque de aquecimento para a água quente, uma bomba para auxiliar a vazão desta, um sistema de encanamento, medidores de vazão e as válvulas independentes para cada um dos fluidos. O sistema de encanamentos tem quatro terminais para que sejam conectadas as tubulações dos módulos dos trocadores de calor através de mangueiras flexíveis, dois para a entrada dos fluidos e dois para a saída destes.

O módulo do trocador de calor de tubos concêntricos (TITC) consiste no equipamento que é formado por dois tubos de aço inox, sendo que as medidas do tubo interno são de 16mm de diâmetro interno, 18mm de diâmetro externo, 1mm de espessura, enquanto que o tubo externo tem dimensões de 26mm de diâmetro interno, 28mm de diâmetro externo, 1mm de espessura, resultando em uma área de troca térmica interna total de  $0,00192\text{m}^2$ .

Já o módulo do trocador de calor de placas (TIPL) é constituído de 10 placas conjugadas de aço inoxidável, e têm dimensões de  $0,192\text{m}^2$  de área de transferência de calor média, 1m de comprimento, 0,3m de largura e 0,5m de altura.

O modo de tomada de dados se dá pela determinação da temperatura em diferentes pontos pelo comprimento de ambos os trocadores, sendo variada a temperatura de entrada e a vazão volumétrica do fluido quente, ambos com escoamento contracorrente. A forma de coleta de dados é análoga a ambos os módulos, e se dá através de uma caixa de controle, onde são conectados os sensores de temperatura dos trocadores de calor. É importante citar que a caixa de controle é também responsável pelo controle de temperatura do tanque de aquecimento e o acionamento e desligamento da bomba de vazão da água quente.

Para iniciar os ensaios, foi necessário preencher o tanque de aquecimento de água a ponto de cobrir a resistência. A resistência e a bomba

são então ligadas e a temperatura de aquecimento da água é ajustada na caixa de controle. Depois que a água é aquecida, abriu-se o fluxo da água quente e fria. Para isso, uma mangueira conectada a uma torneira disponível no laboratório foi anexada à entrada da água fria de forma a entrar pela válvula Profield, sendo esta a válvula que controla a vazão da água fria.

Em seguida, quando os fluidos já estavam em movimento, monitorou-se a temperatura de entrada da água quente até que esta atingisse a desejada no experimento. Então foram coletadas as temperaturas de saída de ambos os fluidos e também a de entrada do fluido frio. Este procedimento foi repetido para todos os ensaios experimentais, em que alterou-se a vazão e temperatura do fluido quente.

### 3.2.2 Definição das Condições Operacionais do Processo

Com o objetivo de avaliar as melhores condições de operação para obter uma maior eficiência de troca térmica em ambos os trocadores de calor, foi feito um estudo estatístico sobre a influência das variáveis operacionais de entrada do processo sobre a taxa de transferência de calor. Os experimentos foram realizados de acordo com o planejamento experimental, explanado no tópico 2.3 deste presente trabalho, sendo utilizado o planejamento experimental com configuração axial ou estrela. Esta configuração fornece uma avaliação consistente da variável resposta mediante variações lineares e quadráticas das variáveis independentes, com uma equação representativa, que pode ser utilizada em modelagens do processo de troca térmica nos trocadores de calor.

No planejamento experimental busca-se um modelo estatístico, representado por uma equação matemática, que discrimina a variável resposta em função das suas variáveis independentes para a execução de um tipo de experimento. A partir da aproximação matemática obtida, torna-se perceptível verificar a influência de uma ou mais variáveis em outra de interesse no experimento. As variáveis independentes estudadas foram a temperatura de entrada e a vazão de alimentação, ambos do fluido quente, para avaliar como estas influenciam na variável resposta (taxa de transferência de calor). O

planejamento estrela consistiu em 11 experimentos com três pontos centrais e com quatro pontos axiais correspondente ao mínimo e ao máximo valor das variáveis independentes, sendo estes níveis apresentados na Tabela 1. Durante os experimentos foi mantida a vazão do fluido frio fixa em 1 l/min e temperatura de entrada do fluido frio foi a temperatura ambiente.

Tabela 1 - Níveis do Planejamento Experimental Estrela de Ambos os Trocadores de Calor

<b>Variáveis</b>	<b>Níveis</b>				
<b>Independentes</b>	$-\sqrt{2}$	-1	0	1	$+\sqrt{2}$
<b>Tq (°C)</b>	40	43	50	57	60
<b>Fq (m³/s)</b>	1,000E-05	1,250E-05	1,833E-05	2,417E-05	2,667E-05

Onde Tq é a temperatura de entrada do fluido quente e Fq é a vazão de entrada do fluido quente.

Os limites inferior e superior das variáveis independentes em estudo foram definidos de acordo com experimentos iniciais nos trocadores de calor e os limites operacionais do equipamento.

Os resultados do experimento foram inseridos no programa Statistica Release 7.0 (2004), que geraram tabelas e gráficos necessários para avaliação das variáveis estudadas nos trocadores de calor.

### 3.3 COMPARAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Para a análise dos dados coletados, foi utilizada, primeiramente, a Equação 2, que diz respeito ao Balanço de Energia dos equipamentos. Sendo assim, com os dados de todos os experimentos, pode-se, então, calcular a quantidade de calor trocado ( $Q$ ) para cada um deles e fazer a primeira comparação entre os dois trocadores.

Em seguida, estes resultados foram utilizados para o cálculo do coeficiente global de troca térmica, para ambos os trocadores. Para isso, foram aplicadas as Equações 3 e 4 para o cálculo pelo método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica, bem como as Equações 5, 6 e 7 para o método da Eficiência-NUT (Número de Unidades de Transferência de Calor). Dessa forma, pôde-se analisar a validade de ambas as metodologias para a obtenção do coeficiente e comparar os resultados obtidos entre si.

Todas as equações aqui relacionadas se encontram explanadas no tópico 2.2.3 deste presente trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados da análise de troca térmica e a comparação do desempenho dos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas de escala laboratorial. São mostrados os dados de taxa de transferência de calor ( $Q$ ) para os ensaios do planejamento experimental estrela, sendo avaliados os efeitos das variáveis independentes temperatura de entrada ( $T_q$ ) e vazão volumétrica ( $F_q$ ) do fluido quente. Além disso, são exibidos e avaliados os dados do coeficiente global de transferência de calor para os ensaios experimentais de ambos os trocadores de calor.

