



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



Autor: Álvaro Francisco de Araújo Albuquerque
Orientadora: Profa. Dra. Cristiane Holanda Sodré

ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL COM
INTERFACE GRÁFICA PARA CÁLCULO DE TROCADOR DE CALOR
PARA FINS DIDÁTICOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Maceió

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL COM INTERFACE GRÁFICA PARA CÁLCULO DE TROCADOR DE CALOR PARA FINS DIDÁTICOS

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Químico.

Autor: Álvaro Francisco de Araújo Albuquerque

Orientador: Profa. Dra. Cristiane Holanda Sodré

Maceió
2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Livia Silva dos Santos – CRB-4 – 1670

A345e Albuquerque, Álvaro Francisco de Araújo .

Elaboração de um programa computacional com interface gráfica para cálculo de trocador de calor para fins didáticos / Álvaro Francisco de Araújo Albuquerque. – 2019. 67f. : il.

Orientador: Cristiane Holanda Sodré.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia. Curso de Engenharia Química, Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 63-65.

Anexos: f. 66-67

1. Trocador de calor - Classificação. 2. Cálculo térmico. 3. Software Matlab – Ferramenta de ensino. 4. DTML. I.Título.

CDU:66.045:37

RESUMO

Diversos processos industriais tem uma característica comum: a transformação física ou química da matéria prima para obtenção de produtos finais. Para que essa transformação ocorra as indústrias utilizam uma grande quantidade de energia na forma de calor. Os Trocadores de Calor são equipamentos responsáveis por realizar a tarefa de transferir energia térmica entre fluidos. O objetivo deste trabalho foi modelar e simular trocadores de calor possibilitando os cálculos de troca térmica e de dimensionamento para fins didáticos, com a finalidade de complementar o aprendizado e a absorção do conteúdo sendo, mais uma ferramenta a ser utilizada para o ensino. A metodologia utilizada se baseou no cálculo da diferença de temperatura média logarítmica (DTML), é o método mais indicado e recomendado quando as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quentes e frios são conhecidas, juntamente com as respectivas vazões mássicas, além disso ao projetar o dimensionamento de um trocador de calor, é indispensável relacionar a taxa total de transferência de calor com as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, para isso o coeficiente global de transferência de calor em conjunto do fator de incrustação e a área total da superfície para a troca térmica também foram utilizados. O desenvolvimento e uso do conceito do DTML é válido apenas para os trocadores de calor do tipo duplo tubo e do tipo casco tubo com um passe no casco e um passe no tubo, quando foge dessas condições e entra nos casos de múltiplos passes no trocador casco tubo se faz necessário um ajuste através do fator de correção f . Quando não foi possível utilizar a DTML foi utilizado então o método da efetividade com o adimensional número de unidades de transferência (ϵ NUT). A simulação foi realizada utilizando o software computacional *Matlab*. Este trabalho possibilitou através da construção do programa a resolução de problemas de troca térmica e dimensionamento de trocadores de calor pelos dois métodos citados, com o auxílio de gráficos e tabelas para consulta dentro do próprio programa.

Palavras-chave: Trocador de Calor, *Matlab*, DTML, troca térmica.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Trocador de calor do tipo placa	12
Figura 2 – Trocador de calor aletado	13
Figura 3 – Trocador de calor do tipo duplo tubo	13
Figura 4 – Trocador de calor do tipo casco e tubo	14
Figura 5 – Distribuição de temperatura em escoamento paralelo	18
Figura 6 – Distribuição de temperatura em escoamento em contracorrente	18
Figura 7 – Gráfico do fator de correção de trocador de calor com 1 passe no casco e 2 nos tubos	19
Figura 8 – Gráfico do fator de correção de trocador de calor com 2 passes no casco e 4 ou múltiplos de 4 passes nos tubos	19
Figura 9 – Gráfico relaciona efetividade com NUT em um trocador de calor com um passe no caso e qualquer múltiplo de dois passes nos tubos	21
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo do programa	26
Figura 11 – <i>Command Window</i> com <i>Warning</i> sobre tamanho de imagem	34
Figura 12 – <i>Command Window</i> sem <i>Warning</i>	34
Figura 13 – Tela com gráfico de incrustação aberto pelo comando <i>imshow</i>	35
Figura 14 – Gráficos ϵ NUT com relação ao tipo de corrente	44
Figura 15 – Resolução da questão de cálculo de troca térmica pelo DTML	51
Figura 16 – Resolução da questão de cálculo da área de troca pelo DTML	52
Figura 17 – Parte do <i>Workspace</i> da Resolução da questão de cálculo da área de troca pelo DTML	53
Figura 18 – Resolução da questão de coeficiente global pelo DTML	54
Figura 19 – Resolução da questão de cálculo de troca térmica pelo ϵ NUT	56
Figura 20 – Tabela de Calor Específico	56
Figura 21 – Conclusão da resolução da questão de cálculo de troca térmica pelo ϵ NUT	57
Figura 22 – Resolução da questão de área de troca térmica pelo ϵ NUT	58
Figura 23 – Resolução da questão do coeficiente global pelo método ϵ NUT	59
Figura 24 – Resolução da questão de incrustação	61

INDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Linhas de código para tomada de decisão	33
Quadro 2 – Comando <i>imshow</i> na linha de código	33
Quadro 3 – Determinação do Coeficiente Global	36
Quadro 4 – Linha de código com determinação de temperatura	36
Quadro 5 – Linha de código para informar as vazões dos fluidos	36
Quadro 6 – Linha de código para definir o método.....	37
Quadro 7 – Linha de código para o calor específico.....	37
Quadro 8 – Linha de código que define o objetivo do cálculo.....	39
Quadro 9 – Linha de código para informações da área.....	39
Quadro 10 – Linha de código do cálculo de troca térmica.....	39
Quadro 11 – Linha de código do cálculo da taxa térmica para o cálculo do dimensionamento da área de troca térmica	40
Quadro 12 – Linha de código do cálculo térmico com duas vazões para o cálculo do dimensionamento.....	41
Quadro 13 – Determinação do C_{\min}	42
Quadro 14 – Cálculo do C_r	42
Quadro 15 – Inserção da área e do tipo da corrente de troca entre os fluidos	43
Quadro 16 – Cálculo do valor máximo de troca térmica e do fluxo de calor	45
Quadro 17 – Inserção da área e do tipo da corrente de troca entre os fluidos	45
Quadro 18 – Inserção dos coeficientes de troca térmica.....	46
Quadro 19 – Inserção de dados e cálculo do coeficiente de convecção externo..	47
Quadro 20 – Cálculo das resistências e do Coeficiente Global	48
Quadro 21 – Linha de código para utilizar os coeficientes globais de troca térmica com incrustações para outros cálculos.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	8
2.1	Objetivos gerais	8
2.2	Objetivos específicos	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	Didática: Estudo e Ferramentas Didáticas	9
3.2	Transferência de Calor	10
3.3	Trocador de Calor e suas Classificações	10
3.4	Cálculo Térmico	14
3.4.1	Diferença de Temperatura Média Logarítmica	16
3.4.2	O método da Efetividade-NUT	20
3.5	Incrustação	22
3.6	Estado da Arte	24
4	METODOLOGIA	26
5	RESULTADOS	32
5.1	Comentários Gerais	32
5.2	Determinações Comuns	35
5.3	Determinações Específicas	38
6	RESOLUÇÃO DE QUESTÕES E DISCUSSÕES	50
7	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXO A – TABELAS DO INCROPERA PARA CONSULTA	66

1 INTRODUÇÃO

O método de difusão de conhecimento mais utilizado nos tempos atuais é aquele dentro da sala de aula. Deve-se compreender a aula como um conjunto de meios e condições por meio das quais o lecionador guia, orienta e municia estímulos ao processo de ensino em função da atividade própria dos alunos, ou seja, da assimilação e aprimoramento de habilidades naturais do aluno na aprendizagem educacional (Libâneo, 1994).

O conteúdo ministrado em sala de aula, muitas vezes, tem sido visto pelos alunos como repetitivo, maçante e pouco convidativo, muito por conta da mesma forma de transmissão de conhecimento, com a cobrança de resolução de listas de exercícios manualmente, em muitas matérias, levando o discente a fadiga e desestímulo. No entanto existem vários meios que podem ser empregados para atrair a atenção dos estudantes. São instrumentos didático-pedagógicos que facilitam a compreensão de conceitos, de fórmulas e de nomenclaturas, auxiliando na relação ensino aprendizagem.

A simulação e modelagem de processos na engenharia química, surge como ferramenta alternativa aos lápis e cadernos utilizados nas salas de aula, instigando os alunos a pensarem por trás do problema, entendendo a modelagem e aplicando a simulação para superar a dificuldade da questão proposta. Aplicando o conhecimento adquirido e organizando o conteúdo de forma lógica fornecendo um produto que facilmente pode ser visualizado em outras condições de operação, sem ter que efetuar todos os cálculos de forma manual novamente.

Em qualquer tipo de indústria o maior foco é a obtenção do produto final, seja ele um alimento, bebida, remédio, cosmético, ou qualquer outro, para tal há a necessidade de modificação da matéria-prima no processo, significa então que passará por transformações físico-químicas alterando o seu estado inicial. Para isso há processos industriais que necessitam de inserção de energia na forma de calor para geração de seus produtos e há também aqueles que necessitam liberar essa energia, ou seja, resfriar o processo para alcançar o produto desejado.

Dessa forma, surge a figura de um importante equipamento, que promove a troca de energia entre esses processos, equipamento esse conhecido como trocador de calor (Delatore, 2011).

O trocador de calor é um equipamento que promove a interação entre dois fluidos com temperaturas diferentes realizando então a troca térmica, sendo assim é um equipamento bastante utilizado nos mais distintos ramos da indústria, afim de reaproveitar a energia em forma de calor.

Por se tratar de um equipamento utilizado em diversas industrias, local onde o lucro é o maior objetivo, conseqüentemente dentro desse processo busca-se que o calor gerado seja utilizado com uma máxima eficiência, evitando assim um consumo extra de energia, geralmente obtida a partir da queima de algum tipo de combustível fóssil e vindo a gerar gastos. Esse fator por si só mostra a extrema relevância e importância do desenvolvimento de ferramentas para o estudo de Trocador de Calor.

Portanto, este estudo avalia a elaboração de um programa no software *Matlab* para cálculo de troca térmica e dimensionamento de trocadores de calor para fins didáticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Elaborar um programa em no software *Matlab* para auxiliar, como ferramenta didática, na resolução de problemas de trocadores de calor.

2.2 Objetivos específicos

- Abranger um bom número de problemas aplicados para ensino de cálculos térmicos de trocadores de calor;
- Trazer inserido no programa todas as informações e dados necessário para a resolução do problema;
- Alcançar resultados condizentes com os encontrados na Literatura;
- Entregar ao curso uma ferramenta didática que auxiliará no aprendizado do conteúdo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Didática: Estudo e Ferramentas Didáticas

A arte do ensino precisa incitar o gosto e o desejo pela prática do estudo, demonstrando a importância da aquisição de conhecimento para o trabalho e o cotidiano. Nesse cenário a figura do professor recebe a obrigação de criar circunstâncias para que nesse processo estimule o indivíduo a alcançar o conhecimento, permitindo que o mesmo venha a pensar, avaliar e relacionar os aspectos estudados com a realidade a que está inserido, mas não é só os aspectos estudados que influenciam na realidade, de acordo com Tavares (2011), ocorre também o inverso, onde durante as práticas educativas dos alunos são propostas situações reais e a base de análise e fonte de convicções do indivíduo para que reflita é pautada pela sua realidade.

Diante disso, é perceptível que os conhecimentos desenvolvidos pelo estudo e as noções mentais do cotidiano se relacionam reciprocamente. Conclui-se então que o progresso intelectual dos alunos e o desenvolvimento de suas capacidades mentais se verificam no decorrer da assimilação ativa dos conteúdos. Portanto, o ensino e a aprendizagem (estudo) se movem em torno dos conteúdos escolares visando o desenvolvimento do pensamento (Libâneo, 2001).

Como ferramenta didática a modelagem e simulação tem lugar diferenciado, segundo Pidd (1998), modelo é uma representação da realidade projetado para algum propósito definido. Definir esse propósito é o que torna a modelagem especial, porquanto pode ser direcionada para um ponto específico, sendo esse ponto justamente o assunto a ser trabalhado para o aprendizado. Enquanto que a simulação consiste de acordo com Saliby (1999) na réplica do funcionamento do modelo, de um sistema real ou idealizado. De posse dessas possibilidades a didática do estudo de trocador de calor pode ter novas facetas, permitindo deixar de lado, mesmo que momentaneamente, o papel, o lápis e conseqüentemente parte da metodologia maçante de ensino.

3.2 Transferência de Calor

A transferência de calor pode ser dividida em três tipos de acordo com os mecanismos físicos que as fundamentam: Condução; Convecção e Radiação.

Condução: Se refere à transferência de energia por contato direto entre as moléculas do mesmo corpo ou entre as moléculas de dois ou mais corpos em perfeito contato térmico. Essa transferência de energia segundo Incropera (2008) é das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas, o que remete a Segunda Lei da Termodinâmica que retrata a transmissão de calor seguindo o gradiente de temperatura, saindo de uma região em que a temperatura se encontra mais alta para outra em que a temperatura é mais baixa.

Convecção: Ocorre quando há movimento de calor de um lugar para outro devido a correntes originadas pelos movimentos aleatórios das moléculas que habitam no interior de um fluido. Estas correntes são resultantes da modificação da densidade produzida pela expansão da porção aquecida de um fluido (Silva, 2013). Esta pode ser:

Natural - O movimento do fluido é dado inteiramente das diferenças de densidade entre partes do fluido em função da temperatura.

Forçada - O movimento é dado por meios mecânicos.

Radiação: É a energia emitida pela matéria por meio de ondas eletromagnéticas. Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação não necessita (Incropera, 2008). Guiada pela Lei de Stefan-Boltzmann que possui a definição de que Emissividade (ϵ) é a razão entre a quantidade de radiação de um corpo real e a de um corpo negro à mesma temperatura.

3.3 Trocador de Calor e suas Classificações

Trocador de calor é um dispositivo que visa facilitar a troca térmica entre dois fluidos de origem e temperaturas diferentes, sintetizou Moretto (2017).

Os trocadores de calor mais comuns são aqueles em que os fluidos não se misturam e estão isolados através de uma parede e/ou tubos, ou seja, o contato entre os fluidos é indireto. Geankoplis (1993) esclarece que a transferência de calor é feita do fluido quente para a parede do tubo por convecção, por condução na parede do tubo e novamente por convecção da parede para o fluido frio.

