

RODRIGO SALLES BEGALLI

SOFTWARE DIDÁTICO DE TROCADORES DE CALOR:

CÁLCULO DO FATOR F DE CORREÇÃO
DA DMLT EM TROCADORES DE CALOR

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para conclusão das disciplinas
Projeto Mecânico I e II.

São Paulo, 2000

aprovado
nota: 9.0
(note)
Lp.

Sys 1996514

RODRIGO SALLES BEGALLI

SOFTWARE DIDÁTICO DE TROCADORES DE CALOR:

**CÁLCULO DO FATOR F DE CORREÇÃO
DA DMLT EM TROCADORES DE CALOR**

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para conclusão das disciplinas
Projeto Mecânico I e II.

Área: Energia e Fluidos

Professor orientador:
Marcos Pimenta

São Paulo, 2000

Agradecimentos

Ao professor Marcos Pimenta por toda a solicitude e compreensão.

Ao amigo Mauro Pini França pela bibliografia valiosíssima.

À doce Fabiana Pezzolo Pavanelli cujas dicas foram imprescindíveis no software.

Aos amigos ombudsman pela valiosa função de advogados do diabo.

ÍNDICE

PARTE I: Conceitos relativos a troca de calor

APRESENTAÇÃO.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES.....	9
2. FLUXOS NOS TC'S.....	10
4. ALGUNS CONCEITOS DE TROCA CONVECTIVA DE CALOR.....	12
4.1 TIPOS DE ESCOAMENTO.....	13
4.2 A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON.....	14
4.3 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	14
5. DIFERENÇA MÉDIA DE TEMPERATURA NO TC: DMLT.....	17
5.1 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA LOGARÍTMICA.....	17
6. O MÉTODO F.....	21
6.1 CURVAS F: APLICAÇÃO GERAL.....	24
6.2 ALTERNATIVA AO MÉTODO F: O MÉTODO G.....	24
7. TROCADORES QUE EMPREGAM O FATOR F.....	26
7.1 CASCO E TUBO.....	26
7.1.1 <i>Sistema de designação de passes</i>	28
7.2 CASCO E TUBO RESFRIADOS A AR.....	28
7.3 TROCADORES DE CORRENTES CRUZADAS.....	28
7.4 CASCO E TUBO DE FLUXO DIVIDIDO.....	30
8. CONCLUSÕES.....	31

PARTE II: Relatório do programa de cálculo do fator F de correção da DMLT

1. INTRODUÇÃO.....	33
CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	34
OS CASOS REAIS DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA.....	35
O FATOR F DE CORREÇÃO DA DMLT.....	36
O PARÂMETRO G.....	37
2. JUSTIFICATIVA DO PROBLEMA.....	39
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DAS FÓRMULAS EMPREGADAS.....	41
1. FÓRMULA DO TROCADOR DE CORRENTES PARALELAS.....	41
2. FÓRMULA PARA OS TROCADORES DE CASCO E TUBO COM N PASSES NO CASCO E 2N PASSES NO TUBO.....	42
3. FÓRMULA DO TROCADOR P TEMA J COM UM ÚNICO PASSE DE TUBO.....	42
4. FÓRMULA DO TROCADOR P TEMA J COM 2N PASSES DE TUBO.....	42
5. FÓRMULA DO TROCADOR P TEMA G COM 2N PASSES DE TUBO.....	43

6. FÓRMULA DO TROCADOR DE FLUXOS CRUZADOS, FLUIDOS NÃO MISTURADOS.....	43
7. FÓRMULA DO TROCADOR DE FLUXOS CRUZADOS, UM DOS FLUIDOS MISTURADOS	43
8. FÓRMULA DO TROCADOR DE FLUXOS CRUZADOS, AMBOS MISTURADOS.....	44
9. FÓRMULA DO TROCADOR DE FLUXOS CRUZADOS COM DOIS PASSES, FLUXOS DE ENTRADA DO FLUIDO QUENTE E FRIO NA MESMA EXTREMIDADE.....	44
10. FÓRMULA DO TROCADOR DE FLUXOS CRUZADOS COM DOIS PASSES, FLUXOS DE ENTRADA DO FLUIDO QUENTE E FRIO EM EXTREMIDADES OPOSTAS	44
11. FÓRMULA DOS TROCADORES DE BANCOS DE TUBOS COM UM PASSE NO CASCO E 1,2,3 E 4 LINHAS DE TUBOS	45
12. FÓRMULAS PARA TROCADORES DE FLUXOS CRUZADOS COM N TUBOS EM U (U-BEND SECTIONS)	46
4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	48
Os CÁLCULOS	48
Os GRÁFICOS.....	50
5. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	56
CÁLCULOS	56
GRÁFICOS.....	57
6. CONCLUSÕES.....	61
UM PROGRAMA DIDÁTICO	61
ESCOLHA DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO	62
EVOLUÇÃO DO MÉTODO	63