### 4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizados os trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas para avaliar a troca térmica entre os fluidos quente e frio. Os experimentos seguiram planejamento experimental do tipo estrela, para investigar a influência das variáveis independentes, temperatura de entrada e vazão volumétrica do fluido quente, na taxa de transferência de calor ( $Q$ ). O planejamento estrela consistiu em 11 experimentos com três pontos centrais e com quatro pontos axiais correspondentes ao mínimo e ao máximo valor das variáveis independentes.

No planejamento experimental é usual trabalhar-se com valores codificados das variáveis. No caso do planejamento estrela, que possui duas variáveis independentes, tem-se nove níveis diferentes, com três pontos centrais. A repetição do ponto central é utilizada para estimar o erro experimental. As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores da combinação estatística das variáveis independentes estudadas, juntamente com seu valor codificado, e as taxas de transferência de calor calculadas para cada ensaio nos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas, onde  $T_q$  é a temperatura de entrada do fluido quente,  $F_q$  é a vazão de entrada do fluido quente e  $Q$  é a quantidade de calor trocado.

A variável resposta (taxa de transferência de calor, Q) foi determinada por meio das equações de balanços de energia, como visto no tópico 2.2.3 do presente trabalho e foram nomeadas como Equações (1) e (2).

Tabela 2 - Dados do planejamento experimental estrela para o trocador de calor de tubos concêntricos

Ensaio	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais		Variável Resposta
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	T <sub>q</sub> (°C)	F <sub>q</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (W)
1	-√2	0	40	1,833E-05	380,617
2	-1	+1	43	2,417E-05	501,195
3	-1	-1	43	1,250E-05	363,065
4	0	+√2	50	2,667E-05	662,040
5	0	0	50	1,833E-05	531,111
6	0	0	50	1,833E-05	531,111
7	0	0	50	1,833E-05	455,238
8	0	-√2	50	1,000E-05	414,085
9	+1	+1	57	2,417E-05	798,122
10	+1	-1	57	1,250E-05	567,966
11	+√2	0	60	1,833E-05	756,244

Observa-se na Tabela 2 que as condições operacionais aplicadas durante os estudos no trocador de calor de tubos concêntricos cobriram um intervalo de taxa de transferência de calor de 363 W a 798 W. Quando se aumentou a T<sub>q</sub> do nível inferior (ensaio 1) ao superior (ensaio 11), com F<sub>q</sub> constante, houve um aumento de 375 W na taxa de transferência de calor entre os fluidos. Por outro lado, com T<sub>q</sub> constante a variação da F<sub>q</sub> do nível mínimo (ensaio 8) ao máximo (ensaio 4) acarretou num ganho de 247 W. Nos pontos centrais (ensaios 5, 6 e 7), nota-se que a variação de Q foi pequena, indicando que o trocador de calor de tubos concêntricos apresentou boa estabilidade durante a operação, condição necessária para a análise das variáveis do processo.

Tabela 3 - Dados do planejamento experimental estrela para o trocador de calor de placas

Ensaio	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais		Variável Resposta
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	T <sub>q</sub> (°C)	F <sub>q</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q (W)
1	-√2	0	40	1,833E-05	838,224
2	-1	+1	43	2,417E-05	1104,360
3	-1	-1	43	1,250E-05	622,935
4	0	+√2	50	2,667E-05	1325,568
5	0	0	50	1,833E-05	1216,013
6	0	0	50	1,833E-05	1216,013
7	0	0	50	1,833E-05	1140,012
8	0	-√2	50	1,000E-05	871,356
9	+1	+1	57	2,417E-05	1598,730
10	+1	-1	57	1,250E-05	1190,271
11	+√2	0	60	1,833E-05	1667,641

A taxa de transferência de calor no trocador de calor de placas varreu um intervalo de 622 W a 1667 W (Tabela 3), para a faixa de estudo especificada. A variação de T<sub>q</sub> do nível inferior (ensaio 1) ao superior (ensaio 11), com F<sub>q</sub> constante, acarretou em um aumento de 829 W na taxa de transferência de calor entre os fluidos. Já com T<sub>q</sub> constante, aumentando-se a F<sub>q</sub> do nível mínimo (ensaio 8) ao máximo (ensaio 4) houve um ganho em q de 454 W. Similarmente ao que ocorreu no trocador de calor de tubos concêntricos, a variação de Q foi pequena nos pontos centrais (ensaios 5, 6 e 7), indicando que o trocador de calor de placas apresentou boa estabilidade durante a operação.

Os dados dos experimentos das Tabelas 2 e 3 foram inseridos no programa Statistica Release 7.0 (2004), utilizando as variáveis codificadas das variáveis independentes, que geraram tabelas e gráficos necessários para avaliação das variáveis estudadas nos trocadores de calor.

As Tabelas 4 e 5 mostram os valores dos efeitos das variáveis independentes sobre a taxa de transferência de calor no trocador de calor de



tubos concêntricos e no trocador de calor de placas, respectivamente, gerado pelo planejamento. O erro puro se trata do erro associado à dispersão dos dados em cada nível da variável resposta em torno de sua própria média. É o erro associado aos experimentos, que é calculado pelas três corridas no ponto central. Nas Tabelas 4 e 5, a coluna representada por "p" mostra os valores do "p-valor" dos efeitos das variáveis para um intervalo de confiança de 95%, que se refere à probabilidade de significância das variáveis independentes. Para que o resultado seja significativo, o teste p requer que o seu valor máximo seja 0,05 (igual a 5%). Nessas tabelas, somente os efeitos significativos foram apresentados, cujo valor de p foi inferior a 0,05.