Existem vários tipos, formas e configurações destes dispositivos, que podem ser desde um simples tubo dentro de outro, até um condensador ou evaporador (Çengel 2012). Quanto a essa classificação que trata sobre a utilização, Ganghis (2015) se refere a ela como a que engloba o serviço de maior relevância do trocador de calor. Assim temos:

Aquecedores - Fornecem calor sensível e/ou latente à um líquido ou gás mediante troca de calor com o fluido frio.

Condensadores - Realizam a condensação de vapores total ou parcial utilizando água ou outro tipo de fluido refrigerante. Ex.: Saída do topo de colunas de destilação bem como em turbinas para condensação dos vapores.

Resfriadores - Removem calor de fluidos de processo, utilizam água ou ar como fluido de resfriamento mais comum.

Refrigeradores - Resfriam um fluido de processo com fluidos refrigerantes como amônia, freon, propano numa temperatura, portanto, mais baixa do que poderia ser obtida empregando-se água ou ar.

Vaporizadores - Cede calor ao fluido de processo com intuito de vaporiza-lo total ou parcialmente utilizando-se vapor de água ou outro fluido de processo conveniente.

Há outras classificações mais técnicas, como pela disposição das correntes do fluido, sendo corrente paralela ou contracorrente. A classificação mais usual é de acordo com as características de sua construção, estabelecendo alguns tipos básicos de trocadores. Dividindo em:

Trocador de calor do tipo placa e quadro: Uma variação dita inovadora de trocador de calor que tem utilização um tanto quanto generalizada é o trocador de

calor de placa e quadro (ou apenas placa), que é constituído por uma série de placas planas. Esses trocadores, ilustrado pela Figura 1, são bem propícios para aplicações de troca líquido/líquido, desde que os escoamentos dos fluidos tanto quente, quanto frio, estejam próximos da mesma pressão (Çengel, 2012). Contudo, de acordo com Gut (2014), esse tipo de trocador limita-se ao uso em baixas temperatura pois não pode trabalhar acima de 150 °C, além do fato de ter alta perda de carga por atrito, elevando os custos de bombeamento.

Figura 1 – Trocador de calor do tipo placa



Fonte: Pereira (2010)

Trocador de calor do tipo superfície estendida e aleta: São trocadores de calor que apesar de serem leves e compactos, como mostrado na Figura 2, podem trabalhar com uma grande faixa de pressão do fluido nos dutos, com pressão manométrica de 3040 kPa, e temperaturas de trabalho em torno de 850 °C, contudo não se recomenda a utilização desses valores altos em ambas as variáveis em simultâneo (Godoy, 2008).

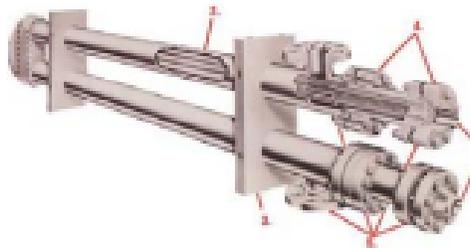
Figura 2 – Trocador de calor aletado



Fonte: Bohorquez (2014)

Trocador de calor do tipo duplo tubo: É constituído por dois tubos concêntricos com seções retas e com conexões apropriadas nas extremidades de cada tubo direcionando os fluidos de um trecho reto para outro. O maior emprego de trocadores do tipo duplo tubo reside na troca de calor sensível, ou seja, aquecimento ou resfriamento. Sua principal vantagem consiste na facilidade de arranjo da tubulação e simplicidade de limpeza, perceptível pela Figura 3, e também permitem um bom controle da distribuição de fluidos em ambos os lados. Sua principal desvantagem é seu alto custo por unidade de área de troca térmica (Almeida, 2002).

Figura 3 – Trocador de calor do tipo duplo tubo

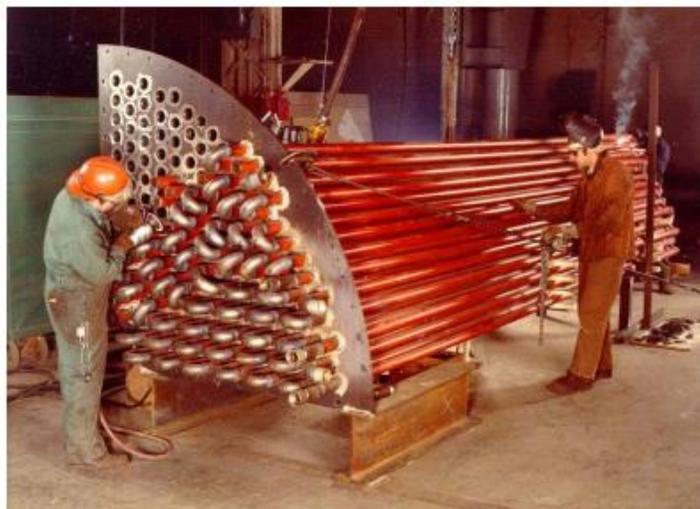


Fonte: Pereira (2010)

Trocador de calor do tipo casco e tubo: O trocador de casco e tubos é resumidamente a combinação de um casco cilíndrico com um conjunto de tubos, sendo este colocado paralelamente ao eixo longitudinal do casco. Çengel (2012) comenta, “os tubos são presos nas extremidades das placas perfuradas,

denominadas espelhos, cada furo corresponde um tubo do feixe”. De acordo com Bicca (2005), “seus componentes principais são os cabeçotes de entrada e saída, casco, feixe de tubos e os defletores”.

Figura 4 – Trocador de calor do tipo casco e tubo



Fonte: Pereira (2010)

Os defletores dividem parcialmente o casco e possuem a função de conduzir o escoamento do fluido de forma ora cruzado, ora em paralelo o que ocasiona turbulência e um maior tempo de resistência do fluido no casco, promovendo um aumento na transferência de calor (Copetti, 1989). O trocador casco e tubo compõem o padrão de projeto para a maioria dos serviços. Baixo custo por unidade de área de troca térmica e há grande possibilidade de tamanhos e tipos como mostrado pela Figura 4. Depois de construído é de difícil redimensionamento de tamanho caracterizando sua principal desvantagem (Çengel, 2012).

Os trocadores de calor de casco e tubos representam algo em torno de 60% de todos os trocadores de calor empregados nos processos industriais, pois podem ser projetados para operar em diferentes escalas de pressão e temperatura em inúmeras aplicações (Hewitt et al, 1993).

3.4 Cálculo Térmico

Para projetar ou prever o desempenho de um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor a grandezas tais como: as

temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor e a área superficial total disponível para a transferência de calor (Incropera, 2008). O balanço de energia para cada corrente de fluido com regime permanente, onde a vazão mássica que entra deve ser igual a vazão mássica que sai, e quando as variações na energia cinética e potencial forem desprezíveis, e não havendo incidência de trabalho, resulta em:

$$q = \dot{m}_q(H_{q,ent} - H_{q,sai}) \quad (1)$$

e

$$q = \dot{m}_f(H_{f,sai} - H_{f,ent}) \quad (2)$$

Onde q é a taxa líquida de transferência de calor, \dot{m} é a vazão mássica, H é a entalpia e os subscritos q e f estão se referindo aos fluidos quentes e frios, respectivamente, em conjunto da identificação de entrada e saída.

Se os fluidos não passam por uma mudança de fase e com calores específicos constantes as expressões se reduzem a:

$$q = \dot{m}_q c_{p,q}(T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (3)$$

e

$$q = \dot{m}_f c_{p,f}(T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (4)$$

Sendo c_p o calor específico e as temperaturas se referem às temperaturas médias dos fluidos.

Como já citado anteriormente ao projetar o dimensionamento de um trocador de calor, é indispensável ter a taxa total de transferência de calor relacionada com as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, com o coeficiente global de transferência de calor e com a área total da superfície para a troca térmica. Portanto para a análise de trocadores de calor se utilizando da diferença de temperatura média dos fluidos, é conveniente trabalhar com a equação para a taxa de acordo com a equação 5:

$$q = UA\Delta T_m \quad (5)$$

Sendo U o Coeficiente global de transferência de calor, A a área superficial de troca térmica e ΔT_m chamada de diferença de temperatura média dos fluidos, que na realidade é a diferença de temperatura média logarítmica de dois fluidos a ser explicitada na sequência.

3.4.1 Diferença de Temperatura Média Logarítmica

Geankoplis (1993) argumenta que quando os fluidos percorrem o trocador de calor, eles estão ao mesmo tempo esquentando e resfriando um ao outro, e com isso a temperatura de ambos os fluidos variam ao longo do trocador. Sendo assim, fica explícita a necessidade do uso de um ΔT_m em todo o equipamento.

Para a determinação desse ΔT_m é aplicado um balanço de energia diferencial em cada um dos fluidos. Aplicando o balanço de energia nas equações 3 e 4 respectivamente, são obtidas as equações 6 e 7 que seguem:

$$dq = -\dot{m}_q c_{p,q} dT_q \equiv -C_q dT_q \quad (6)$$

e

$$dq = \dot{m}_f c_{p,f} dT_f \equiv C_f dT_f \quad (7)$$

Onde C_q e C_f são as chamadas taxas de capacidade calorífica dos fluidos quente e frio, respectivamente. Além do balanço de energia diferencial para cada um dos fluidos, a ideia de diferencial também pode ser estendida para a transferência de calor na área infinitesimal dA sendo ela a equação 8:

$$dq = U \Delta T dA \quad (8)$$

Por ser uma equação definida para uma área infinitesimal esse ΔT equivale a diferença de temperatura local entre o fluido quente e o fluido frio. Tal conceito leva a útil expressão da equação 9:

$$\Delta T = T_q - T_f \quad (9)$$

e conseqüentemente à equação 10:

$$d(\Delta T) = dT_q - dT_f \quad (10)$$

Em busca da forma integrada da equação 8, trata-se a equação 10 com substituições das equações 6 e 7, para obter a equação 11:

$$d(\Delta T) = -dq \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \quad (11)$$

De posse da equação 11, substitui-se dq a partir da equação 8 e integrando, resulta em:

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \int_1^2 dA \quad (12)$$

Calculando de fato a integral para chegar em:

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \quad (13)$$

Agora que se tem a integral já efetuada, busca-se voltar aos termos iniciais, para isto utiliza-se as equações 3 e 4 para a substituição de C_q e C_f .

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{T_{q,ent} - T_{q,sai}}{q} + \frac{T_{f,sai} - T_{f,ent}}{q} \right) \quad (14)$$

Podendo utilizar o conceito de escoamento em paralelo apresentado na Figura 5, onde $\Delta T_1 = (T_{q,ent} - T_{f,ent})$ e $\Delta T_2 = (T_{q,sai} - T_{f,sai})$, reorganiza-se a equação 14 para:

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -\frac{UA}{q} [(T_{q,ent} - T_{f,ent}) - (T_{q,sai} - T_{f,sai})] \quad (15)$$

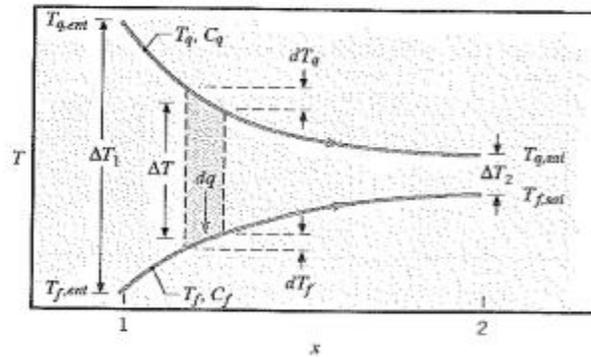
E então:

$$q = UA \left(\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \right) \quad (16)$$

E assim de maneira abreviada temos:

$$q = UA \Delta T_{ml} \quad (17)$$

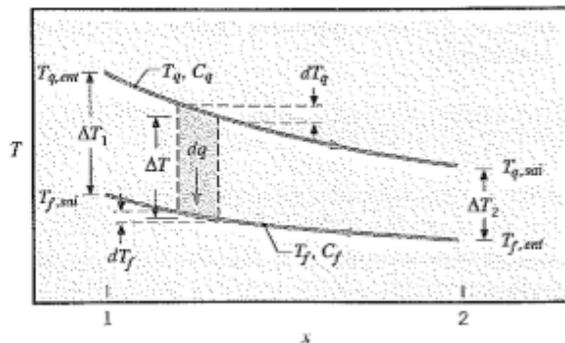
Figura 5 – Distribuição de temperatura em escoamento paralelo



Fonte: Incropera (2008)

Contudo, Geankoplis (1993) alerta que o desenvolvimento e uso do conceito do DTML é válido apenas para os trocadores de calor do tipo duplo tubo, e do tipo casco tubo com 1 passe no casco e 1 passe no tubo, com o escoamento do fluido paralelo ou em contracorrente. Ao utilizar a equação 16 para o escoamento em contracorrente deve-se apenas atualizar o conceito, de acordo com a Figura 6, que $\Delta T_1 = (T_{q,ent} - T_{f,sai})$ e $\Delta T_2 = (T_{q,sai} - T_{f,ent})$.

Figura 6 – Distribuição de temperatura em escoamento em contracorrente



Fonte: Incropera (2008)

Nos casos em que há múltiplos passes no trocador de calor é necessária a obtenção de uma expressão diferente, a depender do arranjo dos passes no casco e no tubo. Como a derivação matemática da equação é muito complexa, costuma-se proceder com o uso de um fator de correção f , que permite aproximar o método do DTML da real temperatura dos fluidos ao longo de todo o trocador de calor. Tal fator de correção é obtido através de gráficos pela combinação de dois adimensionais de temperatura.