PARTE III: Listagem do programa

1. FORMGERAL.....	66
2. FORMRS	75
3. FORMTROCS.....	81
4. CÁLCULOS	86
5. PROCEDIMENTOS COM PLANILHAS	98
6. INICIALIZAÇÃO E FECHAMENTO DO PROGRAMA	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

Apresentação

O programa

O presente trabalho destina-se a ser um programa didático para os alunos da disciplina PMC 402, Trocadores de calor. Com o presente trabalho espera-se que o aluno possa ter uma exposição um pouco mais "palpável" à teoria ministrada em sala de aula. Espera-se também que os alunos possam enxergar uma ponta da magnitude das ferramentas educacionais a que teremos acesso no futuro, já que os softwares didáticos sem dúvida revolucionarão o ensino.

O programa é rodado em Excel e a parte lógica foi toda programada em Visual Basic for Applications, uma versão sucinta do Visual Basic destinada à criação de macros em quaisquer ferramentas do Microsoft Office. Assim, aproveitou-se toda a estrutura rica que o Excel oferece em termos de gráficos – estes são a parte principal do programa – como ponto de partida para o projeto.

O escopo do programa é fornecer ao aluno uma ferramenta que calcule o fator de correção da DMLT em trocadores de calor. Atualmente, esses dados estão disponíveis para o aluno unicamente em gráficos plotados nos livros de transferência de calor, e geralmente são bastante limitados e incômodos. Além de ser fácil de operar, o programa poupa o aluno de alguns dos cálculos trabalhosos requeridos pelos problemas de trocadores de calor.

O programa permite calcular esses fatores para quase vinte tipos diferentes trocadores, possibilidade muito maior que qualquer livro de Transferência de calor oferece. Além de o aluno poder construir os gráficos como quiser, ele pode comparar a eficiência de diversos tipos de trocadores simultaneamente para as mesmas condições de operação. Isto pode dar-lhe uma visão mais ostensiva da eficiência de cada tipo de trocador.

O relatório

Este texto é dividido em três partes. A primeira parte consiste de considerações teóricas a respeito dos processos de troca de calor envolvidos nos trocadores, classifica os tipos de trocadores, explica o desenvolvimento do conceito de diferença média logarítmica de temperatura e outros. Toda a explicação teórica que envolvem os trocadores está inserida nessa parte.

A segunda parte do texto é o relatório do programa propriamente dito. Nessa parte pode-se entender todo o desenvolvimento do programa, as etapas pelas quais o programa passou, as justificativas da relevância do problema, uma análise mais detalhada da lógica que o programa segue, enfim. Diversas telas do programa estão impressas no relatório para ilustrar o seu funcionamento. Nesta parte há também um pequeno manual do usuário.

Finalmente, a terceira parte é a listagem do programa. É colocado o conteúdo de cada uma das telas do programa bem como das fórmulas usadas para os cálculos nas planilhas. Poucos trechos da listagem contêm documentação já que o código é bastante simples no VBA, compreensível para o programador que deseje inspecioná-lo.

Perspectivas

Além do sentimento de realização que este projeto me deu ao vê-lo terminado, esta experiência serviu como um aperitivo que aumentou minha vontade de usar o computador como instrumento educativo. Aliás, poder contribuir no processo de disseminação do conhecimento é um campo que explorarei mais, impelido por este programa.

Minha vontade é continuar programando, agora de uma maneira mais técnica, ajudando a desenvolver o processo educacional para que o aluno possa perder cada vez menos tempo com a labuta mecânica do aprendizado (como fazer contas compridas e transcrever fórmulas complexas) e concentrar-se cada vez mais no nível conceitual do conhecimento. Afinal, não é isto o que diferencia um profissional no mercado?

PARTE I

Conceitos relativos a trocadores de calor

1. Introdução

Trocadores de calor são aparelhos indispensáveis na maioria das aplicações industriais. O processo de pasteurização de leite, a refinação de petróleo e a produção de PVC são três exemplos de aplicação maciça de trocadores de calor.