Tabela 4 - Efeitos das variáveis do processo para o trocador de calor de tubos concêntricos

<b>Fator</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Erro Puro</b>	<b>p</b>
<b>Média</b>	505,9	25,3	0,002489
<b>Tq (°C)</b>	257,1	30,8	0,014069

Tabela 5 - Efeitos das variáveis do processo para o trocador de calor de placas

<b>Fator</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Erro Puro</b>	<b>p</b>
<b>Média</b>	1190,2	25,3	0,000453
<b>Tq (°C)</b>	556,0	30,8	0,003069
<b>Fq (m<sup>3</sup>/s)</b>	380,8	30,9	0,006508

A análise das Tabelas 4 mostra que o efeito que têm maior influência estatística sobre a variável resposta, na faixa de estudo pré-determinada e para um nível de confiança de 95%, é a temperatura de entrada do fluido quente (Tq). Portanto, para o trocador de calor de tubos concêntricos, a vazão volumétrica do fluido quente não apresentou influência significativa na taxa de transferência de calor. Em se tratando do trocador de calor de placas, observa-se na Tabela 5 que tanto os efeitos da temperatura de entrada quanto da vazão de alimentação do fluido quente apresentam influência estatística significativa, para um nível de confiança de 95%, sobre a variável de resposta.

As Equações 8 e 9 representam os modelos experimentais que melhor descrevem a variação da taxa de transferência de calor nos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas de escala laboratorial, respectivamente, dentro do limite das variáveis estudadas e considerando o limite de significância de 95%. Os coeficientes das equações foram gerados pelo software Statistica 7, com as variáveis em seu valor codificado. Para o trocador de calor de tubos concêntricos, o coeficiente de determinação do modelo foi de  $R^2=0,9164$  e para o trocador de calor de placas foi de  $R^2=0,9810$ , que foram calculados considerando os efeitos significativos das variáveis.

$$Y = 505,93 + 128,53 X_1 \quad (8)$$

$$Y = 1299,193 + 688,782 X_1 + 190,406X_2 \quad (9)$$

Onde: Y= taxa de transferência de calor, em Watts;  $X_1$ = variável codificada para a temperatura de entrada do fluido quente;  $X_2$ = variável codificada para vazão volumétrica de alimentação do fluido quente.

Para avaliar se os dados experimentais se adequam ao modelo gerado pela análise estatística, o método mais usado é a Análise de Variância. Os resultados dessa análise são agrupados na tabela ANOVA, que mostra as contribuições da regressão e dos resíduos nos experimentos e permite a determinação da qualidade do ajuste do modelo (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

A análise de variância dos modelos gerados para a taxa de transferência de calor, em função das variáveis independentes, é apresentada na Tabela 6, para o trocador de calor de tubos concêntricos, e na Tabela 7, para o trocador de calor de placas. As tabelas apresentam as contribuições da regressão (R) e dos resíduos (r) nos experimentos. As contribuições da regressão se dão pela soma dos efeitos (SQR). Já as contribuições atribuídas ao resíduo, pela soma do erro puro com a falta de ajuste do modelo (SQr).

Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental estrela do trocador de calor de tubos concêntricos

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade	Média Quadrática (MQ)	F <sub>calculado</sub>
Regressão (R)	133515,1	1	133515,1	54,77
Resíduo (r)	12187,6	5	2437,52	
Falta de Ajuste	8350,0	3	2783,33	
Erro Puro (ep)	3837,6	2	1918,8	
<b>Total (T)</b>	<b>145702,7</b>	<b>10</b>		
%variação explicada	91,64	$\frac{SQ_R}{SQ_T} * 100$		
%máxima de variação explicável	97,37	$\frac{SQ_T - SQ_{ep}}{SQ_T} * 100$		

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento experimental estrela do trocador de calor de placas

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade	Média Quadrática (MQ)	F <sub>calculado</sub>
Regressão (R)	133515,1	1	133515,1	54,77
Resíduo (r)	12187,6	5	2437,52	
Falta de Ajuste	8350,0	3	2783,33	
Erro Puro (ep)	3837,6	2	1918,8	
<b>Total (T)</b>	<b>145702,7</b>	<b>10</b>		
%variação explicada	91,64	$\frac{SQ_R}{SQ_T} * 100$		
%máxima de variação explicável	97,37	$\frac{SQ_T - SQ_{ep}}{SQ_T} * 100$		

Um dos critérios para avaliar se os modelos gerados representam os dados experimentais é o teste F. O valor F é definido pela razão entre a média

quadrática da regressão ( $MQ_R$ ) e a média quadrática dos resíduos ( $MQ_r$ ) e, em seguida, compara-se a razão com o valor de F tabelado (considerando o mesmo nível de confiança). Se o F calculado for pelo menos três vezes maior que o F tabelado, indica que o modelo representa bem os dados experimentais (KALIL, et al., 2000). Na Tabela 6 observa-se que o F calculado é aproximadamente 8 vezes maior que o tabelado ( $F_{1,5} = 6,61$ ) para o trocador de calor de tubos concêntricos. Em se tratando do trocador de calor de placas (Tabela 7) verifica-se que o F tabelado é aproximadamente 22 vezes maior que o tabelado ( $F_{2,5} = 5,79$ ). Portanto, pode-se dizer que os modelos apresentam alta significância estatística. Além disso, os modelos são bem ajustados, pois apresentam coeficientes de determinação altos.

Com estes modelos pôde-se traçar a superfície de resposta para as condições do planejamento para o trocador de calor de tubos concêntricos (Figura 5) e para o trocador de calor de placas (Figura 6). O emprego da técnica de superfície de resposta é adequado para estimar e analisar pontos de ótimo (máximo e mínimo), para uma determinada função, estudando-se o comportamento da variável resposta em função das variáveis independentes.