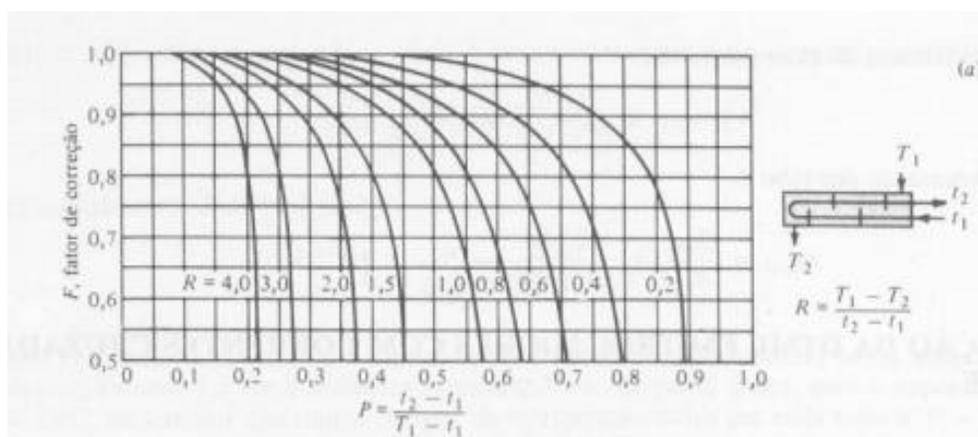
Os adimensionais são as seguintes relações:

$$R = \frac{T_{q,ent} - T_{q,sai}}{T_{f,sai} - T_{f,ent}} \quad (18)$$

$$P = \frac{T_{f,sai} - T_{f,ent}}{T_{q,ent} - T_{f,ent}} \quad (19)$$

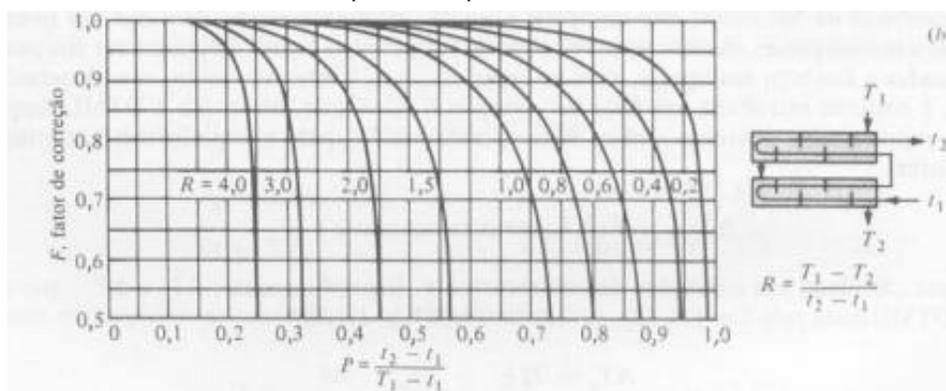
Em que R é a razão entre o decréscimo de temperatura do fluido quente e o acréscimo de temperatura do fluido frio. Enquanto P é a razão entre o acréscimo de temperatura do fluido frio e o maior acréscimo que o mesmo fluido frio poderá ter em contracorrente. A seguir nas Figuras 7 e 8 estão os gráficos que relacionam esses adimensionais e indicam o fator de correção f .

Figura 7 – Gráfico do fator de correção de trocador de calor com 1 passe no casco e 2 nos tubos



Fonte: Ozisik (1985)

Figura 8 – Gráfico do fator de correção de trocador de calor com 2 passes no casco e 4 ou múltiplos de 4 passes nos tubos



Fonte: Ozisik (1985)

De posse desse fator de correção a equação 17 se torna:

$$q = U A f \Delta T_{ml} \quad (20)$$

Uma forma alternativa de calcular o fluxo térmico é por meio da equação 21 abaixo, que é aprendida no ensino médio nos estudos de Calorimetria.

$$q = m c_p \Delta T \quad (21)$$

A equação 22 é para quando informações sobre a tubulação são fornecidas e se deve calcular a área por meio delas.

$$A = n \pi D L \quad (22)$$

3.4.2 O método da Efetividade-NUT

As análises de trocadores de calor nem sempre apresentam as temperaturas de saída dos fluidos definidas, tornando de acordo com Incropera (2008), o uso do método DTML um tanto quanto complicado, com necessidade de processos iterativos. Então surge o método alternativo da Efetividade com o adimensional Número de Unidades de Transferência, NUT.

Inicialmente é preciso definir a taxa de transferência de calor máxima possível, $q_{máx}$. Par tal é necessário analisar o conceito de capacidade calorífica que é a quantidade de calor necessária para o aumento da temperatura do corpo ou fluido. Trazendo para o trocador de calor, onde a troca são entre dois fluidos, há aquele com maior capacidade calorífica e o de menor capacidade, chamados de $C_{máx}$ e $C_{mín}$, respectivamente. A equação 23 representa a capacidade calorífica, onde m é a vazão mássica e c_p é o calor específico

$$C = \dot{m} c_p \quad (23)$$

Tendo em vista o conceito de capacidade calorífica, significa que pra aumentar a temperatura do fluido com $C_{máx}$ exige uma demanda maior de variação de temperatura do outro fluido, então não pode ser o fluido de $C_{máx}$ que proporcionará a maior taxa de transferência de calor possível. Portanto:

$$q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n}(T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (24)$$

Dando sequ\ecencia, pode-se definir tamb\em a efetividade ε de acordo com Incropera (2008), como a raz\ao entre a taxa de transfer\encia de calor real de um trocador e a taxa de transfer\encia de calor m\axima poss\ivel:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (25)$$

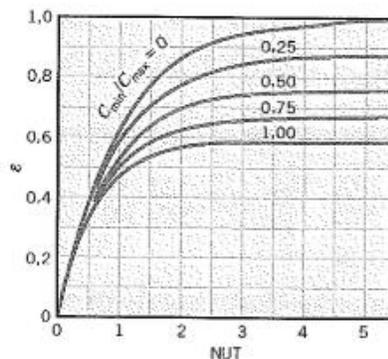
Por fim, define-se o NUT como a rela\cao entre a \area de troca t\ermica, o coeficiente de transfer\encia de calor e o valor m\ınimo da capacidade calor\ıfica da corrente:

$$NUT = \frac{UA}{C_{m\acute{i}n}} \quad (26)$$

Express\oes que relacionam especificamente a efetividade com o NUT foram desenvolvidas, resultando em equa\coes. Para o caso mais especifico do objetivo deste trabalho \e mais conveniente trabalhar com a forma gr\afica atrav\es das chamadas rela\coes ε NUT. Na Figura 9 est\ao o gr\afico que relaciona a efetividade com o NUT em um trocador de calor do tipo casco-tubo com 1 passe no casco e dois, ou m\ultiplos de dois passes nos tubos. Nesse gr\afico a rela\cao \e feita atrav\es de um intermedi\ario C_r , que \e a raz\ao entre as taxas de capacidades calor\ıficas dos fluidos:

$$C_r = \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}} \quad (27)$$

Figura 9 – Gr\afico relaciona efetividade com NUT em um trocador de calor com um passe no casco e qualquer m\ultiplo de dois passes nos tubos



Fonte: Incropera (2008)

3.5 Incrustação

Uma ocorrência natural do processo de troca térmica é o acúmulo de incrustação, fazendo com que ao passar do tempo o Coeficiente Global de troca térmica tenha seu valor alterado por tais incrustações, que são fator determinante de paradas de funcionamento para limpeza e aumento nos custos de manutenção do trocador. O depósito de incrustação que ocorre pode ser determinado através de coeficientes de resistências que são estimados e informados no processo e geralmente se apresenta em exercícios que propõe o cálculo de um novo coeficiente U em conjunto das resistências de transferências térmicas de convecção e condução na parte interna e externa dos tubos.

A maior dificuldade na resolução de exercícios com incrustação por vezes não chega a ser o cálculo dos coeficientes de depósito de fato, pois seus cálculos seriam baseados em meras suposições e por tal motivo estes são fornecidos nos enunciados. Entretanto, os coeficientes de convecção interno e externo, h_i e h_e respectivamente, são propostos a serem obtidos por equações que são funções de alguns adimensionais que são eles: Reynolds, Prandtl e Nusselt.

Cada adimensional tem o seu papel em determinar o comportamento do sistema. O número de Reynolds dado pela equação 28, tem sua utilidade na determinação do tipo do regime que ocorre no tubo, sendo diretamente ligado ao tipo de troca térmica que pode ocorrer.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (28)$$

Sendo ρ a massa específica, v a velocidade do fluido, D o diâmetro do tubo e μ a viscosidade do fluido.

O número Prandtl está relacionado com a viscosidade da substância e com o fluxo fluidodinâmico e térmico que ocorre no tubo, sendo extremamente relevante em casos chamados de comprimento de entrada combinada, que significa que a entrada do fluxo fluidodinâmico e térmico ocorrem no mesmo ponto, caso este que corresponde ao comportamento nos tubos dos trocadores de calor.

As equações para obter os coeficientes de convecção interno e externo, h_i e h_e estão dispostas abaixo:

$$Nu = 1,86 \left(\frac{RePr}{\frac{L}{D}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (29)$$

Onde Pr é o número de Prandtl que é tabelado, L é o comprimento do tubo, μ é a viscosidade do fluido na temperatura em que o mesmo se encontra e μ_s a viscosidade do fluido na temperatura da superfície do tubo e os valores de viscosidade são tabelados.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (30)$$

Sendo f o fator de atrito do fluido no tubo, obtido através da equação 31 e nada tem a ver com o fator de correção f do método do DTML.

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (31)$$

Finalmente de posse do Nusselt e com as informações de k_i que é o coeficiente de condução interno e D_i que é o diâmetro interno do tubo é possível o cálculo de h_i pela equação 32.

$$h_i = \frac{k_i Nu}{D_i} \quad (32)$$

Já para o coeficiente externo é necessário calcular Nusselt de uma forma diferente, sendo ela a da equação 33.

$$Nu = 0,3 + 0,62 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{-1}{4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (33)$$

Onde os valores do número de Reynolds e Prandtl são os mesmos a serem obtidos para o uso da equação 30. Novamente de posse do Nusselt e com as informações de k_e que é o coeficiente de condução externo e D_e que é o diâmetro externo do tubo, é possível o cálculo de h_e pela equação 34.

$$h_e = \frac{k_e Nu}{D_e} \quad (34)$$

A equação 35 representa a resistência total provenientes dos coeficientes de troca térmica.

$$R_{tot} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{Rd_i}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{Rd_e}{A_e} + \frac{1}{h_e A_e} \quad (35)$$

Sendo o primeiro fator da soma correspondente a convecção interna, o segundo fator é o da incrustação interna onde tem Rd_i que é a resistência de depósito interno, o terceiro fator corresponde a superfície tubular, onde ocorre troca de calor por condução e justamente k é o coeficiente de condução da superfície tubular, L o comprimento do tubo e D_i e D_e sendo o diâmetro interno e externo do tubo, respectivamente. O quarto componente da soma é o da incrustação externa que assim como o da interna relaciona o Rd_e que é a resistência de depósito interno com a área da parte externa do tubo, A_e , e finalmente o quinto termo da soma é correspondente a troca de calor por convecção que ocorre na parte externa.

Enquanto que a equação 36 é o coeficiente global de troca térmica do lado externo e a equação 37 fornece o coeficiente global interno de troca térmica.

$$U_e = \frac{1}{R_{tot} A_e} \quad (36)$$

e

$$U_i = \frac{1}{R_{tot} A_i} \quad (37)$$

3.6 Estado da Arte

Atualmente a preocupação das indústrias reside no uso eficiente de fontes de energia para a operação da planta. Com isso a simulação do estudo de trocadores de calor é voltada para a análise que visa a maior efetividade do trocador de calor. Incropera (2008), trabalha com a simulação de trocador de calor voltada para a análise de eficiência de troca térmica. Godoy (2008) estudou a eficiência térmica de trocadores de calor compactos através de simulação numérica. Ferreira (2015) construiu um trocador de calor para analisar nanopartículas de ouro como fluido de arrefecimento afim de analisar a eficiência da troca térmica.

Dentre as ferramentas da simulação estão a instrumentação e controle dos equipamentos. Novazzi (2006) estabeleceu parâmetros para a construção de Redes de Trocadores de Calor e Delatore (2011) com sua metodologia trabalhou com o objetivo de aplicar técnicas de controle multivariável em uma Rede de Trocadores de Calor.

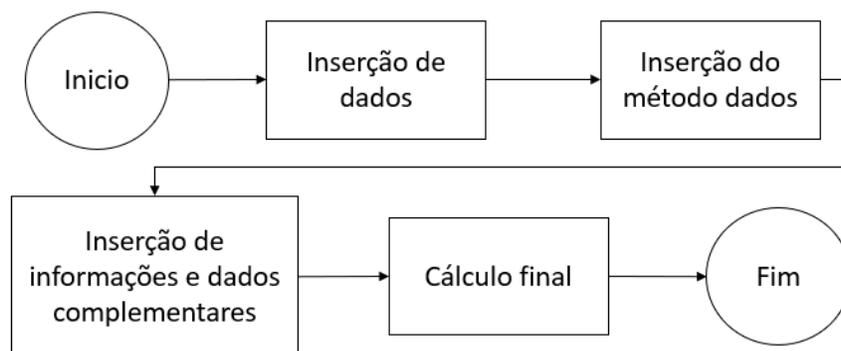
Enquanto que na área de simulação para fins didáticos Filho (201-?) traz o desenvolvimento de simulação como ferramenta de apoio as aulas de operações unitárias, estudando o caso de um trocador do tipo casco tubo em linguagem *Matlab*.

4 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo se baseou inicialmente em uma revisão bibliográfica sobre trocadores de calor, as formas de transferência de calor e os métodos de cálculos de troca térmica. Além de um estudo sobre a modelagem e simulação de problemas envolvendo os trocadores de calor, afim de antecipar as necessidades e meios de implementar os métodos com o objetivo de alcançar os resultados corretos.

Após a revisão inicial, foi feito o algoritmo da implementação do programa que buscou simular a execução de um problema em que requeria calcular o processo de troca térmica e outro para dimensionar o trocador de calor. O passo seguinte foi a implementação deste algoritmo no software *Matlab*, respeitando a sua linguagem. Objetivando a resolução de questões o algoritmo implementado na linguagem *Matlab* foi construído com uma característica interativa com o usuário em que por meio de perguntas busca obter as informações necessárias para a resolução do exercício a cada informação inserida leva para um caminho mais específico dentro do código, através da condições *if* inseridas, em busca do resultado final. Pelo motivo do programa ter muitas tomadas de decisões para serem tomados estes caminhos, fica complexa a criação de um fluxograma para esboçar um algoritmo padrão, mas de certa forma segue o exposto na Figura 10 a seguir. A observação é que desde a primeira inserção de informação até o cálculo final estão ocorrendo cálculos intermediários no programa.

Figura 10 – Fluxograma do algoritmo do programa



Fonte: O Autor (2019)

As informações citadas no fluxograma por vezes não estão contidas no enunciado e precisam ser consultadas em tabelas ou gráficos afim de obter tais informações complementares para a resolução da questão, sendo assim foi desenvolvido dentro do código uma opção de gerar os gráficos de fator de correção e de ϵ NUT ou as tabelas de característica do fluido, de acordo com o dado necessário, através do *imshow*, linha de código que permite que figuras sejam abertas, bastando que tais imagens estejam dentro da mesma pasta do programa.

As tabelas de consulta não autorais estão no Anexo A, enquanto que a tabela modificada pelo autor com informações de outros autores está na Figura 20. O intuito é que após a inserção dos dados necessários de constantes e gráficos, e uma vez alcançado o resultado final, o mesmo seja comparado com o gabarito encontrado na Literatura de origem do problema.