Além disso, os trocadores não são utilizados apenas em processos industriais que envolvem produção propriamente dita. Este um campo promissor na engenharia térmica para os próximos anos: a recuperação de calor, conceito cada vez mais em voga por conta das discussões e projetos em nome da conservação de energia. Ora, a recuperação de calor também é feita por trocadores.

Em países desenvolvidos, por exemplo, a indústria é um importante consumidor de energia, responsável pelo consumo de 50% do potencial total gerado. A maior parte da energia utilizada pelas indústrias é utilizada em forma de calor. Estima-se que o calor fornecido para processos industriais responda por aproximadamente 75% do consumo industrial de energia. E no entanto, nem toda essa energia fornecida é efetivamente utilizada: uma boa parte é perdida na forma de atritos, perdas térmicas para o ambiente, desperdícios e outros. Portanto, a quantidade de energia térmica recuperável em indústrias é enorme.

Para uma empresa progredir no assunto de economia energética, é necessário aumentar a quantidade de desenvolvimentos disponíveis para geração da energia, bem com investir em processos como recuperação de energia e cogeração.

Diversas pesquisas para o melhoramento do rendimento e aumento da aplicabilidade dos trocadores de calor estão em desenvolvimento em muitos países. Investimentos consideráveis estão concentrados na melhora do coeficiente de transferência de calor e elaboração de novos tipos de trocadores de calor.

Os mais populares trocadores de calor são do tipo casco e tubos, e respondem por mais de 50% dos trocadores instalados industrialmente. Por isso a quantidade de desenvolvimentos acadêmicos neste campo é abundante. Diversos estudos foram elaborados para seu dimensionamento, previsão e aumento de eficiência; inúmeros materiais foram e continuam sendo pesquisados e desenvolvidos; apesar de outros desenvolvimentos na área de troca térmica, estes trocadores continuam sendo de relevância muito especial.

Como será visto adiante, os trocadores de casco e tubo compõem uma classe de trocadores que são dimensionados por algumas regras especiais, devido às suas características construtivas. O principal parâmetro que diferencia este trocador dos trocadores mais simples conceitualmente - portanto base de todo desenvolvimento científico de trocadores - é o fator F . Este fator é função das temperaturas de entrada e saída do trocador de calor.

O método F foi elaborado há mais de 65 anos. Naquela época, devido à ausência de calculadoras e computadores, os fatores foram plotados em gráficos que auxiliavam o engenheiro em sua utilização (assim como as tabelas de seno e cosseno). No entanto, ao projetar uma rede de trocadores de calor numa indústria, os engenheiros se viam sufocados por números ao tentar calcular a eficiência da malha completa.

Este trabalho visa à programação de um software de computador que calcula fatores F para algumas configurações de trocadores de calor, dadas suas temperaturas de entrada e saída. Programado em um ambiente "user friendly" como Windows, tenta dar ao aluno uma compreensão global dos parâmetros envolvidos no dimensionamento de trocadores de calor, bem como possibilidade de comparação entre diversas opções construtivas de trocadores.