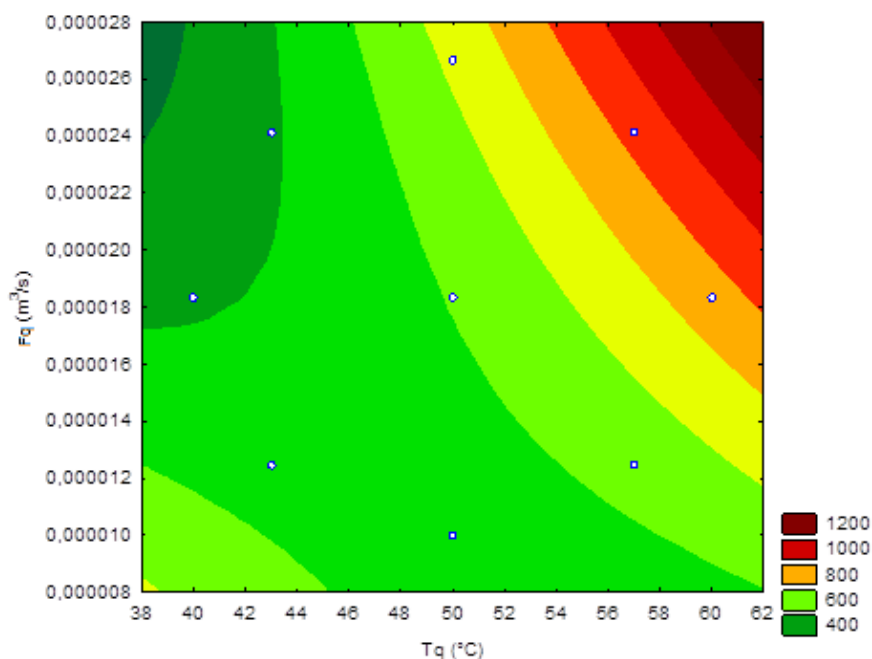


Figura 5 - Superfície de resposta para o trocador de calor de tubos concêntricos

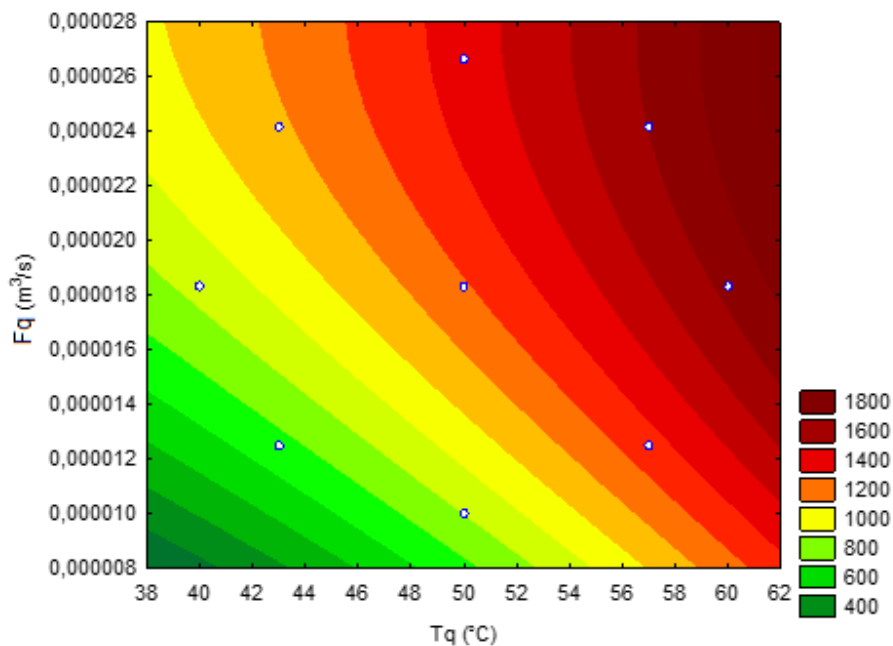


Figura 6 - Superfície de resposta para o trocador de calor de placas

Os eixos das superfícies de respostas representam as variáveis independentes utilizados nos trocadores de calor em seus valores reais e as barras coloridas ao lado direito das figuras representam o valor da taxa de transferência de calor calculado. Observa-se nas Figuras 5 e 6 as condições de operação em que ocorre a maior taxa de transferência de calor entre os fluidos, região destacada pela cor vermelha mais escura nos gráficos.

Na análise da superfície de resposta obtida para o trocador de calor de tubos concêntricos (Figura 5) verifica-se que as curvas de nível aumentam a intensidade da variável resposta no sentido do aumento da temperatura de entrada e vazão volumétrica do fluido quente. Observa-se que para aumentar a taxa de transferência de calor o ideal seria aumentar o nível máximo das variáveis estudadas, porém, devido às limitações operacionais deste equipamento, não foi possível aumentar esses intervalos.

A influência da temperatura de entrada e vazão de alimentação do fluido quente do trocador de calor de placas pode ser vista na superfície de resposta da Figura 6. As melhores condições para se obter maiores taxas de transferência de calor são em altos valores de  $T_q$ , com aumento de  $F_q$ . De forma geral, as curvas de nível aumentam a intensidade da variável resposta no sentido do aumento de  $T_q$  e  $F_q$ .

Em se tratando do estudo estatístico nos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas de escala laboratorial, utilizado planejamento experimental estrela, observou-se que, dentro da faixa de estudo pré-determinada, há um aumento da taxa de transferência de calor com o aumento das variáveis independentes estudadas.

## 4.2 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Quando se trata de dimensionamento de um trocador de calor, o coeficiente global de troca térmica é uma variável de grande importância, pois, associa a carga térmica  $Q$  e a área de troca térmica total  $A$ , como visto na Equação 4 do tópico 2.2.3 deste presente trabalho.

Para análise em trocadores de calor utilizou-se os dados das temperaturas de entrada e saída e vazões, a partir do balanço de energia, demonstrado no tópico 2.2.3, em que foi possível chegar a um valor da taxa de transferência de calor, pela Equação 2. Com estes valores, portanto, empregou-se os métodos da Diferença de Temperatura Média Logarítmica e o método da efetividade-NUT, ambos expostos no Tópico 2.2.3 e caracterizados pelas Equações 4 e 5, respectivamente, para obter-se o valor do coeficiente global de transferência de calor.

Dessa forma, a partir dos dados coletados, os valores do coeficiente para os trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados Para os Coeficientes Globais em  $W/m^2.K$  de Transferência de Calor para Ambos os Trocadores de Calor

Ensaio	Tubos Concêntricos		Placas	
	DTML	NUT	DTML	NUT
1	13260,108	13428,098	974,189	1272,432
2	15825,402	16448,773	878,399	791,962
3	11833,947	11913,272	828,675	748,765
4	16063,883	16274,583	948,102	874,363
5	12868,371	12760,829	976,298	1023,578
6	13203,848	13378,021	911,003	880,609
7	10315,326	9994,358	854,065	819,608
8	10301,184	10291,060	913,017	889,322
9	16320,362	16487,234	994,535	927,996
10	11838,933	11652,913	837,871	722,997
11	14324,378	14295,638	969,071	976,057

Os ensaios citados na Tabela 8 são os mesmos relacionados na Tabela 2 do tópico 4.1.