Os tipos de trocadores de calor que o programa engloba são os trocadores do tipo duplo tubo e casco tubo. A explanação do modelo matemático do programa foi separada por metodologia de problema, sendo:

a) DTML

Em problemas desse tipo a obtenção do DTML é o primeiro cálculo realizado e se dá pelo termo isolado entre parênteses da equação 16.

$$q = UA \left(\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \right) \quad (16)$$

Quando o objetivo é o cálculo térmico e não é fornecida a área, a mesma pode ser calculada pela equação 22, através das informações dos tubos que compõe o trocador casco tubo.

$$A = n\pi DL \quad (22)$$

De posse do valor da área e do coeficiente global é calcula do então a taxa de troca térmica pela equação 17.

$$q = UA\Delta T_{ml} \quad (17)$$

O coeficiente global caso também não seja fornecido é possível calcular por meio da metodologia da incrustação a ser citada mais pra frente neste mesmo tópico na parte c).

A depender do tipo de corrente de troca térmica dos fluidos e da composição do trocador de calor a equação 17 não é mais suficiente, sendo agora a equação 20 a utilizada para o cálculo da taxa térmica.

$$q = UAf\Delta T_{ml} \quad (20)$$

O fator de diferença entre elas é obtido pelo gráfico já exibido nas Figura 7 e 8, relacionados com as equações 18 e 19.

$$R = \frac{T_{q,ent} - T_{q,sai}}{T_{f,sai} - T_{f,ent}} \quad (18)$$

e

$$S = \frac{T_{f,sai} - T_{f,ent}}{T_{q,ent} - T_{f,ent}} \quad (19)$$

O cálculo da área e do coeficiente global podem ocorrer tanto pela equação 17 quanto pela equação 20, sendo dependente do mesmo critério já mencionado anteriormente, a diferença é que para tal o cálculo térmico é feito pela equação 21.

$$q = mc_p\Delta T \quad (21)$$

b) ϵ NUT

O primeiro passo é a identificação do C_{min} através da equação 23

$$C = \dot{m}c_p \quad (23)$$

Em seguida vem o cálculo do C_r que ocorre para todos os problemas deste método e é calculado pela equação 27.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (27)$$

O cálculo da maior taxa de transferência de calor, também figura presente nesse método é obtido através da equação 24.

$$q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n}(T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (24)$$

Já a relação da efetividade com as taxas de transferências de calor é dada pela equação 25, que pode servir para o cálculo da efetividade para encontrar o NUT pelo gráfico (Figura 9), para a resolução de problemas de área de troca térmica e coeficiente global,

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (25)$$

E através da equação 26 é possível calcular o termo desejado uma vez que a mesma relaciona o NUT justamente com a área e o coeficiente global.

$$NUT = \frac{UA}{C_{m\acute{i}n}} \quad (26)$$

A equação 25 é também útil quando se tem como objetivo o cálculo da troca térmica, nesse caso o NUT é calculado pela equação 26 e a efetividade é encontrada pelo gráfico e com o auxílio da equação 25 é calculada a troca térmica. O tipo de gráfico que foi citado para encontrar o NUT foi o da Figura 9 e todos os gráficos que podem vir a ser utilizados em problemas de ε NUT estão exposto mais à frente na Figura 14.

c) Incrustação

O objetivo do cálculo dentro de problemas de incrustação é geralmente a obtenção do coeficiente global, que pode ser dividido em interno ou externo, sendo o primeiro calculado pela equação 37 e o segundo pela 36.

$$U_i = \frac{1}{R_{tot}A_i} \quad (37)$$

e

$$U_e = \frac{1}{R_{tot}A_e} \quad (36)$$

Todas as duas equações dependem dos mesmos parâmetros, obviamente mudando ser apenas interno e externo. O parâmetro que necessita ser calculado

previamente é a resistência total de troca térmica pela equação 35 que é dependente dos coeficientes dos diferentes tipos de troca térmica.

$$R_{tot} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R d_i}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R d_e}{A_e} + \frac{1}{h_e A_e} \quad (35)$$

Desses coeficientes há o de convecção interna, calculado pela equação 32,

$$h_i = \frac{k_i Nu}{D_i} \quad (32)$$

e o de convecção externa obtido pela equação 34.

$$h_e = \frac{k_e Nu}{D_e} \quad (34)$$

Para calcular o coeficiente de convecção interna utilizando a equação 32 é necessário antes calcular o Nusselt, por meio da equação 29 ou 30, e para saber qual dessas duas utilizar é preciso ter o valor de Reynolds que é calculado pela equação 28.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (28)$$

O resultado de Reynolds menor que 3000 utiliza-se a equação 29.

$$Nu = 1,86 \left(\frac{Re Pr}{\frac{L}{D}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (29)$$

Caso dê maior a equação utilizada será a 30 que necessita de um fator calculado pela equação 31.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (30)$$

e

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (31)$$

Agora para calcular o coeficiente de convecção externa através da equação 34 é necessária apenas a utilização da equação 33, para o cálculo de Nu independentemente do valor encontrado de Re pela equação 28.

$$h_e = \frac{k_e Nu}{D_e} \quad (34)$$

e

$$Nu = 0,3 + 0,62 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{-1}{4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (33)$$

Por fim, de posse de todos os valores necessários o valor da equação 35 pode ser encontrado e conseqüentemente o das equações 36 e 37. Assim como a área pode necessitar ser calculada por meio da equação 22. Por vezes o valor encontrado do coeficiente global pode ser utilizado para o cálculo de outros problemas já citados nos itens anteriores, seguindo então o mesmo procedimento lógico já disposto.

5 RESULTADOS

Neste tópico mostraremos as linhas de códigos resultantes da modelagem matemática para a resolução dos problemas de trocadores de calor e assim será separado este tópico:

1. Comentários Gerais
2. Determinações Comuns
3. Determinações Especificas

Fica demonstrado então que as linhas de código serão explanadas mais a frente, sendo separadas por definições comuns e definições específicas, que no fluxograma já mostrado correspondem a inserção de informação e a inserção de informação e dados complementares, respectivamente. As informações comuns são aquelas comuns a todos os tipos de problemas resolvidos pelo programa. Antes, mas não menos importante há comentários sobre o desenvolvimento do programa.

5.1 Comentários Gerais

O processo de desenvolvimento do código ocorreu todo na janela do *Editor* do programa *Matlab* e permite que os dados a serem definidos pelo usuário sejam todos inseridos a partir da *Command Window*.

São os comandos *if*, *elseif* e *else* que permeiam as condições que devem ser satisfeitas para que determinado caminho seja seguido, ou tipo de cálculo seja realizado pelo usuário ao longo da resolução de uma questão, por exemplo, quando o usuário tiver a necessidade de um dos gráficos ou tabelas citados anteriormente.

Os caminhos podem ser alimentados por respostas a perguntas ou na simples inserção de dados. As perguntas são para tomadas de decisões cruciais, como o método de cálculo a ser seguido ou o tipo das correntes dos fluidos que trocam calor, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Linhas de código para tomada de decisão

```
fprintf('Qual o tipo de troca térmica? (obs: se não for informado
utilizar contracorrente)\n 1.Paralelo\n 2.Contracorrente\n')
    troca=input('Diga qual o tipo de troca térmica: ');
    if troca==1
```

Fonte: O Autor (2019).

A inserção de dados ocorre por estes se encontrarem no enunciado ou por serem padrões conhecidos, como o cp da água por exemplo, já aqueles que não forem informados no enunciado do problema, devem ser consultados e encontrados por meio de gráficos ou tabelas, os quais para isso o usuário terá através da função *imshow*, inserida na linha de código do programa, tais gráficos e tabelas abertos quando necessários. No Quadro 2 está o comando do *imshow* em um dos momentos que é utilizado no código do programa.

Quadro 2 – Comando *imshow* na linha de código

```
if passo==1 && tubo==2
    R=(Tq1-Tq2)/(Tf2-Tf1);
    P=(Tf2-Tf1)/(Tq1-Tf1);
    fprintf('Os valores encontrados são:\n %g R\n %f P\n',R,P)
    imshow('fatorin crust1x2.jpg'), title('Fator de Correção
    f');
    warning('off', 'images:initSize:adjustingMag');
    f=input('O valor encontrado do fator de correção foi: ');
```

Fonte: O Autor (2019)

Abaixo do comando *imshow* é possível perceber outro comando chamado *warning*, este comando foi inserido para desativar os avisos que aparecem na tela de comando alertando possíveis reajustes de dimensão ou resolução na imagem aberta pelo *imshow*, avisos esses que estavam ocupando parte da tela e poderiam atrapalhar o prosseguimento do uso do código, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – *Command Window* com *Warning* sobre tamanho de imagem

```

Command Window
Quantos passes no casco?: 1
Quantos passes nos tubos?: 2
Os valores encontrados são:
  0.8 R
  0.454545 P
Warning: Image is too big to fit on screen; displaying at 67%
> In images.internal.initSize (line 71)
  In imshow (line 328)
  In incrustacao (line 230)
fx O valor encontrado do fator de correção foi: |

```

Fonte: O Autor (2019)

Após a utilização do *warning*, estabelecendo-o como off para ajuste de imagem a tela de comando fica como mostrado na Figura 11. Para a ilustração tanto da Figura 11 quanto da Figura 12 foram utilizados exemplos aleatórios apenas para demonstrar o aviso sobre o redimensionamento na tela de comando.

Figura 12 – *Command Window* sem *Warning*

```

Command Window
1.Paralelo
2.Contracorrente
Diga qual o tipo de troca térmica: 2
O DTML é 37.4444 graus Celsius
Quantos passes no casco?: 1
Quantos passes nos tubos?: 2
Os valores encontrados são:
  1.33333 R
  0.272727 P
fx O valor encontrado do fator de correção foi: |

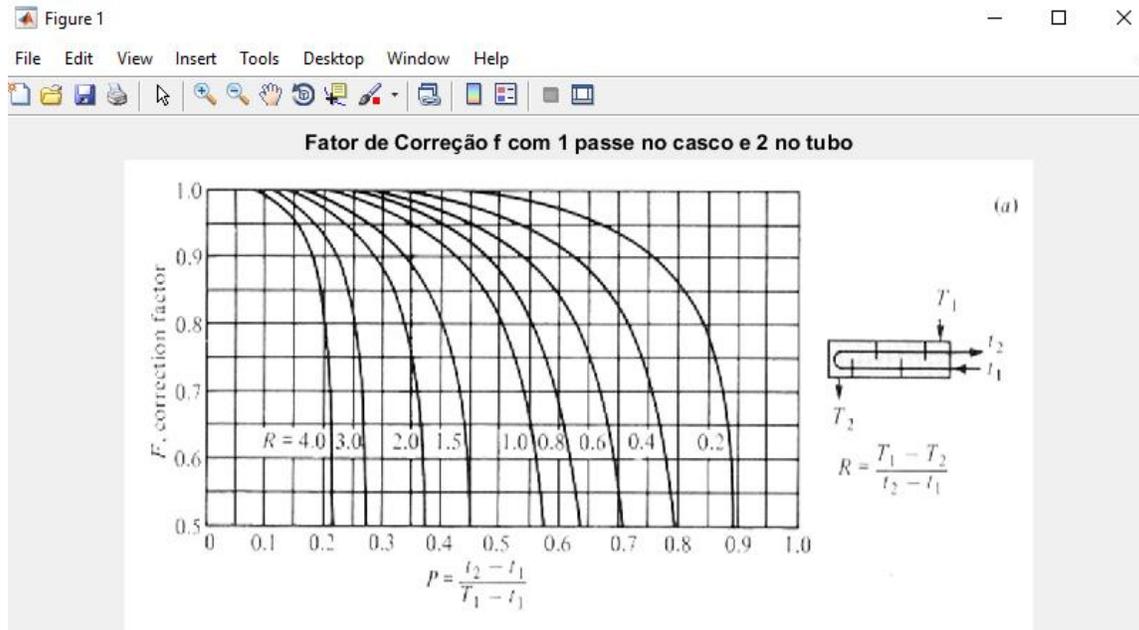
```

Fonte: O Autor (2019)

Tais imagens geradas pelo *imshow* como dito anteriormente servem como auxílio para a resolução da questão, ou seja, existem com o intuito de a informação contida na imagem seja consultada para então ser utilizada no programa, mais especificamente no caso desse fator de incrustação os valores dos eixos serão calculadas e mostradas na tela de comando como já mostrado na Figura 12, para então com base nesses valores o fator de correção ser encontrado.

A imagem gerada pelo *imshow* é mostrada pela Figura 13 e é justamente o gráfico de fator de correção que é para ser utilizado com as informações de R e P na *command window* já mostrada na Figura 12.

Figura 13 – Tela com gráfico de incrustação aberto pelo comando *imshow*



Fonte: O Autor (2019)

5.2 Determinações Comuns

Linhas de código de determinações comuns para todos os problemas serão explicitadas a seguir, contudo é importante ressaltar que elas por serem comuns aos problemas não significa dizer que estão sequenciadas na linha de código, há alterações entre elas e o que chamaremos mais na frente de determinações específicas para cada tipo de problema. Como o trabalho utiliza as condicionais *if* há comando que devem se repetir na linha de código pois estarão dentro de outras condicionais para serem seguidas em momentos diferentes.

A primeira é a determinação a respeito do Coeficiente Global de Troca Térmica, mostrada no Quadro 3. A escolha aqui determina se o objetivo é calcular o coeficiente através dos métodos de DTML ou ϵ NUT, calcular incrustação ou se o coeficiente já foi fornecido. Daqui em diante as determinações servem para todos os problemas exceto os que são apenas de Incrustação.

Quadro 3 – Determinação do Coeficiente Global

```
fprintf('O coeficiente global U foi fornecido?\n 1.Sim\n 2.Não, meu
objetivo é calculá-lo\n 3.Incrustação \n')
CoefglobalU=input('Resposta: ');
```

Fonte: O Autor (2019)

Seguindo, a próxima determinação é das temperaturas de entrada e saída dos fluidos e se há mais de uma “fase” ou de um fluido no casco ou no tubo, sendo mostrada no Quadro 4.

Quadro 4 – Linha de código com determinação de temperatura

```
Tf1=input('\nTemperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius:
(obs:Tc=(Tf-32)*0.556) \n');
    Tf2=input('Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius:
(obs:Tc=(Tf-32)*0.556) \n');
    Tq1=input('Temperatura de entrada do fluido quente em graus
Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556) \n');
    Tq2=input('Temperatura de saída do fluido quente em graus
Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556) \n');
    fprintf('Há mais de um fluido no casco ou no tubo?\n 1.Sim\n 2.
Não\n')
    fase=input('Resposta ');
```

Fonte: O Autor (2019)

A determinação da vazão é o próximo passo comum aos tipos de exercício sendo dependente apenas da informação anterior denominada de fase, conforme Quadro 5.

