



BEATRIZ FONSECA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE
SOFTWARE PARA PROJETO
DE TROCADOR DE CALOR
TEMA E**

**LAVRAS – MG
2019**

BEATRIZ FONSECA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE
SOFTWARE PARA PROJETO
DE TROCADOR DE CALOR
TEMA E**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof(a). Dr(a). Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2019**

BEATRIZ FONSECA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA PROJETO DE
TROCADOR DE CALOR TEMA E
SOFTWARE DEVELOPMENT FOR DESIGN OF TEMA E HEAT
EXCHANGER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do curso de Engenharia
Química, para a obtenção do título de
Bacharel.

APROVADA em 11 de dezembro de 2019.
Prof. Dr. Irineu Petri Júnior UFLA
Prof(a). Dr(a). Lidja D. M. S. Borél UFLA

Prof(a). Dr(a). Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS - MG
2019**

*Aos meus pais Jorge e Marlene e ao meu
irmão Jorge Júnior por todo apoio e ajuda
que prestaram durante minha graduação.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à professora Suellen Mendonça por ter aceitado o convite para orientação deste trabalho e ter sido tão paciente e solícita durante o desenvolvimento do mesmo.

Aos professores Irineu Petri e Lidja Borél pela disposição e boa vontade em fazer parte da banca examinadora deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade.

A todos os professores do curso de Engenharia Química pelo conhecimento passado que de alguma forma contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas pela ajuda e apoio direto e indireto para a realização deste trabalho.

A minha família por toda ajuda e apoio, sem os quais não seria possível a concretização desta etapa.

RESUMO

Os trocadores de calor são equipamentos amplamente utilizados na indústria em processos que envolvem a troca de calor direta ou indireta entre dois ou mais fluidos. Um dos tipos mais utilizados, atualmente, é o trocador do tipo casco e tubos, devido ao equipamento apresentar vantagens de fabricação, custo e eficiência térmica, além da aplicabilidade em várias condições operacionais. Apesar de o projeto para este tipo de trocador para o lado dos tubos ser relativamente simples, para o lado do casco ele é bastante complexo devido a fatores geométricos e aos caminhos que o fluido percorre. Por esse motivo foram desenvolvidos diversos métodos voltados para o projeto do lado do casco, sendo o método Bell-Delaware considerado o mais adequado dentre os métodos analíticos. Porém este método é bastante longo e complexo o que torna quase inviável sua aplicação sem o uso de *softwares*, sendo também muito susceptíveis a erros de cálculo. Os *softwares* para projeto de trocadores, por sua vez, possuem licenças com alto custo e exigem certo conhecimento do usuário para a sua utilização. Por estes motivos este trabalho teve como objetivo desenvolver um programa com interface clara e objetiva que possibilite o projeto de trocadores casco e tubo do tipo TEMA E, o tipo mais utilizado devido à simplicidade na construção e baixo custo. O programa foi desenvolvido na interface de programação do *Visual Basic for Applications* (VBA) do Excel por se tratar de um programa de fácil acesso. Para validar os resultados do código desenvolvido, os resultados obtidos foram comparados com dados da literatura. Os maiores valores para os erros relativos obtidos foram para a perda de carga e coeficiente convectivo de transferência de calor no casco, cujos valores foram de 8,24% e 6,85%, respectivamente. No entanto tais erros foram considerados razoáveis tendo em vista que as modelagens comparadas apresentaram ligeiras diferenças no equacionamento, como o método utilizado para o cálculo da taxa de transferência de calor. Em vista de seus resultados o programa se mostrou promissor para utilização como ferramenta didática e de pesquisa.

Palavras-chave: Casco e tubos. Bell-Delaware. *Visual Basic*. Excel. Ferramenta didática.

ABSTRACT

Heat exchangers are equipment widely used in industry in processes involving direct or indirect heat exchange between two or more fluids. One of the most used types today is the shell and tube exchanger, because the equipment has advantages in manufacturing, cost and thermal efficiency, as well as its applicability in various operating conditions. Although the design for this type of exchanger for the tubes side is relatively simple, for the shell side it is quite complex due to geometric factors and the paths the fluid travels. For this reason, several methods have been developed for the design of the shell side, and the Bell-Delaware method is considered the most appropriate of the analytical methods. However this method is quite long and complex which makes its application almost unfeasible without the use of softwares, being also very susceptible to miscalculations. Exchanger design softwares, on the other hand, has high cost licenses and requires some knowledge to use it. Because of these reasons, this work aimed to develop a program with clear and objective interface that allows the design of TEMA E shell and tubes exchangers, the most used type due to its simplicity in construction and low cost. The program was developed in Excel's Visual Basic for Applications (VBA) programming interface because it is an accessible software. To validate the results of the developed code, the results obtained were compared with data from the literature. The highest relative errors obtained were for the pressure drop and convective coefficient of heat transfer in the shell side, whose values were 8.24% and 6.85%, respectively. However, such errors were considered reasonable considering that the studies that were compared were done in different programs with different programming languages and there were slight differences in the design, as the method used to calculate the heat transfer rate. In view of the results, the program is promising as a didactic and research tool.

Keywords: Shell and tubes. Bell-Delaware. Visual Basic. Excel. Teaching tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema tridimensional de um trocador TEMA E	3
Figura 2.2 – Perda de carga para o lado dos tubos.....	8
Figura 2.3 – Correntes de fluxos em trocadores de calor casco e tubos	10
Figura 2.4 – Comprimento dos tubos.....	14
Figura 2.5 – Arranjos dos tubos.....	14
Figura 2.6 – Corte do defletor.....	15
Figura 2.7 – Espaçamentos terminais de defletores.....	16
Figura 2.8 – Tiras de selagem.....	16
Figura 2.9 – Folga casco-feixe e diâmetros característicos	17
Figura 2.10 – Ângulos de intersecção.....	18
Figura 2.11 – Região da queda de pressão em fluxo cruzado.....	24
Figura 2.12 – Região da queda de pressão nas janelas dos defletores.....	24
Figura 2.13 – Região da queda de pressão nas seções de entrada e de saída do trocador	25
Figura 2.14 – Região da queda de pressão nos bocais de entrada e saída do trocador	26
Figura 3.1 – Fluxograma simplificado da programação	29
Figura 4.1 – Abertura do programa	34
Figura 4.2 – Interface para inserção dos dados dos fluidos	35
Figura 4.3 – Planilha de Banco de Dados	35
Figura 4.4 – Botão de comando para consultar valores de fator de incrustação.....	36
Figura 4.5 – Interface para inserção de dados da geometria.....	36
Figura 4.6 – Página de resultados	37
Figura 4.7– Janela de inserção do nome do operador.....	37
Figura 4.8 – Dados exportados	38
Figura 4.9 – Planilha Auxiliar.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constantes utilizadas para o cálculo da transferência de calor e perda de carga ideais.	12
Tabela 2.2 – Passos tubular normal e paralelo.....	15
Tabela 2.3 – Número máximo de passes nos tubos	16
Tabela 3.1 – Dados dos fluidos.....	20
Tabela 3.2 – Dados da geometria do trocador	30
Tabela 4.1 – Resultados da modelagem.....	39
Tabela 1A – Temperatura crítica e massa molar de líquidos.....	61
Tabela 2A – Constantes para cálculo da condutividade térmica de líquidos.....	62
Tabela 3A – Constantes para cálculo da massa específica de líquidos.....	63
Tabela 4A – Constantes para cálculo do calor específico de líquidos	64
Tabela 5A – Constantes para o cálculo da viscosidade de líquidos.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

ΔP_c	Perda de carga no fluxo cruzado	<i>Pa</i>
ΔP_e	Perda de carga nas seções de entrada e saída do trocador	<i>Pa</i>
ΔP_w	Perda de carga nas janelas do defletor	<i>Pa</i>
ΔP_{bocais}	Perda de carga nos bocais do trocador de calor	<i>Pa</i>
ΔP_{canais}	Perda de carga nos canais de distribuição do trocador de calor	<i>Pa</i>
ΔP_{casco}	Perda de carga total para o fluido no lado do casco	<i>Pa</i>
ΔP_{ideal}	Perda de carga ideal no feixe de tubos ideal	<i>Pa</i>
ΔP_{total}	Perda de carga total para o fluido no lado dos tubos	<i>Pa</i>
ΔP_{tubos}	Perda de carga no interior dos tubos	<i>Pa</i>
ΔT	Diferença de temperatura entre a corrente quente e fria	<i>K</i>
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	<i>Pa.s</i>
μ_m	Viscosidade dinâmica do fluido à temperatura média	<i>Pa.s</i>
μ_p	Viscosidade dinâmica do fluido à temperatura da parede	<i>Pa.s</i>
ϕ	Fator de correção para propriedades variáveis com a temperatura	-
ρ	Massa específica	<i>kg/m³</i>
θ_{ctl}	Ângulo formado pela interseção do corte do defletor com o diâmetro	$^\circ$
	D_{ctl}	
θ_{ds}	Ângulo central formado pela interseção do corte do defletor com a parede interna do casco	$^\circ$
θ	Ângulo característico formado pela arranjo dos tubos no casco	$^\circ$
ε	Efetividade térmica do trocador	-
a	Parâmetro da Equação 2.39	-
a_1	Constante da Equação 2.39	-
a_2	Constante da Equação 2.39	-
a_3	Constante da Equação 2.41	-
a_4	Constante da Equação 2.41	-
A_1	Constante da Equação 2.1	-
A_2	Constante da Equação 2.3	-
A_3	Constante da Equação 2.4	-
A_4	Constante da Equação 2.5	-
A	Área de troca térmica	<i>m²</i>

A_{bocal}	Área do bocal do trocador para o lado do casco	m^2
A_e	Área da superfície externa da parede dos tubos	m^2
A_{escape}	Área de escape	m^2
A_i	Área da superfície externa da parede dos tubos	m^2
A_{tubo}	Área transversal do tubo	m^2
b	Parâmetro da Equação 2.40	-
b_1	Constante da Equação 2.40	-
b_2	Constante da Equação 2.40	-
b_3	Constante da Equação 2.41	-
b_4	Constante da Equação 2.41	-
B_1	Constante da Equação 2.1	-
B_2	Constante da Equação 2.3	-
B_3	Constante da Equação 2.4	-
B_4	Constante da Equação 2.5	-
C	Razão entre as capacidades caloríficas mínima e máxima dos fluidos	-
C_1	Constante da Equação 2.1	-
C_2	Constante da Equação 2.3	-
C_3	Constante da Equação 2.4	-
C_4	Constante da Equação 2.5	-
C_{max}	Capacidade calorífica máxima	W/K
C_{min}	Capacidade calorífica mínima	W/K
cp	Calor específico do fluido à pressão constante	$J/kg.K$
cp_f	Calor específico do fluido frio à pressão constante	$J/kg.K$
cp_q	Calor específico do fluido quente à pressão constante	$J/kg.K$
D	Diâmetro do tubo	m
D_1	Constante da Equação 2.3	-
D_2	Constante da Equação 2.4	-
D_3	Constante da Equação 2.5	-
dA	Área diferencial	m^2
D_{bocal}	Diâmetro do bocal de entrada ou de saída	m
D_{ctl}	Diâmetro do círculo formado através do centro dos tubos mais externos no casco	m
D_e	Diâmetro externo dos tubos	m

D_i	Diâmetro interno dos tubos	m
$D_{i_{bocal}}$	Diâmetro interno do bocal	m
$D_{o_{bocal}}$	Diâmetro externo do bocal	m
D_s	Diâmetro interno do casco	m
D_w	Diâmetro equivalente da janela	m
dQ	Taxa de calor transferido através do elemento de área dA	W
\hat{f}	Fator de atrito Fanning	-
f	Fator de atrito	-
f_{app}	Fator de atrito aparente	-
F_{bp}	Fração da área da seção do fluxo disponível ao fluxo de <i>bypass</i>	-
F_c	Fração total de tubos em uma seção de fluxo cruzado puro	-
f_i	Fator de atrito para um feixe de tubos ideal	-
F_w	Fração de tubos na janela do defletor	-
h_e	Coeficiente convectivo de transferência de calor na corrente externa	$W/m^2 \cdot K$
h_i	Coeficiente convectivo de transferência de calor na corrente interna	$W/m^2 \cdot K$
h_{ideal}	Coeficiente convectivo de transferência de calor ideal	$W/m^2 \cdot K$
$H_{i_{bocal}}$	Altura sobre o casco do bocal de entrada do casco	m
$H_{o_{bocal}}$	Altura sobre o casco do bocal de saída do casco	m
J_b	Fator de correção na transferência de calor devido aos efeitos de bypass no feixe de tubos	-
J_c	Fator de correção na transferência de calor devido aos efeitos de configuração do defletor	-
j_i	Fator j-Colburn para um feixe de tubos ideal	-
J_l	Fator de correção na transferência de calor devido aos efeitos de vazamento no defletor	-
J_r	Fator de correção na transferência de calor para o gradiente de temperatura adverso no fluxo laminar	-
J_{r1}	Parâmetro da Equação 2.85	-
J_s	Fator de correção na transferência de calor para o espaçamento entre defletores diferente na entrada e/ou saída	-
J_{total}	Correção total na transferência de calor para o fluido do casco	-
K	Parâmetro para o cálculo da perda de carga (bocais e canais)	-
k	Condutividade térmica	$W/m \cdot K$

k_l	Condutividade térmica do fluido	$W/m.K$
$K(x)$	Parâmetro para o cálculo da perda de carga no interior dos tubos	-
$K_1(f)$	Parâmetro para o cálculo do Nusselt médio	-
$K_2(Pr)$	Parâmetro para o cálculo do Nusselt médio	-
L	Comprimento do tubo	m
L_{cd}	Folga entre o diâmetro interno do casco e a extremidade do defletor	m
L_{cf}	Folga entre o diâmetro interno do casco e o diâmetro externo do feixe	m
\hat{L}_i	Parâmetro da Equação 2.87	-
\hat{L}_o	Parâmetro da Equação 2.87	-
L_s	Espaçamento central dos defletores	m
L_{si}	Espaçamento do defletor na entrada do casco	m
L_{so}	Espaçamento do defletor na saída do casco	m
L_t	Comprimento efetivo do tubo	m
L_{td}	Folga entre o diâmetro externo do tubo e o orifício do defletor	m
L_{tn}	Comprimento nominal do tubo	m
L_{tp}	Espessura da parede dos tubos	m
m	Fluxo cruzado mássico máximo no lado do casco	$kg/m^2.s$
\dot{m}	Vazão mássica do fluido	kg/s
\dot{m}_c	Vazão mássica no casco	kg/s
\dot{m}_f	Vazão mássica do fluido frio	kg/s
\dot{m}_q	Vazão mássica do fluido quente	kg/s
\dot{m}_t	Vazão mássica nos tubos	kg/s
m_w	Fluxo mássico na janela do defletor	$kg/m^2.s$
M_c	Massa mola do fluido no casco	kg/mol
M_t	Massa mola do fluido no	kg/mol
N	Número de passes no casco do trocador de calor	-
n	Expoente das Equações 2.6, 2.91	-
N_B	Número de defletores	-
N_c	Número de fileiras de tubos entre dois cortes do defletor	-
N_{cw}	Número de fileiras reais de fluxo cruzado em cada janela do defletor	-
N_{pt}	Número de passes no lado dos tubos	-
N_{ss}	Número de pares de tiras de selagem	-
N_{tc}	Número total de fileiras de tubos cruzados no trocador	-

N_{tt}	Número total de tubos no trocador de calor	-
N_{tw}	Número de tubos na janela do defletor	-
Nu	Número de Nusselt	-
\overline{Nu}	Número de Nusselt médio	-
NUT	Número de unidades de transferência de calor	-
P	Distância de centro a centro de tubos adjacentes	m
p	Parâmetro da Equação 2.77	-
P_N	Passo tubular normal no feixe de tubos	m
P_o	Parâmetro de correção da efetividade térmica	-
P_P	Passo tubular paralelo no feixe de tubos	m
Pr	Número de Prandtl	-
Q	Taxa real de transferência de calor	W
Q_{max}	Quantidade máxima de calor possível de ser trocada	W
Q_{total}	Taxa de calor total	W
R_b	Fator de correção na perda de carga devido aos efeitos de <i>bypass</i> no feixe de tubos	-
R_{d_e}	Fator de incrustação para a corrente externa	$m^2 \cdot K/W$
R_{d_i}	Fator de incrustação para a corrente interna	$m^2 \cdot K/W$
r_e	Raio externo dos tubos	m
Re	Número de Reynolds	-
r_i	Raio interno dos tubos	m
R_l	Fator de correção na perda de carga devido aos efeitos de vazamento no defletor	-
R_{lm}	Razão entre as áreas de vazamento e a área de fluxo cruzado puro	-
R_s	Razão da área de vazamento casco-defletor	-
R_t	Resistência térmica total	$m^2 \cdot K/W$
S_{cd}	Área de vazamento entre o casco e o defletor (para um defletor)	m^2
SM	Área de fluxo cruzado (dentro de um espaçamento entre defletores)	m^2
S_{td}	Área de vazamento entre o tubo e o defletor	m^2
S_w	Área de escoamento através da janela do defletor	m^2
S_{wg}	Área total da janela do defletor	m^2
S_{wt}	Área da janela do defletor ocupada pelos tubos	m^2
T	Temperatura do fluido	K

T_c	Temperatura crítica do fluido	K
T_f	Temperatura final do fluido	K
T_{fe}	Temperatura da corrente fria na entrada do trocador de calor	K
T_{fs}	Temperatura da corrente fria na saída do trocador de calor	K
T_i	Temperatura inicial do fluido	K
T_m	Temperatura média	K
$T_{m,c}$	Temperatura média no casco	K
$T_{m,t}$	Temperatura média nos tubos	K
T_p	Temperatura da parede	K
T_{qe}	Temperatura da corrente quente na entrada do trocador de calor	K
T_{qs}	Temperatura da corrente quente na saída do trocador de calor	K
T_r	Temperatura reduzida do fluido	$^{\circ}R$
U	Coefficiente global de transferência de calor	$W/m^2 \cdot K$
U_l	Coefficiente global de transferência de calor limpo	$W/m^2 \cdot K$
U_s	Coefficiente global de transferência de calor sujo	$W/m^2 \cdot K$
V_{bocal}	Velocidade do fluido no bocal do trocador de calor	m/s
V_t	Velocidade do fluido	m/s
\dot{V}_t	Vazão molar do fluido nos tubos	mol/s
x	Comprimento	m
\hat{x}	Parâmetro para o cálculo do coeficiente de transferência de calor local	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral do trabalho	1
1.1.1 Objetivos específicos	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1 Trocadores de calor casco e tubo	2
2.2 Equacionamento para projeto	3
2.2.1 Propriedades físicas dos fluidos	3
2.2.1.1 Condutividade térmica	3
2.2.1.2 Massa específica	4
2.2.1.3 Calor específico	4
2.2.1.4 Viscosidade	4
2.2.2 Variação das propriedades físicas dos fluidos com a temperatura	4
2.2.3 Transferência de calor e perda de carga para o lado dos tubos	6
2.2.3.1 Coeficiente de transferência de calor	7
2.2.3.2 Perda de carga	7
2.2.3.2.1 Perda de carga nos bocais	8
2.2.3.2.2 Perda de carga no interior dos tubos	8
2.2.3.2.3 Perda de carga nos canais de distribuição	9
2.2.4 Transferência de calor e perda de carga para o lado do casco	10
2.2.4.1 Método utilizado	10
2.2.4.2 Coeficiente de transferência de calor e perda de carga	11
2.2.4.3 Parâmetros necessários para o projeto para o lado do casco	13
2.2.4.4 Número de Reynolds	20
2.2.4.5 Fatores de correção	21
2.2.4.6 Perdas de carga nas seções do casco	24
2.2.5 Taxa de transferência de calor	26
2.2.6 Coeficiente global de transferência de calor	26
2.2.7 Efetividade – NUT	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
APÊNDICE – Código do programa	44

ANEXO – Propiedades físicas dos fluidos	61
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são equipamentos versáteis e são amplamente utilizados na indústria. Através deles é possível que ocorra a troca de calor entre dois ou mais fluidos de forma direta ou indireta, viabilizando, inclusive, a aplicação de integração energética entre processos, de forma a reduzir custos com correntes de utilidades.

Devido às suas inúmeras aplicabilidades e esta possibilidade de redução de custos, é crescente o interesse das indústrias em aplicar o projeto de trocadores de forma a determinar as condições ótimas para o processo de transferência de calor entre os fluidos.

O projeto de trocador estudado neste trabalho é o do trocador de calor casco-tubo, tendo em vista que é o tipo de trocador mais utilizado atualmente (CORTEZ et al., 2004). Neste caso, embora a transferência de calor no interior dos tubos seja simples de se analisar, o mesmo não pode ser dito com relação ao lado do casco, devido aos fatores geométricos envolvidos e aos diferentes caminhos que o fluido pode percorrer.

Devido a estas dificuldades foram desenvolvidos vários métodos para analisar a transferência de calor e perda de carga no lado do casco. Dentre esses métodos se destaca o método Bell-Delaware pela sua confiabilidade (WOLVERINE COMPANY, 1984). No entanto o método citado é bastante complexo sendo indicado sua aplicação por meio de *softwares*. No mercado são encontrados diversos *softwares* comerciais para projeto e simulação de trocadores, como ASPEN PLUS, UniSim e HTRI *Xchanger Suite*. No entanto esses programas possuem licenças com custos elevados e, em alguns casos, possuem interfaces que dificultam o uso por usuários que não estão familiarizados com esses programas (BICCA, 2006).

1.1 Objetivo geral do trabalho

Em vista dos problemas citados, este trabalho objetivou a construção de um *software* no Excel utilizando a ferramenta VBA (*Visual Basic for Applications*) com interface clara e objetiva que seja capaz de projetar um trocador casco-tubo usando o método de Bell-Delaware para o lado do casco.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Criar um banco de dados de fluidos e suas constantes para o cálculo das propriedades físicas no *software* desenvolvido;
- Avaliar a confiabilidade e precisão do *software* desenvolvido no Excel através da comparação com o trabalho da referência Bicca (2006).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Cortez et al. (2004) os trocadores de calor são equipamentos que permitem o resfriamento e aquecimento de fluidos através da troca térmica entre eles sem que haja contato direto deles. Uma das formas que as normas da *Tubular Exchanger Manufacturers Association* (TEMA, 2007) usam para classificar esse tipo de equipamento é através do serviço que realizam em um processo, assim podem ser classificados como trocadores/recuperadores, condensadores, resfriadores, aquecedores, refeedores, evaporadores e vaporizadores.

Os trocadores de calor ou recuperadores, por sua vez, podem ser classificados de acordo com o tipo de construção, sendo os principais os trocadores de tubo duplo, de placas e o de casco e tubo (ARAUJO, 2011). Como citado anteriormente, neste trabalho é tratado a modelagem do trocador do tipo casco e tubo pela sua maior empregabilidade.

2.1 Trocadores de calor casco e tubo

O trocador casco e tubo consiste basicamente em um feixe de tubos envolvido por um casco, de forma que um fluido escoar no interior dos tubos e outro escoar externamente a esses (MARTINEZ et al., 2016).