Nota-se que para nenhum dos métodos o coeficiente global é constante. Isso pode ser justificado pelo fato de que para cada teste tanto as temperaturas de entrada e saída quanto a vazão do fluido quente não foram as mesmas. Logo, estas variáveis de fato exercem influência, como também mostrado no tópico 4.1, uma vez que mostram por meio da variação do coeficiente global se há uma maior ou menor resistência em relação a troca térmica. Um maior coeficiente global indica uma maior troca térmica, apresentando, assim, uma menor resistência.

Analisando a Tabela 8, observa-se que o coeficiente global para o trocador de calor de tubos concêntricos apresentou valores maiores do que os relacionados ao trocador de calor de placas. Ou seja, ao se comparar os valores médios do coeficiente global de transferência de calor tem-se que o valor de  $U$  para o trocador de tubos concêntricos é cerca de 14,5 vezes maior para o método DTML e 16,9 vezes maior para o método NUT em relação aos mesmos métodos no cálculo de tal coeficiente para o trocador de calor de placas.

Isso pode ocorrer devido à diferença de área de troca térmica dos equipamentos. Enquanto tem-se uma área de  $0,00192 \text{ m}^2$  para o trocador de tubos concêntricos, o trocador de placas apresenta uma área 100 vezes maior, ou seja, de  $0,192 \text{ m}^2$ . Como o coeficiente global e a área de troca térmica estão numa relação onde são inversamente proporcionais, quando tem-se um aumento de área há, portanto, uma diminuição do coeficiente global. Por este motivo, a comparação dos equipamentos a partir do coeficiente global de troca de calor não é efetiva.

Para melhor visualização, os dados da Tabela 8, referentes aos resultados do coeficiente global, foram plotados e são representados nas Figuras 7 e 8 para o trocador de calor de tubos concêntricos e de placas, respectivamente.



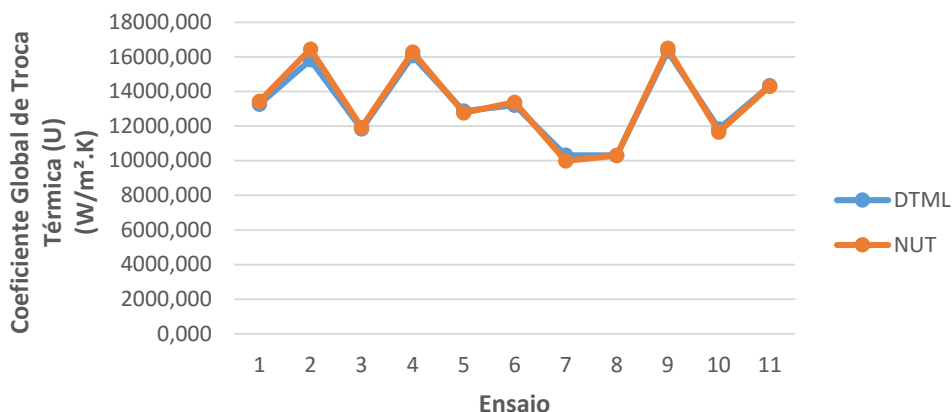


Figura 7 – Cálculo do Coeficiente Global Pelos Diferentes Métodos para o Trocador de Calor de Tubos Concêntricos

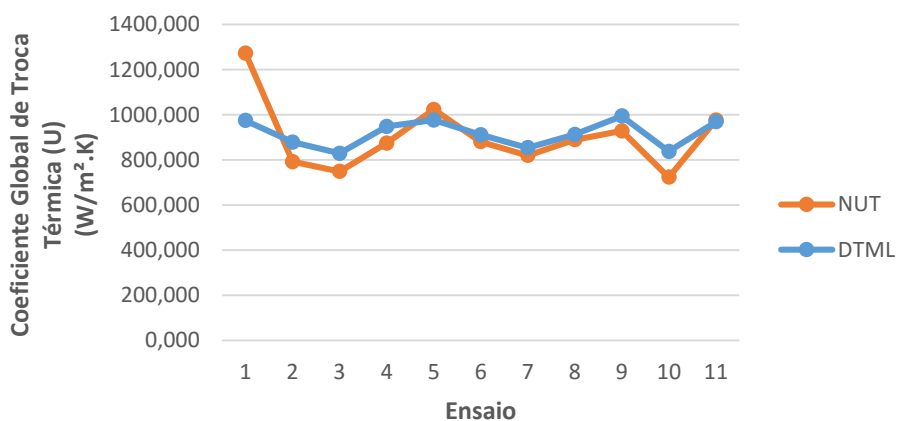


Figura 8 – Cálculo do Coeficiente Global Pelos Diferentes Métodos Para o Trocador de Calor de Placas

Quando se compara os métodos de cálculo para se obter o valor de  $U$  tanto para os trocadores de tubos concêntricos quanto para o de placas, nota-se uma pequena variação entre eles, salvo alguns pontos. Então, pode-se dizer que tanto o método da diferença de temperatura média logarítmica e da efetividade NUT, têm resultados muito próximos uns dos outros.

Observa-se nas Figuras 7 e 8, que os pontos de todos os ensaios seguem um mesmo comportamento, ou seja, as variações nos valores de coeficiente obtidos para cada experimento são similares para ambos os métodos quando calculados para um equipamento. O mesmo não se observa quando são comparados os trocadores de calor, pois as alterações das vazões e

temperaturas de entrada ocasionaram uma maior oscilação no valor de  $U$  no trocador de calor de tubos concêntricos. .

Essa diferença pode ser justificada pelos dados terem sido obtidos em dias diferentes, o que altera condições com a temperatura de entrada do fluido frio e do ambiente, e também, pela diferença das geometrias e áreas de troca térmica.

Calculando a média dos resultados tem-se para os trocadores de tubos concêntricos um valor de  $\bar{U}=13286,89 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para o método DTML e  $\bar{U}=13356,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para o método NUT. Já para o trocador de placas  $\bar{U}=916,8386 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para o método DTML e  $\bar{U}= 791,962 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para o método NUT. Observa-se que a proximidade dos dados de  $U$  é muito maior para o de tubos concêntricos.