Quadro 5 – Linha de código para informar as vazões dos fluidos

```
if fase==1
    %Se tiver apenas uma vazão na outra colocar 0
    mq1=input('Vazão do fluido quente 1 em kg/s: ');
    mq2=input('Vazão do fluido quente 2 em kg/s: ');
    mf1=input('Vazão do fluido frio 1 em kg/s: ');
    mf2=input('Vazão do fluido frio 2 em kg/s: ');
else
```

```

        %Se tiver apenas uma vazão na outra colocar 0
        mf=input('Vazão do fluido frio em kg/s:
(obs:11bm=0.454kg) \n ');
        mq=input('Vazão do fluido quente em kg/s:
(obs:11bm=0.454kg) \n ');
        mf1=mf;
        mq1=mq;
        mf2=0;
        mq2=0;

    end

```

Fonte: O Autor (2019)

Outra determinação geral é a da escolha do método mostrada no Quadro 6.

Quadro 6 – Linha de código para definir o método

```

fprintf('Qual o método?\n 1.DTML\n 2.E-NUT\n')
metodo=input('Diga qual o metodo: ');

```

Fonte: O Autor (2019)

Por fim o cp é a última determinação que se pode chamar de geral, mostrado a seguir no Quadro 7, contudo ela não é pedida para os itens I, IV e VII dos problemas citados acima, mas por ser informação do fluido boa parte das vezes compõe os problemas de trocadores de calor. É possível observar que há espaço designado para o preenchimento não só do calor específico, mas também do calor latente, caso esse exista no problema.

Quadro 7 – Linha de código para o calor específico

```

fprintf('Precisa descobrir o cp?\n 1.Sim\n 2.Não\n')
cp=input('Diga: ');
if cp==1
    imshow('tabelacp.jpg');
    cpf=input('Insira o cp do fluido frio
abaixo em J/Kg°C: \n');
    cpq=input('Insira o cp do fluido quente
abaixo em J/Kg°C: \n');
else

```

```

    cpf=input('Insira o cp do fluido frio
abaixo em J/Kg°C: (obs:1cal=4.19J e
1btu/lbmF=4190J/Kg°C) \n');
    cpq=input('Insira o cp do fluido quente
abaixo em J/Kg°C: (obs:1cal=4.19J e
1btu/lbmF=4190J/Kg°C) \n');
    Lf=input('Insira o calor latente do fluido
frio em J/Kg: (obs:1cal=4.19J e
1btu/lbm=2326J/Kg) \n');
    Lq=input('Insira o calor latente do fluido
quente em J/Kg: (obs:1cal=4.19J e
1btu/lbm=2326J/Kg) \n');

end

```

Fonte: O Autor (2019)

5.3 Determinações Específicas

Para as determinações específicas a descrição será facilitada pela disposição em sete tipos de problemas. Os tipos de problemas que o programa criado visa resolver são os de:

- I. Cálculo de Troca Térmica DTML;
- II. Área de Troca Térmica DTML;
- III. Coeficiente Global de Troca Térmica DTML;
- IV. Cálculo de Troca Térmica ϵ NUT;
- V. Área de Troca Térmica ϵ NUT;
- VI. Coeficiente Global de Troca Térmica ϵ NUT;
- VII. Determinação do Coeficiente Global de Troca Térmica após a Incrustação.

I. Cálculo de Troca Térmica DTML

As determinações gerais que trazem para esse tipo de problema é a do método que no caso será o da Diferença de Temperatura Média Logarítmica, denominado de DTML e que se dá pela linha de código já demonstrada no Quadro 6. A primeira determinação específica é então a do objetivo ilustrada no Quadro 8, para ser inserida a informação que se deseja calcular a troca térmica.

Quadro 8 – Linha de código que define o objetivo do cálculo

```
fprintf('Qual o objetivo?\n 1.Calcular troca térmica\n 2.Obter a área
necessária para a troca térmica\n')
    objetivo=input('Objetivo é: ');
```

Fonte: O Autor (2019)

O próximo passo dentro desse problema é o que se encontra no Quadro 1 em que há a determinação da corrente dos fluidos, em seguida com base na informações de temperatura inseridas é calculado o valor do DTML como já mostrado na Figura 12. Para finalizar o cálculo térmico resta apenas a informação da área, que pode ter sido informada ou deve ser calculada por meio de outras informações, conforme mostrada na linha de código do Quadro 9.

Quadro 9 – Linha de código para informações da área

```
fprintf('A área foi fornecida ou deve calcular?\n
1.Fornecida\n 2.Calcular\n')
area=input('Resposta: ');
if area==1
    A=input('informe agora a área de troca térmica em m²: ');
else
    n=input('Insira o numero de tubos');
    D=input('Insira o diametro dos tubos em cm');
    L=input('Insira o comprimento dos tubos em metros');
    A=n*pi*0.01*D*L;
    fprintf('A área calculada em m² foi de: %f \n',A)
end
```

Fonte: O Autor (2019)

E por fim a linha de código que realiza o cálculo da troca térmica é mostrada no Quadro 10 a seguir, também é onde é mostrado o resultado juntamente com a unidade que foi já estabelecida em Watts e por isso há a necessidade de realizar as conversões, quando necessário .

Quadro 10 – Linha de código do cálculo de troca térmica

```
q=U*A*DTM;
fprintf('A quantidade de calor trocada é em Watts %f \n',q)
```

Fonte: O Autor (2019)

II. Área de Troca Térmica DTML

Para o cálculo da área de troca térmica pelo método do DTML as determinações necessárias não fogem do que já foi apresentado anteriormente, sendo a determinação do método na linha de código já demonstrada no Quadro 6 e a determinação específica do objetivo ilustrada no Quadro 8, para inserir a informação de que o intuito será obter a área necessária para que a troca térmica ocorra, que é o que se chama de dimensionar o trocador de calor. Em seguida a informação a ser inserida é a do calor específico como já demonstrada pelo Quadro 7.

Exercidos todos os passos anteriores é então chegada a hora de obter os valores de fluxo térmico de cada fluido. Cálculo que é feito por meio da equação 21, uma vez obtido o valor de troca térmica entre os fluidos é possível então obter a área necessária para que essa troca ocorra. Os cálculos nas linhas mostradas no Quadro 11 são para quando apenas a vazão de um dos fluidos é fornecida, onde havendo uma vazão nula é escolhido um caminho dentro das condicionais *if* e *elseif* implementadas.

Quadro 11 – Linha de código do cálculo da taxa térmica para o cálculo do dimensionamento da área de troca térmica

```

if mq==0
    q=mf*(cpf*(Tf2-Tf1)+Lf);
    A=q/(U*DTM);
    fprintf('A área necessária para o trocador de calor é %f metros
quadrados \n',A)
elseif mf==0
    q=mq*(cpq*(Tq1-Tq2)+Lq);
    A=q/(U*DTM);
    fprintf('A área necessária para o trocador de calor é %f metros
quadrados \n',A)

```

Fonte: O Autor (2019)

Quando ocorre de serem fornecidas as vazões dos dois fluidos do trocador é então seguida a linha de código mostrada no Quadro 12, em que haverá então dois

valores para o fluxo térmico e por definição é pego o maior valor para o cálculo da área térmica necessária.

Quadro 12 – Linha de código do cálculo térmico com duas vazões para o cálculo do dimensionamento

```

else
    q1=mf*(cpf*(Tf2-Tf1)+Lf);
    q2=mq*(cpq*(Tq1-Tq2)+Lq);
    if q1>q2
        q=q1;
        A=q/(U*DTM);
        fprintf('A área necessária para o trocador de calor é %f
metros quadrados \n',A)
    else
        q=q2;
        A=q/(U*DTM);
        fprintf('A taxa de calor foi de: %f W \n',q)
        fprintf('A área necessária para o trocador de calor é %f
metros quadrados \n',A)
    end
end
end

```

Fonte: O Autor (2019)

III. Coeficiente Global de Troca Térmica DTML

Para o cálculo do coeficiente algumas determinações já foram expostas aqui, são elas as do Quadro 3 e Quadro 6, para a definição do objetivo de calcular o Coeficiente pelo método do DTML. Após isso ocorre a necessidade da obtenção da área, então entra em ação novamente o já exposto Quadro 9, e o valor do calor trocado de semelhante forma ao já mostrado nos Quadro 11 e Quadro 12, trocando apenas a variável final de interesse, no lugar de A vai o U e vice-versa.

IV. Cálculo de Troca Térmica ϵ NUT

Aqui inicialmente se repete o que já ocorre no cálculo térmico pelo método do DTML exposto no I, diferenciando obviamente na escolha do método que se dá pela linha de código já demonstrada no Quadro 6. Observa-se aqui que nas

informações gerais não são todos os valores de temperatura que são fornecidos, por vezes são somente fornecidas duas temperaturas, a quente de entrada e a fria de entrada. Segue com a primeira determinação específica com a identificação do chamado C_{\min} , conforme Quadro 13 abaixo.

Quadro 13 – Determinação do C_{\min}

```
C1=mq*cpq;
    C2=mf*cpf;
    if C1<C2
        Cmin=C1;
        fprintf('O valor de Cmin é: %f \n',Cmin)
    else
        Cmin=C2;
        fprintf('O valor de Cmin é: %f \n',Cmin)
    end
```

Fonte: O Autor (2019)

O próximo passo é então o cálculo do chamado C_r definido pela equação 27 e mostrado no Quadro 14.

Quadro 14 – Cálculo do C_r

```
if Cmin==C1
    Cr=C1/C2;
    fprintf('O valor de Cr é: %f \n',Cr)
else
    Cr=C2/C1;
    fprintf('O valor de Cr é: %f \n',Cr)
end
```

Fonte: O Autor (2019)

O próximo passo é finalmente a determinação do objetivo já ilustrada no Quadro 8, para ser inserida a informação que se deseja calcular a troca térmica. Dando seguimento se tem a inserção da área necessária, no mesmo estilo do que já foi mostrado no Quadro 9, para o cálculo do NUT pela equação 26, e a inserção da informação do tipo da corrente de troca térmica que é importante para determinar

qual o gráfico de ϵNUT que será aberto pelo *imshow*, tudo isso sendo demonstrado na linha de código do Quadro 15.

Quadro 15 – Inserção da área e do tipo da corrente de troca entre os fluidos

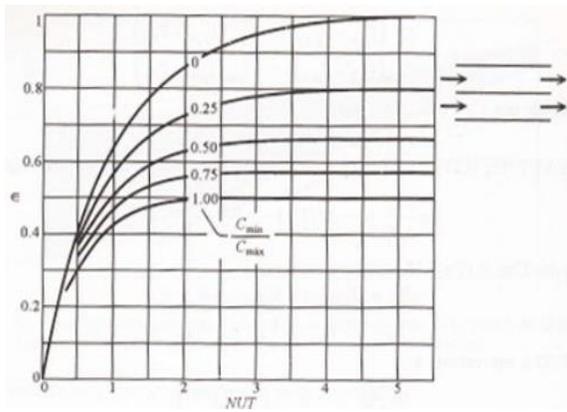
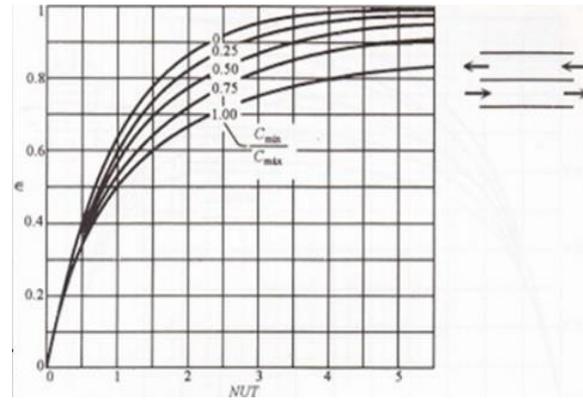
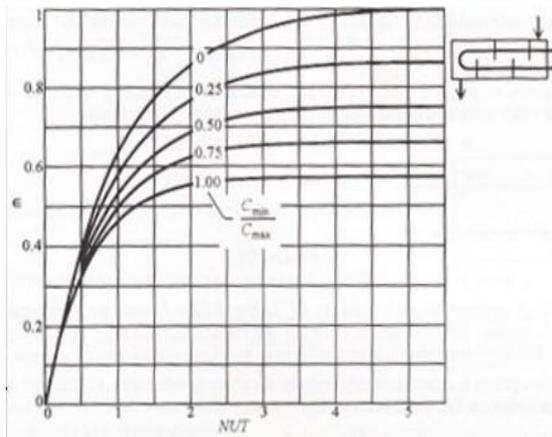
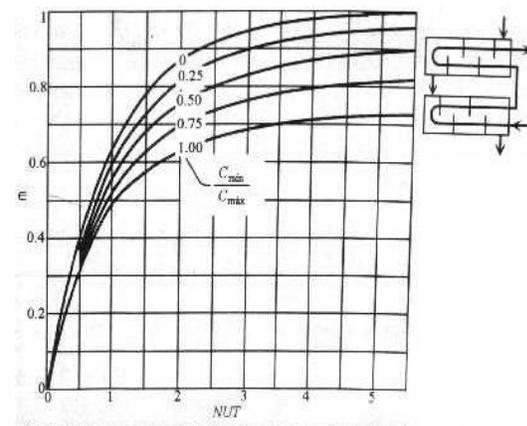
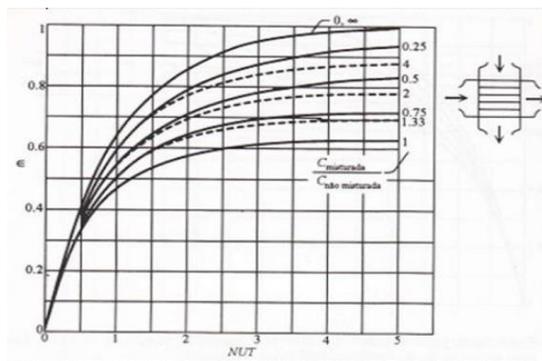
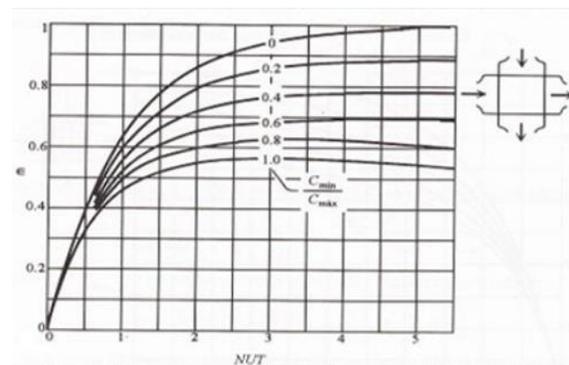
```

    if objetivo==1
        A=input('informe agora a área de troca térmica em m²:
\n');
        NUT=U*A/Cmin;
        fprintf('O valor de calculado de NUT foi de %f
\n',NUT)
        fprintf('Para saber qual gráfico usar, favor informar
o tipo da corrente troca térmica. \n');
        Troca=input('Paralelo=1; \nContracorrente=2; \n1
passe no casco e 2 ou multiplos de 2 no tubo=3; \nCom 2 passes no casco e
4 ou multiplos no tubo=4; \nCorrente misturada=5\nA troca térmica é: ');
        if Troca==1
            imshow('enutparalelo.jpg'),          title('ENUT
paralelo');
        elseif Troca==2
            imshow('enutcontracorrente.jpg'),    title('ENUT
contracorrente');
        elseif Troca==3
            imshow('enut1x2n.jpg'), title('ENUT 1 passe no
casco e 2 no tubo');
        elseif Troca==4
            imshow('enut2x4n.jpg'), title('ENUT 2 passe no
casco e 4 ou multiplos no tubo');
        elseif Troca==5
            imshow('correntemisturada.jpg'),     title('ENUT
Corrente Misturada');
        end