De acordo com Ribeiro (1984) dentre as vantagens deste trocador pode ser citado o fato de possuir uma construção resistente e de ser adaptável a várias condições de projeto, tais como:

- Troca de calor com e sem mudança de fase;
- Posicionamento na horizontal e vertical;
- Ampla faixa de pressão de operação;
- Ampla faixa de variação de perda de carga permitida;
- Possibilidade de adaptação de projeto para cada tipo de fluido;
- Ampla gama de capacidade e de materiais que podem ser utilizados, levando em consideração resistência à corrosão, pressão e temperatura;
- Uso de superfícies aletadas ou não aletadas;
- Possibilita a remoção do feixe de tubos para limpeza.

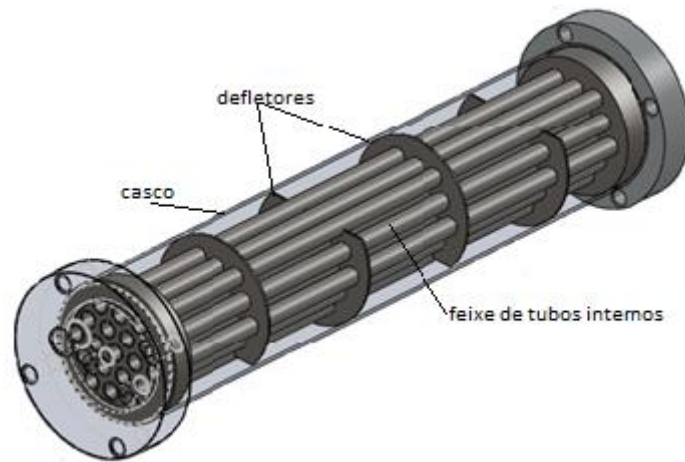
Os principais componentes do trocador são: cabeçote de entrada, cabeçote de retorno, o casco e o feixe de tubos. Os tubos podem ser dispostos em U e existem, ainda, diversos tipos de cabeçotes e casco, os quais foram padronizados pelas normas TEMA (2007), a qual atribui uma classificação alfabética de acordo com cada uma das partes, formas construtivas e condições de uso (BICCA, 2006).

O trocador TEMA E é o mais comum em vista de seu baixo custo e versatilidade. Ele se caracteriza pela entrada do fluido no casco por uma extremidade e saída na extremidade

oposta, ou seja, por haver apenas uma passagem no casco sendo os tubos são suportados por defletores transversais (RUBBO, 2014).

A Figura 2.1 ilustra o esquema tridimensional de um trocador TEMA E com três dos seus principais componentes, casco, defletores e feixe de tubos. Segundo Copetti (1989) os defletores dividem parcialmente o casco conduzindo o escoamento do fluido de forma contracorrente e paralela o que gera turbulência e maior tempo de residência do fluido no casco, e conseqüentemente aumentando a eficiência da transferência de calor.

Figura 2.1 - Esquema tridimensional de um trocador TEMA E.



Fonte: Adaptado de Generoso (2014).

2.2 Equacionamento para projeto

Neste tópico estão descritos os parâmetros e as equações envolvidos na modelagem e dimensionamento do trocador estudado.

2.2.1 Propriedades físicas dos fluidos

Nos cálculos de trocadores são requeridas informações a respeito das propriedades físicas dos fluidos de condutividade térmica, massa específica, calor específico e viscosidade. Como essas propriedades variam com a temperatura, são utilizadas equações que as relacionam com essa variável, as quais estão descritas neste tópico. Neste trabalho estão descritas apenas equações para o cálculo de alguns fluidos no estado líquido.

O cálculo das propriedades físicas dos fluidos em função da temperatura foi feito a partir das equações disponíveis em Almeida (2003).

2.2.1.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica de líquidos é dada pela Equação 2.1.

$$k_l = [A_1 + B_1(1 - T_r)^{2/3} + C_1 \cdot T]. 1,73 \quad (2.1)$$

Em que k_l é a condutividade térmica do fluido, T é a temperatura em Rankine e T_r é a temperatura reduzida dada pela Equação 2.2, T_c é a temperatura crítica em Rankine apresentadas na Tabela 1A. Os parâmetros A_1 , B_1 e C_1 são constantes disponíveis na Tabela 2A.

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (2.2)$$

2.2.1.2 Massa específica

A massa específica é obtida pela Equação 2.3.

$$\rho = \left[A_2 + B_2 \cdot T + C_2 \cdot T^2 + \frac{D_1}{(T_c + 62 - T)} \right] \cdot 16,02 \quad (2.3)$$

Em que ρ é a massa específica do fluido, T é a temperatura em Rankine, T_c é a temperatura crítica em Rankine apresentada na Tabela 1A e A_2 , B_2 e C_2 e D_1 são constantes apresentadas na Tabela 3A.

2.2.1.3 Calor específico

O calor específico de líquidos é obtido pela Equação 2.4.

$$cp = \left[A_3 + B_3 \cdot T + C_3 \cdot T^2 + \frac{D_2}{(1 - T_r)} \right] \cdot 4,1858 \quad (2.4)$$

Em que cp é o calor específico do fluido, T é a temperatura do fluido em Rankine e T_r é a temperatura reduzida dada pela Equação 2.2 e A_3 , B_3 e C_3 e D_2 são constantes apresentadas na Tabela 4A.

2.2.1.4 Viscosidade

A viscosidade de líquidos é obtida pela Equação 2.5.

$$\mu = \left[2,42e^{\left(A_4 + \frac{B_4}{T} + \frac{C_4}{T^2} + \frac{D_3}{T^3} \right)} \right] \cdot 4,13 \cdot 10^{-4} \quad (2.5)$$

Em que μ é viscosidade dinâmica do fluido, T é a temperatura do fluido em Rankine e A_4 , B_4 e C_4 e D_3 são constantes apresentadas na Tabela 5A.

2.2.2 Variação das propriedades físicas dos fluidos com a temperatura

As propriedades físicas dos fluidos sofrem variações ao longo do trocador de calor, principalmente se o fluido for muito viscoso ou se as diferenças de temperatura no escoamento forem muito grandes. Por esse motivo, após avaliar todas as propriedades na temperatura média entre as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, como é feito usualmente na avaliação de trocadores, é necessário corrigir o coeficiente convectivo de transferência de calor e a perda de carga. Essa correção pode ser feita em função da viscosidade, usando a Equação 2.6 (BICCA, 2006).

$$\phi = \left(\frac{\mu_m}{\mu_p} \right)^n \quad (2.6)$$

Em que μ_p é a viscosidade do fluido à temperatura média e μ_m é a viscosidade do fluido à temperatura da parede.

O expoente n assume os seguintes valores para transferência de carga:

- Regime laminar (SIEDER & TATE, 1936)

$$n = 0,14$$

- Regime turbulento e de transição (HOLMANN, 1976)

$$T_p > T_m \rightarrow n = 0,11$$

$$T_p < T_m \rightarrow n = 0,25$$

Já para perda de carga o expoente n assume os seguintes valores:

- Regime laminar

$$T_p > T_m \rightarrow n = 0,58$$

$$T_p < T_m \rightarrow n = 0,50$$

- Regime turbulento e de transição

$$T_p > T_m \rightarrow n = 0,14$$

$$T_p < T_m \rightarrow n = 0,24$$

Em que T_p é a temperatura média da parede obtida pela Equação 2.7.

$$T_p = T_{m,t} + \left(\frac{T_{m,c} - T_{m,t}}{1 + \frac{h_i}{h_e}} \right) \quad (2.7)$$

Em que $T_{m,t}$ a temperatura média nos tubos, $T_{m,c}$ é a temperatura média no casco, h_i e h_e são o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior dos tubos e o coeficiente de transferência de calor por convecção no lado externo aos tubos descritos mais adiante nesta seção pelas Equações 2.15 e 2.88.

A temperatura média T_m é obtida pela média aritmética entre a temperatura inicial e final do fluido expressa pela Equação 2.8.

$$T_m = \frac{T_i + T_f}{2} \quad (2.8)$$

Em que T_i é a temperatura inicial do fluido e T_f é a temperatura final.

2.2.3 Transferência de calor e perda de carga para o lado dos tubos

O coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos está relacionado com três números adimensionais, o número de Reynolds (Re), Prandtl (Pr) e Nusselt (Nu), que serão abordados a seguir.

O valor de Reynolds definido pela Equação 2.9 determina o regime de escoamento do fluido.

$$Re = \frac{V_t \cdot D_i \cdot \rho}{\mu} \quad (2.9)$$

Em que D_i é o diâmetro interno do tubo e V_t é a velocidade do fluido nos tubos obtida pela Equação 2.10.

$$V_t = \frac{\dot{m}_t}{A_{tubo} \cdot \rho \cdot \frac{N_{tt}}{N_{pt}}} \quad (2.10)$$

Em que N_{tt} é o número total de tubos, N_{pt} é o número de passes nos tubos, ρ é a massa específica, A_{tubo} a área de cada tubo dada pela Equação 2.11 e \dot{m}_t a vazão mássica nos tubos expressa pela Equação 2.12.

$$A_{tubo} = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \quad (2.11)$$

$$\dot{m}_t = \dot{V}_t \cdot M_t \quad (2.12)$$

Em que \dot{V}_t é a vazão molar nos tubos e M_t é a massa molar do fluido que passa nos tubos ilustrada na Tabela 1A do Anexo A.

Valores de Re menores que 2300 indicam escoamento laminar, entre 2300 e 10000 o escoamento é de transição e valores maiores que 10000 determinam regime turbulento. O regime turbulento favorece a troca de calor devido ao movimento turbilhonar, pois há a mistura macroscópica entre as partículas fluidas mais quentes e mais frias (BICCA, 2006).

Segundo Bicca (2006) o número de Prandtl relaciona as espessuras relativas das camadas limite hidrodinâmica e térmica e é expresso pela Equação 2.13.

$$Pr = \frac{cp \cdot \mu}{k_l} \quad (2.13)$$

O número adimensional Nu , por sua vez, relaciona a transferência de calor por convecção e condução do fluido pela Equação 2.14 (BICCA, 2006).

$$Nu = \frac{D_i \cdot h_i}{k_l} \quad (2.14)$$

Em que h_i é o coeficiente convectivo de transferência de calor.

2.2.3.1 Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor por convecção nos tubos é obtido através da Equação 2.14 rearranjada (Equação 2.15).

$$h_i = Nu \cdot \frac{k_l}{D_i} \quad (2.15)$$

As correlações para o número de Nusselt foram as mesmas adotadas por Bicca (2006) as quais são expressas pelas Equações 2.16, 2.17 e 2.19:

- Regime laminar (GNIELINSKI, 1983)

$$\overline{Nu} = \sqrt[3]{3,66^3 + 1,61^3 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{D_i}{L}} \quad (2.16)$$

Em que L é o comprimento efetivo dos tubos.

- Regime de transição (GNIELINSKI, 1976)

$$\overline{Nu} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (2.17)$$

O fator de atrito f é dado pela Equação 2.18.

$$f = (0,79 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (2.18)$$

- Regime de turbulência (PETUKHOV, 1970)

$$\overline{Nu} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{K_1(f) + K_2(Pr) \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (2.19)$$

O fator de atrito f é obtido pela Equação 2.20.

$$f = (1,82 \cdot \log_{10} Re - 1,64)^{-2} \quad (2.20)$$

Os parâmetros $K_1(f)$ e $K_2(Pr)$ são expressos pelas Equações 2.21 e 2.22.

$$K_1(f) = 1 + 1,34 \cdot f \quad (2.21)$$

$$K_2(Pr) = 11,7 + 1,8 \cdot Pr^{-1/3} \quad (2.22)$$

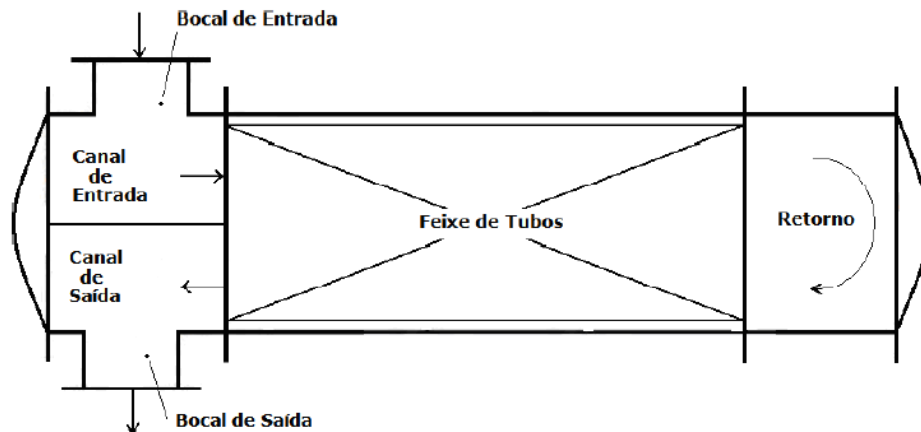
2.2.3.2 Perda de carga

A perda de carga total para o lado dos tubos é a soma das perdas de carga nos tubos, nos bocais, nos canais e no retorno, se houver, como mostra a Equação 2.23.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{tubos} + \Delta P_{bocais} + \Delta P_{canais} \quad (2.23)$$

A Figura 2.2 ilustra as regiões onde ocorre a perda de carga para o lado dos tubos.

Figura 2.2 - Perda de carga para o lado dos tubos.



Fonte: Bicca (2006).

A seguir são apresentadas as equações para o cálculo da perda de carga em cada uma das regiões.

2.2.3.2.1 Perda de carga nos bocais

De acordo com Bicca (2006) a perda de carga nos bocais de entrada e saída se relaciona com a velocidade do fluido nos bocais e é expressa em termos do adimensional K (SAUNDERS, 1988), como ilustra a Equação 2.24.

$$\Delta P_{bocais} = K \cdot \frac{\rho V_{bocal}^2}{2} \quad (2.24)$$

O parâmetro K equivale a:

$$K = 1,1 \text{ no bocal de entrada}$$

$$K = 0,7 \text{ no bocal de saída}$$

A velocidade do fluido nos bocais dada pela Equação 2.25.

$$V_{bocal} = \frac{\dot{m}_t}{A_{bocal} \cdot \rho} \quad (2.25)$$

A área do bocal A_{bocal} é obtida pela Equação 2.26.

$$A_{bocal} = \frac{D_{bocal}^2 \cdot \pi}{4} \quad (2.26)$$

Em que D_{bocal} é o diâmetro do bocal de entrada ou de saída.

2.2.3.2.2 Perda de carga no interior dos tubos

A perda de carga no interior dos tubos pode ser calculada pela Equação 2.27 (SAUNDERS, 1988).

$$\Delta P_{tubos} = \frac{4 \cdot \hat{f} \cdot L \cdot N_{pt} \cdot \rho \cdot V^2}{2 \cdot D_i \cdot \phi} \quad (2.27)$$

Em que ϕ é o fator de correção para as propriedades variáveis com a temperatura, N_{pt} é o número de passes no lado dos tubos, \hat{f} é o fator de atrito Fanning, expresso pelas correlações de Saunders (1988) conforme as Equações 2.28 e 2.29:

- Escoamento em regime de transição

$$\hat{f} = 0,0035 + \frac{0,264}{Re^{0,42}} \quad (2.28)$$

- Escoamento em regime turbulento

$$\hat{f} = 0,0122 \quad (2.29)$$

A Equação 2.26 foi utilizada por Bicca (2006) em regime de escoamento turbulento ou de transição. Para regime laminar foi utilizada a Equação 2.30.

$$\Delta P_{tubos} = \frac{4 \cdot \hat{f} \cdot L \cdot N_{pt} \cdot \rho \cdot V^2}{2 \cdot D_i \cdot \phi} + K(x) \frac{\rho \cdot V^2 \cdot N_{pt}}{2 \cdot \phi} \quad (2.30)$$

Sendo \hat{f} o fator de atrito Fanning para escoamento laminar dado pela Equação 2.31 e $K(x)$ é um incremento na perda de carga dado pela Equação 2.32.

$$\hat{f} = \frac{16}{Re} \quad (2.31)$$

$$K(x) = (f_{app} \cdot Re - 16) \cdot 4 \cdot \hat{x} \quad (2.32)$$

Em que \hat{x} é expresso pela Equação 2.33.

$$\hat{x} = \frac{x}{Re \cdot D} \quad (2.33)$$

O valor de x/D se refere ao comprimento da entrada hidrodinâmica e é obtido pelas correlações expressas pelas Equações 2.34 e 2.35 (INCROPERA et al., 2008):

- Escoamento laminar

$$\left(\frac{x}{D}\right) \cong 0,05 \cdot Re \quad (2.34)$$

- Escoamento turbulento

$$10 \leq \left(\frac{x}{D}\right) \leq 60 \quad (2.35)$$

2.2.3.2.3 Perda de carga nos canais de distribuição

Segundo Bicca (2006) a função dos canais é distribuir a corrente fluida uniformemente nos tubos que compõem o feixe e recombinar esta corrente no canal de saída. Além das perdas pela desaceleração do fluido no canal de entrada e aceleração no canal de saída há ainda as perdas quando há mais de um passe nos tubos, pois a corrente muda de direção abruptamente.

A Equação 2.36 proposta por Saunders (1988) expressa a perda de carga nos canais:

$$\Delta P_{canais} = K \frac{\rho \cdot V_t^2}{2} N_{pt} \quad (2.36)$$

O parâmetro K equivale a:

$$K = 0,9 \text{ com um passe nos tubos}$$

$$K = 1,6 \text{ com dois ou mais passes nos tubos}$$

2.2.4 Transferência de calor e perda de carga para o lado do casco

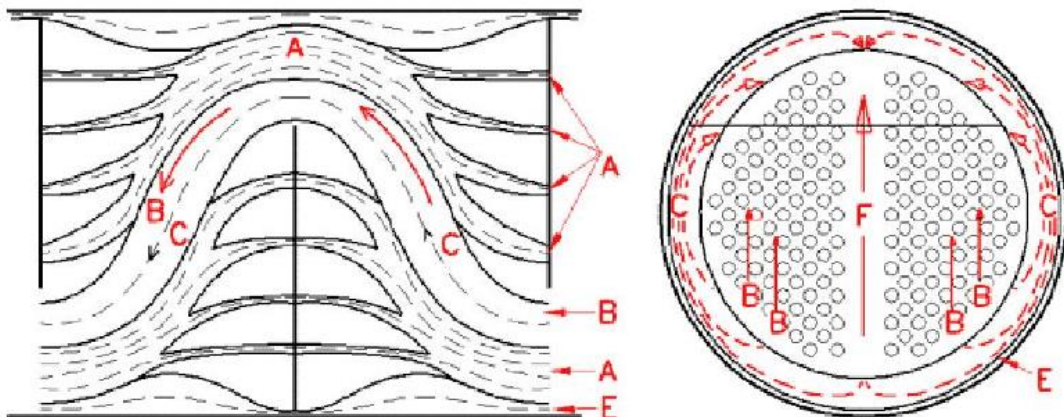
Neste tópico é apresentado o método utilizado para os cálculos do lado do casco. Todas as equações cujas referências não foram citadas junto a elas foram consultadas na referência Bicca (2006).

2.2.4.1 Método utilizado

Segundo Tinker (1951) enquanto o projeto para o lado dos tubos é relativamente simples, o cálculo da transferência de calor e perda de carga para o lado do casco é bastante complexo devido a fatores geométricos e diferentes caminhos que podem ser tomados pela corrente do fluido que passa pelo casco. Por esse motivo Tinker (1958) propôs um método de cálculo analítico no qual há a divisão do fluxo global em correntes individuais, ilustradas na Figura 2.3, que são:

- Corrente de vazamento entre tubos e defletor (A): esta corrente se forma devido à folga entre a parede do tubo e o orifício do defletor;
- Corrente de fluxo cruzado puro (B): esta corrente equivale à corrente ideal do escoamento no casco;
- Corrente de *bypass* (C): se forma entre a parede do casco e o feixe de tubos;
- Corrente de vazamento entre a parede do casco e a extremidade do defletor (E): corrente que passa pela folga entre a parede interna do casco e o defletor;
- Corrente de *bypass* (F): é formada na partição dos tubos pela omissão de alguns tubos.

Figura 2.3 – Correntes de fluxos em trocadores de calor casco e tubos.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

De acordo com Bicca et al. (2005), embora este método fosse bastante preciso por considerar os efeitos das correntes citadas sobre a perda de carga e transferência de calor, a análise original possuía grande complexidade e dificilmente seria executada sem o auxílio de recursos computacionais devido á existência de iterações.

Com o intuito de eliminar a necessidade de iterações, foi desenvolvido o método de Bell-Delaware, levando em consideração o estudo das correntes, no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Delaware no período de 1947 até 1963 tendo como os principais pesquisadores os professores Olaf Bergelin e Allan Colburn (Bicca et al., 2005).

Para Wolverine Company (1984) este método é o mais adequado dentre os métodos analíticos por ser descrito de forma clara na bibliografia e por apresentar resultados dentro de uma faixa razoável de precisão.

2.2.4.2 Coeficiente de transferência de calor e perda de carga

Para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor e perda de carga para o lado do casco é necessário, primeiramente, calcular o coeficiente convectivo e perda de carga ideais, expressos pelas Equações 37 e 38 respectivamente.

$$h_{ideal} = j_i \cdot cp \cdot m \cdot Pr^{-2/3} \cdot \phi \quad (2.37)$$

$$\Delta P_{ideal} = \frac{2 \cdot f_i \cdot N_c \cdot m^2}{\rho \cdot \phi} \quad (2.38)$$

Em que cp é o calor específico do fluido dado pela Equação 2.4, m é o fluxo cruzado máximo do lado do casco fornecido pela Equação 2.70, Pr é o número de Prandtl dado pela Equação 2.13, ϕ é a correção para variação das propriedades físicas dos fluidos com a temperatura dada pela Equação 2.6, N_c é o número de fileiras de tubos entre dois cortes do defletor fornecido pela Equação 2.50, ρ é a massa específica fornecida pela Equação 2.3. O fator j_i e o fator de atrito f_i são dados pelas Equações 2.39 e 2.40 respectivamente.

$$j_i = a_1 \cdot \left(1,33 \cdot \frac{D_e}{P}\right)^a \cdot Re^{a_2} \quad (2.39)$$

$$f_i = b_1 \cdot \left(1,33 \cdot \frac{D_e}{P}\right)^b \cdot Re^{b_2} \quad (2.40)$$

Em que P é a distância centro a centro entre os tubos adjacentes, D_e é o diâmetro externo dos tubos e Re é o número de Reynolds para o casco.

Os parâmetros a e b são obtidos pelas Equações 2.41 e 2.42.

$$a = \frac{a_3}{1 + 0,14 \cdot Re^{a_4}} \quad (2.41)$$

$$b = \frac{b_3}{1 + 0,14 \cdot Re^{b_4}} \quad (2.42)$$

Os valores das constantes $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3$ e b_4 estão ilustrados na Tabela 2.1

Tabela 2.1 - Constantes utilizadas para o cálculo da transferência de calor e perda de carga ideais.

Arranjo	Reynolds	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3	b_4
30°	$10^5 - 10^4$	0,321	-0,388			0,372	-0,123		
	$10^4 - 10^3$	0,321	-0,388			0,486	-0,152		
	$10^3 - 10^2$	0,593	-0,477	1,450	0,519	4,570	-0,476	7,00	0,500
	$10^2 - 10$	1,360	-0,657			45,100	-0,973		
	10	1,400	-0,667			48,000	-1,000		
45°	$10^5 - 10^4$	0,370	-0,396			0,303	-0,126		
	$10^4 - 10^3$	0,370	-0,396			0,333	-0,136		
	$10^3 - 10^2$	0,730	-0,500	1,930	0,500	3,500	-0,476	6,590	0,520
	$10^2 - 10$	0,498	-0,656			26,200	-0,913		
	10	1,550	-0,667			32,000	-1,000		
90°	$10^5 - 10^4$	0,370	-0,395			0,391	-0,148		
	$10^4 - 10^3$	0,107	-0,266			0,082	-0,022		
	$10^3 - 10^2$	0,408	-0,460	1,187	0,370	6,090	-0,602	6,300	0,378
	$10^2 - 10$	0,900	-0,631			32,100	-0,963		
	10	0,970	-0,667			35,000	-1,000		

Fonte: Bell e Mueller (2001).