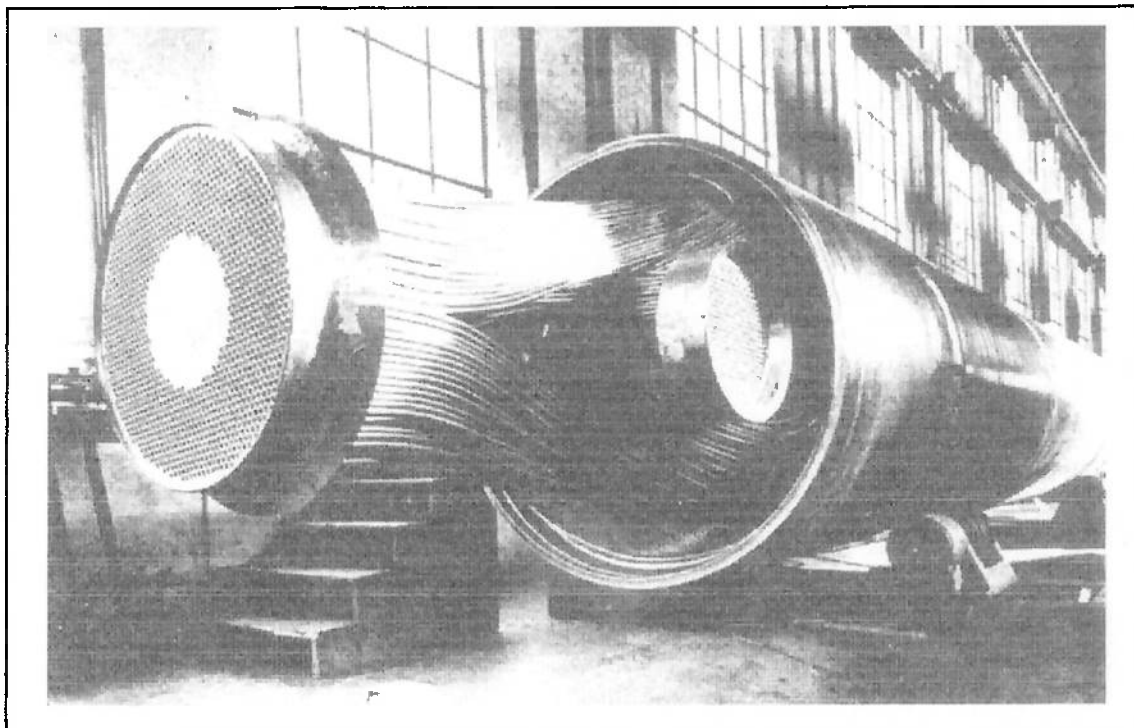


Figura 1.1 Um trocador de calor do tipo casco e tubo

2. Classificação dos trocadores

Os trocadores de calor (TC's) podem ser classificados de acordo com quatro características: (1) o processo de troca de calor, (2) a geometria de construção, (3) a função e (4) a disposição do fluxo.

Quanto ao **processo de troca de calor**, os trocadores são subdivididos em:

- regenerativos: a troca de calor ocorre por meio de um meio intermediário como uma matriz porosa sólida
- recuperativos: os fluidos correm simultaneamente e calor é transferido por uma parede separando os fluidos
- leito fluidizado: um sólido é particulado e aspergido num meio fluido
- contato direto: dois fluidos são colocados em contato direto
- queimadores: a troca de calor é feita indiretamente ao fluido por um processo de combustão.

Quanto à **geometria de construção**, podem ser subclassificados em

- tubulares:
 1. Tubos concêntricos (duplo-tubo): Um tubo é montado dentro de outro; em cada tubo escoa um fluido diferente
 2. Casco e tubo: consiste em um agrupamento de tubos colocados paralelamente ao eixo uma carcaça cilíndrica externa; um fluido escoa pelos tubos, outro pela carcaça.
- de placa: construídos com placas planas paralelas formando canais finos, as superfícies podem ser lisas ou corrugadas
- aletadas: têm aletas ou apêndices juntadas à superfície primária de transferência de calor, seja tubular ou plana.

Quanto à **função** as classificações são muitas. Temos os resfriadores, condensadores, evaporadores, vaporizadores, condensadores de superfície, condensadores de refluxo, trocadores de tubo espiral, bombas de calor, dentre outros.

Quanto ao **fluxo**, são subclassificados em quatro os trocadores de calor:

- correntes paralelas: os dois fluidos entram numa mesma extremidade e se deslocam na mesma direção até a saída
- contracorrente: os fluidos entram em extremidades opostas e fluem em direções contrárias
- correntes cruzadas: há uma diferença de 90° entre os deslocamentos do fluido frio e quente

De todas as classificações acima, a classificação quanto ao fluxo é mais importante quando falamos em fator de correção F , por isso é necessário aprofundar esse estudo.

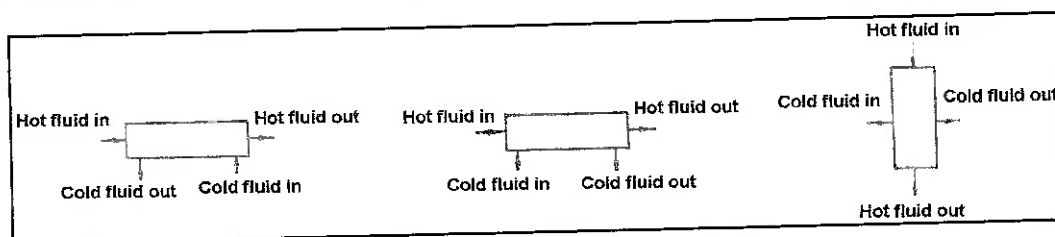


Figura 2.1 Os três tipos de fluxo nos trocadores de calor

2. Fluxos nos TC's

O modo como se processa o fluxo de um TC é fundamental para seu estudo e compreensão. Conforme exposto anteriormente, nesse tocante os TC's podem ser classificados em três tipos: correntes paralelas, contracorrente e correntes cruzadas.