```

Fonte: O Autor (2019)

Os tipos de gráficos que se abrem a cada tipo de troca inserida estão na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Gráficos ϵ NUT com relação ao tipo de correntea) Gráfico ϵ NUT para corrente em paralelob) Gráfico ϵ NUT para contracorrentec) Gráfico ϵ NUT para contracorrente com 1 passe no casco e 2 ou múltiplos no tubod) Gráfico ϵ NUT para contracorrente com 2 passes no casco e 4 ou múltiplos no tuboe) Gráfico ϵ NUT para um escoamento misturado e outro não misturadof) Gráfico ϵ NUT para corrente misturada

Fonte: Ozisik (1985)

Em seguida deve ser inserida a informação do valor da efetividade encontrado no gráfico, com essa informação são calculados os valores de q_{\max} e q , respectivamente.

Quadro 16 – Cálculo do valor máximo de troca térmica e do fluxo de calor

```
E=input('insira o valor de Efetividade encontrado no gráfico: ');
    qmax=Cmin*(Tq1-Tf1);
    fprintf('O valor de qmax é de %f Watts \n',qmax)
    q=E*qmax;
    fprintf('O valor de troca térmica é de %f Watts \n',q)
```

Fonte: O Autor (2019)

V. Área de Troca Térmica ϵ NUT

Para o cálculo da área de troca térmica pelo método do ϵ NUT ocorre com obviedade a determinação geral do método, já citada e demonstrada no Quadro 6 e então a definição dos valores de c_p conforme já mostrado no Quadro 7. Dando sequência vem o que já foi também demonstrado no tópico IV com a descoberta de C_{\min} e o cálculo do C_r com os Quadros 13 e 14, respectivamente.

Agora, diferente do tópico anterior, há inicialmente o cálculo do q e q_{\max} e posteriormente o cálculo da efetividade demonstrado na linha de código do Quadro 17 abaixo.

Quadro 17 – Inserção da área e do tipo da corrente de troca entre os fluidos

```
if Tq2==0
    q=mf*cpf*(Tf2-Tf1);
    qmax=Cmin*(Tq1-Tf1);
    E=q/qmax;
else
    q=mq*cpq*(Tq1-Tq2);
    qmax=Cmin*(Tq1-Tf1);
    E=q/qmax;
```

Fonte: O Autor (2019)

Em seguida há a necessidade da consulta dos gráficos da Figura 14 de semelhante forma ao já explicitado na metade final do Quadro 15, mas dessa vez para encontrar o valor do NUT e não o da efetividade. De posse do valor do NUT é então calculada a área de troca térmica

VI. Coeficiente Global ϵ NUT

Para o cálculo do coeficiente global por meio do ϵ NUT é seguido tudo que é feito no cálculo da área pelo mesmo método, mudando apenas o fato de quando chega no final com os valores de efetividade, q , q_{\max} e NUT em mãos calcula-se ou insere a área assim como mostrado citado diversas vezes anteriormente e mostrado no Quadro 9, e finalmente calcula o valor do Coeficiente.

VII. Determinação do Coeficiente Global de Troca Térmica após a incrustação

Esse cálculo inicia-se inserindo os coeficientes de cada tipo de troca térmica e os dados de diâmetro interno e externo, ilustrado pelo Quadro 18, necessários para calcular a resistência total de troca térmica e por fim chegar ao resultado do Coeficiente Global.

Quadro 18 – Inserção dos coeficientes de troca térmica

```

hi=input('Insira o coeficiente de convecção interno hi (se precisar
calcular coloque -1): ');
Rdi=input('Insira o coeficiente de depósito interno Rdi: ');
Di=input('Insira o diametro interno Di: ');
De=input('Insira o diametro externo De: ');
k=input('Insira o coeficiente de condução k: ');
l=input('Insira o comprimento da superfície condutiva L: ');
Rde=input('Insira o coeficiente de depósito externo Rde: ');
he=input('Insira o coeficiente de convecção externo he (se precisar
calcular coloque -1): ');
Ai=pi*Di*l;
Ae=pi*De*l;

```

Contudo, por vezes é necessário o cálculo dos coeficientes de convecção interno e externo, sendo necessário o acréscimo de algumas informações extras como mostra o Quadro 19 que exemplifica o cálculo do coeficiente de convecção externo. Nele é mostrado o *imshow* que entra justamente para exibir tabelas para auxiliar nas informações inseridas, como já dito anteriormente.

Quadro 19 – Inserção de dados e cálculo do coeficiente de convecção externo

```

if he==-1

    figure(2)
    imshow('tabelaincagua.jpg'), title('Tabela de propriedades da
    água');
    figure(3)
    imshow('tabelaincgases.jpg'), title('Tabela de propriedades de
    gases');
    V=input('Insira o valor da velocidade V do fluido externo
    (m/s): ');
    v=input('Insira o valor da viscosidade cinemática v do fluido
    externo (m²/s): ');
    ke=input('Insira o valor do coeficiente de condução k do fluido
    interno (W/mK): ');
    Pr=input('O número de Prandtl é: ');
    Re=V*De/v;
    fprintf('O número de Reynolds é: %f \n',Re)
    Nu=0.3+0.62*Re^(1/2)*Pr^(1/3)*(1+(0.4/Pr)^(2/3))^(
    (-1/4))*(1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5);
    fprintf('O valor do Número de Nusselt é de: %f \n',Nu)
    he=ke*Nu/De;
    fprintf('O valor do Coeficiente convectivo externo é de: %f
    \n',he)

```

Fonte: O Autor (2019)

Para o cálculo do coeficiente de convecção interno é seguido o mesmo raciocínio mudando apenas as equações, pois como explanado na metodologia são regidas por equações diferentes, e conseqüentemente as informações a serem inseridas também são diferentes.

De posse de todos os coeficientes é possível então calcular a resistência de cada tipo de troca e a resistência total para enfim calcular o coeficiente global de troca térmica como mostra o Quadro 20.

Quadro 20 – Cálculo das resistências e do Coeficiente Global

```

Rci=1/(hi*Ai);
Rdei=Rdi/Ai;
Rk=(log(De/Di))/(2*pi*k*l);
Rdee=Rde/Ae;
Rce=1/(he*Ae);
if k==0
    Rk=0;
elseif hi==0
    Rci=0;
elseif he==0
    Rce=0;
elseif Rde==0
    Rdee=0;
elseif Rdi==0
    Rdei=0;
end
Rtot=Rci+Rdei+Rk+Rdee+Rce;
Ue=1/(Rtot*Ae);
Ui=1/(Rtot*Ai);
fprintf('O Coeficiente global com relação a area externa é de: %f
\n',Ue)
fprintf('O Coeficiente global com relação a area interna é de: %f
\n',Ui)

```

Fonte: O Autor (2019)

De posse desse valor de coeficiente global após a incrustação é possível ainda realizar cálculos de troca térmica ou do novo dimensionamento do trocador de calor onde após a incrustação precisará de uma nova área de troca térmica, caso seja necessário, isso por conta das linhas de código mostradas no Quadro 21 que permite que o programa retorne para os outros objetivos.

Quadro 21 – Linha de código para utilizar os coeficientes globais de troca térmica com incrustações para outros cálculos

```
fprintf('Necessita de mais algum cálculo?\n 1.Calcular troca térmica\n 2.Obter a área necessária para a troca térmica\n 3.Não\n')
objetivo=input('Objetivo é: ');
if objetivo==3
    fprintf('Fim\n')
else
    U=input('Dos dois qual Coeficiente global de troca térmica
    usará, digite o valor calculado: \n');
end
```

Fonte: O Autor (2019).

6 RESOLUÇÃO DE QUESTÕES E DISCUSSÕES

Após toda a explanação da construção do código e de seus caminhos nesse tópico será mostrado de fato o programa rodando e trabalhando na resolução de questões. As questões foram retiradas de livros e lista de exercício aplicada na disciplina de Operações Unitárias 3 do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas.

A estrutura desse tópico segue assim como o anterior, adotando a mesma separação por tipos de problemas. Todas as questões mostradas a seguir foram feitas utilizando o programa desenvolvido por este trabalho e confrontadas com os gabaritos encontrados na Literatura e com as resoluções manuais. Os resultados serão mostrados por captura de tela de toda a *Command Window* no decorrer do problema. Conterá os seguintes elementos sobre a informação: Calculada; Consultada; Fornecida ou Inserida. As informações calculadas como o nome já diz são aquelas calculadas, as consultadas são aquelas que foram consultadas por meio de gráficos ou tabelas, as fornecidas são as que estão contidas no enunciado do problema, e as inseridas são aquelas que a informação não está clara no enunciado e o usuário tem o poder de decisão tendo de usar de conhecimento próprio para fazer algumas deduções sobre o problema.

I. Cálculo de Troca Térmica DTML

Enunciado: Um trocador de calor com 2 passes no casco e 4 passes nos tubos é utilizado para aquecer a glicerina de 20°C até 50°C, com água quente a 80°C que entra nos tubos de paredes fina com diâmetro de 2 cm e sai a 40°C. O comprimento total dos tubos é 60 metros. O coeficiente de transferência de calor por convecção é de 25 W/m²k no lado do casco e 160 W/m²k no lado dos tubos. Determine a taxa de transferência de calor no trocador de calor.

Resolução: Inseridas as informações necessárias foi seguido o caminho de resolução de incrustação para encontrar o coeficiente global U para finalmente calcular a taxa de calor trocado que foi de 1829,26 Watts, conforme mostra a Figura 15 abaixo.

Figura 15 – Resolução da questão de cálculo de troca térmica pelo DTML

```

Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
1.Sim
2.Não, meu objetivo é calculá-lo
3.Incrustação
Resposta: 3 Inserida
Insira o coeficiente de convecção interno hi (se precisar calcular coloque -1): 25 Fornecida
Insira o coeficiente de depósito interno Rdi: 0 Inserida
Insira o diametro interno Di: 2 Fornecida
Insira o diametro externo De: 2 Fornecida
Insira o coeficiente de condução k: 0 Inserida
Insira o comprimento da superfície condutiva L: 60 Fornecida
Insira o coeficiente de depósito externo Rde: 0 Inserida
Insira o coeficiente de convecção externo he (se precisar calcular coloque -1): 160 Fornecida
O Coeficiente global com relação a area externa é de: 21.621622 Calculada
O Coeficiente global com relação a area interna é de: 21.621622 Calculada
Necessita de mais algum cálculo?
1.Calcular troca térmica
2.Obter a área necessária para a troca térmica
3.Não
Objetivo é: 1 Inserida
Dos dois qual Coeficiente global de troca térmica usará, digite o valor calculado:
21.62 Inserida

Temperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
20 Fornecida
Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
50 Fornecida
Temperatura de entrada do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
80 Fornecida
Temperatura de saída do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
40 Fornecida
Vazão do fluido frio em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
0 Inserida
Vazão do fluido quente em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
0 Inserida
Qual o método?
1.DTML
2.E-NUT
Diga qual o metodo: 1 Inserida
Qual o tipo de troca térmica? (obs: se não for informado utilizar contracorrente)
1.Paralelo
2.Contracorrente
Diga qual o tipo de troca térmica: 2 Inserida
O DTML é 24.663 graus Celsius Calculada
Quantos passes no casco?: 2 Fornecida
Quantos passes nos tubos?: 4 Fornecida
Os valores encontrados são:
1.33333 R Calculada
0.500000 P Calculada
O valor encontrado do fator de correção foi: 0.91 Consultada
O DTM é 22.4434 graus Celsius Calculada
A área foi fornecida ou deve calcular?
1.Fornecida
2.Calcular
Resposta: 2 Inserida
Insira o numero de tubos: 1 Fornecida
Insira o diametro dos tubos em cm: 2 Fornecida
Insira o comprimento dos tubos em metros: 60 Fornecida
A área calculada em m² foi de: 3.769911 Calculada
A quantidade de calor trocada é em Watts 1829.256948 Calculada

```

Fonte: O Autor (2019)

II. Área de Troca Térmica com DTML

Enunciado: A anilina comercial com velocidade de 70 lbm/min é aquecida de 60°F a 100°F com um óleo que possui uma temperatura de entrada igual a 180°F e temperatura de saída igual a 135°F. Usa-se um trocador de casco e tubo. Determine a área necessária para este trocador se o coeficiente de transferência de calor total for de 45 Btu/hft²F, para um trocador de 2 passagens no tubo em contracorrente. Utilizando o óleo no casco e a anilina no tubo.

Dado: $C_{\text{panilina}} = 0.485 \text{ Btu/lbm}^\circ\text{F}$.

Resolução: Todos os dados dessa questão estão no chamado Sistema de Unidades Inglesas, comumente utilizada nos Estados Unidos. Portanto durante a resolução desse problema ilustrada pela Figura 16 foram feitas as conversões sugeridas no programa portanto foi trazido também nessa resolução as informações do *workspace*, pela Figura 17, para facilitar a compreensão dos dados inseridos.