Assim o coeficiente convectivo de transferência de calor real para o lado do casco é expresso pela Equação 2.43.

$$h_e = h_{ideal} \cdot J_{total} \quad (2.43)$$

Em que J_{total} é o fator de correção total para a transferência de calor e é obtido pela Equação 2.44.

$$J_{total} = J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s \quad (2.44)$$

Em que J_c, J_l, J_b, J_r e J_s são os fatores de correção para o escoamento não ideal do fluido no casco e fatores geométricos.

A perda de carga total para o lado do casco é obtida pela Equação 2.45.

$$\Delta P_{casco} = \Delta P_c + \Delta P_w + \Delta P_e + \Delta P_{bocais} \quad (2.45)$$

Em que ΔP_c , ΔP_w , ΔP_e e ΔP_{bocais} são as perdas de carga referentes às seções de fluxo cruzado, janelas dos defletores, entrada e saída e bocais de entrada e saída respectivamente.

2.2.4.3 Parâmetros necessários para o projeto para o lado do casco

Os parâmetros necessários para o cálculo dos fatores de correção, coeficiente convectivo e perda de carga ideais, além das perdas de carga em cada seção do casco são apresentados a seguir:

➤ **Diâmetro interno do casco (D_s)**

O diâmetro interno do casco é padronizado pela TEMA (2007).

➤ **Diâmetro externo dos tubos (D_e)**

De acordo com Ravagnani (1989) o diâmetro externo dos tubos (D_e) é padronizado, cujos valores são: $\frac{3}{4}$ pol, 1 pol, 1 $\frac{1}{2}$ pol, 2 pol e 2 $\frac{1}{2}$ pol. Para a escolha de D_e deve-se levar em consideração as seguintes recomendações:

- Utilizar D_e de $\frac{3}{4}$ pol para fluidos com fator de incrustação menor que 0,003 h.ft².F/BTU;

- Utilizar D_e de 1 pol para fluidos com fator de incrustação maior que 0,003 h.ft².F/BTU;

- Utilizar D_e de 1 $\frac{1}{2}$ pol para fluidos com problemas de perda de carga.

➤ **Diâmetro interno dos tubos (D_i)**

Assim como D_e , o diâmetro interno dos tubos é padronizado, mas também pode ser calculado pela Equação 2.46.

$$D_i = D_e - 2 \cdot L_{tp} \quad (2.46)$$

Em que L_{tp} é a espessura da parede dos tubos.

➤ **Espessura da parede dos tubos (L_{tp})**

É padronizado de acordo com o tipo de material, pressão e temperatura (BICCA, 2006).

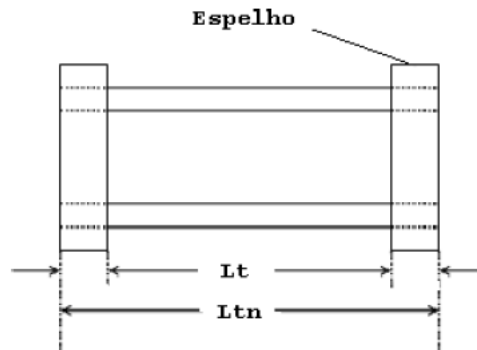
➤ **Número total de tubos no trocador de calor (N_{tt})**

Segundo Bicca (2006) o número total de tubos é encontrado tabelado em função do diâmetro de limite externo dos tubos no casco (D_{otl}), do passo (P) e do ângulo do arranjo dos tubos (θ), mas pode, também, ser obtido por contagem direta.

➤ **Comprimento nominal (L_{tn}) e efetivo do tubo (L_t)**

O comprimento nominal e efetivo dos tubos são ilustrados pela Figura 2.4. O comprimento efetivo é utilizado nos cálculos de transferência de calor (BICCA, 2006).

Figura 2.4 – Comprimento dos tubos.



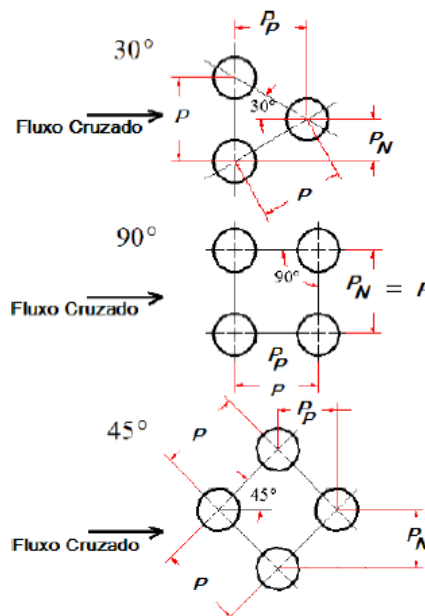
Fonte: Bicca (2006).

➤ **Ângulo característico formado pelo arranjo dos tubos no casco (θ)**

Segundo Bicca (2006) o número de tubos que podem ser inseridos no casco é determinado pelo arranjo dos tubos que, por sua vez, é definido pelo ângulo característico. Em geral durante a escolha do tipo de arranjo busca-se inserir a maior quantidade de tubos possível de forma que haja espaço suficiente para o escoamento do fluido e para limpeza.

A Figura 2.5 ilustra os 3 tipos de arranjos mais comuns. De acordo com Ravagnani (1989) arranjos triangulares não devem ser utilizados quando o fator de incrustação do lado do casco for maior que $0,000352 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ e o casco deve ser limpo mecanicamente.

Figura 2.5 – Arranjos dos tubos.



Fonte: Bicca (2006).

➤ **Distância de centro a centro de tubos adjacentes (P)**

A distância P é padronizada e é utilizada no cálculo da área de fluxo cruzado. As normas TEMA (2007) sugerem que a relação P/D_e mantenha-se entre o mínimo de 1,25 e o máximo

de 1,5 (BICCA, 2006). A Tabela 2.2 apresenta os valores dos passos tubulares normal (P_N) e paralelo (P_P) para arranjos ilustrados na Figura 2.5

Tabela 2.2 – Passos tubular normal e paralelo.

Arranjo	P_N	P_P
30°	0,5. P	0,866. P
45°	0,707. P	0,707. P
90°	P	P

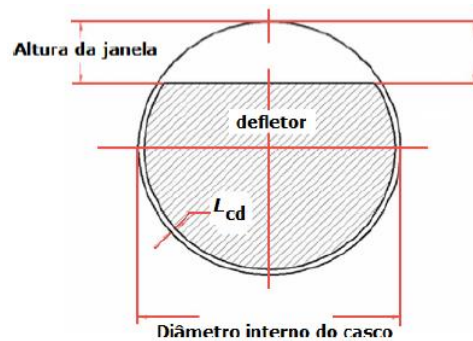
Fonte: Bicca (2006).

➤ **Porcentagem de corte do defletor (B_c)**

A porcentagem de corte do defletor ou da chicana é definida como uma porcentagem do diâmetro interno do casco, segunda a Equação 2.47. A Figura 2.6 ilustra este parâmetro.

$$B_c = \frac{\text{altura da janela}}{D_s} \cdot 100\% \quad (2.47)$$

Figura 2.6 – Corte do defletor.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

Conforme Bell (1981) a posição do corte do defletor depende do tipo e temperatura do fluido que circula pelo casco. Em condensadores é utilizado o corte na posição vertical de forma a evitar o acúmulo de condensado nas partes baixas do trocador. No caso de gases à baixa pressão o recomendado é cortes de 40 a 45% para minimizar a perda de carga (RAVAGNANI, 1989).

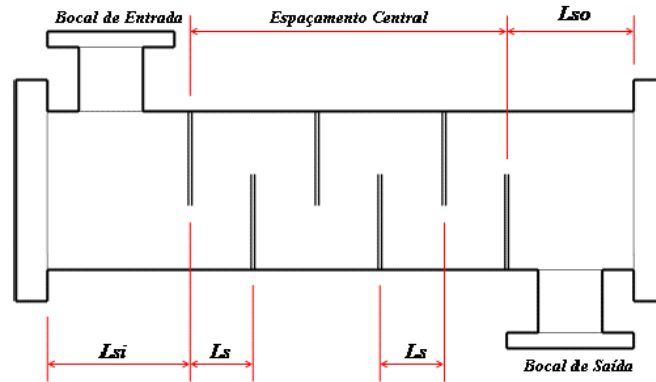
➤ **Espaçamento entre defletores (L_s)**

De acordo com a norma TEMA (2007) para uma boa distribuição de fluxo o espaçamento mínimo deve ser em torno de 20% do diâmetro interno do casco e maior do que 50 mm (BICCA, 2006).

➤ **Espaçamentos terminais de defletores (L_{si} e L_{so})**

Como pode ser observado na Figura 2.7 os espaçamentos terminais de defletores são espaçamentos adjacentes aos bocais de entrada e saída.

Figura 2.7 – Espaços terminais de defletores.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

➤ **Número de passes nos tubos (N_{pt})**

Bicca (2006) fornece os valores aproximados do número máximo de passes nos tubos de acordo com diferentes valores de diâmetros do casco, esses valores são ilustrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Número máximo de passes nos tubos.

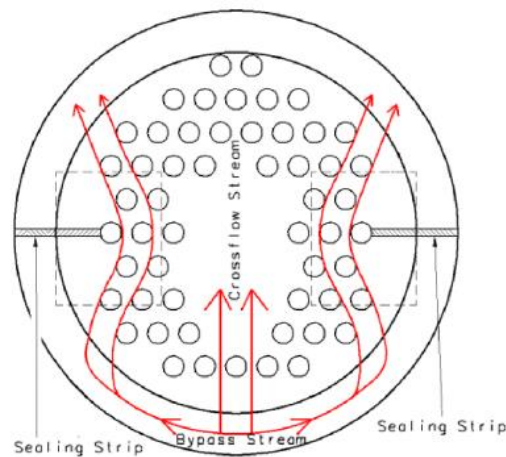
D_s (mm)	200	400 - 800	800 - 1200	>1200
N_{pt} máximo	2	4 - 6	6 - 8	8 - 10

Fonte: Bicca (2006).

➤ **Número de tiras de selagem (N_{ss})**

Conforme Ravagnani (1989), as tiras de selagem diminuem a corrente C que desvia e contorna o feixe de tubos. Elas agem de forma a forçar o fluxo de volta para o feixe de tubos. Comumente é utilizado um par de tiras para cada quatro a seis fileiras de tubos cruzados (BICCA, 2006). A Figura 2.8 ilustra a ação das tiras de selagem.

Figura 2.8 – Tiras de selagem.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

➤ **Folgas (L_{td}, L_{cd}, L_{cf})**

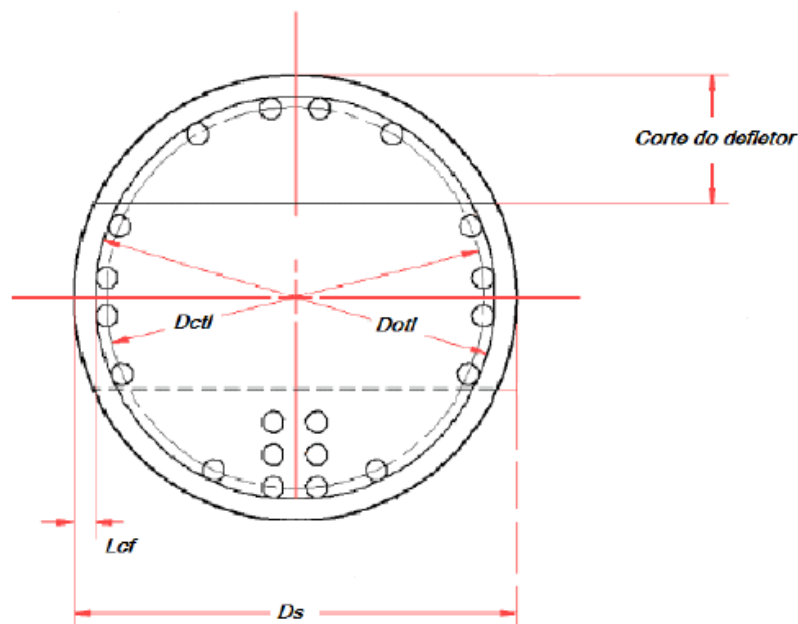
A folga L_{td} é a folga entre o diâmetro interno e externo do tubo e o orifício do defletor, L_{cd} é dada pela Equação 2.48 e ilustrada pela Figura 2.6, representa a folga entre o diâmetro interno do casco e a extremidade do defletor. E L_{cf} é a folga entre o diâmetro interno do casco e o diâmetro externo do feixe de tubos, ilustrada pela Figura 2.9, e é obtida pela Equação 2.49.

$$L_{cd} = 1,6 + 0,004 \cdot D_s \quad (2.48)$$

$$L_{cf} = D_s - D_{otl} \quad (2.49)$$

D_{otl} é o diâmetro de limite externo dos tubos no casco ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Folga casco-feixe e diâmetros característicos.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

➤ **Número de fileiras de tubos entre dois cortes do defletor (N_c)**

N_c é função do passo como ilustra a Equação 2.50.

$$N_c = \frac{D_s}{P_p} \left(1 - 2 \cdot \frac{B_c}{100} \right) \quad (2.50)$$

Em que D_s é o diâmetro interno do casco, ilustrado pela Figura 2.9, P_p é o passo tubular paralelo, ilustrado pela Figura 2.5 e B_c é o corte do defletor, expresso pela Equação 2.47.

➤ **Número de fileiras reais de fluxo cruzado em cada janela do defletor (N_{cw})**

N_{cw} é calculado pela Equação 2.51.

$$N_{cw} = \frac{0,8}{P_p} \left(D_s \cdot \frac{B_c}{100} - \frac{D_s - D_{ctl}}{2} \right) \quad (2.51)$$

Em que D_{ctl} é o diâmetro do círculo formado através do centro dos tubos mais externos, dado pela Equação 2.52.

$$D_{ctl} = D_{otl} - D_e \quad (2.52)$$

Em que D_e o diâmetro externo dos tubos e D_{otl} o diâmetro de limite externo dos tubos no casco ilustrado na Figura 2.9.

➤ **Áreas de fluxo na janela do defletor**

A área de escoamento através da janela (S_w) é a diferença entre a área total da janela (S_{wg}) e a área ocupada pelos tubos (S_{wt}), calculada pela Equação 2.53.

$$S_w = S_{wg} - S_{wt} \quad (2.53)$$

A área S_{wg} é obtida pela Equação 2.54.

$$S_{wg} = \frac{\pi}{4} \cdot D_s^2 \cdot \left(\frac{\theta_{ds}}{360} - \frac{\sin(\theta_{ds})}{2 \cdot \pi} \right) \quad (2.54)$$

O ângulo θ_{ds} é o ângulo central formado pela interseção do corte do defletor com a parte interna do casco, dado pela Equação 2.55.

$$\theta_{ds} = 2 \cdot \cos^{-1} \left(1 - 2 \cdot \frac{B_c}{100} \right) \quad (2.55)$$

A área S_{wt} é obtida pela Equação 2.56.

$$S_{wt} = N_{tt} \cdot F_w \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_e^2 \quad (2.56)$$

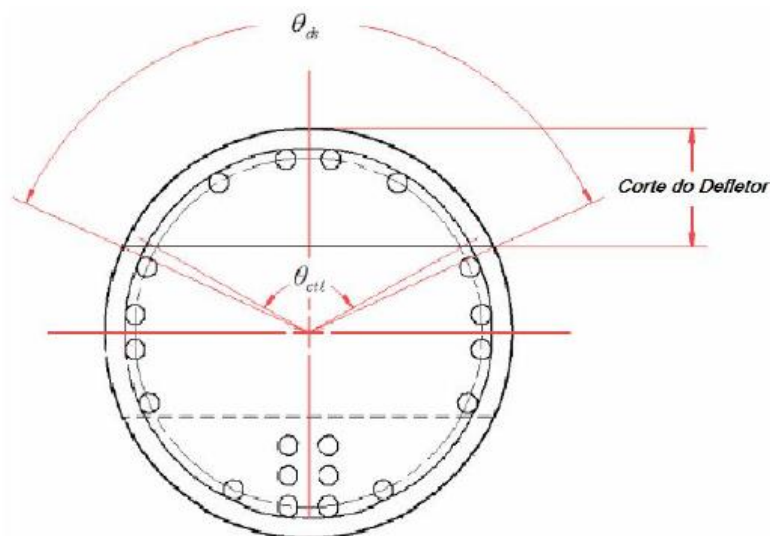
O termo F_w é a fração de tubos na janela do defletor obtida pela Equação 2.57.

$$F_w = \frac{\theta_{ctl}}{360} - \frac{\sin(\theta_{ctl})}{2 \cdot \pi} \quad (2.57)$$

O ângulo θ_{ctl} é formado pela interseção do corte do defletor com o diâmetro D_{ctl} dado pela Equação 2.58 e ilustrado pela Figura 2.10.

$$\theta_{ctl} = 2 \cdot \cos^{-1} \left[\frac{D_s}{D_{ctl}} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{B_c}{100} \right) \right] \quad (2.58)$$

Figura 2.10 – Ângulos de intersecção.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

➤ **Fração total de tubos em uma seção de fluxo cruzado puro (F_c)**

F_c é obtido pela Equação 2.59.

$$F_c = 1 - 2 \cdot F_w \quad (2.59)$$

Em que F_w é a fração de tubos na janela do defletor obtida pela Equação 2.57.

➤ **Área de fluxo cruzado na linha central ou próxima dela numa seção reta do fluxo (dentro de um espaçamento entre defletores) (SM)**

Segundo Bicca (2006) o parâmetro SM corresponde à mínima área na direção do fluxo cruzado no lado do casco. As Equações 2.60 e 2.61 expressam SM :

- Arranjos de 30° e 90°

$$SM = L_s \cdot \left(L_{cf} + \frac{D_{ctl}}{P} \cdot (P - D_e) \right) \quad (2.60)$$

- Arranjos de 45°

$$SM = L_s \cdot \left(L_{cf} + \frac{D_{ctl}}{P_N} \cdot (P - D_e) \right) \quad (2.61)$$

Em que P_N é o passo normal da pela Tabela 2.2, L_s é o espaçamento entre defletores, L_{cf} é a folga entre o diâmetro interno do casco e o diâmetro externo do feixe de tubos, ilustrada pela Figura 2.9, D_{ctl} é o diâmetro do círculo formado através do centro dos tubos mais externos, dado pela Equação 2.52, P é a distância de centro a centro de tubos adjacentes e D_e é o diâmetro externo dos tubos.

➤ **Diâmetro equivalente da janela (D_w)**

D_w é necessário para o cálculo da perda de carga em regime de escoamento laminar e é obtido pela Equação 2.62.

$$D_w = \frac{4 \cdot S_w}{\pi \cdot D_e \cdot N_{tw} + \pi \cdot D_s \cdot \frac{\theta_{ds}}{360}} \quad (2.62)$$

Em que S_w é a área de escoamento através da janela dada pela Equação 2.53, D_e é o diâmetro externo dos tubos, D_s é o diâmetro interno do casco, θ_{ds} é o ângulo central formado pela interseção do corte do defletor com a parte interna do casco dado pela Equação 2.55, N_{tw} é o número de tubos na janela do defletor dado pela Equação 2.63.

$$N_{tw} = N_{tt} \cdot F_w \quad (2.63)$$

➤ **Número de defletores (NB)**

O número de defletores é obtido pelas equações 2.64 e 2.65.

Para espaçamentos centrais e terminais iguais:

$$NB = \frac{L_t}{L_s} - 1 \quad (2.64)$$

Para espaçamentos terminais diferentes dos centrais:

$$NB = \frac{L_t - L_{si} - L_{so}}{L_s} + 1 \quad (2.65)$$

Em que L_t é o comprimento efetivo do tubo, L_s é o espaçamento entre defletores e L_{si} e L_{so} são os espaçamentos terminais de defletores.

➤ **Fração da área da seção do fluxo disponível ao fluxo de *bypass* (F_{bp})**

F_{bp} é obtida pela Equação 2.66.

$$F_{bp} = \frac{(D_s - D_{otl}) \cdot L_s}{SM} \quad (2.66)$$

Em que SM é a área de fluxo cruzado dada pelas Equações 2.60 e 2.61.

➤ **Área de vazamento entre o casco e o defletor (para um defletor) (S_{cd})**

S_{cd} é obtida pela Equação 2.67.

$$S_{cd} = \pi \cdot D_s \cdot \frac{L_{cd}}{2} \left(\frac{360 - \theta_{ds}}{360} \right) \quad (2.67)$$

Em que L_{cd} é a folga entre o diâmetro interno do casco e a extremidade do defletor, ilustrada pela Figura 2.6.

➤ **Área de vazamento entre o tubo e o defletor (para um defletor) (S_{td})**

A área S_{td} é obtida pela Equação 2.68.

$$S_{td} = \frac{\pi}{4} \cdot ((L_{td} + D_e)^2 - D_e^2) \cdot N_{tt} \cdot (1 - F_w) \quad (2.68)$$

Em que L_{td} é a folga entre o diâmetro interno e externo do tubo e o orifício do defletor N_{tt} é o número total de tubos no trocador de calor e F_w é a fração de tubos na janela do defletor obtida pela Equação 2.57.

2.2.4.4 Número de Reynolds

O número de Reynolds para o lado do casco é expresso pela Equação 2.69 (BICCA, 2006):

$$Re = \frac{D_e \cdot m}{\mu} \quad (2.69)$$

Em que D_e é o diâmetro externo do tubo, μ é a viscosidade dinâmica do fluido do lado do casco e m é o fluxo cruzado mássico máximo do lado do casco, conforme a Equação 2.70.

$$m = \frac{\dot{m}_c}{SM} \quad (2.70)$$

Em que SM a área de fluxo cruzado dada pelas Equações 2.60 e 2.61 e \dot{m}_c é a vazão mássica de fluido no lado do casco dada pela Equação 2.71.

$$\dot{m}_c = \rho * V_c * SM \quad (2.71)$$

Em que V_c é a velocidade do fluido no casco que pode ser obtida pela Equação 2.72.

$$V_c = \frac{\dot{V}_c \cdot M_c}{\rho \cdot SM} \quad (2.72)$$

Em que M_c é a massa molar do fluido que passa no casco apresentada na Tabela 1A.

2.2.4.5 Fatores de correção

➤ Fatores de correção para os efeitos de vazamento no defletor na transferência de calor (J_l) e na perda de carga (R_l)

Esses fatores estão relacionados ao decréscimo na corrente de fluxo puro que é causado pela diferença de pressão entre dois compartimentos de defletores adjacentes, que força parte do fluxo de forma a criar as correntes A e E, mostradas na Figura 2.3 (BICCA, 2006).