Esse desvio no valor de  $U$  para o trocador de calor de placas pode ser explicado pelo fato que o método da efetividade leva em conta as configurações geométricas, tornando-se mais impreciso no caso dos trocadores de placas que tem em sua estrutura, dimensões mais complexas que podem gerar erros. Dessa forma, nos cálculos de  $U$  para as próximas análises foram utilizados os dados obtidos pelo método DTML (diferença de temperatura média logarítmica), pois este método baseia-se em cálculos com hipóteses mais próxima das condições reais, ou seja, não leva em conta sua estrutura geométrica específica.

Para analisar a influência das variáveis de entrada do fluido quente, vazão e temperatura, no valor do  $U$  foi feita a comparação dos experimentos. Foram escolhidos dois experimentos, em que houve a variação da vazão e a temperatura permaneceu constante, e onde se manteve a vazão constante e variou-se a a temperatura.

Os ensaios escolhidos se referiram à maior variação possível de uma das variáveis, ou seja, relacionaram o maior e o menor valor estudado, enquanto a outra se manteve constante.

Estas condições foram selecionadas nas Tabelas 2 e 3 e são mostrados nas Tabelas 9 (ensaios com temperatura constante e vazão variável) e 10 (ensaio com vazão constante e temperatura variável) .

Tabela 9 – Ensaios Escolhidos Para a Avaliação da Influência da Vazão no Coeficiente Global de Troca Térmica

Ensaio	Vazão (Fq, m <sup>3</sup> /s)	Temperatura (Tq, °C)	U (W/m <sup>2</sup> .K)	
			Tubos Concêntricos	Placas
4	2,667E-05	50	16063,883	948,102
8	1,000E-05	50	10301,184	913,017

Tabela 10 - Ensaios Escolhidos Para a Avaliação da Influência da Temperatura no Coeficiente Global de Troca Térmica

Ensaio	Vazão (Fq, m <sup>3</sup> /s)	Temperatura (Tq, °C)	U (W/m <sup>2</sup> .K)	
			Tubos Concêntricos	Placas
1	1,833E-05	40	13260,108	974,189
11	1,833E-05	60	14324,378	969,071

Comparando os ensaios 4 e 8 da Tabela 9 observou-se a influência da vazão no coeficiente global de troca térmica quando manteve-se a temperatura constante. Com a diminuição da vazão, houve a diminuição do U para ambos os equipamentos. Isso se deve ao fato de que a quantidade de calor trocado (Q), está relacionada com a vazão mássica do fluido, como podemos observar na Equação 2 do tópico 2.2.3. Dessa forma, com o aumento de Fq, há o aumento de Q, e conseqüentemente, o aumento do U, pois, o coeficiente global de troca térmica é diretamente proporcional à quantidade de calor trocado. Então, observa-se que a vazão de fluido quente é diretamente proporcional ao coeficiente global de troca térmica em ambos os casos.

Para analisar a influência da temperatura, foram comparados os ensaios 1 e 11, como mostrado na Tabela 10. Neste caso, a variação da temperatura de 40°C para 60°C com a vazão constante, resultou em uma variação pequena no valor do coeficiente global de transferência de calor. Logo, pode-se dizer a influência da temperatura no U não é significativa quando se compara com a influência da vazão.

### 4.3 COMPARAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Até agora foram discutidas as influências das variáveis de entrada no funcionamento geral dos equipamentos. Neste tópico são apresentadas as análises comparativas dos dois trocadores de calor .

Avaliando a quantidade de calor trocado, foi utilizada a Equação (2) do tópico 2.2.3 para calcular os valores de todos os ensaios para ambos equipamentos. Os resultados destes cálculos estão expressos na Tabela 11, em que os ensaios listados são referentes à Tabela 2.

Tabela 11 – Quantidade de Calor Trocado nos Equipamentos

<b>Ensaio</b>	<b>Calor Trocado no Trocador de Tubos Concêntricos (W)</b>	<b>Calor Trocado no Trocador de Placas (W)</b>
<b>1</b>	380,6167	838,2244
<b>2</b>	501,1952	1104,36
<b>3</b>	363,065	622,9349
<b>4</b>	662,0398	1325,568
<b>5</b>	531,1106	1216,013
<b>6</b>	531,1106	1216,013
<b>7</b>	455,2376	1140,012
<b>8</b>	414,0849	871,356
<b>9</b>	798,1225	1598,73
<b>10</b>	567,9656	1190,271
<b>11</b>	756,2438	1667,641

É possível notar uma pequena variação de quantidade de calor trocado nos pontos centrais, que representam a triplicata dos ensaios. Isto pode ter ocorrido, pois não foi possível manter constante a temperatura de entrada da água fria, que variava em virtude da temperatura ambiente.

Dessa forma, observa-se na Figura 9 o desempenho relativo de ambos os trocadores em relação à taxa de transferência de calor para todos os ensaios.

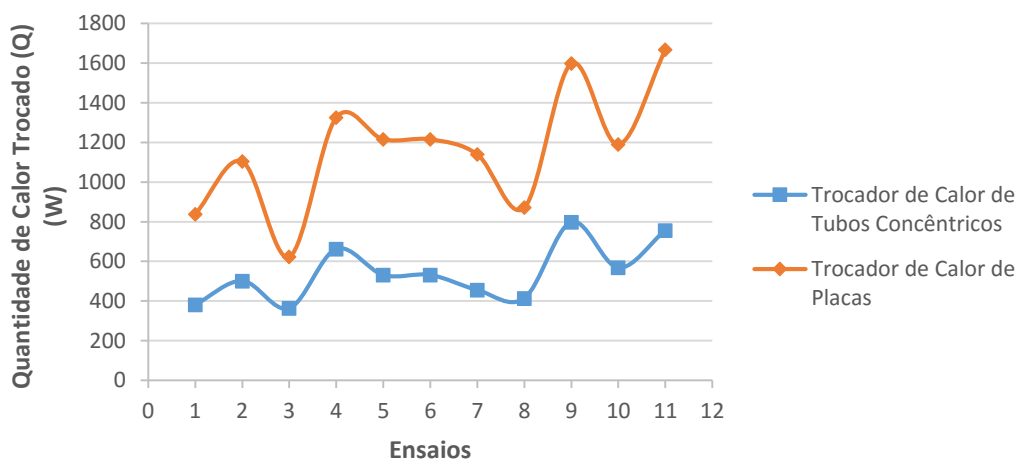


Figura 9 – Quantidade de Calor Trocado nos Equipamentos

Na Figura 9, pode-se observar que as variações de vazão e temperatura interferem na troca de calor de forma semelhante em ambos os equipamentos. Os pontos onde a maior quantidade de calor é trocada para cada equipamento, dentro da faixa estudada, são visíveis pelo maior pico de ambas as curvas, sendo no ensaio 9 para o trocador de calor de tubos concêntricos e o ensaio 11 para o trocador de calor de placas. Para melhor visualização, as condições destes ensaios são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Ensaio com as Maiores Quantidades de Troca Térmica em Ambos os Equipamentos