Figura 16 – Resolução da questão de cálculo da área de troca pelo DTML

```

Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
  1.Sim
  2.Não, meu objetivo é calculá-lo
  3.Incrustação
Resposta: 1 Fornecida
Coeficiente global de troca térmica em W/m²°C: (obs:1btu/hft²F=5.678W/m²C)
45*5.678 Inserida
Qual o objetivo?
  1.Calcular troca térmica
  2.Obter a área necessária para a troca térmica
Objetivo é: 2 Inserida

Temperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
(60-32)*0.556 Inserida
Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
(100-32)*0.556 Inserida
Temperatura de entrada do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
(180-32)*0.556 Inserida
Temperatura de saída do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
(135-32)*0.556 Inserida
Vazão do fluido frio em kg/s: (obs:1lbm=0.454kg)
70*0.454/60 Inserida
Vazão do fluido quente em kg/s: (obs:1lbm=0.454kg)
0 Inserida

```

Qual o método?
 1.DTML
 2.E-NUT
 Diga qual o metodo: 1 **Inserida**
 Qual o tipo de troca térmica? (obs: se não for informado utilizar contracorrente)
 1.Paralelo
 2.Contracorrente
 Diga qual o tipo de troca térmica: 2 **Inserida**
 O DTML é 43.075 graus Celsius **Calculada**
 Quantos passes no casco?: 1 **Fornecida**
 Quantos passes nos tubos?: 2 **Fornecida**
 Os valores encontrados são:
 1.125 R **Calculada**
 0.333333 P **Calculada**
 O valor encontrado do fator de correção foi: 0.95 **Consultada**
 O DTM é 40.9213 graus Celsius **Calculada**
 Precisa descobrir o cp?
 1.Sim
 2.Não
 Diga: 2
 Insira o cp do fluido frio abaixo em J/Kg°C: (obs:1cal=4.19J e lbtu/lbmF=4190J/Kg°C)
 0.485*4190 **Inserida**
 Insira o cp do fluido quente abaixo em J/Kg°C: (obs:1cal=4.19J e lbtu/lbmF=4190J/Kg°C)
 0 **Inserida**
 Insira o calor latente do fluido frio em J/Kg: (obs:1cal=4.19J e lbtu/lbm=2326J/Kg)
 0 **Inserida**
 Insira o calor latente do fluido quente em J/Kg: (obs:1cal=4.19J e lbtu/lbm=2326J/Kg)
 0 **Inserida**
 A área necessária para o trocador de calor é 2.289475 metros quadrados **Calculada**

Fonte: O Autor (2019)

Figura 17 – Parte do *Workspace* da Resolução da questão de cálculo da área de troca pelo DTML

Workspace	
Name ▲	Value
A	2.2895
CoefglobalU	1
cp	2
cpf	2.0321e+03
cpq	0
DTM	40.9213
DTML	43.0750
f	0.9500
P	0.3333
passo	1
q	2.3938e+04
R	1.1250
Tf1	15.5680
Tf2	37.8080
Tq1	82.2880
Tq2	57.2680

Fonte: O Autor (2019)

III. Coeficiente Global com DTML

Enunciado: Calcule o coeficiente global de transferência de calor para um trocador de calor com escoamento em contracorrente de um serviço que busca fornecer água gelada a 4 °C.

	Lado do Casco	Lado dos Tubos
Fluido	Freon 12	Água de resfriamento
Vazão (kg/h)	127213	750560
Temp. entrada (°C)	54,1	29,44
Temp. saída (°C)	40,5	35,0
Calor latente (kcal/kg)	31,24	-----
Calor específico (kcal/kg°C)	0,1847(v)	1,0

Resolução: Os passos diferentes do já citado anteriormente a ser seguido foram as transformações de unidades das vazões para finalizar na unidade padrão final de Watts/m² °C, conforme ilustrado pela Figura 18 o resultado final foi de 273.155 W/m²°C.

Figura 18 – Resolução da questão de coeficiente global pelo DTML

```

Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
  1.Sim
  2.Não, meu objetivo é calculá-lo
  3.Incrustação
Resposta: 2 Fornecida

Temperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
29.44 Fornecida
Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
35 Fornecida
Temperatura de entrada do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
54.1 Fornecida
Temperatura de saída do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
40.5 Fornecida
Vazão do fluido frio em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
750560/3600 Inserida
Vazão do fluido quente em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
127213/3600 Inserida
Qual o método?
  1.DTML
  2.E-NUT

```

Diga qual o metodo: 1 **Fornecida**
Qual o tipo de troca térmica? (obs: se não for informado utilizar contracorrente)
1.Paralelo
2.Contracorrente
Diga qual o tipo de troca térmica: 2 **Fornecida**
O DTML é 14.7158 graus Celsius **Calculada**
Quantos passes no casco?: 1 **Inserida**
Quantos passes nos tubos?: 1 **Inserida**
A área foi fornecida ou deve calcular?
1.Fornecida
2.Calcular
Resposta: 2 **Fornecida**
Insira o numero de tubos: 4292 **Fornecida**
Insira o diametro dos tubos em cm: 1.905 **Fornecida**
Insira o comprimento dos tubos em metros: 4.84 **Fornecida**
A área calculada em m² foi de: 1243.225552 **Calculada**
Precisa descobrir o cp?
1.Sim
2.Não
Diga: 2 **Inserida**
Insira o cp do fluido frio abaixo em J/Kg°C: (obs:lcal=4.19J e lbtu/lbmF=4190J/Kg°C)
4190 **Fornecida**
Insira o cp do fluido quente em J/Kg°C: (obs:lcal=4.19J e lbtu/lbmF=4190J/Kg°C)
0.1847*4190 **Inserida**
Insira o calor latente do fluido frio em J/Kg: (obs:lcal=4.19J e lbtu/lbm=2326J/Kg)
0 **Inserida**
Insira o calor latente do fluido quente em J/Kg: (obs:lcal=4.19J e lbtu/lbm=2326J/Kg)
31.24*4190 **Inserida**
A taxa de calor foi de: 4997369.934901 W **Calculada**
O coeficiente global para troca térmica é de 273.154981 W/m²°C **Calculada**

Fonte: O Autor (2019)

IV. Cálculo de Troca Térmica pelo ϵ NUT

Enunciado: 0.5kg/s de óleo a 375 K são resfriados com 0.227 kg/s de água a 280 K em um trocador de calor casco e tubo 1-2 com área de troca térmica de 1,65 m² e coeficiente global de troca de calor U de 250 W/m²K. Quais as temperaturas de saída do óleo e da água?

Resolução: Ilustrada pela Figura 19, nessa questão o objetivo final é o cálculo das temperaturas de saída do óleo e da água, contudo para ser possível esse cálculo é necessário primeiro justamente o cálculo térmico do fluxo de calor que resulta em 27.36 kW. A observação feita é da realização de transformação da temperatura de Kelvin para Celsius.

Figura 19 – Resolução da questão de cálculo de troca térmica pelo ϵ NUT

```

Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
1.Sim
2.Não, meu objetivo é calculá-lo
3.Incrustação
Resposta: 1 Fornecida
Coeficiente global de troca térmica em W/m²°C: (obs:lbtu/hft²F=5.678W/m²C)
250 Fornecida
Qual o objetivo?
1.Calcular troca térmica
2.Obter a área necessária para a troca térmica
Objetivo é: 1 Fornecida

Temperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
280-273 Inserida
Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
0 Inserida
Temperatura de entrada do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
375-273 Inserida
Temperatura de saída do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
0 Inserida
Vazão do fluido frio em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
0.227 Fornecida
Vazão do fluido quente em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
0.5 Fornecida
Qual o método?
1.DTML
2.E-NUT
Diga qual o metodo: 2 Inserida
Precisa descobrir o cp?
1.Sim
2.Não
Diga: 1 Inserida
Insira o cp do fluido frio abaixo em J/Kg°C:
4189 Consultada
Insira o cp do fluido quente abaixo em J/Kg°C:
1800 Consultada

```

Fonte: O Autor (2019)

Ao digitar 1 para descobrir o cp é aberta uma tabela, mostrada na Figura 20, com os Calores específicos das substâncias mais comuns encontradas em exercícios de trocadores de calor, baseada nos valores tabelados de Smith et al. (2007).

Figura 20 – Tabela de Calor Especifico

Tabela cp				
Substância	Cp/R (298K)	Cp(J/mol K)	mol/kg	Cp(J/Kg K)
Água	9,069	75,40	0,018	4189,103
Amônia	9,718	80,80	0,017	4752,938
Anilina	23,07	191,81	0,093	2062,523
Ar	3,509	29,18	0,029	1006,05
Benzeno	16,157	134,34	0,078	1722,266
Cloro	4,082	33,94	0,035	969,7038
Etanol(líquido)	13,444	111,78	0,046	2429,992
Etanol(gás)	8,948	74,40	0,046	1617,344
Óleo (gas oil)				1800

Fonte: O Autor (2019)

Após a consulta da tabela de cp e inserido os dados a resolução segue conforme a Figura 21 que resulta numa troca térmica de 27360 Watts e temperaturas de saída do fluido quente de 35,77 °C e de 71,6 °C.

Figura 21 – Conclusão da resolução da questão de cálculo de troca térmica pelo ϵ NUT

```
O valor de Cmin é: 900.000000 Calculada
O valor de Cr é: 0.946469 Calculada
A área foi fornecida ou deve calcular?
  1.Fornecida
  2.Calcular
Resposta: 1 Fornecida
informe agora a área de troca térmica em m²:
  1.65 Fornecida
O valor de calculado de NUT foi de 0.458333 Calculada
Para saber qual gráfico usar, favor informar o tipo da corrente troca térmica.
Paralelo=1;
Contracorrente=2;
  1 passe no casco e 2 ou multiplos de 2 no tubo=3;
Com 2 passes no casco e 4 ou multiplos no tubo=4;
Corrente misturada=5 |
A troca térmica é: 3 Fornecida
insira o valor de Efetividade encontrado no gráfico: 0.32 Consultada
O valor de qmax é de 85500.000000 Watts Calculada
O valor de troca térmica é de 27360.000000 Watts Calculada
De posse do valor da troca térmica deseja encontrar alguma temperatura?
  1.Temperatura de saida do fluido frio
  2.Temperatura de saida do fluido quente
  3.As duas
  4.Não
Qual delas? 3 Fornecida
O valor da temperatura de saida do fluido frio é de 35.772651 Calculada
O valor da temperatura de saida do fluido quente é de 71.600000 Calculada
```

Fonte: O Autor (2019)

V. Área de troca térmica ϵ NUT

Enunciado: O gás de exaustão de uma fornalha é usado para pré-aquecer o ar de combustão alimentado nos queimadores da fornalha. O gás que possui uma vazão de 15 kg/s e uma temperatura de entrada de 1100 K, passa pelos tubos de uma matriz tubular enquanto o ar, a uma vazão de 10 kg/s e a uma temperatura de entrada de 300 K, encontra-se em escoamento cruzado sobre o lado externo dos tubos. Os tubos não possuem aletas e o coeficiente global de transferência de calor é de 100 W/m²K. Determine a área total da superfície dos tubos necessária para se obter uma temperatura de saída do ar de 850 K. Pode-se supor que tanto o gás de exaustão quanto o ar possuem um calor específico de 1075 J/kgK.

Resolução: Assim como na questão anterior houve a transformação da temperatura de Kelvin para °C e o valor resultante da área foi de 236.5 m², conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 – Resolução da questão de área de troca térmica pelo ϵ NUT

```

Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
1.Sim
2.Não, meu objetivo é calculá-lo
3.Incrustação
Resposta: 1 Fornecida
Coeficiente global de troca térmica em W/m²°C: (obs:lbtu/hft²F=5.678W/m²C)
100 Fornecida
Qual o objetivo?
1.Calcular troca térmica
2.Obter a área necessária para a troca térmica
Objetivo é: 2 Fornecida

Temperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
300-273 Inserida
Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
850-273 Inserida
Temperatura de entrada do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
1100-273 Inserida
Temperatura de saída do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
0 Inserida
Vazão do fluido frio em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
10 Fornecida
Vazão do fluido quente em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
15 Fornecida
Qual o método?
1.DTML
2.E-NUT
Diga qual o metodo: 2 Inserida
Precisa descobrir o cp?
1.Sim
2.Não
Diga: 2 Inserida
Insira o cp do fluido frio abaixo em J/Kg°C: (obs:lcal=4.19J e lbtu/lbmF=4190J/Kg°C)
1075 Fornecida
Insira o cp do fluido quente abaixo em J/Kg°C: (obs:lcal=4.19J e lbtu/lbmF=4190J/Kg°C)
1075 Fornecida
O valor de Cmin é: 10750.000000 Calculada
O valor de Cr é: 0.666667 Calculada
Para saber qual gráfico usar, favor informar o tipo de troca térmica.
Paralelo=1;
Contracorrente=2;
Com 1 passe no casco e 2 ou multiplos de 2 no tubo=3;
Com 2 passes no casco e 4 ou multiplos no tubo=4;
Um escoamento misturado e outro não misturado=5
Corrente misturada=6
A troca térmica é: 5 Fornecida
O valor de troca térmica é de 5912500.000000 Watts Calculada
O valor de qmax é de 8600000.000000 Watts Calculada
O valor de efetividade é de 0.687500 Calculada
insira o valor de NUT encontrado no gráfico: 2.2 Consultada
O valor da área de troca térmica é de 236.500000 u.a Calculada

```

Fonte: O Autor (2019)

VI. Coeficiente Global ϵ NUT

Enunciado: Um radiador de automóvel pode ser visto como um trocador de calor com escoamento cruzado com um fluido misturado. Água a uma vazão de 0.05 kg/s entra no radiador a 130 °C e deve deixá-lo a 60 °C. A água é resfriada por ar, que entra a 0.75 kg/s e a 30 °C. Considerando a área de troca térmica igual a 1.60 m², qual o coeficiente global de transferência de calor?