A correção para transferência de calor é dada pela Equação 2.73.

$$J_l = 0,44 \cdot (1 - R_s) + (1 - 0,44 \cdot (1 - R_s)) \cdot \exp(-2,2 \cdot R_{lm}) \quad (2.73)$$

Os parâmetros R_{lm} e R_s são expressos pelas Equações 2.74 e 2.75.

$$R_{lm} = \frac{S_{cd} + S_{td}}{SM} \quad (2.74)$$

$$R_s = \frac{S_{cd}}{S_{cd} + S_{td}} \quad (2.75)$$

Sendo S_{cd} e S_{td} as áreas de vazamento fornecidas pelas Equações 2.67 e 2.68 e SM área de fluxo cruzado dada pelas Equações 2.60 e 2.61.

A correção para perda de carga é dada pela Equação 2.76.

$$R_l = \exp(-1,33 \cdot (1 + R_s) \cdot R_{lm}^p) \quad (2.76)$$

Onde p é obtido pela Equação 2.77.

$$p = -0,15 \cdot (1 + R_s) + 0,8 \quad (2.77)$$

➤ Fatores de correção para os efeitos de *bypass* no feixe de tubos na transferência de calor (J_b) e na perda de carga (R_b)

O fator para transferência de calor é obtido pela Equação 2.78.

$$J_b = \exp\left(-C_{bh} \cdot F_{bp} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{2 \cdot R_{ss}}\right)\right) \quad (2.78)$$

Sendo F_{bp} a fração da área da seção do fluxo disponível ao fluxo de *bypass* dada pela Equação 2.66.

O parâmetro R_{ss} é obtido pela Equação 2.79.

$$R_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_c} \quad (2.79)$$

Em que N_{ss} é o número de tiras de selagem e N_c é o número de fileiras de tubos entre dois cortes do defletor fornecido pela Equação 2.50.

E o parâmetro C_{bh} assume os seguintes valores:

- Para regime laminar

$$C_{bh} = 1,35$$

- Para regime turbulento e de transição

$$C_{bh} = 1,25$$

O fator para perda carga é obtido pela Equação 2.80.

$$R_b = \exp\left(-C_{bh} \cdot F_{bp} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{2 \cdot R_{ss}}\right)\right) \quad (2.80)$$

O parâmetro R_{ss} é obtido pela Equação 2.81.

$$R_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_c} \quad (2.81)$$

E o parâmetro C_{bh} assume os seguintes valores:

- Para regime laminar

$$C_{bh} = 4,5$$

- Para regime turbulento e de transição

$$C_{bh} = 3,7$$

➤ **Fatores de correção para na transferência de calor pelos efeitos de configuração do defletor (J_c)**

J_c é expresso pela Equação 2.82.

$$J_c = 0,55 + 0,72 \cdot F_c \quad (2.82)$$

Em que F_c é a fração total de tubos em uma seção de fluxo cruzado puro fornecida pela Equação 2.59.

➤ **Fatores de correção para o gradiente de temperatura adverso no fluxo laminar (J_r)**

Este fator expressa o efeito causado por escoamentos profundamente laminares nos quais há formação de camada limite onde é desenvolvido um gradiente adverso de temperatura causando um decréscimo no coeficiente de transferência (BICCA, 2006).

O fator J_r é obtido pelas Equações 2.83 e 2.85.

Para $Re \leq 20$:

$$J_r = \left(\frac{10}{N_{tc}}\right)^{0,18} \quad (2.83)$$

Em que N_{tc} é o número total de fileiras de tubos cruzados no trocador, obtido pela equação 2.84.

$$N_{tc} = (N_c + N_{cw}).(NB + 1) \quad (2.84)$$

Em que N_{cw} é o número de fileiras reais de fluxo cruzado em cada janela do defletor dado pela Equação 2.51 e NB é o número de defletores dado pelas Equações 2.64 e 2.65.

Para $20 < Re \leq 100$:

$$J_r = J_{r1} + \left(\frac{20 - Re}{80}\right) \cdot (J_{r1} - 1) \quad (2.85)$$

O termo J_{r1} é dado pela Equação 2.86.

$$J_{r1} = \left(\frac{10}{N_{tc}}\right)^{0,18} \quad (2.86)$$

Para $Re > 20$, J_r é igual a 1.

➤ **Fatores de correção para os efeitos de *bypass* no feixe de tubos na transferência de calor (J_s) e na perda de carga (R_s)**

Esses fatores representam a diminuição no fluxo mássico pela diferença entre os espaçamentos de entrada e saída dos espaçamentos centrais (BICCA, 2006).

O fator para a transferência de calor é dado pela Equação 2.87.

$$J_s = \frac{NB - 1 + (\hat{L}_i)^{1-n} + (\hat{L}_o)^{1-n}}{NB - 1 + \hat{L}_i + \hat{L}_o} \quad (2.87)$$

Em que n é igual a 0,6 em escoamento turbulento e 0,3 em escoamento laminar e \hat{L}_i e \hat{L}_o são parâmetros dados pelas Equações 2.88 e 2.89 respectivamente.

$$\hat{L}_i = \frac{L_{si}}{L_s} \quad (2.88)$$

$$\hat{L}_o = \frac{L_{so}}{L_s} \quad (2.89)$$

Em que L_{si} e L_{so} são espaçamentos terminais de defletores e L_s é o espaçamento de defletores.

Quando os espaçamentos forem iguais como ilustra a Equação 2.90, J_s será igual a 1.

$$L_s = L_{si} = L_{so} = \hat{L}_i = \hat{L}_o \quad (2.90)$$

O fator para a perda de carga é expresso perda Equação 2.88.

$$R_s = \left(\frac{L_s}{L_{so}}\right)^{2-n} + \left(\frac{L_s}{L_{si}}\right)^{2-n} \quad (2.91)$$

Em que n é igual a 0,2 em escoamento turbulento e 1,0 em escoamento laminar.

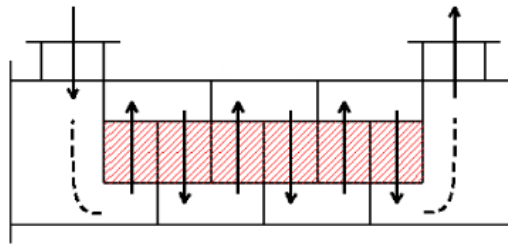
2.2.4.6 Perdas de carga nas seções do casco

Neste tópico são apresentadas as perdas de carga necessárias para a resolução da perda de carga total para o lado do casco, a Equação 2.45.

➤ Perda de carga em fluxo cruzado puro (ΔP_c)

De acordo com Bicca (2006) esta perda de carga ocorre entre as extremidades dos defletores, como ilustra a Figura 2.11 na região hachurada, sendo sujeita às correções para vazamento e *bypass*, de acordo com a Equação 2.92.

Figura 2.11 – Região da queda de pressão em fluxo cruzado.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

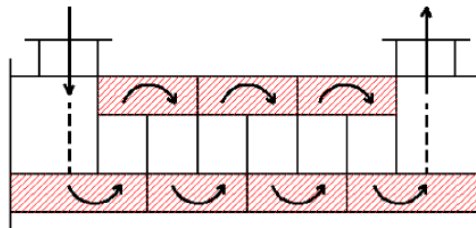
$$\Delta P_c = \Delta P_{ideal} \cdot (NB - 1) \cdot R_b \cdot R_l \quad (2.92)$$

Sendo R_l e R_b fatores dados pelas Equações 2.76 e 2.80.

➤ Perda de carga nas janelas dos defletores (ΔP_w)

Segundo Bicca (2006) esta perda de carga representa os efeitos de vazamento. A região da perda de carga está ilustrada na Figura 2.12 na região hachurada.

Figura 2.12 – Região da queda de pressão nas janelas dos defletores.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

A queda de pressão ΔP_w é obtida pelas Equações 2.93 e 2.94:

- Para regime turbulento

$$\Delta P_w = NB \cdot \left((2 + 0,6 \cdot N_{cw}) \cdot \frac{m_w^2}{2 \cdot \rho} \right) \cdot R_l \quad (2.93)$$

- Para regime laminar

$$\Delta P_w = NB \cdot \left[26 \cdot \frac{m_w}{\rho} \cdot \mu \cdot \left(\frac{N_{cw}}{P - D_e} + \frac{L_s}{D_w^2} \right) + 2 \cdot \frac{m_w^2}{2 \cdot \rho} \right] \cdot R_l \quad (2.94)$$

Em que D_w é o diâmetro equivalente da janela dado pela Equação 2.62 e m_w é o fluxo mássico dado pela Equação 2.95.

$$m_w = \frac{\dot{m}_c}{\sqrt{SM \cdot S_w}} \quad (2.95)$$

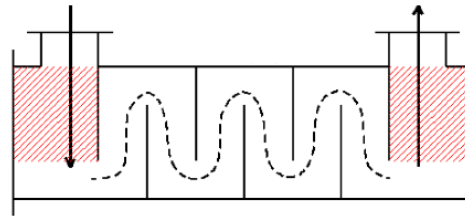
Em que \dot{m}_c é a vazão mássica para o lado do casco fornecida pela Equação 2.71 e S_w é a área de escoamento através da janela dada pela Equação 2.53.

➤ **Perda de carga nas seções de entrada e de saída do trocador**

Segundo Bicca (2006) esta perda de carga é afetada por efeitos de *bypass*, e é dada pela Equação 2.96. A região de queda de pressão é ilustrada pela Figura 2.13 na região hachurada.

$$\Delta P_e = \Delta P_{ideal} \cdot \left(1 + \frac{N_{cw}}{N_c}\right) \cdot R_b \cdot R_s \quad (2.96)$$

Figura 2.13 – Região da queda de pressão nas seções de entrada e de saída do trocador.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

➤ **Perda de carga nos bocais de entrada e saída do trocador**

Esta perda de carga se baseia na velocidade do fluido nos bocais de saída e entrada conforme Equação 2.97.

$$\Delta P_{bocais} = K \cdot \frac{\rho \cdot V_{bocal}^2}{2} \quad (2.97)$$

O adimensional K é obtido pelas Equações 2.98 e 2.99.

Com uso de quebra jato:

$$K = 1 + \left(\frac{A_{bocal}}{A_{escape}}\right)^2 \quad (2.98)$$

Sem o uso de quebra jato:

$$K = 1 + \frac{1}{\left(\left(\frac{A_{escape}}{A_{bocal}}\right) + 0,6 \cdot \left(P - \frac{D_e}{P}\right)\right)^2} \quad (2.99)$$

Em que A_{bocal} e A_{escape} são as áreas dos bocais e escape respectivamente e são obtidas pelas Equações 2.100, 2.101, 2.102 e 2.103:

- Para o bocal de entrada

$$A_{bocal} = \frac{\pi \cdot D_{i_{bocal}}^2}{4} \quad (2.100)$$

$$A_{escape} = \pi \cdot D_{i_{bocal}} \cdot H_{i_{bocal}} \quad (2.101)$$

- Para o bocal de saída

$$A_{bocal} = \frac{\pi \cdot D_{o_{bocal}}^2}{4} \quad (2.102)$$

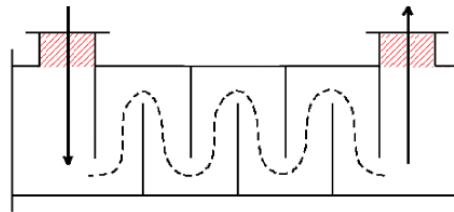
$$A_{escape} = \pi \cdot D_{o_{bocal}} \cdot H_{o_{bocal}} \quad (2.103)$$

E a velocidade do fluido nos bocais dada pela Equação 2.104.

$$V_{bocal} = \frac{\dot{m}_c}{A_{bocal} \cdot \rho} \quad (2.104)$$

A região da queda de pressão neste caso está ilustrada na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Região da queda de pressão nos bocais de entrada e saída do trocador.



Fonte: Bell e Mueller (2001).

2.2.5 Taxa de transferência de calor

Segundo Araujo (2011) a troca de calor no estado estacionário para uma seção diferencial do trocador é expressa pela Equação 2.105.

$$dQ = U \cdot dA \cdot \Delta T \quad (2.105)$$

Em que U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área de troca térmica e ΔT é a diferença de temperatura entre os fluidos.

Rearranjando e aplicando a integral em ambos os lados, obtém-se a Equação 2.106

$$\int_0^{Q_{total}} dQ = \int_0^A dA \cdot U \cdot \Delta T \quad (2.106)$$

Integrando chega-se na Equação 2.107 que representa a taxa total de transferência de calor.

$$Q_{total} = A \cdot U \cdot \Delta T \quad (2.107)$$

2.2.6 Coeficiente global de transferência de calor

Segundo Bicca (2006) a taxa de transferência de calor também pode ser expressa pela razão entre a variação de temperaturas e a soma das resistências térmicas à transferência de calor, como pode ser visto na Equação 2.108.

$$Q_{total} = \frac{\Delta T}{\sum R_t} \quad (2.108)$$

Em que $\sum R_t$ é a soma das resistências à transferência de calor entre dois fluidos separados por uma parede sem a presença de incrustações e é obtida pela Equação 2.109.

$$\sum R_t = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_e \cdot A_e} \quad (2.109)$$

Em que A_i e A_e são as áreas das superfícies interna e externa da parede dos tubos, respectivamente, r_i e r_e são os raios interno e externo dos tubos, respectivamente, k é a condutividade térmica do material dos tubos, L é o comprimento efetivo dos tubos e h_i e h_e são os coeficientes convectivos de transferência das correntes interna e externa aos tubos, respectivamente.

Combinando as Equações 2.107 e 2.108 obtém-se a Equação 2.110.

$$U \cdot A = \frac{1}{\sum R_t} \quad (2.110)$$

Combinando as Equações 2.109 e 2.110 obtém-se a Equação 2.111 que representa o coeficiente global de transferência de calor limpo, ou seja, sem a presença de incrustações.

$$U_s = \frac{1}{\frac{A_e}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \cdot D_e}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_e}} \quad (2.111)$$

Ao considerar os fatores de incrustação R_{d_i} e R_{d_e} para o lado interno e externo aos tubos, respectivamente, a Equação 2.111 toma a forma da Equação 2.112, a qual representa o coeficiente global de transferência de calor sujo. Os valores dos fatores de incrustação, por sua vez são tabelados pelas normas TEMA (2007).

$$U_s = \frac{1}{\frac{A_e}{h_i \cdot A_i} + R_{d_i} \cdot \frac{A_e}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \cdot D_e}{2 \cdot k} + R_{d_e} + \frac{1}{h_e}} \quad (2.112)$$

2.2.7 Efetividade – NUT

O método da efetividade-NUT (Número de Unidades de Transferência) é um método muito útil para o cálculo da taxa de transferência de calor quando as temperaturas de saída do trocador não são conhecidas (INCROPERA et al., 2008), como é o caso da modelagem realizada neste trabalho.

Para aplicar este método, primeiramente é calculada a taxa de transferência de calor máxima obtida pela Equação 2.113.

$$Q_{max} = (\dot{m} \cdot cp)_{min} \cdot (T_{qe} - T_{fe}) \quad (2.113)$$

Em que T_{qe} e T_{fe} são as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, respectivamente, \dot{m} é a vazão mássica do fluido, cp é o calor específico do fluido e $(\dot{m} \cdot cp)_{min}$ é o valor mínimo da multiplicação dos dois parâmetros citados entre o fluido quente e o fluido frio. Esse valor também é denominado como capacidade calorífica mínima (C_{min}), no caso da capacidade calorífica máxima a nomenclatura é dada por C_{max} .

A razão entre as duas capacidades caloríficas equivale a C , um parâmetro adimensional dado pela Equação 2.114 e utilizado em correlações do método da efetividade-NUT.

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (2.114)$$

Pela razão entre a capacidade calorífica mínima e a multiplicação do coeficiente global e a área de troca térmica é obtido o número de unidades de troca térmica, conforme a Equação 2.115.

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (2.115)$$

De acordo com Incropera et al. (2008) a efetividade pode ser definida como a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência máxima possível, conforme a Equação 2.116.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\text{taxa real de transferência de calor}}{\text{máxima troca de calor possível}} \quad (2.116)$$

A efetividade também é função de NUT e C e pode ser calculada por meio de correlações. A Equação 2.117 é uma correlação para trocadores de calor do tipo casco e tubos com um passe no casco e passes pares nos tubos (INCROPERA et al., 2008).

$$\varepsilon = 2 \cdot \left(1 + C + \sqrt{1 + C^2} \cdot \frac{1 + \exp(-NUT \cdot \sqrt{1 + C^2})}{1 - \exp(-NUT \cdot \sqrt{1 + C^2})} \right)^{-1} \quad (2.117)$$

Conhecendo-se a efetividade, a Equação 2.118 pode ser utilizada para calcular a taxa de transferência de calor total.

$$Q_{total} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{qe} - T_{fe}) \quad (2.118)$$

Após calculada a taxa de transferência total, a Equação 2.119 pode ser utilizada para calcular as temperaturas de saída dos fluidos quente e frio, T_{qs} e T_{fs} respectivamente.

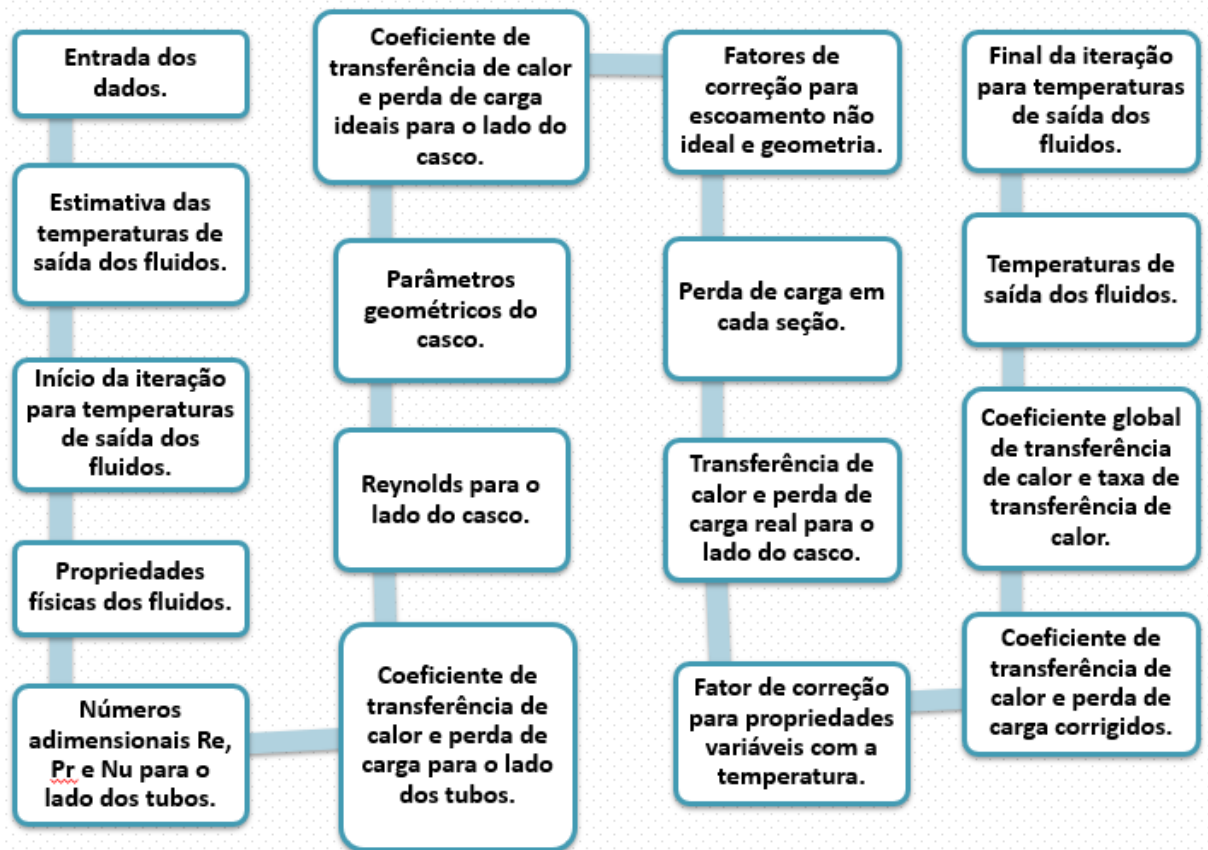
$$Q_{total} = \dot{m}_q \cdot cp_q \cdot (T_{qe} - T_{qs}) = \dot{m}_f \cdot cp_f \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (2.119)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como supracitado, o *software* para projeto de trocador de calor do tipo TEMA E foi desenvolvido no Excel utilizando a ferramenta VBA (*Visual Basic for Applications*).

O VBA possibilita a criação de *UserForms* que podem ser programados em linguagem VBA e utilizados como formulários para entrada de dados e posterior cálculo de variáveis através aplicação de fórmulas no ambiente de programação. A forma como o equacionamento apresentado na Seção 2 e o código do programa foram aplicados no VBA pode ser vista no Apêndice deste trabalho. A Figura 3.1 mostra de forma resumida e simplificada a sequência das etapas do projeto implementada no VBA.

Figura 3.1 – Fluxograma simplificado da programação.



Fonte: Do autor (2019).

A fim de verificar se o programa desenvolvido no Excel possui confiabilidade nos resultados, estes foram comparados com os resultados obtidos por Bicca (2006) em seu trabalho intitulado como “Modelagem Hierárquica de Trocadores de Calor Casco e Tubos”. Neste trabalho Bicca incorpora o método de Bell-Delaware para trocadores do tipo TEMA E, TEMA F e TEMA E em série à biblioteca de modelos de equipamentos do simulador de processos EMSO.

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os dados referentes aos fluidos e à geometria do trocador respectivamente para o projeto do trocador, os quais foram retirados do trabalho de Bicca (2006).

Tabela 3.1 – Dados dos fluidos.

Item	Tubos	Casco
Fluido	Tolueno	Benzeno
Temperatura de entrada (K)	363,35	419,25
Pressão de entrada (kPa)	2210,26	733,06
Vazão molar (mols.s ⁻¹)	121,70	40,48

Fonte: Bicca (2006).

Tabela 3.2 – Dados da geometria do trocador.