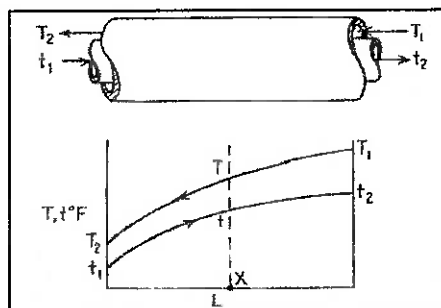


Figura 3.1 Trocador de calor em contracorrente (CC)

Num trocador de contracorrente (CC), o fluido frio se desloca paralelamente ao quente, porém em direções opostas. Assim, o fluido frio entra na extremidade contrária à do fluido quente. São os trocadores mais eficientes e mais compactos. Há aplicações em que o fluido frio sai a temperaturas mais elevadas que o próprio fluido quente em sua saída. São às vezes inconvenientes por seu custo relativamente elevado e pelo fato de exporem os materiais do aparato a tensões térmicas elevadas.

Num trocador de correntes paralelas (CP), os dois fluidos entram no dispositivo em uma mesma extremidade e se deslocam paralelamente no mesmo sentido até atingirem a saída. É o trocador menos eficiente e requer grande área para realizar a troca de calor. A temperatura de saída, ao contrário do trocador CC, jamais atinge a temperatura de saída do fluido quente. É um trocador muito aplicado em projetos que não permitem que as tensões térmicas do aparelho sejam muito elevadas, por exemplo.

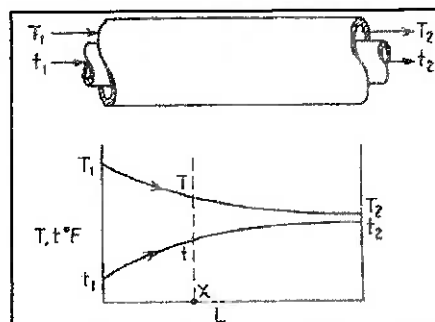


Figura 3.2 Trocador de calor em correntes paralelas (CP)

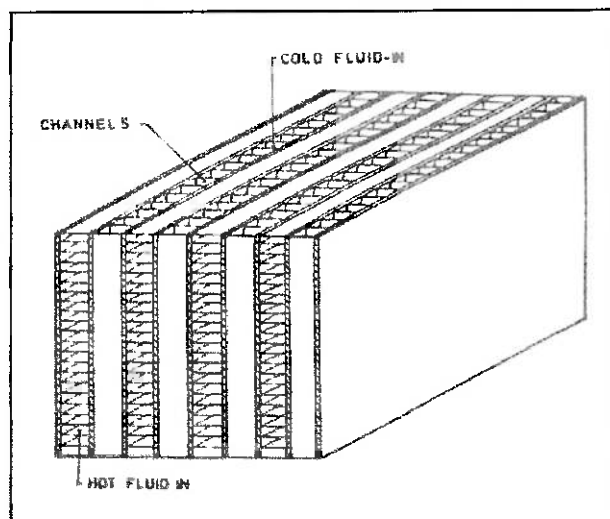


Figura 3.3 Trocador em correntes cruzadas, ambos fluidos não-misturados

No terceiro tipo de trocadores a corrente é cruzada e os fluidos se deslocam em direções perpendiculares entre si. É muito empregado por sua facilidade de montagem e seu baixo custo. Os fluxos podem ser misturados ou não. Por fluxo não misturado designam-se os trocadores que têm canaletas que guiam o fluido de modo a fazê-lo deslocar-se apenas na direção da corrente. Quando o fluxo é misturado, o fluido pode deslocar-se perpendicularmente à corrente, misturando-se. Existem três tipos de trocadores de fluxo cruzado: ambos lados não-misturados, ambos lados misturados e apenas um lado misturado.

Além da diferença da disposição dos fluxos entre esses trocadores, é importante notar que a distribuição de temperatura dos fluidos em função da geometria do dispositivo é também distinta. Em um trocador de calor CC, a diferença de temperatura entre os fluidos tende a ser a mais constante através do aparelho, e de magnitude maior se comparada à variação de temperatura sofrida pelo CP. Em ambos estes trocadores, porém, a temperatura é função do comprimento do equipamento, de simples determinação. Já num trocador de correntes cruzadas, a diferença de temperatura através do aparelho é uma função bidimensional, compondo assim um fluxo mais complexo em termos de distribuição de temperaturas.