Resolução: A observação feita nessa questão é que um radiador é na verdade um trocador de calor com escoamento cruzado com fluidos não misturados, mas para efeitos didáticos a questão sofreu modificações. Para a resolução da questão foram apenas inseridos os valores sem conversões, houve consulta da tabela já ilustrada pela Figura 20 com o objetivo de descobrir o calor específico do ar. O resultado final foi que o coeficiente de troca térmica é de 196,36 W/m²°C, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 – Resolução da questão do coeficiente global pelo método ϵ NUT

```
Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
1.Sim
2.Não, meu objetivo é calculá-lo
3.Incrustação
Resposta: 2 Fornecida

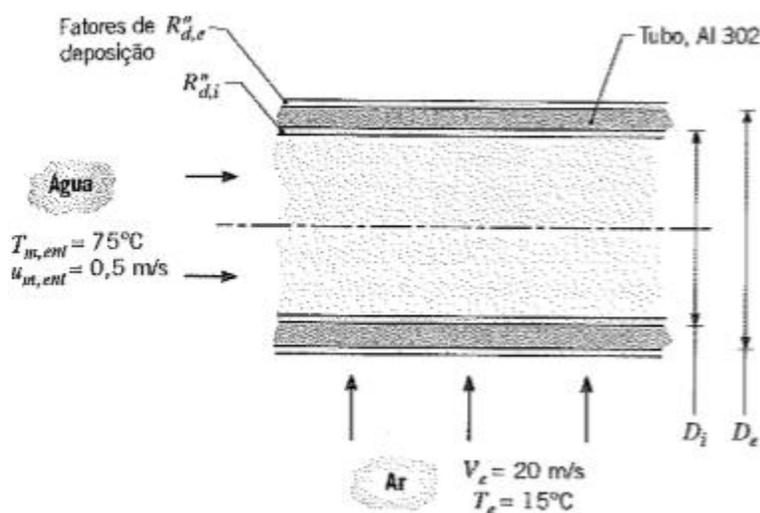
Temperatura de entrada do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
30 Fornecida
Temperatura de saída do fluido frio em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
0
Temperatura de entrada do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
130 Fornecida
Temperatura de saída do fluido quente em graus Celsius: (obs:Tc=(Tf-32)*0.556)
60 Fornecida
Vazão do fluido frio em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
0.75 Fornecida
Vazão do fluido quente em kg/s: (obs:llbm=0.454kg)
0.05 Fornecida
Qual o método?
1.DTML
2.E-NUT
Diga qual o metodo: 2 Inserida
Precisa descobrir o cp?
1.Sim
2.Não
Diga: 1
Insira o cp do fluido frio abaixo em J/Kg°C:
1006 Fornecida
Insira o cp do fluido quente abaixo em J/Kg°C:
4189 Fornecida
```

O valor de C_{min} é: 209.450000 **Calculada**
 O valor de C_r é: 0.277601 **Calculada**
 Para saber qual gráfico usar, favor informar o tipo de troca térmica.
 Paralelo=1;
 Contracorrente=2;
 Com 1 passe no casco e 2 ou múltiplos de 2 no tubo=3;
 Com 2 passes no casco e 4 ou múltiplos no tubo=4;
 Um escoamento misturado e outro não misturado=5
 Corrente misturada=6
 A troca térmica é: 5 **Fornecida**
 O valor de troca térmica é de 14661.500000 Watts **Calculada**
 O valor de q_{max} é de 20945.000000 Watts **Calculada**
 O valor de efetividade é de 0.700000 **Calculada**
 A área foi fornecida ou deve calcular?
 1.Fornecida
 2.Calcular
 Resposta: 1 **Fornecida**
 informe agora a área de troca térmica em m^2 :
 1.6 **Fornecida**
 insira o valor de NUT encontrado no gráfico: 1.5 **Consultada**
 O valor do coeficiente global troca térmica é de $196.359375 \text{ W/m}^2\text{°C}$ **Calculada**

Fonte: O Autor (2019)

VII. Incrustação

Enunciado: Um tubo de aço inoxidável AISI 302, com diâmetros interno e externo de $D_i=22 \text{ mm}$ e $D_e=27 \text{ mm}$, respectivamente, é usado em um trocador de calor com escoamento cruzado. Os fatores de deposição, R_d'' , nas superfícies interna e externa são estimados serem iguais a $0,0004 \text{ m}^2\text{K/W}$ e $0,0002 \text{ m}^2\text{K/W}$, respectivamente.



Determine o coeficiente global de transferência de calor baseado na área externa do tubo, U_e .

Resolução: Para a resolução desse problema segue conforme ilustrado na Figura 24. Ocorre a consulta de diversas tabelas e conseqüentemente se deve observar as unidades em que se encontram sendo necessário sempre realizar as conversões para inserir o número corretamente. Nessa questão há dois resultados, sendo um deles o requisitado na questão que foi o coeficiente de troca do lado externo que resultou em $98,39 \text{ W/m}^2\text{C}$

Figura 24 – Resolução da questão de incrustação

```

Command Window
O coeficiente global U foi fornecido?
1.Sim
2.Não, meu objetivo é calculá-lo
3.Incrustação |
Resposta: 3 Fornecida
Insira o coeficiente de convecção interno hi (se precisar calcular coloque -1): -1 Inserida
Insira o coeficiente de depósito interno Rdi: 0.0004 Fornecida
Insira o diametro interno Di: 0.022 Fornecida
Insira o diametro externo De: 0.027 Fornecida
Insira o coeficiente de condução k: 15.1 Consultada
Insira o comprimento da superficie condutiva L: 1 Inserida
Insira o coeficiente de depósito externo Rde: 0.0002 Fornecida
Insira o coeficiente de convecção externo he (se precisar calcular coloque -1): -1 Inserida
Insira o valor da massa especifica p do fluido interno (kg/m³): 1/(1.026*10^-3)
Insira o valor da velocidade v do fluido interno (m/s): 0.5 Fornecida
Insira o valor da viscosidade dinâmica µ do fluido interno (Ns/m²): 365*10^-6 Inserida
Insira o valor da viscosidade dinâmica µs na temperatura de superficie (Ns/m²): 1080*10^-6 Inserida
Insira o valor do coeficiente de condução k do fluido interno (W/mK): 668*10^-3 Inserida
O número de Prandtl é: 2.3 Consultada
O número de Reynolds é: 29373.280995 Calculada
O valor do Número de Nusselt é de: 128.033660 Calculada
O valor do Coeficiente convectivo interno é de: 3887.567492 Calculada
Insira o valor da velocidade V do fluido externo (m/s): 20 Fornecida
Insira o valor da viscosidade cinemática v do fluido externo (m²/s): 15*10^-6 Consultada
Insira o valor do coeficiente de condução k do fluido interno (W/mK): 26.3*10^-3 Consultada
O número de Prandtl é: 0.707 Consultada
O número de Reynolds é: 36000.000000 Calculada
O valor do Número de Nusselt é de: 112.116372 Calculada
O valor do Coeficiente convectivo externo é de: 109.209651 Calculada
O Coeficiente global com relação a area externa é de: 98.387519 Calculada
O Coeficiente global com relação a area interna é de: 120.748319 Calculada
Necessita de mais algum cálculo?
1.Calcular troca térmica
2.Obter a área necessária para a troca térmica
3.Não
Objetivo é: 3 Inserida
Fim
fx Fim

```

7 CONCLUSÃO

Este trabalho contribuiu para consolidação dos conceitos vistos nas disciplinas de operações unitárias III, fenômenos Transporte II e Modelagem e simulação de processos, levando a criação de uma ferramenta matemática capaz de reproduzir o comportamento de trocadores de calor.

Perante os objetivos traçados do trabalho e o apresentado em seus resultados é possível dizer que os objetivos específicos estão cumpridos. A resolução de sete exercícios diferentes de trocadores de calor mostra a abrangência que o programa possui e o seu potencial como ferramenta para auxiliar na didática.

A entrega desse estudo deixa também o desafio da melhoria contínua do programa, através de um desenvolvimento maior do código e mudanças na interface máquina-usuário, em prol de facilitar a utilização do programa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. **Transferência de Calor**. 2002. Disponível em: <<http://essel.com.br/cursos/material/03/CAP2B.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2019.

BICCA, G. B.; SECCHI, A. R.; WADA, K. **Modelagem de Trocadores de Calor Casco e Tubos**. Porto Alegre RS: Ppgeq, 2005.

BOHORQUEZ, W. O. I. **Aula 23 - Trocadores de Calor**. Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil, 2012.

COPETTI, J.B. **Cálculo de trocadores de calor tipo casco e tubos por partes com determinação das curvas de temperatura e perda de carga**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, 1989.

DELATORE, F. **Controle multivariável em redes de trocadores de calor com by-passes**. Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2011.

FILHO, A. P. **Desenvolvimento de simulador para análise de trocadores de calor como ferramenta de apoio às aulas de operações unitárias**. Unimep, [201-?]. Disponível em: <<http://www.unimep.br/phpg/mostracademica/anais/4mostra/pdfs/470.pdf>>. Acesso em: 7 mar. 2019.

FERREIRA, T. P. A. **Projeto e construção de um trocador de calor: Uso de nanofluidos (nanopartículas de ouro em fluido base) como líquido de arrefecimento**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

GANGHIS, D. **Apostila de trocadores de calor**. Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET/BA, 2015. Disponível em: <[https://www.passeidireto.com/arquivo/19714522/apostila-de-trocadores-de-calor-cefet-ba-prof-diogenes-ganghis->](https://www.passeidireto.com/arquivo/19714522/apostila-de-trocadores-de-calor-cefet-ba-prof-diogenes-ganghis-). Acesso em: 3 abr. 2019.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3th ed. Prentice Hall, Inc, 1993.

GODOY, S. M. **Eficiência térmica de trocadores de calor compactos através de simulação numérica**. 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado em 2008) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

GUT, J. A. W.; PINTO, J. M. **Conhecendo os Trocadores de Calor a Placas**. 2014.

HEWITT, G.F.; SHIRES, G. L.; BOTT, T.R.: **Process heat transfer**. CRC Press Inc, 1993.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LIBÂNEO, J. C. **Didática**. São Paulo: Cortez, 1994.

LIBÂNEO, J. C. **O essencial da didática e o trabalho de professor em busca de novos caminhos**. Goiânia, 2001.

NOVAZZI, L. F. **Dinâmica e Controle de Redes de Trocadores de Calor**. Tese (doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, 2006.

OZISIK, M. N. **Heat Transfer - A Basic Approach**, McGraw-Hill, 1985.

PEREIRA, F. M. **Trocadores**. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2010.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

SALIBY, E. Tecnologia de Informação: uso da simulação para obtenção de melhorias em operações logísticas. **Revista Tecnológica.**, 1999.

Smith, J. M., Van Ness, H. C. e Abbott, M. M., **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**, 7a Ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2007.

TAVARES, R. H. **Didática Geral**. Belo Horizonte: Editora, UFMG, 2011.

ANEXO A – TABELAS DO INCROPERA PARA CONSULTA

TABELA A.1 Propriedades termofísicas de sólidos metálicos selecionados*

Composição	Ponto de Fusão (K)	Propriedades a 300 K				Propriedades em Várias Temperaturas (K)													
		ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg·K))	k (W/(m·K))	$\alpha \cdot 10^5$ (m ² /s)	k (W/(m·K)) / c_p (J/(kg·K))													
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500						
Aços carbono																			
Não-ligado (Mn \leq 1%, Si \leq 0,1%)		7854	434	60,5	17,7			56,7	48,0	39,2	30,0								
AISI 1010		7832	434	63,9	18,8			487	559	685	1169								
Carbono-silício (Mn \leq 1%, 0,1% < Si \leq 0,6%)		7817	446	51,9	14,9			487	559	685	1168								
Carbono-manganes-silício (1% < Mn \leq 1,65%, 0,1% < Si \leq 0,6%)		8131	434	41,0	11,6			49,8	44,0	37,4	29,3								
								501	582	699	971								
Aços (com baixo teor de) cromo																			
1/2Cr-1/2Mo-Si (0,18% C; 0,65% Cr; 0,23% Mo; 0,6% Si)		7822	444	37,7	10,9			38,2	36,7	33,3	26,9								
								492	575	688	969								
1 Cr-1/2Mo (0,16% C; 1% Cr; 0,54% Mo; 0,39% Si)		7858	442	42,3	12,2			42,0	39,1	34,5	27,4								
								492	575	688	969								
1 Cr-V (0,2% C; 1,02% Cr; 0,15% V)		7836	443	48,9	14,1			46,8	42,1	36,3	28,2								
								492	575	688	969								
Aços inoxidáveis																			
AISI 302		8055	480	15,1	3,91			17,3	20,0	22,8	25,4								
								512	559	585	606								
AISI 304	1670	7900	477	14,9	3,95	9,2	12,6	16,6	19,8	22,6	25,4	28,0	31,7						
						272	402	515	557	582	611	640	682						
AISI 316		8238	468	13,4	3,48			15,2	18,3	21,3	24,2								
								504	550	576	602								
AISI 347		7978	480	14,2	3,71			15,8	18,9	21,9	24,7								
								513	559	585	606								

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada*

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg·K))		Viscosidade, ($N \cdot s/m^2$)		Condutividade Térmica (W/(m·K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_g \cdot 10^3$	v_f		$c_{p,g}$	$c_{p,f}$	$\mu_g \cdot 10^6$	$\mu_f \cdot 10^6$	$k_g \cdot 10^2$	$k_f \cdot 10^2$	Pr_g	Pr_f			
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	668	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	679,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373,15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373,15
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400
410	3,302	1,077	0,553	2153	4,278	2,221	200	13,42	688	28,2	1,24	1,054	51,5	952	410
420	4,370	1,088	0,425	2123	4,302	2,291	185	13,79	688	29,8	1,16	1,075	49,4	1010	420
430	5,699	1,099	0,331	2091	4,331	2,369	173	14,14	685	30,4	1,09	1,10	47,2	430	430

*Adaptado da Referência 22.
^b1 bar = 10⁵ N/m².

TABELA A.4 Propriedades termofísicas de gases à pressão atmosférica^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/(kg · K))	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/(m · K))	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Ar							
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,690
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	47,2	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
Vapor d'Água							
380	0,5863	2,060	127,1	21,68	24,6	20,4	1,06
400	0,5542	2,014	134,4	24,25	26,1	23,4	1,04
450	0,4902	1,980	152,5	31,11	29,9	30,8	1,01
500	0,4405	1,985	170,4	38,68	33,9	38,8	0,998
550	0,4005	1,997	188,4	47,04	37,9	47,4	0,993
Oxigênio (O₂) (continuação)							
350	1,100	0,929	233,5	21,23	29,6	29,0	0,733
400	0,9620	0,942	258,2	26,84	33,0	36,4	0,737
450	0,8554	0,956	281,4	32,90	36,3	44,4	0,741
500	0,7698	0,972	303,3	39,40	41,2	55,1	0,716
550	0,6998	0,988	324,0	46,30	44,1	63,8	0,726
Hidrogênio (H₂)							
300	0,08078	14,31	89,6	111	183	158	0,701
350	0,06924	14,43	98,8	143	204	204	0,700
400	0,06059	14,48	108,2	179	226	258	0,695
450	0,05386	14,50	117,2	218	247	316	0,689
Nitrogênio (N₂)							
250	1,3488	1,042	154,9	11,48	22,2	15,8	0,727
300	1,1233	1,041	178,2	15,86	25,9	22,1	0,716
350	0,9625	1,042	200,0	20,78	29,3	29,2	0,711
400	0,8425	1,045	220,4	26,16	32,7	37,1	0,704
450	0,7485	1,050	239,6	32,01	35,8	45,6	0,703