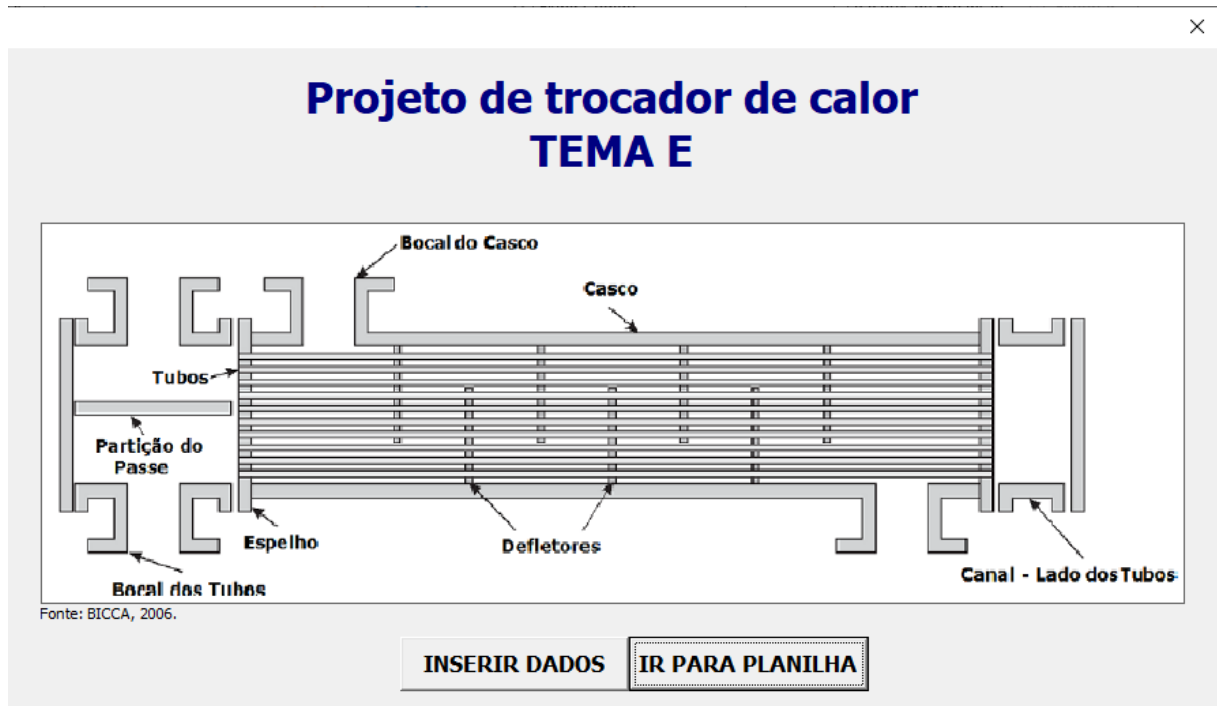
	Parâmetros	Valores
Casco	Diâmetro interno do casco - D_s (mm)	914
	Pares de tiras de selagem - N_{ss} (mm)	2
	Diâmetro do bocal de entrada - $D_{i_{bocal}}$ (mm)	387,35
	Diâmetro do bocal de saída - $D_{o_{bocal}}$ (mm)	387,35
	Altura sobre o feixe de entrada - $H_{i_{bocal}}$ (mm)	22,50
	Altura sobre o feixe de saída $H_{o_{bocal}}$ (mm)	21,55
Tubos	Número total de tubos - N_{tt}	775
	Arranjo dos tubos no feixe - θ	90°
	Distância centro a centro - P (mm)	25,40
	Comprimento efetivo do tubo - L_t (m)	6,70
	Tubos Diâmetro externo – D_e (mm)	19,05
	Diâmetro interno – D_i (mm)	14,83
	Número de passes - N_{pt}	4
	Condutividade térmica do material - k (kW/m.K)	0,057
	Diâmetro do bocal de entrada - $D_{i_{bocal}}$ (mm)	154,05
Diâmetro do bocal de saída - $D_{o_{bocal}}$ (mm)	154,05	
Defletores	Corte do defletor - B_c (%)	30
	Número de defletores de segmentos - NB	8
	Folga tubo-defletor – L_{cd} (mm)	4,763
	Defletores Folga casco-feixe – L_{td} (mm)	0,397
	Folga casco-defletor – L_{cf} (mm)	43,09
	Espaçamento inicial do defletor – L_{si} (mm)	807,813
Espaçamento central do defletor – L_s (mm)	622	

Fonte: Bicca (2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O programa desenvolvido é constituído por um conjunto de *UserForms*. Ao clicar no arquivo do Excel o primeiro *UserForm* é aberto, ilustrado pela Figura 4.1. Nele o usuário tem a opção inserir os dados para o projeto do trocador clicando no ícone “INSERIR DADOS” ou ir para a planilha do Excel clicando em “IR PARA PLANILHA”.

Figura 4.1 - Abertura do programa.



Fonte: Do autor (2019).

Após clicar no ícone “INSERIR DADOS” abre-se a interface para a inserção de dados dos fluidos conforme a Figura 4.2. Esta janela é dividida em 3 páginas, sendo a primeira destinada à inserção de dados referentes aos fluidos. Nela o usuário deve, primeiramente, selecionar os fluidos do casco e dos tubos nas caixas de combinação (local indicado pela seta).

Fazendo isso os dados referentes às constantes para o cálculo das propriedades físicas dos fluidos são inseridos automaticamente nas caixas de texto destacadas. Além disso, há também o preenchimento dos dados referentes à temperatura, pressão e vazão molar de entrada dos fluidos em caixas de texto.

Figura 4.2 - Interface para inserção dos dados dos fluidos.

Fonte: Do autor (2019).

As constantes para o cálculo das propriedades físicas estão disponíveis nas Tabelas 2A, 3A, 4A e 5A do Anexo e foram inseridas em uma planilha do mesmo arquivo, chamada de Banco de Dados, mostrada na Figura 4.3.

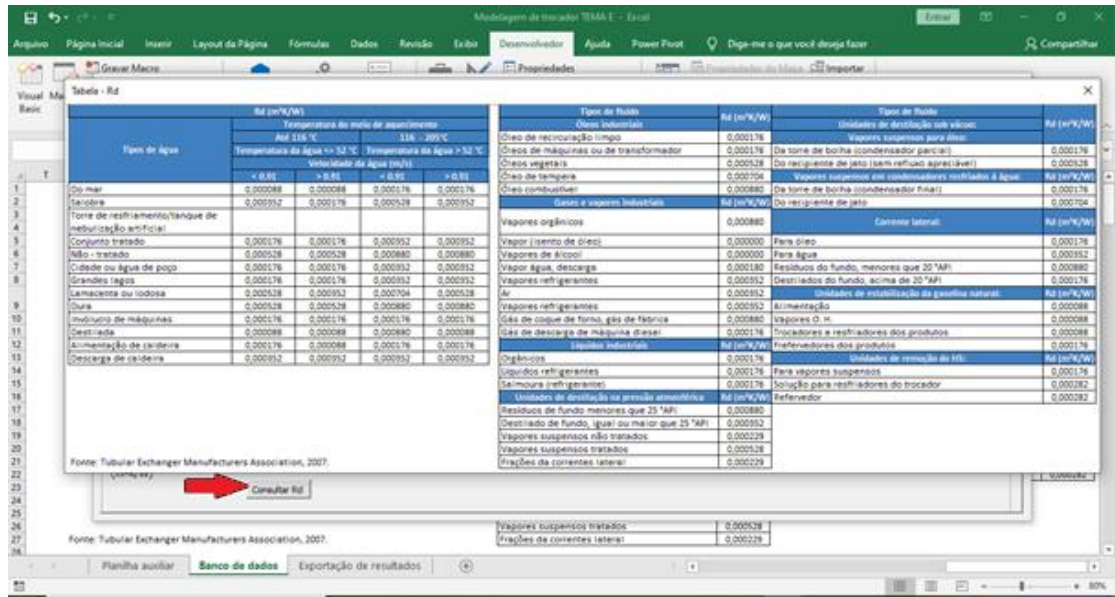
Figura 4.3 – Planilha de Banco de Dados.

Fluido	Condutividade térmica				Massa específica				Calor específico				Viscosidade				Temperatura crítica (K)	Massa molar (kg/mol)
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D		
Acetato de etila (líquido)	0,0288	0,089	0	0	139,438	-0,21027	0,0001285	-2225,1	0,86518	-0,001519	1,4656-06	0,00474	-6,54767	136,581	5779300	-2,294E+09	941,8	0,0881
Acetileno (líquido)	0,0196	0,022	0	0	94,8988	-0,23693	0,0002861	-2297,54	0,57613	0,0003714	-5,15E-07	0,03567	-38,8869	42205,9	-1,6E+07	212030000	555,7	0,02604
Acetona (líquido)	0,1511	0,03	-1E-04	0	70,27	-0,03541	0	-1025,5	-0,755	0,00388	-4,17E-06	0,1645	-4,3581	2034	-179740	0	916,4	0,05808
Água (líquido)	0,0495	0,08	0	0	119,643	-0,11914	5,857E-05	-2169,13	0,30298	0,0001655	2,545E-07	0,01075	117,235	-311024	2,7E+08	-7,409E+10	1070,6	0,06005
Ácido acético (líquido)	-1,4227	1,62	0,0013	0	57	0,03337	-0,00004	-838,1	1,207	-0,00087	2,545E-07	0,01075	-2,9868	-388,75	1037700	0	1165,2	0,01802
Amônia (líquido)	0,1051	0,44	0	0	62,6542	-0,04273	5,456E-06	-948,53	-3,37464	0,163558	-1,49E-05	0,04094	-27,9904	37159,6	-1,8E+07	3047500000	730	0,01703
Anilina (líquido)	0,0487	0,848	0	0	114,257	-0,09797	3,834E-05	-1679,52	0,45928	-0,000159	3,28E-07	0,00582	-8,984	14708,8	-1,1E+07	373290000	1258,2	0,09506
Ar (líquido)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	238,3	0,02896
Benzeno (líquido)	0,0169	0,127	0	0	43,85	0,06106	-7,67E-05	0	0,63859	-0,001008	1,12E-06	0	6,15849	-18510	1,3E+07	-2,694E+09	1012	0,07811
Butanol (líquido)	0,0349	0,087	0	0	78,3963	-0,05181	1,009E-05	-902,78	4,07351	-0,001135	9,451E-06	7,9E-05	-27,0618	58513,8	-4,7E+07	1,3228E+10	1010,1	0,07412
Decano (líquido)	0,0416	0,121	0	0	79,1	-0,068	3,088E-05	168,6	0,264	0,0003596	2,832E-07	-0,00972	-6,328	3381	655700	3450000	1248	0,15828
Etano (líquido)	0,0182	0,071	0	0	18,98	0,12	-0,000219	0	1,26665	-0,004551	7,301E-06	0,00314	621980	-2,6094	0	1	550,1	0,03007
Etanol (líquido)	0,0536	0,083	0	0	40,409	0,05531	-6,62E-05	-599,21	6,00148	-0,01735	1,433E-05	-0,01109	-12,5191	13575,2	-5152380	78020000	929,3	0,0461
Etileno Glycol (líquido)	-0,0065	0,127	0,0001	0	83,59	-0,02434	0	-832,3	0,2939	0,00046	1,251E-07	-0,00358	-1,4921	-1820	2226020	0	1170	0,06207
Freon 11 (líquido)	0,0329	0,049	0	0	126,07	-0,03801	-3,41E-05	-1350,37	0,0177	0,0006135	-6,39E-07	0,01755	-4,029	2205	-329700	29100000	848,2	0,1374
Freon 113 (líquido)	0,094	0,627	0	0	139,6	-0,0691	0	-2069,4	0,232	-0,00029	4,77E-07	0,0003	-4,1743	1831	109220	0	877,2	0,18739
Freon 114 (líquido)	0,0286	0,043	0	0	122,8	-0,00667	-7,36E-05	-2888	0,1414	0,0001323	-2,34E-07	0,01769	-4,901	3988	-1627000	333700000	753,7	0,17092
Freon 12 (líquido)	0,0091	0,087	0	0	133,188	-0,07416	-9,82E-06	-1923,55	0,33488	-0,000656	8,539E-07	0,00094	-27,6434	38125,6	-1,9E+07	321700000	692,6	0,12092
Freon 21 (líquido)	0,0262	0,074	0	0	122,2	-0,0496	-2E-05	-1570	0,6733	-0,001655	1,589E-06	0,00227	-8,973	7753	-1867000	-2770000	812,3	0,10292
Freon 22 (líquido)	0,0138	0,107	0	0	187,083	-0,30728	0,0002274	-2539,32	-0,03823	0,001075	-1,1E-06	0,01478	-15,0693	17805,9	-8110050	130510000	664,7	0,08648
Glicerina (líquido)	0,2333	-0,102	0	0	89,217	-0,01454	-4,61E-06	-1421	-3,5716	0,007367	-9,46E-06	1,751	-1,6365	-2092	1954000	85820000	1305	0,09209
i-butano (líquido)	0,0144	0,096	0	0	17,96	0,1098	-0,000146	0	0,82159	-0,001648	2,233E-06	0	-11,1725	8522	-2148450	14010000	735	0,05812
i-propanol (líquido)	0,0444	0,078	-2E-05	0	66,62	-0,02851	0	-1150,8	-1,164	0,00459	-2,42E-06	0,0048	-2,6221	-1613	1821510	0	914,8	0,06009
Isobutano (líquido)	0,0538	0,059	0	0	74,82	-0,05413	3,155E-05	-3021	0,3585	-0,00041	8,058E-07	0,0942	-19,658	22420	-8737000	145700000	990	0,07412
Isopentano (líquido)	0,0102	0,103	0	0	69,51	-0,04051	9,445E-06	-811,7	0,938	-0,001959	3,068E-06	-1,07918	-3,787	-406,5	1175000	-21590000	878,4	0,07715

Fonte: Do autor (2019).

Na mesma janela de inserção de dados referentes aos fluidos também há a opção de consultar valores de fator de incrustação clicando no ícone “Consultar Rd” indicado pela seta na Figura 4.4, que também ilustra a janela com os dados de Rd.

Figura 4.4 – Botão de comando para consultar valores de fator de incrustação.



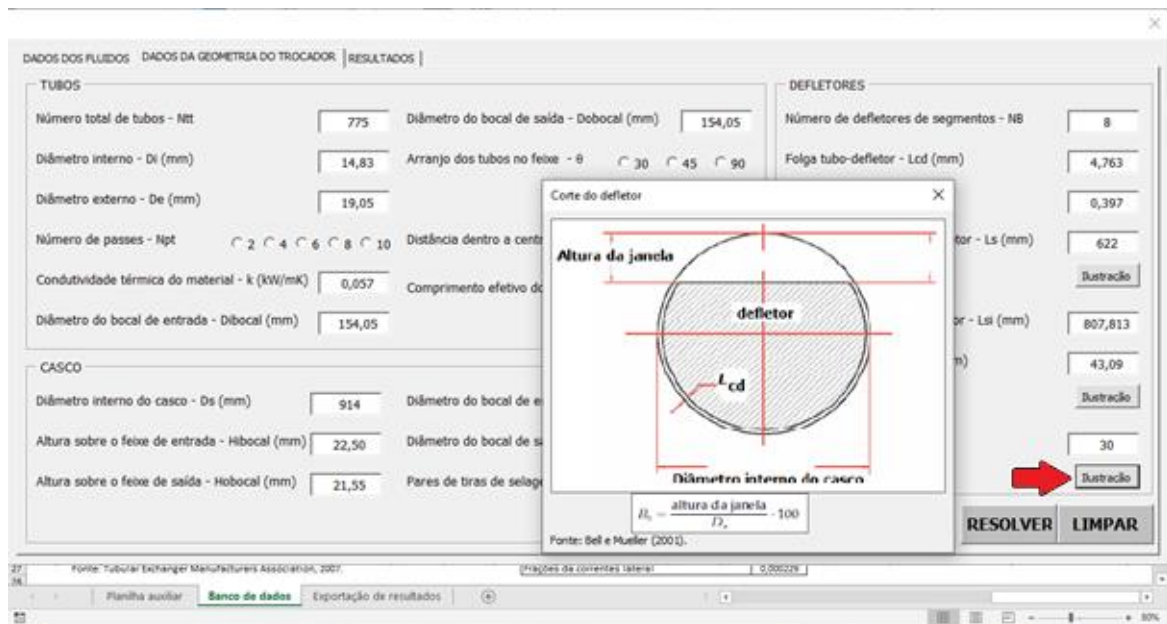
Fonte: Do autor (2019).

Em seguida o usuário deve acessar a página seguinte para o preenchimento dos dados referentes à geometria do trocador. Nesta página há a opção de visualizar imagens ilustrativas referentes a alguns parâmetros.

Como mostrada na Figura 4.5 ao clicar no ícone “Ilustração” indicado pela seta uma janela é aberta com uma imagem ilustrativa.

Após o preenchimento dos dados o usuário deve clicar no ícone “RESOLVER” para que a modelagem do trocador seja realizada.

Figura 4.5 - Interface para inserção de dados da geometria.



Fonte: Do autor (2019).

A página seguinte, ilustrada pela Figura 4.6, apresenta os resultados obtidos pelo projeto. Nesta página o usuário tem a opção de exportar os resultados ou ir para a planilha apenas selecionando um dos botões de comando.

Figura 4.6 – Página de resultados.

Fonte: Do autor (2019).

Ao clicar no botão “EXPORTAR RESULTADOS” uma caixa de mensagem é aberta solicitando o nome do operador, que se encontra destacada na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Janela de inserção do nome do operador.

Fonte: Do autor (2019).

Após o preenchimento do nome do operador um documento em PDF é gerado com o nome do operador, data da modelagem e os resultados obtidos, como apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Dados exportados.

Beatriz_02.12.2019.pdf - Adobe Acrobat Reader DC

Arquivo Editar Visualizar Janela Ajuda

Início Ferramentas 1ª Resolução Eng Q... Beatriz_02.12.2019... x

1 / 2 112%

Projeto de trocador de calor TEMA E		
Operador	Beatriz	
Data	02.12.2019	
Resultados		
Casco	Temperatura de saída (K)	372,13
	Pressão de saída (kPa)	733,03
	Perda de carga (kPa)	0,0255
	Coefficiente convectivo médio (kW/m ² K)	0,174
Tubos	Temperatura de saída (K)	378,42
	Pressão de saída (kPa)	2205,95
	Perda de carga (kPa)	4,3105
	Coefficiente convectivo médio (kW/m ² K)	0,913
Taxa de Calor (kW)		321,252
Coefficiente Global U (W/m ² K)		138,920

Fonte: Do autor (2019).

Também foi criada uma planilha para o auxílio da construção do programa, chamada de planilha auxiliar, que está apresentada na Figura 4.9. Nesta planilha são inseridos automaticamente todos os cálculos realizados pelo programa, dessa forma foi possível identificar erros de programação com mais facilidade.

Figura 4.9 – Planilha Auxiliar.

Modelagem de trocador TEMA E - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda Power Pivot Digite-me o que você deseja fazer Compartilhar

Visual Basic Gravar Macro Usar Referências Relativas Segurança de Macro Códigos

Suplementos do Excel Suplementos COM Inserir Modo de Design Controles

Códigos-fonte Pacotes de Expansão XML Importar Exportar Atualizar Dados

Resultados para o lado dos tubos					Resultados para o lado do casco				
Propriedades físicas do fluido	Tmédia	Tentrada	Tsaída	Tparede	Propriedades físicas do fluido	Tmédia	Tentrada	Tsaída	Tparede
k (W/m ² C)	0,116376568	0,118400538	0,11432956	0,11527533	k (W/m ² C)	0,12665627	0,11721724	0,13561971	0,13456
ro (kg/m ³)	816,5310228	823,4259408	809,096665	812,587748	ro (kg/m ³)	775,8608085	740,90158	806,399108	802,967
cp (J/kg°C)	1921,867537	1901,133548	1943,12348	1933,2687	cp (J/kg°C)	2043,645559	2156,22826	1947,92034	1958,52
mi (kg/ms)	0,000275181	0,00029143	0,00026036	0,00026702	mi (kg/ms)	0,000203821	0,0001739	0,00024986	0,00024
teta (°)	90			Tparede (K) 374,951148	Pn (m)	0,0254			
Not	4				Pp (m)	0,0254			
vméd (m/s)	0,410296609				Dortl (m)	0,87091			
Re	18054,8404				Dct1 (m)	0,85186			
Pr	4,544394452				SM (m ²)	0,15926621			
x_medio					vméd (m/s)	0,0258567			
fa_N	0,026848754				M_taxa (kg/s)	3,16158036			
K1(fa_N)					m (kg/sm ²)	19,8509173			
K2(Pr)					fiem	1855,35517			
Nusselt	115,8783528				a1	0,107			
hi (W/m ² K)	909,3408624				a2	-0,266			
correção de viscosidade	1,004223548				a3	1,187			
hi_corrigido (W/m ² K)	913,1815075				a4	0,37			
vboval_e (m/s)	0,056211516				b1	0,082			
vboval_f (m/s)	0,117594524				b2	0,022			
deltaP_entrada (Pa)	0,04662681				b3	6,3			
deltaP_saida (Pa)	3,915999735				b4	0,378			
					a	0,36333345			

Planilha auxiliar Banco de dados Exportação de resultados

Fonte: Do autor (2019).

Os resultados obtidos pelo projeto do trocador estão listados na Tabela 4.1, a qual mostra, também, os resultados obtidos por Bicca (2006) pela modelagem no EMSO e o erro relativo entre as modelagens.

Tabela 4.1 – Resultados do projeto.

		Excel	EMSO	Erro (%)
Casco	Temperatura de saída (K)	372,13	369,45	0,72
	Pressão de saída (kPa)	733,03	733,03	0,00
	Perda de carga (kPa)	0,03	0,03	8,24
	Coefficiente convectivo médio (kW/m ² K)	0,17	0,16	6,85
Tubos	Temperatura de saída (K)	378,42	379,62	0,32
	Pressão de saída (kPa)	2210,26	2205,91	0,20
	Perda de carga (kPa)	4,31	4,34	0,79
	Coefficiente convectivo médio (kW/m ² K)	0,91	0,89	2,40
	Taxa de Calor (kW)	321,25	300,11	6,58
	Coefficiente Global U (W/m ² K)	138,92	130,57	6,01

Fonte adaptada: Bicca (2006).

Como pode ser observado, os resultados para perda de carga e coeficiente convectivo médio do casco apresentaram erros relativos maiores que 5%, cujos valores foram de 8,24% e 6,85% respectivamente, bem como os valores da taxa de calor e coeficiente global, com valores de 6,58% e 6,01% respectivamente.

Uma possível fonte de erro para a perda de carga no casco é a velocidade do fluido do lado do casco. Em Bicca (2006) não foi especificado como foi calculada essa velocidade, sendo assim foi implementada a Equação 2.72 neste trabalho. O valor da velocidade afeta o número de Reynolds, que por sua vez é utilizado no cálculo da perda de carga.

Deve-se levar em consideração, também, que foi necessária a aplicação de um processo iterativo na programação para estimar as temperaturas finais dos fluidos, visto que não eram conhecidas. A iteração gerou o valor de 372,13 K para o lado do casco e 378,42 K para o lado dos tubos com erros relativos de 0,72 e 0,32% respectivamente. Embora estes valores sejam considerados pequenos, as temperaturas foram utilizadas em diversos cálculos, assim as diferenças entre as temperaturas foram responsáveis pela geração de diferenças em quase toda a programação.

Outros fatores também podem ter sido responsáveis por essas diferenças, como o cálculo das propriedades físicas, pois Bicca (2006) não especifica em seu trabalho quais valores das propriedades físicas foram utilizados. Essas propriedades são utilizadas ao longo de todo o

equacionamento, sendo assim uma pequena diferença entre esses valores pode gerar diferenças entre os resultados obtidos ao longo de toda a programação acarretando um maior erro ao final do projeto.

Um ponto importante que deve ser destacado é a utilização de um método diferente de cálculo de Bicca (2006) para o cálculo da taxa de calor. Neste trabalho foi aplicado o método da Efetividade – NUT, por se tratar de um método mais simples, que não envolve iterações. Já Bicca (2006) utilizou o método DTML que consiste no cálculo da temperatura média logarítmica entre as temperaturas iniciais e finais dos fluidos e, portanto, envolve interações.

5 CONCLUSÃO

O projeto de trocadores sem a utilização de *softwares* é inviável devido à complexidade e quantidade de cálculos envolvidos. A utilização de *softwares* pagos, por sua vez, pode exigir conhecimentos específicos sobre o manuseio dos mesmos, além de possuírem custos elevados de licenças.