Nos três primeiros tipos de configuração de fluxo descritos acima, ambos os fluidos atravessam o comprimento (ou a largura) do TC apenas uma vez, sendo por isso chamados de trocadores de passe único. Porém, é possível construir-se um aparelho em que um fluido atravesse o comprimento mais de uma vez, os chamados trocadores multipasse. Este tipo de aparelho tem fluxo misto, ora em contracorrente, ora em corrente paralela.

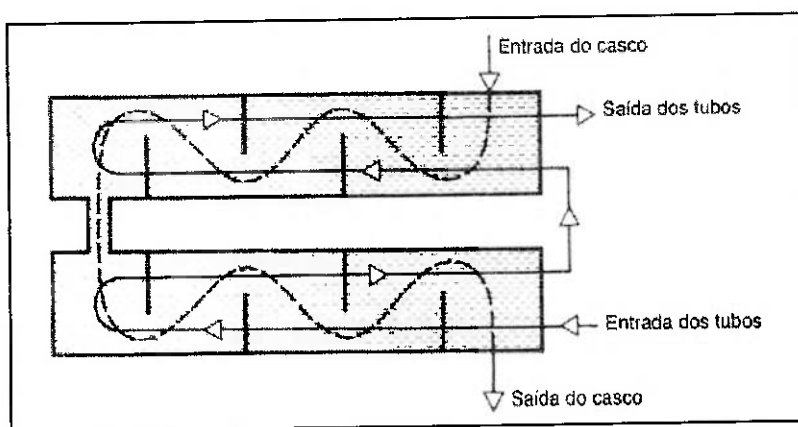


Figura 3.4a Trocador multipasse do tipo casco e tubo

Um trocador multipasse é mais eficiente que um trocador em correntes paralelas, porém menos eficiente que um trocador em contracorrente. No entanto, um agrupamento em série de muitos trocadores multipasse aproxima-se bastante da eficiência atingida por um

trocador CC. Uma das grandes vantagens dos trocadores multipasse é poder processar grande quantidade de matéria ocupando um espaço relativamente pequeno. O custo de um trocador CC para grandes fluxos e altas diferenças de temperatura exigiria uma grande área e causaria tensões térmicas elevadas. Como exemplo dos trocadores multipasse, temos o mais popular trocador da indústria, os trocadores de casco e tubo, que respondem por 50% das aplicações industriais.

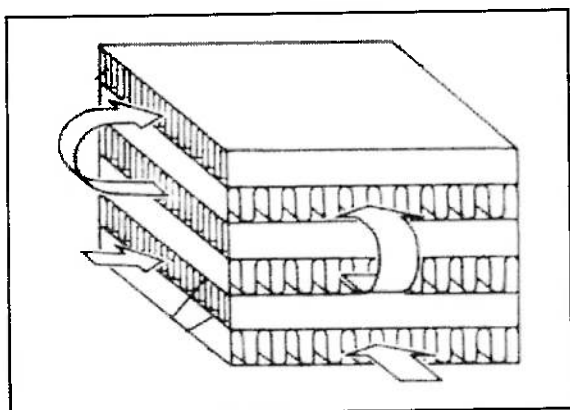


Figura 3.4b Trocador multipasse de fluxo cruzado

Para poder dimensionar e prever o modo como ocorre a troca de calor num TC é necessário recorrer-se a alguns fundamentos da transferência de calor. O dimensionamento do trocador é uma fase crucial do projeto, já que envolve custos, qualidade de produto, espaço de instalação, potência de funcionamento, possíveis impactos ambientais como ruídos, dentre outros.

4. Alguns conceitos de troca convectiva de calor

"A transferência de calor é o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura."¹ Esta definição elementar de troca de calor é o ponto inicial de qualquer compreensão dos processos decorrentes dessa diferença de temperaturas.

São três os mecanismos de fluxo de calor: condução, convecção e radiação. Na condução, o calor flui num corpo estacionário devido à transferência de momento entre moléculas, impelidas por um gradiente de temperatura. Na convecção há fluxo de calor entre um fluido e uma superfície com temperatura distinta à do fluido. Já na radiação, a transferência de calor ocorre através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas. Todos os corpos em temperaturas finitas emitem essa radiação, e estão, portanto, trocando calor por radiação com o ambiente a todo momento.