Equipamento	Ensaio	Vazão (Fq, m <sup>3</sup> /s)	Temperatura (Tq, °C)
<b>Trocador de Calor de Tubos Concêntricos</b>	9	2,417E-05	57
<b>Trocador de Calor de Placas</b>	11	1,833E-05	60

Assim, pode-se dizer que, para a faixa de estudo utilizada, o ensaio 9 representa as condições nas quais o trocador de calor de tubos concêntricos

obteve a maior quantidade de calor trocado, enquanto que no caso do trocador de calor de placas tais condições são encontradas no ensaio 11.

Outra característica visível na Figura 9 é a distância entre as curvas relacionadas aos equipamentos, onde se observa que a curva referente ao trocador de calor de placas é superior à curva do trocador de calor de tubos concêntricos. Isso mostra que a troca de calor realizada pelo trocador de calor de placas foi mais elevada para todos os ensaios realizados.

Além disso, os trocadores de calor foram comparados levando em consideração eficiências de troca térmica, calculadas a partir da Equação (6) do tópico 2.2.3. Estes dados estão apresentados na Figura 10.

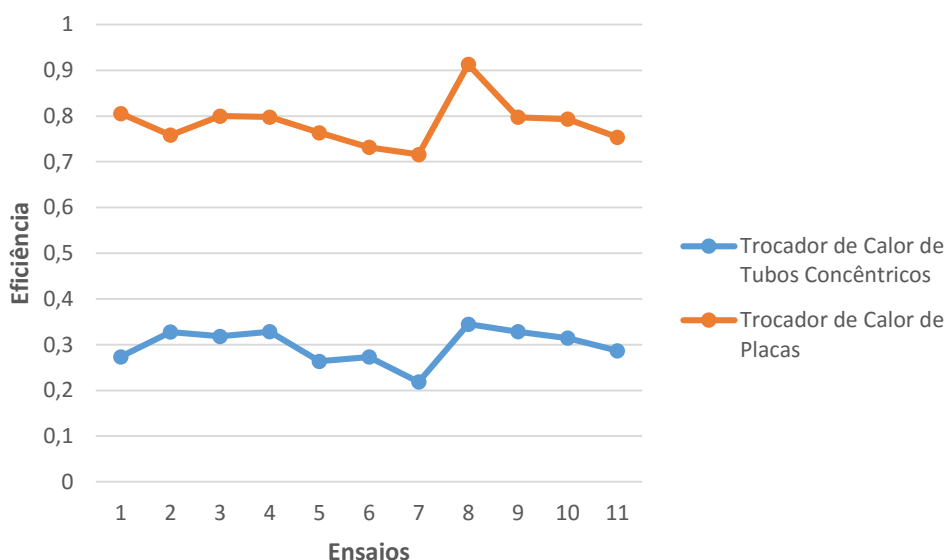


Figura 10 – Comparação Entre as Eficiências dos Trocadores de Calor

Com uma eficiência de aproximadamente de 0,3, observa-se na Figura 10 uma taxa de troca térmica menor entre os fluidos para o trocador de calor de tubos concêntricos. Por outro lado, para o trocador de calor de placas com uma eficiência de cerca de 0,8 houve uma maior taxa de troca térmica. Logo, o trocador de calor de placas mostrou-se aproximadamente 66,67% mais efetivo que o de tubos concêntricos.

A maior eficiência de trocador de placas em relação ao trocador de calor de tubos concêntricos pode ser justificada principalmente pela área interna superficial, que é 100 vezes maior naquele. Vale ressaltar que a área de troca

térmica do trocador de calor de placas é 0,192m, enquanto que no de tubos concêntricos é de apenas 0,00192m.

Além disso, a maior efetividade de trocador de calor de placas pode ser também justificada pelo empacotamento das placas que faz com que o calor trocado com o ambiente seja menor do que a que ocorre no trocador de calor de tubos concêntricos.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo da troca de calor nos trocadores de calor de tubos concêntricos e de placas utilizando planejamento experimental mostrou que, dentro da faixa estudada, a temperatura de entrada do fluido quente e vazão de entrada de fluido quente, influenciam significativamente na variável resposta.

Além disso, foi possível verificar que as condições ideais para a maior troca térmica foram para temperatura e vazão de entrada elevadas no trocador de calor de tubos concêntricos e para maior temperatura no trocador de calor de placas.

Nos ensaios realizados no trocador de calor de tubos concêntricos verificou-se que houve um aumento de 375 W na taxa de transferência de calor quando se aumentou a temperatura do fluido quente com a vazão constante e um ganho de 247 W para a situação inversa. Para o trocador de calor de placas observou-se os um aumentou 829 W na taxa de transferência de calor para um aumento de temperatura e vazão constante e um ganho de 424 W pra a situação oposta. Assim, para ambos os trocadores o aumento de temperatura se mostrou mais significativo. Os dois trocadores apresentaram uma boa estabilidade durante os testes o que pode ser demonstrado pela pequena variação de Q nos pontos centrais.

A análise estatística mostrou que para um nível confiança de 95% o efeito que têm maior influência estatística sobre a variável resposta na faixa estudada para o trocador de calor de tubos concêntricos foi a temperatura de entrada do fluido quente, enquanto que para o trocador de placas as duas variáveis apresentaram efeitos significativos na variável de resposta.