Diante deste contexto objetivou-se o desenvolvimento de um *software* no Excel para o projeto de trocadores de calor TEMA E como interface objetiva e de fácil entendimento e, pelos resultados obtidos, conclui-se que este objetivo foi alcançado. Embora algumas variáveis calculadas tenham apresentado erros relativos acima de 5%, deve-se ter em vista que os projetos comparados foram desenvolvidos em *softwares* com linguagens diferentes e o maior erro relativo foi de 8,24% para a perda de carga no casco, logo tais erros podem ser considerados pequenos.

Assim o programa se mostrou promissor para aplicação como ferramenta didática e de pesquisa, tendo em vista que o Excel é uma ferramenta bastante conhecida e utilizada no meio acadêmico e a programação do *UserForm* é aberta, dessa forma o usuário pode entender como é aplicado o método de projeto. Há ainda a possibilidade de aperfeiçoamento do programa seja pela ampliação do banco de dados ou implementação de outros métodos pelo próprio usuário, pois a programação pode ser acessada e modificada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, J. A. **Equipamentos Térmicos**. 2003. Disponível em: <http://termo.furg.br/JAA/index.php>. Acesso em: 01 de agosto de 2019.
- ARAÚJO, E. C. da C. **Operações unitárias envolvendo transmissão de calor**. São Carlos: EdUfscar, 2011.
- BELL, K. J.; MUELLER, A. C. Wolverine engineering data book II. **Wolverine Tube Inc**, 2001.
- BICCA, G. B.; SECCHI, A. R.; WADA, K. Modelagem de trocadores de calor casco e tubos. In: Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2005, Porto Alegre. Não paginado.
- BICCA, G. B. **Modelagem Hierárquica de trocadores de calor casco e tubos**. 2006. 157 p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia) – UFRGS, Porto Alegre, 2006.
- COPETTI, J. B. **Cálculo de trocadores de calor tipo casco e tubos por partes com determinação das curvas de temperatura e perda de carga**. 1989. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) - UFRGS, Porto Alegre, 1989. p. 8.
- CORTEZ, I. R.; MÜLLER, J. M.; LIMA, O. C. da M.. Desenvolvimento de planilhas como suporte para disciplinas de laboratório: trocadores de calor casco/tubos. In: **Congresso Brasileiro do Ensino de Engenharia**, 2004, Maringá. Não paginado.
- GENEROSO, D. J. **Projeto: Refrigeração por adsorção**. Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Araranguá, 2014.
- GNIELINSKI, V. **New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow**. Int. Chem. Eng., 1976, v. 16, cap. 2, p. 359–368.
- GNIELINSKI, V. Forced convection in ducts. In: SCHLUNDER, E. U. **Heat Exchanger Design Handbook**. Washington: Hemisphere Publishing Corp., 1983. v. 2, cap. 2.
- HOLMANN, J. P. **Heat transfer**. 4th ed. New York: Mcgraw-Hill, 1976. 530 p.
- ICROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., & LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- MARTINEZ, D. B.; BATISTA, G. R. P; PASSINI, R. M. **Comparação entre trocadores de calor casco e tubo no processo de fabricação de cerveja**. 2016. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade São Francisco, Campinas, 2016. p. 34.
- RAVAGNANI, M. A. da S. S. **Projeto de trocadores de calor multitubulares incluindo processos com mudança de fase**. 1989. 150 p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Química) – UNICAMP, Campinas, 1989.

RIBEIRO, C. M. C. **Comparação de métodos de cálculo termo-hidráulico para trocadores de calor casco e tubo, sem mudança de fase.** 1984. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) – UNICAMP, Campinas, 1984. cap. 1, p. 1.

RUBBO, Patrick Nikson. **Determinação do coeficiente global de transferência de calor de um condensador do tipo casco e tubo de um chiller por adsorção de amônia em NaBr.** 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia) – UFSC, Araranguá, 2014. p. 7.

SAUNDERS, E. A. D. **Heat exchangers : selection, design and construction.** New York, NY: Longman Scientific & Technical, 1988.

SIEDER, E.; TATE, G. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. **Industrial and Engineering Chemistry**, 1936, v. 28, p. 1429–1435.

TEMA. **Tubular Exchanger Manufacturers Association Standards.** 9th ed. New York: TEMA, 2007.

TINKER, T. Shell side characteristics of shell and tube heat exchangers, parts I, II and III, general discussion of heat transfer. In: Proc. Int. Mech. Eng., London, 1951.

TINKER, T. Shell side characteristics of shell and tube heat exchangers: a simplified rating system for commercial heat exchangers. *J. Heat Transfer* 80, 1958. p. 36-52.

WOLVERINE COMPANY. **Engineering Data Book II**, 1984.

APÊNDICE – Código do programa

```

Private Sub Adicionar_Rd_Click()
Formulário_Rd.Show
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()
'Seleção da planilha para transcrever os resultados:
Sheets("Planilha auxiliar").Select
'Conversão dos dados inseridos no formulário de texto para número e conversão de
unidades:
Te_casco = CDb1(Te_cascoc.Text) 'K
Pe_casco = CDb1(Pe_cascoc.Text) * 1000 'Pa
V_casco = CDb1(V_cascoc.Text) 'mol/s
Te_tubo = CDb1(Te_tubot.Text)
Pe_tubo = CDb1(Pe_tubot.Text) * 1000
V_tubo = CDb1(V_tubot.Text)
Ds = CDb1(Dsc.Text) * 0.001 'm
Nss = CDb1(Nssc.Text) * 0.001 'm
Dibocal = CDb1(Dibocalc.Text) * 0.001 'm
Dobocal = CDb1(Dobocalc.Text) * 0.001 'm
Hibocal = CDb1(Hibocalc.Text) * 0.001 'm
Hobocal = CDb1(Hobocalc.Text) * 0.001 'm
Ntt = CDb1(Nttt.Text)
P = CDb1(Pt.Text) * 0.001 'm
L = CDb1(Lt.Text) 'm
De = CDb1(Det.Text) * 0.001 'm
Di = CDb1(Dit.Text) * 0.001 'm
k = CDb1(k_materialt.Text) * 1000 'W/(m.K)
Dibocal_tubo = CDb1(Dibocal_tubot.Text) * 0.001 'm
Dobocal_tubo = CDb1(Dobocal_tubot.Text) * 0.001 'm
Bc = CDb1(Bcd.Text) '%'
NB = CDb1(NBd.Text)
Lcd = CDb1(Lcdd.Text) * 0.001 'm
Ltd = CDb1(Ltdd.Text) * 0.001 'm
Lcf = CDb1(Lcfd.Text) * 0.001 'm
Lsi = CDb1(Lsid.Text) * 0.001 'm
Ls = CDb1(Lsd.Text) * 0.001 'm
'Constantes das propriedades físicas dos fluidos:
KA = CDb1(KA.Text)
KB = CDb1(KB.Text)
KC = CDb1(KC.Text)
KD = CDb1(KD.Text)
ROA = CDb1(ROA.Text)
ROB = CDb1(ROB.Text)
ROC = CDb1(ROC.Text)
ROD = CDb1(ROD.Text)
cpa = CDb1(cp_A.Text)
cpb = CDb1(cp_B.Text)
cpc = CDb1(cp_C.Text)
cpd = CDb1(cp_D.Text)
mia = CDb1(mi_A.Text)
mib = CDb1(mi_B.Text)
mic = CDb1(mi_C.Text)
midd = CDb1(mi_D.Text)
kta = CDb1(kt_A.Text)
ktb = CDb1(kt_B.Text)
ktc = CDb1(kt_C.Text)
ktd = CDb1(kt_D.Text)
rota = CDb1(rot_A.Text)
rotb = CDb1(rot_B.Text)
rotc = CDb1(rot_C.Text)
rotd = CDb1(rot_D.Text)
cpta = CDb1(cpt_A.Text)
cptb = CDb1(cpt_B.Text)
cptc = CDb1(cpt_C.Text)
cptd = CDb1(cpt_D.Text)

```

```

mita = CDb1(mit_A.Text)
mitb = CDb1(mit_B.Text)
mitc = CDb1(mit_C.Text)
mitd = CDb1(mit_D.Text)
Tc_casco = CDb1(T_casco.Text)
Tc_tubo = CDb1(T_tubo.Text)
M_molar_casco = CDb1(M_molar_cascoc.Text)
M_molar_tubo = CDb1(M_molar_tubot.Text)
Rdi = CDb1(fator_incrustacao_i.Text)
Rde = CDb1(fator_incrustacao_e.Text)
'Botão de opção para o arranjo dos tubos no feixe:
If Programa.teta30.Value = True Then
    Cells(12, "D").Value = Programa.teta30.Caption
ElseIf Programa.teta45.Value = True Then
    Cells(12, "D").Value = Programa.teta45.Caption
ElseIf Programa.teta90.Value = True Then
    Cells(12, "D").Value = Programa.teta90.Caption
End If
teta = Cells(12, "D")
'Botão de opção para o número de passes:
If Programa.passo2.Value = True Then
    Cells(13, "D").Value = Programa.passo2.Caption
ElseIf Programa.passo4.Value = True Then
    Cells(13, "D").Value = Programa.passo4.Caption
ElseIf Programa.passo6.Value = True Then
    Cells(13, "D").Value = Programa.passo6.Caption
ElseIf Programa.passo8.Value = True Then
    Cells(13, "D").Value = Programa.passo8.Caption
ElseIf Programa.passo10.Value = True Then
    Cells(13, "D").Value = Programa.passo10.Caption
End If
Npt = Cells(13, "D")
'Atribuição das temperaturas quente e fria de entrada e saída:
If Te_casco > Te_tubo Then
    Tqe = Te_casco
    Tfe = Te_tubo
    Tqs = Tqe - 10
    Tfs = Tfe + 11
    Tf_casco = Tqs 'Chute para a temperatura final do casco
    Tf_tubo = Tfs 'Chute para a temperatura final dos tubos
Else
    Tfe = Te_casco
    Tqe = Te_tubo
    Tqs = Tqe - 10
    Tfs = Tfe + 10
    Tf_casco = Tfs
    Tf_tubo = Tqs
End If
Cells(39, "F") = Tf_casco
Cells(40, "F") = Tf_tubo
w = 15
'#####INÍCIO DA ITERAÇÃO PARA CALCULAR AS TEMPERATURAS FINAIS#####
'Diferenças entre as temperaturas finais estimadas e calculadas:
dif_casco = 10
dif_tubo = 10
Do While dif_casco > 1 And dif_tubo > 1
    'Cálculo da temperatura média:
    Tqmed = (Tqe + Tqs) / 2 'Temperatura média do fluido quente
    Tfmed = (Tfe + Tfs) / 2 'Temperatura média do fluido frio
    Tm_casco = (Te_casco + Tf_casco) / 2 'Temperatura média do fluido no casco
    Tm_tubo = (Te_tubo + Tf_tubo) / 2 'Temperatura média do fluido nos tubos
    '*****CÁLCULO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS*****
    'Cálculo das propriedades físicas do fluido do casco na temperatura de entrada:
    Te_casco_R = (Te_casco - 273.15) * 1.8 + 491.67 'Transforma temperatura em Kelvin
    para Rankine
    Tr_casco = (Te_casco_R / Tc_casco) 'Temperatura reduzida

```

```

ke_casco = (KA + KB * (1 - Tr_casco) ^ (2 / 3) + KC * Te_casco_R) * 1.73 'Condutividade
térmica
roe_casco = (ROA + ROB * Te_casco_R + ROC * (Te_casco_R) ^ (2) + ROD / (Tc_casco + 62
- Te_casco_R)) * 16.02 'Massa específica
cpe_casco = (cpa + cpb * Te_casco_R + cpc * (Te_casco_R) ^ (2) + cpd / (1 - Tr_casco))
* 4183.3 'Calor específico
mie_casco = (2.42 * Exp(mia + mib / Te_casco_R + mic / (Te_casco_R) ^ 2 + midd /
(Te_casco_R) ^ 3)) * 4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade
'Cálculo das propriedades físicas do fluido do casco na temperatura de saída:
Tf_casco_R = (Tf_casco - 273.15) * 1.8 + 491.67 'Transforma temperatura em Kelvin
para Rankine
Tr_casco = (Tf_casco_R / Tc_casco) 'Temperatura reduzida
kf_casco = (KA + KB * (1 - Tr_casco) ^ (2 / 3) + KC * Tf_casco_R) * 1.73 'Condutividade
térmica
rof_casco = (ROA + ROB * Tf_casco_R + ROC * (Tf_casco_R) ^ (2) + ROD / (Tc_casco + 62
- Tf_casco_R)) * 16.02 'Massa específica
cpf_casco = (cpa + cpb * Tf_casco_R + cpc * (Tf_casco_R) ^ (2) + cpd / (1 - Tr_casco))
* 4183.3 'Calor específico
mif_casco = (2.42 * Exp(mia + mib / Tf_casco_R + mic / (Tf_casco_R) ^ 2 + midd /
(Tf_casco_R) ^ 3)) * 4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade
'Cálculo das propriedades físicas do fluido do casco na temperatura média:
Tm_casco_R = (Tm_casco - 273.15) * 1.8 + 491.67 'Transforma temperatura em Kelvin
para Rankine
Tr_casco = (Tm_casco_R / Tc_casco) 'Temperatura reduzida
km_casco = (KA + KB * (1 - Tr_casco) ^ (2 / 3) + KC * Tm_casco_R) * 1.73 'Condutividade
térmica
rom_casco = (ROA + ROB * Tm_casco_R + ROC * (Tm_casco_R) ^ (2) + ROD / (Tc_casco + 62
- Tm_casco_R)) * 16.02 'Massa específica
cpm_casco = (cpa + cpb * Tm_casco_R + cpc * (Tm_casco_R) ^ (2) + cpd / (1 - Tr_casco))
* 4183.3 'Calor específico
mim_casco = (2.42 * Exp(mia + mib / Tm_casco_R + mic / (Tm_casco_R) ^ 2 + midd /
(Tm_casco_R) ^ 3)) * 4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade
'Cálculo das propriedades físicas do fluido dos tubos na temperatura de entrada:
Te_tubo_R = (Te_tubo - 273.15) * 1.8 + 491.67 'Transforma temperatura em Kelvin para
Rankine
Tr_tubo = (Te_tubo_R / Tc_tubo) 'Temperatura reduzida
ke_tubo = (kta + ktb * (1 - Tr_tubo) ^ (2 / 3) + ktc * Te_tubo_R) * 1.73 'Condutividade
térmica
roe_tubo = (rota + rotb * Te_tubo_R + rotc * (Te_tubo_R) ^ (2) + rotd / (Tc_tubo + 62
- Te_tubo_R)) * 16.02 'Massa específica
cpe_tubo = (cpta + cptb * Te_tubo_R + cptc * (Te_tubo_R) ^ (2) + cptd / (1 - Tr_tubo))
* 4183.3 'Calor específico
mie_tubo = (2.42 * Exp(mita + mitb / Te_tubo_R + mitc / (Te_tubo_R) ^ 2 + mitd /
(Te_tubo_R) ^ 3)) * 4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade
'Cálculo das propriedades físicas do fluido dos tubos na temperatura final:
Tf_tubo_R = (Tf_tubo - 273.15) * 1.8 + 491.67 'Transforma temperatura em Kelvin para
Rankine
Trf_tubo = (Tf_tubo_R / Tc_tubo) 'Temperatura reduzida
kf_tubo = (kta + ktb * (1 - Trf_tubo) ^ (2 / 3) + ktc * Tf_tubo_R) * 1.73 'Condutividade
térmica
rof_tubo = (rota + rotb * Tf_tubo_R + rotc * (Tf_tubo_R) ^ (2) + rotd / (Tc_tubo + 62
- Tf_tubo_R)) * 16.02 'Massa específica
cpf_tubo = (cpta + cptb * Tf_tubo_R + cptc * (Tf_tubo_R) ^ (2) + cptd / (1 - Trf_tubo))
* 4183.3 'Calor específico
mif_tubo = (2.42 * Exp(mita + mitb / Tf_tubo_R + mitc / (Tf_tubo_R) ^ 2 + mitd /
(Tf_tubo_R) ^ 3)) * 4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade
'Cálculo das propriedades físicas do fluido dos tubos na temperatura média:
Tm_tubo_R = (Tm_tubo - 273.15) * 1.8 + 491.67 'Transforma temperatura em Kelvin para
Rankine
Trm_tubo = (Tm_tubo_R / Tc_tubo) 'Temperatura reduzida
km_tubo = (kta + ktb * (1 - Trm_tubo) ^ (2 / 3) + ktc * Tm_tubo_R) * 1.73 'Condutividade
térmica
rom_tubo = (rota + rotb * Tm_tubo_R + rotc * (Tm_tubo_R) ^ (2) + rotd / (Tc_tubo + 62
- Tm_tubo_R)) * 16.02 'Massa específica
cpm_tubo = (cpta + cptb * Tm_tubo_R + cptc * (Tm_tubo_R) ^ (2) + cptd / (1 - Trm_tubo))
* 4183.3 'Calor específico

```

```

mim_tubo = (2.42 * Exp(mita + mitb / Tm_tubo_R + mitc / (Tm_tubo_R) ^ 2 + mitd /
(Tm_tubo_R) ^ 3)) * 4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade
'*****CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PERDA DE CARGA PARA O LADO DOS TUBOS*****
Sti = WorksheetFunction.Pi() * ((Di) ^ (2)) / 4 'Área da seção interna de escoamento
em um tubo
vtm = V_tubo * M_molar_tubo / (Sti * rom_tubo * Ntt / Npt) 'Velocidade média de
escoamento do fluido em um tubo
Rem_tubo = vtm * Di * rom_tubo / mim_tubo 'Reynolds médio
Prm_tubo = cpm_tubo * mim_tubo / km_tubo 'Prandtl médio nos tubos
'Camada limite térmica:
If Rem_tubo < 2300 Then
x_D = 0.05 * Rem_tubo
Else
x_D = 10
End If
'Nusselt considerando efeitos de entrada:
If Rem_tubo < 2300 Then
x_medio = x_D / (Rem_tubo * Prm_tubo)
  If x_medio <= 0.01 Then
    Nux = 1.077 * x_medio - 0.7
  ElseIf x_medio > 0.01 Then
    Nux = 3.65 + 6.874 * (1000 * x_medio) ^ (-0.488) * Exp(-57.2 * x_medio)
  ElseIf x_medio <= 0.00005 Then
    Nux = 1.302 * (x_medio) ^ (-1 / 3) - 1
  ElseIf 0.00005 < x_medio <= 0.0015 Then
    Nux = 1.302 * (x_medio) ^ (-1 / 3) - 0.5
  ElseIf x_medio > 0.0015 Then
    Nux = 4.364 + 8.68 * (1000 * x_medio) ^ (-0.506) * Exp(-41 * x_medio)
  End If
ElseIf 2300 <= Rem_tubo <= 5000000 Then
F = (0.79 * Log(Rem_tubo) - 1.64) ^ (-2)
Nux = (F / 8) * (Rem_tubo - 1000) * Prm_tubo / (1 + 12.7 * (F / 8) ^ 0.5 * ((Prm_tubo)
^ (2 / 3) - 1))
End If 'Final do If para o Reynolds
If Rem_tubo < 2300 Then
Nusselt = ((3.66) ^ (3) + ((1.61) ^ (3)) * Rem_tubo * Prm_tubo * (Di / L)) ^ (1 / 3)
ElseIf 2300 <= Rem_tubo <= 10000 Then
fa_N = (0.79 * Log(Rem_tubo) - 1.64) ^ (-2) 'fator de atrito
Nusselt = (fa_N / 8) * (Rem_tubo - 1000) * Prm_tubo / (1 + 12.7 * (fa_N / 8) ^ (0.5)
* ((Prm_tubo) ^ (2 / 3) - 1)) * (1 + (Di / L) ^ (2 / 3))
Else
fa_N = (1.82 * Math.Log(Rem_tubo) - 1.64) ^ (-2)
K1f = 1 + 3.4 * fa_N
K2Pr = 11.7 + 1.8 * (Prm) ^ (-1 / 3)
Nusselt = (fa_N / 8) * Rem_tubo * Prm_tubo / (K1f + K2Pr * ((fa_N / 8) ^ (0.5)) *
((Prm_tubo) ^ (2 / 3) - 1))
End If
hi_tubo = Nusselt * km_tubo / Di 'Coeficiente de transferência de calor lado interno
dos tubos
v_bocal_e = V_tubo * M_molar_tubo / ((roe_tubo * ((Dibocal) ^ (2)) *
WorksheetFunction.Pi()) / 4) 'Velocidade no bocal de entrada
v_bocal_f = V_tubo * M_molar_tubo / ((rof_tubo * ((Dobocal) ^ (2)) *
WorksheetFunction.Pi()) / 4) 'Velocidade no bocal de saída
deltaP_entrada = (1.1 * roe_tubo * (v_bocal_e) ^ (2)) / 2 'Perda de carga no bocal de
entrada
deltaP_saida = 0.7 * rof_tubo * (v_bocal_f) ^ (2) / 2 'Perda de carga no bocal de
entrada
If Rem_tubo < 2300 Then
fanning = 16 / Rem_tubo
ElseIf Rem_tubo > 10000 Then
fanning = 0.0035 + 0.264 / ((Rem_tubo) ^ (0.42))
Else
fanning = 0.0122
End If
'Cálculo da perda de carga no interior dos tubos considerando efeitos de entrada em
escoamento laminar:
If Rem_tubo >= 2300 Then

```

```

deltaP_tubos = (4 * fanning * L * Npt * rom_tubo * (vtm) ^ (2)) / (2 * Di) 'Perda de
carga no interior dos tubos em regime turbulento
Else
x_medio2 = x_D / Rem_tubo
fapp_Re = 3.44 / (x_medio2) ^ (0.5) + (1.25 / (4 * x_medio2) + 16 - 3.44 / (x_medio2)
^ (0.5)) 'Fator de atrito aparente vezes Re
K_x = (fapp_Re - 16) * 4 * x_medio2
deltaP_tubos = 4 * fanning * L * Npt * rom_tubo * (vt) ^ (2) / (2 * Di) + K_x *
rom_tubo * (vt) ^ (2) * Npt / (2) 'Perda de carga no interior dos tubos em regime
laminar
End If
'Perda de carga nos canais de distribuição:
If Npt = 1 Then
deltaP_canais = 0.9 * rom_tubo * (vtm) ^ 2 * Npt / 2
Else
deltaP_canais = 1.6 * rom_tubo * (vtm) ^ 2 * Npt / 2
End If
deltaP_total_tubos = deltaP_canais + deltaP_tubos + deltaP_saida + deltaP_entrada
'Perda de carga total nos tubos
'*****CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PERDA DE CARGA PARA O LADO DO CASCO*****
'Passos normal (Pn) e paralelo (Pp):
If teta = 30 Then
Pn = 0.5 * P
Pp = 0.866 * P
ElseIf teta = 45 Then
Pn = 0.707 * P
Pp = 0.707 * P
Else
Pn = P
Pp = P
End If
Dotl = Ds - Lcf 'Diâmetro do círculo circunscrito aos tubos mais externos do feixe de
tubos
Dctl = Dotl - De 'Diâmetro do círculo formado através do centro dos dois tubos mais
externos
'Área de fluxo cruzado na linha central:
If teta = 30 Or teta = 90 Then
SM = Ls * (Lcf + (Dctl / P) * (P - De))
Else
SM = Ls * (Lcf + (Dctl / Pn) * (P - De))
End If
vm_casco = V_casco * M_molar_casco / (rom_casco * SM)
M_taxa = rom_casco * vm_casco * SM 'Taxa mássica
m = M_taxa / SM 'fluxo cruzado mássico máximo do lado do casco
Rem_casco = De * m / mim_casco 'Reynolds médio do lado do casco
'Valores das constantes utilizadas para o cálculo de ji e fi:
If teta = 30 Then
  If 10000 < Rem_casco <= 100000 Then
    a1 = 0.321
    a2 = -0.388
    a3 = 1.45
    a4 = 0.519
    b1 = 0.372
    b2 = -0.123
    b3 = 7
    b4 = 0.5
  ElseIf 1000 < Rem_casco <= 10000 Then
    a1 = 0.321
    a2 = -0.388
    a3 = 1.45
    a4 = 0.519
    b1 = 0.486
    b2 = -0.152
    b3 = 7
    b4 = 0.5
  ElseIf 100 < Rem_casco <= 1000 Then
    a1 = 0.593
    a2 = -0.477