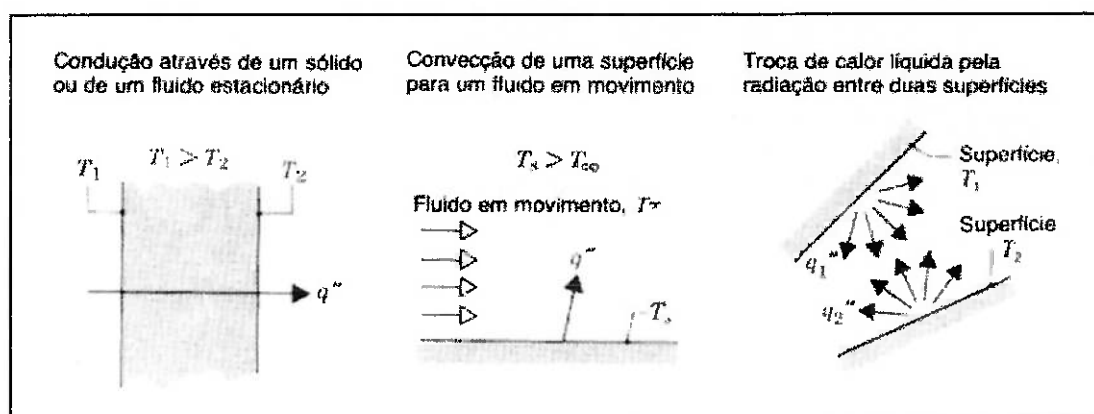


Figura 4.1: Modos de transferência de calor

Há trocadores em que um gás quente é borbulhado numa solução fria, por exemplo. Assim, a troca de calor ocorre apenas por convecção. Já num trocador CC, CP, de correntes cruzadas ou mesmo um trocador casco e tubo, a condução é também um fenômeno fundamental no processo, já que a transferência de calor entre os fluidos é intermediada por dutos.

A convecção é composta por dois mecanismos: a transferência de energia provocada pelo movimento molecular aleatório (difusão) e a energia transferida pelo movimento de massa do fluido. Dada uma superfície e um fluido em movimento sobre ela, existe uma região em que a temperatura varia desde a temperatura da superfície até a temperatura do fluido ao longe. A esta região chama-se camada limite térmica (análoga à camada limite cinética). Enquanto a temperatura T_s for maior que T_∞ , ocorrerá transferência de calor. A transferência convectiva de calor global é feita pelos movimentos moleculares aleatórios e macroscópicos dentro da camada limite. A difusão (movimento molecular) é predominante nas vizinhanças da superfície e a contribuição do movimento macroscópico do fluido aumenta à medida em que o escoamento se desenvolve e, portanto, engrossa a camada limite. Esta última é a responsável pela maior porcentagem da transferência de calor convectiva total, enquanto que os movimentos moleculares contribuem em menor escala. A transferência de calor por convecção tem a seguinte forma:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4.1)$$

onde q (W/m^2) é o fluxo de calor convectivo, T_∞ (K) é a temperatura do fluido ao longe, T_s (K) é a temperatura da superfície e h ($\text{W/m}^2\text{K}$) é o coeficiente de transferência convectiva de calor. A esta expressão costuma-se chamar de Lei de Newton do resfriamento.

Assim, dada uma diferença de temperatura, para aumentar-se a troca líquida de calor na convecção deve-se aumentar o coeficiente de transferência convectiva (h) dessa troca. E os parâmetros que influem no coeficiente de transferência convectiva de calor são as condições da camada limite, funções influenciadas pela geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido e por um conjunto de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

Um dos principais responsáveis pela transferência de calor convectiva é o atrito existente entre a superfície e o fluido. Por isso qualquer abordagem à transferência convectiva remete ao estudo detalhado das condições do escoamento do sistema em estudo.

4.1 Tipos de escoamento

Analogamente à camada limite térmica, na camada limite cinética a velocidade varia de v_s (nula) até v_∞ . O escoamento laminar é caracterizado por um movimento muito organizado do fluido, onde é possível identificar linhas de corrente na camada limite cinética ao longo das quais as partículas se movem. Existe uma componente da velocidade na direção normal à superfície, que pode contribuir significativamente para a transferência de momento e de energia através da camada limite.