Com os dados dos ensaios experimentais calculou-se uma média dos coeficientes globais de troca térmica obtendo-se  $\bar{U}=13286,89$  W/m<sup>2</sup>.K para o método DTML e  $\bar{U}=13356,8$  W/m<sup>2</sup>.K para o método NUT para o trocador de calor de tubos concêntricos e  $\bar{U}=916,8386$  W/m<sup>2</sup>.K para o método DTML e  $\bar{U}= 791,962$  W/m<sup>2</sup>.K para o método NUT para o trocador de calor de placas. Observou-se que o valor do coeficiente global de transferência de calor oscilou de forma parecida em relação aos dois métodos para cada equipamento salvo alguns pontos, o que pode ser justificado pela diferença nas condições operacionais dos



dias de coleta. Além disso, verificou-se que a variação da vazão de alimentação influencia muito mais o valor do coeficiente global de transferência de calor do que a temperatura, visto que  $U$  é diretamente proporcional à vazão.

A efetividade dos trocadores foi outro parâmetro analisado e utilizado para comparação dos trocadores de calor. Em média o trocador de tubos concêntricos obteve um desempenho de 0,3 enquanto o de placas manteve-se em média com 0,8 de efetividade, mostrando que o trocador de calor de placas foi cerca de 66,67% mais eficiente que o outro equipamento, dentro da faixa de variáveis estudadas. Portanto, por meio do cálculo da quantidade de calor trocada e da efetividade dos equipamentos, foi possível concluir também que o trocador de calor de placas se apresentou mais eficiente que o trocador de calor de tubos concêntricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS INC. **ANSYS CFX**. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>>. Acesso em: 10 maio 2015.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CALADO, Verônica; MONTGOMERY, Douglas C.. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=1Yp7Q23dcLcC&oi=fnd&pg=PA7&dq=statistica&ots=8ukd0h1QfB&sig=2tidnq-zVGthjm4NBdXfmyXLJIU#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 17 maio 2015.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. São Paulo: Amgh, 2012.

COSTA, Maria Carolina Burgos; ALMEIDA, Cláudio Romero Rodrigues de. **A importância do ensino da ferramenta de planejamento fatorial para estudantes de engenharia**. In: **congresso brasileiro de educação em engenharia**, 39., 2011, Blumenau. Rio Grande do Norte: 2011. p. 1 - 7. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2011/sessoestec/art1903.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2015.

EDIBON. **Manual TIPL: Plate Heat Exchanger**. Madrid: Edibon, 2011.

ESSS. **ANSYS**. 2015. Disponível em: <[http://www.esss.com.br/software\\_ansys.php](http://www.esss.com.br/software_ansys.php)>. Acesso em: 11 maio 2015.

FRARI, Ricardo Vargas del; PEDROSO, Clemerson Alberi. Malhas Computacionais Para Simulação Numérica de escoamentos de Fluidos Entre Cilindros Com Excentricidade. **X Encontro Gaúcho de Educação Matemática**. Ijuí, p. 1-8. jun. 2009.

IBM. **SPSS Statistics Base**. Disponível em: <<http://www-03.ibm.com/software/products/pt/spss-stats-base>>. Acesso em: 10 maio 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan; PRAMUANJAROENKIJ, Anchasa. **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**. Boca Raton: Crc Press, 2012.

KALIL, S. J., MAUGERI, F., RODRIGUES, M. I. **Response surface analysis and simulation as a tool for bioprocess design and optimization.** Process Biochemistry, v. 35, p. 539–550, 2000.

KECHICHIAN, Viviane. **Modelagem do Processo Térmico Contínuo de Fluidos Alimentícios Não-Newtonianos em Trocador de Calor Bitubular.** 2011. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KERN, Donald Q.. **Processos de Transmissão de Calor.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1987.

KHEDKAR, Rohit S.; SONAWANE, Shiram S.; WASEWAR, Kailas L.. Heat Transfer Study on Concentric Tube Heat Exchanger Usin TiO<sub>2</sub>-water Based Nanofluid. **Crossmark**, Alabama, v. 1, n. 57, p.163-169, jul. 2014.

KREITH, Frank; BOHN, Mark S.. **Princípios de Transferência de Calor.** São Paulo: Thomson, 2003.

LEITE, Renan C. V.; FROTA, Anésia B.. Análise da Influência da Verticalização Sobre a Ventilação Natural Através de Aplicativo de Dinâmica dos Fluidos Computadorizada: Estudo de Caso em Fortaleza - Ceará. **Universidade de São Paulo**, São Paulo, v. 1, n. 1, p.1-4, mar. 2014.

SALOME INC. **Welcome to Salome.** Disponível em: <<http://www.salome-platform.org/>>. Acesso em: 10 maio 2015.

SARAMAGO, Simone P.; SILVA, Jefferson Duarte. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS MISTOS. **Famat**, Uberlândia, n. 11, p.231-245, out. 2008. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/profile/Valder\\_Steffen\\_Jr/publication/228551708\\_PLANEJAMENTO\\_DE\\_EXPERIMENTOS\\_E\\_OTIMIZAO\\_DE\\_SISTEMAS\\_MISTOS/links/0046351f0ff15c94f7000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Valder_Steffen_Jr/publication/228551708_PLANEJAMENTO_DE_EXPERIMENTOS_E_OTIMIZAO_DE_SISTEMAS_MISTOS/links/0046351f0ff15c94f7000000.pdf)>. Acesso em: 18 maio 2015.

StatSoft Inc.. (2004) StatSoft Inc.. **Statistica for Windows (Computer Program Manual).** Statsoft Inc.. Tulsa. OK. USA (2004).

STATSOFT. **Otimizador de Processos: STATISTICA** Process Optimization. Disponível em: <<http://statsoft.com.br/otimizador-de-processos.php>>. Acesso em: 10 maio 2015.

TRINDADE, Jemmla Meira. **Otimização de um procedimento eletroanalítico usando planejamento experimental para determinação de metais em gasolina comum.** 2009. 101 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. Disponível em: <[http://www.quimica.ufpb.br/posgrad/teses/Tese\\_Jemmla\\_Meira\\_Trindade.pdf](http://www.quimica.ufpb.br/posgrad/teses/Tese_Jemmla_Meira_Trindade.pdf)>. Acesso em: 23 maio 2015.

UFRGS. **Software Licenciado - Statistica.** Disponível em:  
<<http://www.ufrgs.br/cpd/servicos/computadores-e-aplicativos/software-disponiveis/software-licenciado-statistica>>. Acesso em: 15 maio 2015.