```

```
a3 = 1.45
a4 = 0.519
b1 = 4.57
b2 = -0.476
b3 = 7
b4 = 0.5
ElseIf 10 < Rem_casco <= 100 Then
a1 = 1.36
a2 = -0.657
a3 = 1.45
a4 = 0.519
b1 = 45.1
b2 = -0.973
b3 = 7
b4 = 0.5
ElseIf Rem_casco = 10 Then
a1 = 1.4
a2 = -0.667
a3 = 1.45
a4 = 0.519
b1 = 48
b2 = -1
b3 = 7
b4 = 0.5
End If
ElseIf teta = 45 Then
If 10000 < Rem_casco <= 100000 Then
a1 = 0.37
a2 = -0.396
a3 = 1.93
a4 = 0.5
b1 = 0.303
b2 = -0.126
b3 = 6.59
b4 = 0.52
ElseIf 1000 < Rem_casco <= 10000 Then
a1 = 0.37
a2 = -0.396
a3 = 1.93
a4 = 0.5
b1 = 0.333
b2 = -0.136
b3 = 6.59
b4 = 0.52
ElseIf 100 < Rem_casco <= 1000 Then
a1 = 0.73
a2 = -0.5
a3 = 1.93
a4 = 0.5
b1 = 3.5
b2 = -0.476
b3 = 6.59
b4 = 0.52
ElseIf 10 < Rem_casco <= 100 Then
a1 = 0.498
a2 = -0.656
a3 = 1.93
a4 = 0.5
b1 = 26.2
b2 = -0.913
b3 = 6.59
b4 = 0.52
ElseIf Rem_casco = 10 Then
a1 = 1.55
a2 = -0.667
a3 = 1.93
a4 = 0.5
b1 = 32
```

```

b2 = -1
b3 = 6.59
b4 = 0.52
End If
ElseIf teta = 90 Then
  If 1000 < Rem_casco <= 10000 Then
    a1 = 0.107
    a2 = -0.266
    a3 = 1.187
    a4 = 0.37
    b1 = 0.082
    b2 = 0.022
    b3 = 6.3
    b4 = 0.378
  ElseIf 10000 < Rem_casco <= 100000 Then
    a1 = 0.37
    a2 = -0.395
    a3 = 1.187
    a4 = 0.37
    b1 = 0.391
    b2 = -0.148
    b3 = 6.3
    b4 = 0.378
  ElseIf 100 < Rem_casco <= 1000 Then
    a1 = 0.408
    a2 = -0.46
    a3 = 1.187
    a4 = 0.37
    b1 = 6.09
    b2 = -0.602
    b3 = 6.3
    b4 = 0.378
  ElseIf 10 < Rem_casco <= 100 Then
    a1 = 0.9
    a2 = -0.631
    a3 = 1.187
    a4 = 0.37
    b1 = 32.1
    b2 = -0.963
    b3 = 6.3
    b4 = 0.378
  ElseIf Rem_casco = 10 Then
    a1 = 0.97
    a2 = -0.667
    a3 = 1.187
    a4 = 0.37
    b1 = 35
    b2 = -1
    b3 = 6.3
    b4 = 0.378
  End If
End If
a = (a3) / (1 + 0.14 * (Rem_casco) ^ (a4))
ji = a1 * (1.33 * De / P) ^ (a) * (Rem_casco) ^ (a2) 'Fator Ji
b = b3 / (1 + 0.14 * (Rem_casco) ^ (b4))
fi = b1 * (1.33 * De / P) ^ b * (Rem_casco) ^ (b2) 'Fator de atrito fi
'***Calculo dos fatores de correção***
'Fatores de correção para vazamentos (Jl e Rl):
teta_Ds = 2 * WorksheetFunction.Acos(1 - 2 * Bc / 100) 'Ângulo central formado pela
interceção do corte do defletor com a parede interna do casco
teta_ctl = 2 * WorksheetFunction.Acos((Ds / Dctl) * (1 - 2 * Bc / 100)) 'Ângulo
formado pela interceção do corte do defletor com o diâmetro Dctl
teta_Ds_graus = teta_Ds * 180 / WorksheetFunction.Pi()
teta_ctl_graus = teta_ctl * 180 / WorksheetFunction.Pi()
Fw = (teta_ctl_graus) / 360 - Math.Sin(teta_ctl) / (2 * WorksheetFunction.Pi())
'Fração de tubos na janela do defletor
Scd = WorksheetFunction.Pi() * Ds * (Lcd / 2) * ((360 - teta_Ds_graus) / 360) 'Área
de vazamento entre o casco e o defletor (para um defletor)

```



```

Std = WorksheetFunction.Pi() / 4 * ((Ltd + De) ^ (2) - (De) ^ 2) * Ntt * (1 - Fw)
'Área de vazamento entre o tubo e o defletor (para um defletor)
Rlm = (Scd + Std) / SM 'Razão entre as áreas de vazamento e área de fluxo cruzado
puro
Rs = Scd / (Scd + Std) 'Razão da área de vazamento casco-defletor e soma das áreas de
vazamento
Jl = 0.44 * (1 - Rs) + (1 - 0.44 * (1 - Rs)) * Exp(-2.2 * Rlm)
p_minusc = -0.15 * (1 + Rs) + 0.8
Rl = Exp(-1.33 * (1 + Rs) * (Rlm) ^ (p_minusc))
'Fatores de correção para efeitos de bypass no feixe de tubos (Jb e Rb):
If Rem_casco < 2300 Then
Cbh = 1.35
Else
Cbh = 1.25
End If
Nc = (Ds / Pp) * (1 - 2 * Bc / 100) 'Número de fileiras de tubos entre dois cortes do
defletor
Rss = Nss / Nc
Fbp = ((Ds - Dotl) * Ls) / SM 'Fração da área da seção do fluxo disponível ao fluxo
de baypass
Jb = Exp(-Cbh * Fbp * (1 - (2 * Rss) ^ (1 / 3))) 'Fator de correção para efeitos de
bypass no feixe de tubos na transferência de calor
If Rem_casco < 2300 Then
Cbh2 = 4.5
Else
Cbh2 = 3.7
End If
Rb = Exp(-Cbh2 * Fbp * (1 - (2 * Rss) ^ (1 / 3))) 'Fator de correção para efeitos de
bypass no feixe de tubos na perda de carga
Fc = 1 - 2 * Fw 'Fração total de tubos numa seção de fluxo cruzado puro
Jc = 0.55 + 0.72 * Fc 'Fator de correção para a transferência de calor devido aos
efeitos de configuração do defletor
Ntc = (Nc + Ncw) * (NB + 1) 'Número total de fileiras de tubos cruzadas no trocador
If Rem_casco > 100 Then
Jr = 1 'Fator de correção para o gradiente de temperatura adverso no fluxo laminar
ElseIf Rem_casco <= 20 Then
Jr = (10 / Ntc) ^ 0.18
Else
Jrl = (10 / Ntc) ^ 0.18
Jr = Jrl + ((20 - Rem_casco) / 80) * (Jrl - 1)
End If
'Fatores de correção para o espaçamento entre defletores diferente na entrada e/ou
saída:
If Rem_casco < 2300 Then
n = 0.6
Else
n = 0.3
End If
Js = 1 'Fator de correção para o espaçamento entre defletores diferente na entrada
e/ou saída para a transferência de calor
If Rem_casco < 2300 Then
n = 1
Else
n = 0.2
End If
Rs = (Ls / Lsi) ^ (2 - n) + (Ls / Lsi) ^ (2 - n) 'Fator de correção para o espaçamento
entre defletores diferente na entrada e/ou saída para a perda de carga
J_total = Jc * Jl * Jb * Jr * Js 'Correção na transferência de calor
'Cálculo do coeficiente de transferência de calor:
Prm_casco = cpm_casco * mim_casco / km_casco 'Prandtl médio do lado do casco
hi_ideal = ji * cpm_casco * m * (Prm_casco) ^ (-2 / 3) 'Coeficiente de transferência
de calor ideal
he = hi_ideal * J_total 'Coeficiente de transferência de calor corrigido
'Cálculo da perda de carga:
deltaP_ideal = (2 * fi * Nc * (m) ^ (2)) / (rom_casco) 'Perda de carga ideal
deltaPc = deltaP_ideal * (NB - 1) * Rb * Rl 'Perda de carga no fluxo cruzado puro
Swg = ((WorksheetFunction.Pi()) / 4) * ((Ds) ^ (2)) * (teta_Ds / 360 -
Math.Sin(teta_Ds) / (WorksheetFunction.Pi()))

```

```

Swt = Ntt * Fw * ((WorksheetFunction.Pi()) / 4) * (De) ^ 2
Sw = -Swg + Swt 'Área de fluxo na janela do defletor
mw = M_taxa / (SM * Sw) ^ (1 / 2) 'Fluxo mássico
Ntw = Ntt * Fw 'Número de tubos na janela do defletor
Ncw = (0.8 / Pp) * (Ds * Bs / 100 - (Ds - Dctl) / 2) 'Número de fileiras reais de
fluxo cruzado em cada janela do defletor
Dw = 4 * Sw / (WorksheetFunction.Pi() * De * Ntw + WorksheetFunction.Pi() * Ds *
(teta_Ds / 360)) 'Diâmetro equivalente da janela
If Rem_casco < 2300 Then
deltaPw = NB * (26 * mw * mim_casco / rom_casco * (Ncw / (P - De) + Ls / (Dw) ^ (2))
+ 2 * ((mw) ^ (2)) / (2 * rom_casco)) * Rl
Else
deltaPw = NB * ((2 + 0.6 * Ncw) * ((mw) ^ (2)) / (2 * rom_casco)) 'Perda de carga nas
janelas dos defletores
End If
deltaPe = deltaP_ideal * (1 + Ncw / Nc) * Rb * Rs 'Perda de carga nas seções de
entrada e saída do trocador
A_bocal_e = (WorksheetFunction.Pi() * (Dibocal) ^ 2) / 4
A_escape_e = WorksheetFunction.Pi() * Dibocal * Hibocal
A_bocal_s = (WorksheetFunction.Pi() * (Dobocal) ^ 2) / 4
A_escape_s = WorksheetFunction.Pi() * Dobocal * Hobocal
v_bocal_e = V_casco * M_molar_casco / (A_bocal_e * roe_casco)
v_bocal_s = V_casco * M_molar_casco / (A_bocal_s * rof_casco)
K_entrada = 1 + (A_bocal_e / A_escape_e) ^ 2 'Adimensional K com uso de quebra jato
deltaP_bocal_e = (K_entrada * roe_casco * (v_bocal_e) ^ 2) / 2 'Perda de carga nos
bocais de entrada e saída do trocador
K_saida = 1 + (A_bocal_s / A_escape_s) ^ 2
deltaP_bocal_s = (K_saida * rof_casco * (v_bocal_s) ^ 2) / 2
deltaP_total_casco = deltaPc + deltaPw + deltaPe + deltaP_bocal_e + deltaP_bocal_s
'Perda de carga total no casco
*****CORREÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PERDA DE CARGA*****
'Correção para o lado dos tubos:
Tp = Tm_tubo + (Tm_casco - Tm_tubo) / (1 + hi_tubo / he) 'Temperatura média da parede
'Cálculo das propriedades físicas do fluido dos tubos na Tp:
TpR = Tp * 1.8 'Transforma temperatura em Kelvin para Rankine
Tr_tubo = (TpR / Tc_tubo) 'Temperatura reduzida
kp_tubo = (kta + ktb * (1 - Tr_tubo) ^ (2 / 3) + ktc * TpR) * 1.73 'Condutividade
térmica na Tp
rop_tubo = (rota + rotb * TpR + rotc * (TpR) ^ (2) + rotd / (Tc_tubo + 62 - TpR)) *
16.02 'Massa específica na Tp
cpp_tubo = (cpta + cptb * TpR + cptc * (TpR) ^ (2) + cptd / (1 - Tr_tubo)) * 4183.3
'Calor específico na Tp
mip_tubo = (2.42 * Exp(mita + mitb / TpR + mitc / (TpR) ^ 2 + mitd / (TpR) ^ 3)) *
4.13 * (10) ^ (-4) 'Viscosidade na Tp
If Rem_casco < 2300 Then
n_fi = 0.14
ElseIf Rem_casco >= 2300 Then
If Tp > Tm Then
n_fi = 0.11
ElseIf Tm > Tp Then
n_fi = 0.25
End If
End If
fi_tubo = (mim_tubo / mip_tubo) ^ n_fi 'Correção da viscosidade
hi_tubo_corrigido = hi_tubo * fi_tubo 'hi corrigido para o lado dos tubos
If Rem_tubo >= 2300 Then
deltaP_tubos = (4 * fanning * L * Npt * rom_tubo * (vtm) ^ (2)) / (2 * Di * fi_tubo)
'Perda de carga no interior dos tubos em regime turbulento
Else
x_medio2 = x_D / Rem_tubo
fapp_Re = 3.44 / (x_medio2) ^ (0.5) + (1.25 / (4 * x_medio2) + 16 - 3.44 / (x_medio2)
^ (0.5)) 'Fator de atrito aparente vezes Re
K_x = (fapp_Re - 16) * 4 * x_medio2
deltaP_tubos = 4 * fanning * L * Npt * rom_tubo * (vtm) ^ (2) / (2 * Di * fi_tubo) +
K_x * rom_tubo * (vtm) ^ (2) * Npt / (2 * fi_tubo) 'Perda de carga no interior dos
tubos em regime laminar
End If

```

```

deltaP_total_tubos_corrigido = deltaP_canais + deltaP_tubos + deltaP_saida +
deltaP_entrada 'Perda de carga total corrigida para o lado dos tubos
'Correção para o lado do casco:
'Cálculo das propriedades físicas do fluido do casco na temperatura da parede:
Tr_casco = (TpR / Tc_casco) 'Temperatura reduzida
kp_casco = (KA + KB * (1 - Tr_casco) ^ (2 / 3) + KC * TpR) * 1.73 'Condutividade
térmica
rop_casco = (ROA + ROB * TpR + ROC * (TpR) ^ (2) + ROD / (Tc_casco + 62 - TpR)) *
16.02 'Massa específica
cpp_casco = (cpa + cpb * TpR + cpc * (TpR) ^ (2) + cpd / (1 - Tr_casco)) * 4183.3
'Calor específico
mip_casco = (2.42 * Exp(mia + mib / TpR + mic / (TpR) ^ 2 + midd / (TpR) ^ 3)) * 4.13
* (10) ^ (-4) 'Viscosidade
fi_casco = (mim_casco / mip_casco) ^ (n_fi) 'Correção da viscosidade
hi_ideal_corrigido = ji * cpm_casco * m * ((Prm_casco) ^ (-2 / 3)) * fi_casco
'Coeficiente de transferência de calor ideal corrigido
he_corrigido = hi_ideal_corrigido * J_total 'Coeficiente de transferência de calor
corrigido para o lado do casco
'Calcula perda de carga:
deltaP_ideal = (2 * fi * Nc * (m) ^ (2)) / (rom_casco * fi_casco) 'Perda de carga
ideal
deltaPc = deltaP_ideal * (NB - 1) * Rb * Rl 'Perda de carga no fluxo cruzado puro
deltaP_total_casco_corrigido = deltaPc + deltaPw + deltaPe + deltaP_bocal_e +
deltaP_bocal_s 'Perda de carga total corrigida para o lado do casco
'*****CÁLCULO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA
DE CALOR*****
Ae = WorksheetFunction.Pi() * De * L 'Área de troca térmica de um tubo
Ai = WorksheetFunction.Pi() * Di * L 'Área superficial interna de um tubo
U = 1 / (Ae / (hi_tubo_corrigido * Ai) + (Rdi * Ae / Ai) + (Log(De / Di) * De) / (2
* k) + Rde + 1 / he_corrigido) 'Coeficiente global de transferência de calor
Atotal = Ntt * Ae 'Área total de troca térmica
'Atribuição das temperaturas, calores específicos e taxas mássicas dos fluidos quente
e frio:
If Te_casco > Te_tubo Then
cpq = cpe_casco 'Calor específico do fluido quente
wq = V_casco * M_molar_casco 'Taxa mássica do fluido quente
cpf = cpe_tubo 'Calor específico do fluido frio
wf = V_tubo * M_molar_tubo 'Vazão mássica do fluido frio
Else
cpq = cpe_tubo
wq = V_tubo * M_molar_tubo
cpf = cpe_casco
wf = V_casco * M_molar_casco
End If
'***Método da Efetividade - NUT***
Cq = wq * cpq 'Capacidade calorífica do fluido quente
Cf = wf * cpf 'Capacidade calorífica do fluido frio
If Cq < Cf Then
Cmin = Cq 'Capacidade calorífica mínima
Cmax = Cf 'Capacidade calorífica máxima
Else
Cmin = Cf
Cmax = Cq
End If
Nut = U * Atotal / Cmin 'Número de unidades de troca térmica
C = Cmin / Cmax
e = 2 * (1 + C + (1 + (C) ^ 2) ^ (1 / 2)) * (1 + Exp(-Nut * (1 + (C) ^ 2) ^ (1 / 2)))
/ (1 - Exp(-Nut * (1 + (C) ^ 2) ^ (1 / 2))) ^ (-1) 'Efetividade
q = e * Cmin * (Tqe - Tfe) 'Taxa de transferência de calor real total
qmax = q / e 'Taxa de transferência de calor máxima
Tfs = q / Cf + Tfe 'Temperatura de saída do fluido frio
Tqs = Tqe - q / Cq 'Temperatura de saída do fluido quente
'Atribuição das temperaturas de saída dos fluidos quente e frio calculadas pelo método
da Efetividade-NUT:
If Te_casco > Te_tubo Then
Tf_casco_efetividade = Tqs
Tf_tubo_efetividade = Tfs
Else

```

```

Tf_casco_efetividade = Tfs
Tf_tubo_efetividade = Tqs
End If
Cells(44, "F") = Tf_casco_efetividade
Cells(45, "F") = Tf_tubo_efetividade
dif_casco = Abs(Tf_casco - Tf_casco_efetividade) 'Diferença entre as temperaturas
finais estimada e calculada do casco
dif_tubo = Abs(Tf_tubo - Tf_tubo_efetividade) 'Diferença entre as temperaturas finais
estimada e calculada dos tubos
'Nova estimativa para as temperaturas finais:
Tf_casco = Tf_casco_efetividade
Tf_tubo = Tf_tubo_efetividade
'MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS ESTIMADAS E CALCULADAS - DIFERENÇAS:
Cells(w, "P") = Tf_casco
Cells(w, "Q") = Tf_tubo
Cells(w, "R") = dif_casco
Cells(w, "S") = dif_tubo
'PARA MUDAR A LINHA NO CONTROLE
w = w + 1
Loop
'#####Final da iteração para encontrar as temperaturas finais#####
Pf_casco = (Pe_casco - deltaP_total_casco_corrigido) * 0.001 'Pressão final no casco
Pf_tubo = (Pe_tubo - deltaP_total_tubo_corrigido) * 0.001 'Pressão final nos tubos
'Inserção dos resultados obtidos na Planilha Auxiliar:
Cells(7, "L") = ke_casco
Cells(8, "L") = roe_casco
Cells(9, "L") = cpe_casco
Cells(10, "L") = mie_casco
Cells(7, "M") = kf_casco
Cells(8, "M") = rof_casco
Cells(9, "M") = cpf_casco
Cells(10, "M") = mif_casco
Cells(7, "K") = km_casco
Cells(8, "K") = rom_casco
Cells(9, "K") = cpm_casco
Cells(10, "K") = mim_casco
Cells(7, "D") = ke_tubo
Cells(8, "D") = roe_tubo
Cells(9, "D") = cpe_tubo
Cells(10, "D") = mie_tubo
Cells(7, "E") = kf_tubo
Cells(8, "E") = rof_tubo
Cells(9, "E") = cpf_tubo
Cells(10, "E") = mif_tubo
Cells(7, "C") = km_tubo
Cells(8, "C") = rom_tubo
Cells(9, "C") = cpm_tubo
Cells(10, "C") = mim_tubo
Cells(15, "D") = vtm
Cells(16, "D") = Rem_tubo
Cells(17, "D") = Prm_tubo
Cells(18, "D") = x_medio
Cells(19, "D") = fa_N
Cells(20, "D") = Kl_f
Cells(21, "D") = K2Pr
Cells(22, "D") = Nusselt
Cells(23, "D") = hi_tubo
Cells(26, "D") = v_bocal_e
Cells(27, "D") = v_bocal_f
Cells(28, "D") = deltaP_entrada
Cells(29, "D") = deltaP_saida
Cells(30, "D") = fanning
Cells(31, "D") = deltaP_tubos
Cells(32, "D") = deltaP_canais
Cells(33, "D") = deltaP_total_tubos
Cells(12, "L") = Pn
Cells(13, "L") = Pp
Cells(14, "L") = Dotl

```

```

Cells(15, "L") = Dct1
Cells(16, "L") = SM
Cells(17, "L") = vm_casco
Cells(18, "L") = M_taxa
Cells(19, "L") = m_
Cells(20, "L") = Rem_casco
Cells(21, "L") = a1
Cells(22, "L") = a2
Cells(23, "L") = a3
Cells(24, "L") = a4
Cells(25, "L") = b1
Cells(26, "L") = b2
Cells(27, "L") = b3
Cells(28, "L") = b4
Cells(29, "L") = a
Cells(30, "L") = j_i
Cells(31, "L") = b
Cells(32, "L") = f_i
Cells(33, "L") = teta_Ds
Cells(34, "L") = teta_ctl
Cells(35, "L") = Fw
Cells(36, "L") = Scd
Cells(37, "L") = Std
Cells(38, "L") = Rlm
Cells(39, "L") = Rs
Cells(40, "L") = J1
Cells(41, "L") = P
Cells(42, "L") = R1
Cells(43, "L") = Nc
Cells(44, "L") = Rss
Cells(45, "L") = Fbp
Cells(46, "L") = Jb
Cells(47, "L") = Rb
Cells(48, "L") = Fc
Cells(49, "L") = Jc
Cells(50, "L") = Ntc
Cells(51, "L") = Jr
Cells(52, "L") = Js
Cells(53, "L") = Rs
Cells(54, "L") = J_total
Cells(55, "L") = Prm_casco
Cells(56, "L") = hi_ideal
Cells(57, "L") = he
Cells(60, "L") = deltaP_ideal
Cells(61, "L") = deltaPc
Cells(62, "L") = Swg
Cells(63, "L") = Swt
Cells(64, "L") = Sw
Cells(65, "L") = mw
Cells(66, "L") = Ntw
Cells(67, "L") = Ncw
Cells(68, "L") = Dw
Cells(69, "L") = deltaPw
Cells(70, "L") = deltaPe
Cells(71, "L") = A_bocal_e
Cells(72, "L") = A_escape_e
Cells(73, "L") = A_bocal_s
Cells(74, "L") = A_escape_s
Cells(75, "L") = v_bocal_e
Cells(76, "L") = v_bocal_s
Cells(77, "L") = K_entrada
Cells(78, "L") = deltaP_bocal_e
Cells(79, "L") = K_saida
Cells(80, "L") = deltaP_bocal_s
Cells(81, "L") = deltaP_total_casco
Cells(12, "F") = Tp
Cells(7, "F") = kp_tubo
Cells(8, "F") = rop_tubo

```

```

Cells(9, "F") = cpp_tubo
Cells(10, "F") = mip_tubo
Cells(24, "D") = fi_tubo
Cells(25, "D") = hi_tubo_corrigido
Cells(34, "D") = deltaP_total_tubos_corrigido
Cells(35, "D") = Pf_tubo
Cells(7, "N") = kp_casco
Cells(8, "N") = rop_casco
Cells(9, "N") = cpp_casco
Cells(10, "N") = mip_casco
Cells(58, "L") = fi_casco
Cells(59, "L") = he_corrigido
Cells(82, "L") = deltaP_total_casco_corrigido
Cells(83, "L") = Pf_casco
Cells(46, "C") = Ae
Cells(47, "C") = Ai
Cells(48, "C") = Atotal
Cells(49, "C") = U
Cells(50, "C") = cpq
Cells(51, "C") = cpf
Cells(52, "C") = wq
Cells(53, "C") = wf
Cells(54, "C") = Cq
Cells(55, "C") = Cf
Cells(56, "C") = Cmin
Cells(57, "C") = Cmax
Cells(58, "C") = Nut
Cells(59, "C") = C
Cells(60, "C") = e
Cells(61, "C") = qmax
Cells(62, "C") = q
Cells(39, "C") = Tqe
Cells(40, "C") = Tqs
Cells(41, "C") = Tfe
Cells(42, "C") = Tfs
'Insere resultados no formulário
Tfcasco.Clear 'Limpa a ListBox
Tfcasco.AddItem (Format(Tf_casco_efetividade, "0.00")) 'Insere resultado
Tftubo.Clear
Tftubo.AddItem (Format(Tf_tubo_efetividade, "0.00"))
Pfcasco.Clear
Pfcasco.AddItem (Format(Pf_casco, "0.00"))
Pftubo.Clear
Pftubo.AddItem (Format(Pf_tubo, "0.00"))
deltaPcasco.Clear
deltaPcasco.AddItem (Format(deltaP_total_casco_corrigido * 0.001, "0.0000"))
deltaPtubo.Clear
deltaPtubo.AddItem (Format(deltaP_total_tubos_corrigido * 0.001, "0.0000"))
hecasco.Clear
hecasco.AddItem (Format(he_corrigido * 0.001, "0.000"))
hitubo.Clear
hitubo.AddItem (Format(hi_tubo_corrigido * 0.001, "0.000"))
taxa_calor.Clear
taxa_calor.AddItem (Format(q * 0.001, "0.000"))
coef_U.Clear
coef_U.AddItem (Format(U, "0.000"))
'Insere resultados na planilha de exportação de resultados
Sheets("Exportação de resultados").Select
Cells(6, "E") = Tf_casco_efetividade
Cells(10, "E") = Tf_tubo_efetividade
Cells(7, "E") = (Pe_casco - deltaP_total_casco_corrigido) * 0.001
Cells(11, "E") = (Pe_tubo - deltaP_total_tubos_corrigido) * 0.001
Cells(13, "E") = hi_tubo_corrigido * 0.001
Cells(9, "E") = he_corrigido * 0.001
Cells(12, "E") = deltaP_total_tubos_corrigido * 0.001
Cells(8, "E") = deltaP_total_casco_corrigido * 0.001
Cells(15, "E") = U
Cells(14, "E") = q * 0.001

```

```

End Sub
Private Sub CommandButton11_Click()
Arranjo_tubos.Show
End Sub
Private Sub CommandButton12_Click()
Comprimento_efetivo_tubo.Show
End Sub
Private Sub CommandButton13_Click()
Corte_defletor.Show
End Sub
Private Sub CommandButton14_Click()
Espaçamento_central_defletor.Show
End Sub
Private Sub CommandButton15_Click()
Folga_casco_defletor.Show
End Sub
Private Sub CommandButton16_Click()
Tabela_Rd.Show
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()
Tfcasco = ""
Tftubo = ""
Pf_tubo = ""
Pf_casco = ""
deltaPcasco = ""
deltaPtubo = ""
hecasco = ""
hitubo = ""
taxa_calor = ""
coef_U = ""
'Limpa caixas de texto
Te_cascoc = ""
Pe_cascoc = ""
V_cascoc = ""
Te_tubot = ""
Pe_tubot = ""
V_tubot = ""
Dsc = ""
Nssc = ""
Dibocalc = ""
Dobocalc = ""
Hibocalc = ""
Hobocalc = ""
Nttt = ""
tetat = ""
Pt = ""
Lt = ""
Det = ""
Dit = ""
Npt = ""
k_materialt = ""
Dibocal_tubot = ""
Dobocal_tubot = ""
Bcd = ""
NBd = ""
Lcdd = ""
Ltdd = ""
Lcfd = ""
Lsid = ""
Lsd = ""
KA = ""
KB = ""
KC = ""
KD = ""
ROA = ""
ROB = ""
ROC = ""

```

```

ROD = ""
cp_A = ""
cp_B = ""
cp_C = ""
cp_D = ""
mi_A = ""
mi_B = ""
mi_C = ""
mi_D = ""
kt_A = ""
kt_B = ""
kt_C = ""
kt_D = ""
rot_A = ""
rot_B = ""
rot_C = ""
rot_D = ""
cpt_A = ""
cpt_B = ""
cpt_C = ""
cpt_D = ""
mit_A = ""
mit_B = ""
mit_C = ""
mit_D = ""
T_casco = ""
T_tubo = ""
M_molar_cascoc = ""
M_molar_tubot = ""
fator_incrustacao_i = ""
fator_incrustacao_e = ""
End Sub
Private Sub CommandButton3_Click()
'Vai para planilha
Application.Visible = True
Programa.Hide
End Sub
Private Sub CommandButton4_Click()
'Exporta resultados
Dim Data As String ' a data será salva no arquivo e será uma informação que a pessoa
irá colocar
Dim operador As String
Dim nomedoarquivo As String
Sheets("Exportação de resultados").Select
operador = InputBox("Digite o nome do operador", "Identificação do operador") ' irá
abrir tipo uma "janelinha" para o operador entrar com a informação do seu nome
Cells(2, 3) = operador ' lugar na planilha que irá armazenar a informação do operador
Data = VBA.Format(VBA.Date, "dd.mm.yyyy") 'irá abrir tipo uma "janelinha" para o
operador entrar com a informação da data
Cells(3, 3) = Data ' lugar na planilha que irá armazenar a informação da data
ActiveSheet.PageSetup.PrintArea = Range("$A$1:$J$15").Address ' imprimir na tela os
valores
nomedoarquivo = ThisWorkbook.Path & Application.PathSeparator & operador & "_" & Data
& ".pdf"
ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, Filename:=nomedoarquivo,
Quality:=xlQualityStandard, Includedocproperties:=False, IgnorePrintAreas:=False,
Openafterpublish:=True
End Sub
Private Sub CommandButton7_Click()
'Vai para planilha
Application.Visible = True
BellDelaware.Hide
End Sub
Private Sub CommandButton8_Click()
Tabela_Rd.Show
End Sub
Private Sub CommandButton9_Click()
Tiras_selagem.Show

```



```

End Sub
Private Sub fluido_casco_Change()
Dim fluido As String
Dim linha As Integer
fluido = Programa.fluido_casco.Value
For linha = 4 To Range("dados").Rows.Count
  If fluido = Planilha2.Cells(linha, 1).Value Then
    Programa.KA = Planilha2.Cells(linha, 2).Value
    Programa.KB = Planilha2.Cells(linha, 3).Value
    Programa.KC = Planilha2.Cells(linha, 4).Value
    Programa.KD = Planilha2.Cells(linha, 5).Value
    Programa.ROA = Planilha2.Cells(linha, 6).Value
    Programa.ROB = Planilha2.Cells(linha, 7).Value
    Programa.ROC = Planilha2.Cells(linha, 8).Value
    Programa.ROD = Planilha2.Cells(linha, 9).Value
    Programa.cp_A = Planilha2.Cells(linha, 10).Value
    Programa.cp_B = Planilha2.Cells(linha, 11).Value
    Programa.cp_C = Planilha2.Cells(linha, 12).Value
    Programa.cp_D = Planilha2.Cells(linha, 13).Value
    Programa.mi_A = Planilha2.Cells(linha, 14).Value
    Programa.mi_B = Planilha2.Cells(linha, 15).Value
    Programa.mi_C = Planilha2.Cells(linha, 16).Value
    Programa.mi_D = Planilha2.Cells(linha, 17).Value
    Programa.T_casco = Planilha2.Cells(linha, 18).Value
    Programa.M_molar_cascoc = Planilha2.Cells(linha, 19).Value
  End If
Next
End Sub
Private Sub fluido_casco_Enter()
Dim linha As Integer
Dim fluido As String
Dim i As Integer
For linha = 4 To Range("dados").Rows.Count
fluido = Planilha2.Cells(linha, 1).Value
Programa.fluido_casco.AddItem (fluido)
Next
End Sub
Private Sub fluido_tubo_Change()
Dim fluido As String
Dim linha As Integer
fluido = Programa.fluido_tubo.Value
For linha = 4 To Range("dados").Rows.Count
  If fluido = Planilha2.Cells(linha, 1).Value Then
    Programa.kt_A = Planilha2.Cells(linha, 2).Value
    Programa.kt_B = Planilha2.Cells(linha, 3).Value
    Programa.kt_C = Planilha2.Cells(linha, 4).Value
    Programa.kt_D = Planilha2.Cells(linha, 5).Value
    Programa.rot_A = Planilha2.Cells(linha, 6).Value
    Programa.rot_B = Planilha2.Cells(linha, 7).Value
    Programa.rot_C = Planilha2.Cells(linha, 8).Value
    Programa.rot_D = Planilha2.Cells(linha, 9).Value
    Programa.cpt_A = Planilha2.Cells(linha, 10).Value
    Programa.cpt_B = Planilha2.Cells(linha, 11).Value
    Programa.cpt_C = Planilha2.Cells(linha, 12).Value
    Programa.cpt_D = Planilha2.Cells(linha, 13).Value
    Programa.mit_A = Planilha2.Cells(linha, 14).Value
    Programa.mit_B = Planilha2.Cells(linha, 15).Value
    Programa.mit_C = Planilha2.Cells(linha, 16).Value
    Programa.mit_D = Planilha2.Cells(linha, 17).Value
    Programa.T_tubo = Planilha2.Cells(linha, 18).Value
    Programa.M_molar_tubot = Planilha2.Cells(linha, 19).Value
  End If
Next
End Sub
Private Sub fluido_tubo_Enter()
Dim linha As Integer
Dim fluido As String
Dim i As Integer

```

```
For linha = 4 To Range("dados").Rows.Count
fluido = Planilha2.Cells(linha, 1).Value
Programa.fluido_tubo.AddItem (fluido)
Next
End Sub
```

ANEXO – Propriedades físicas dos fluidos

Tabela 1A – Temperatura crítica e massa molar de líquidos.

Fluido	Temperatura crítica (°R)	Massa molar (kg/mol)
Acetato de etila	941,8	0,0881
Acetileno	555,7	0,02604
Acetona	916,4	0,05808
Ácido acético	1070,6	0,06005
Água	1165,2	0,01802
Amônia	730	0,01703
Anilina	1258,2	0,09306
Ar	238,3	0,02896
Benzeno	1012	0,07811
Butanol	1010,1	0,07412
Decanol	1248	0,15828
Etano	550,1	0,03007
Etanol	929,3	0,0461
Etileno Glycol	1170	0,06207
Freon 11	848,2	0,1374
Freon 113	877,2	0,18739
Freon 114	753,7	0,17092
Freon 12	692,6	0,12092
Freon 21	812,3	0,10292
Freon 22	664,7	0,08648
Glicerina	1305	0,09209
i-butano	735	0,05812
i-propanol	914,8	0,06009
Isobutanol	990	0,07412
Isopentano	828,4	0,07215
Metano	344,2	0,01604
Metanol	923,7	0,032
n-butano	765,6	0,05812
n-heptano	972,3	0,1002
n-hexano	914,1	0,08617
n-octano	1024	0,1142
n-pentano	845,2	0,07215
Octanol	1184,7	0,13023
Propano	666,2	0,04409
Propanol	965,9	0,06009
Propileno Glycol	1123,2	0,0761
Propileno	657,4	0,04208
Tolueno	1069	0,09213

Fonte: Almeida (2003).

Tabela 2A – Constantes para cálculo da condutividade térmica de líquidos.

Fluido	A₁	B₁	C₁
Acetato de etila	0,02882	0,08890	0,00000
Acetileno	0,01959	0,02220	0,00000
Acetona	0,15112	0,02970	-0,00010
Ácido acético	0,04949	0,07990	0,00000
Água	-1,42270	1,62040	0,00133
Amônia	0,10509	0,43990	0,00000
Anilina	0,04865	0,84810	0,00000
Ar	0,00000	0,00000	0,00000
Benzeno	0,01690	0,12670	0,00000
Butanol	0,03491	0,08660	0,00000
Decanol	0,04155	0,07140	0,00000
Etano	0,01820	0,12130	0,00000
Etanol	0,05356	0,08340	0,00000
Etileno Glycol	-0,00650	0,12660	0,00013
Freon 11	0,03285	0,04860	0,00000
Freon 113	0,09400	0,62670	0,00000
Freon 114	0,02863	0,04270	0,00000
Freon 12	0,00914	0,08660	0,00000
Freon 21	0,02621	0,07420	0,00000
Freon 22	0,01376	0,10700	0,00000
Glicerina	0,23330	-0,10200	0,00000
i-butano	0,01440	0,09600	0,00000
i-propanol	0,04437	0,07850	-0,00002
Isobutanol	0,05583	0,05910	0,00000
Isopentano	0,01022	0,10270	0,00000
Metano	0,02912	0,14030	0,00000
Metanol	0,07814	0,06350	0,00000
n-butano	0,01670	0,11130	0,00000
n-heptano	0,01470	0,09800	0,00000
n-hexano	0,01436	0,09570	0,00000
n-octano	0,01461	0,09740	0,00000
n-pentano	0,01540	0,10270	0,00000
Octanol	0,11077	-0,00004	0,00000
Propano	0,01740	0,11600	0,00000
Propanol	0,05577	0,05650	0,00000
Propileno Glycol	0,02026	0,15760	0,00000
Propileno	0,01900	0,12670	0,00000
Tolueno	0,01505	0,10030	0,00000

Fonte: Almeida (2003).

Tabela 3A – Constantes para cálculo da massa específica de líquidos.

Fluido	A_2	B_2	C_2	D_1
Acetato de etila	139,43800	-0,21027	0,00013	-2225,10000
Acetileno	94,89880	-0,23693	0,00029	-2297,54000
Acetona	70,27000	-0,03541	0,00000	-1025,50000
Ácido acético	119,64300	-0,11914	0,00006	-2169,13000
Água	57,00000	0,03337	-0,00004	-838,10000
Amônia	62,66420	-0,04273	0,00001	-948,53000
Anilina	114,25700	-0,09797	0,00004	-1679,52000
Ar	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Benzeno	43,85000	0,06106	-0,00008	0,00000
Butanol	78,39630	-0,05181	0,00001	-902,78000
Decanol	79,10000	-0,06800	0,00003	168,60000
Etano	18,98000	0,12000	-0,00022	0,00000
Etanol	40,40900	0,05531	-0,00007	-599,21000
Etileno Glycol	83,59000	-0,02434	0,00000	-832,30000
Freon 11	126,07000	-0,03801	-0,00003	-1350,37000
Freon 113	139,60000	-0,06910	0,00000	-2069,40000
Freon 114	122,80000	-0,00667	-0,00007	-2888,00000
Freon 12	133,18800	-0,07416	-0,00001	-1923,55000
Freon 21	122,20000	-0,04960	-0,00002	-1570,00000
Freon 22	187,08300	-0,30728	0,00023	-2539,32000
Glicerina	89,21700	-0,01454	0,00000	-1421,00000
i-butano	17,96000	0,10980	-0,00015	0,00000
i-propanol	66,62000	-0,02851	0,00000	-1150,80000
Isobutanol	74,82000	-0,05413	0,00003	-3021,00000
Isopentano	59,51000	-0,04051	0,00001	-811,70000
Metano	50,09800	-0,13810	0,00029	-1574,00000
Metanol	75,17700	-0,05223	0,00002	-1323,09000
n-butano	28,84000	0,07033	-0,00011	0,00000
n-heptano	58,24000	-0,02580	0,00000	-1002,70000
n-hexano	37,14000	0,03995	-0,00006	0,00000
n-octano	41,16000	0,03308	-0,00005	0,00000
n-pentano	58,41000	-0,03366	0,00000	-568,60000
Octanol	61,86700	-0,01255	-0,00001	-877,82000
Propano	39,33000	0,02900	-0,00008	0,00000
Propanol	61,23380	-0,00400	-0,00002	-1009,60000
Propileno Glycol	76,21000	-0,01716	-0,00001	235,10000
Propileno	60,06150	-0,05989	0,00005	-1597,60000
Tolueno	32,20000	0,08920	-0,00009	0,00000

Fonte: Almeida (2003).

Título 4A – Constantes para cálculo do calor específico de líquidos.

Fluido	A₃	B₃	C₃	D₂
Acetato de etila	0,863180	-0,001519	1,4645E-06	0,00473644
Acetileno	0,576130	0,000371	-5,1527E-07	0,03567240
Acetona	-0,755000	0,003880	-4,1690E-06	0,16450000
Ácido acético	0,302980	0,000166	2,5447E-07	0,01075400
Água	1,207000	-0,000870	2,5447E-07	0,01075400
Amônia	-3,374640	0,163558	-1,4867E-05	0,04094130
Anilina	0,459280	-0,000159	3,2599E-07	0,00581816
Ar	0,000000	0,000000	0,0000E-0	0,00000000
Benzeno	0,638590	-0,001008	1,1200E-06	0,00000000
Butanol	4,073510	-0,001135	9,4509E-06	0,00007936
Decanol	0,264000	0,000360	2,8320E-07	-0,00972300
Etano	1,266650	-0,004551	7,3013E-06	0,00313529
Etanol	6,001480	-0,017350	1,4329E-05	-0,01108570
Etileno Glycol	0,293900	0,000460	1,2510E-07	-0,00358000
Freon 11	0,017700	0,000614	-6,3300E-07	0,01755000
Freon 113	0,232000	-0,000290	4,7700E-07	0,00030000
Freon 114	0,141400	0,000232	-2,3360E-07	0,01769000
Freon 12	0,334880	-0,000656	8,5392E-07	0,00094340
Freon 21	0,673300	-0,001655	1,5890E-06	0,00227100
Freon 22	-0,038230	0,001075	-1,1006E-06	0,01477630
Glicerina	-3,571600	0,007367	-9,4630E-06	1,75100000
i-butano	0,821590	-0,001648	2,2330E-06	0,00000000
i-propanol	-1,164000	0,004590	-2,4170E-06	0,00480000
Isobutanol	0,338500	-0,000410	8,0580E-07	0,09420000
Isopentano	0,938000	-0,001959	3,0680E-06	-0,07918000
Metano	0,316000	0,003440	-8,7760E-06	0,07080000
Metanol	0,775380	-0,001587	2,3647E-06	0,00081182
n-butano	0,686310	-0,001146	1,8472E-06	0,00000000
n-heptano	0,435000	-0,000150	5,8700E-07	0,00240000
n-hexano	0,583530	-0,000691	1,1399E-06	0,00000000
n-octano	0,445360	-0,000136	5,3194E-07	0,00000000
n-pentano	0,704000	-0,001130	1,5680E-06	0,00150000
Octanol	0,250570	0,000337	4,7340E-08	0,07850110
Propano	1,029100	-0,002689	3,8990E-06	0,00233490
Propanol	0,400390	-0,000729	1,1430E-06	0,10270000
Propileno Glycol	-0,656800	0,002874	-2,6590E-06	0,25000000
Propileno	0,817550	-0,001811	2,8573E-06	0,00509000
Tolueno	0,363520	-0,000083	3,3904E-07	0,00000000

Fonte: Almeida (2003).

Tabela 5A – Constantes para o cálculo da viscosidade de líquidos.

Fluido	A₄	B₄	C₄	D₃
Acetato de etila	-6,54767	-136,5810	5779300	-2,294E+09
Acetileno	-38,88690	42205,9000	-16286100	2,120E+09
Acetona	-4,35810	2034,0000	-179740	0,000E+00
Ácido acético	117,23500	-311024,0000	265529000	-7,409E+10
Água	-2,98680	-388,7500	1037700	0,000E+00
Amônia	-27,99040	37159,6000	-18115500	3,048E+09
Anilina	-8,98400	14708,6000	-11364300	3,733E+09
Ar	0,00000	0,0000	0	0,000E+00
Benzeno	6,15849	-18510,0000	13035300	-2,694E+09
Butanol	-27,06180	58513,8100	-46982700	1,323E+10
Decanol	-6,32800	3381,0000	655700	3,450E+07
Etano	621980,00000	-2,6094	0	1,000E+00
Etanol	-12,51910	13575,2000	-5152380	7,802E+08
Etileno Glycol	-1,49210	-1820,0000	2226020	0,000E+00
Freon 11	-4,02900	2205,0000	-329700	2,910E+07
Freon 113	-4,17430	1831,0000	109220	0,000E+00
Freon 114	-4,90100	3988,0000	-1627000	3,337E+08
Freon 12	-27,64340	38125,6000	-18928000	3,217E+09
Freon 21	-8,97300	7753,0000	-1867000	-2,770E+06
Freon 22	-15,06930	17805,9000	-8110050	1,305E+09
Glicerina	-1,63650	-2092,0000	1954000	8,582E+08
i-butano	-11,17250	8522,0000	-2148450	1,401E+08
i-propanol	-2,62210	-1613,0000	1821510	0,000E+00
Isobutanol	-19,65800	22420,0000	-8737000	1,457E+09
Isopentano	-3,28700	-406,5000	1125000	-2,159E+08
Metano	-16,31300	8578,0000	-1881000	1,458E+08
Metanol	-8,58670	7619,0000	-2472170	3,714E+08
n-butano	-3,06000	170,2500	368540	-4,570E+07
n-heptano	-20,51600	30765,6000	-16958000	3,264E+09
n-hexano	-11,02410	13120,0000	-6461020	1,205E+09
n-octano	-4,37450	2065,0000	-56510	9,700E+06
n-pentano	-11,71460	10240,0000	-2556240	0,000E+00
Octanol	-6,74039	4232,2100	257650	0,000E+00
Propano	943800,00000	-2,9230	0	1,000E+00
Propanol	-11,11000	11990,0000	-4611000	8,454E+08
Propileno Glycol	-22,63200	5802,3800	8471680	-2,217E+09
Propileno	-3,35300	32,1200	345380	-4,810E+07
Tolueno	-7,13937	7771,6800	-3791140	8,077E+08

Fonte: Almeida (2003).