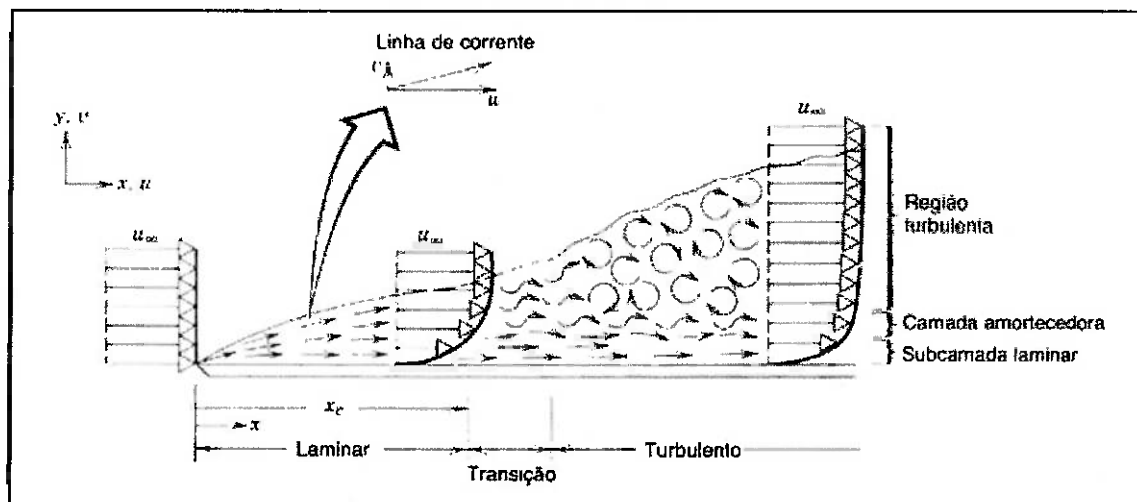


Figura 4.2 Camada limite cinética sobre placa plana

Já a camada limite turbulenta é muito irregular e se caracteriza pelas flutuações da velocidade. Essas flutuações realçam a transferência de momento e de energia massa, por isso provocam o aumento das taxas de transferência de convectiva. Esta camada tem espessura maior que o escoamento laminar, já que sua desordem provoca flutuações.

Em um fluxo laminar num tubo, as partículas do fluido escoam com um perfil parabólico de velocidades através do tubo. Este fluxo é às vezes abstraído como uma

série de cilindros concêntricos que escorregam um dentro do outro - feito um telescópio.

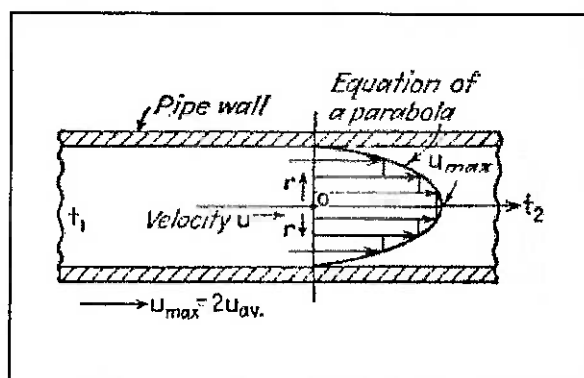


Figura 4.3 Fluxo laminar num tubo

O número de Reynolds (Re , adimensional) é um parâmetro fundamental no estudo dos escoamentos. Razão entre a força viscosa e a força de inércia na camada limite, este número determina se um dado escoamento é laminar ou turbulento: num duto, se $Re < 2100$ o escoamento é laminar; se $Re > 10.000$ o escoamento é turbulento; e finalmente, se Re está no intervalo desses dois números, o escoamento é transicional.

Em um escoamento lento, as forças viscosas se sobrepõem às perturbações que poderiam amplificar-se gerando turbulência num escoamento. À medida em que a velocidade aumenta (aumentando o número de Reynolds também), os efeitos viscosos se tornam cada vez menos importantes em face dos efeitos inerciais, e as perturbações acabam por gerar escoamentos turbulentos.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho V_m D}{\mu} \quad (4.2)$$

onde V_m = velocidade média do fluido (m/s), D = diâmetro interno do tubo (m), ρ = densidade do fluido (kg/m^3) e μ = viscosidade dinâmica (N.s/m^2).

4.2 A lei do resfriamento de Newton

A transferência de calor ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre um fluido e uma superfície sólida.

Pela lei do resfriamento de Newton, a transferência de calor por área pode ser expressada por:

$$Q = hA(T_s - T_\infty) = hA(\Delta T) \quad (4.3)$$

onde

Q = calor transferido

A = área da superfície normal ao fluxo de calor

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície T_s e o fluido ao longe T_∞

h = coeficiente de transferência de calor

4.3 Determinação de coeficientes de transferência de calor

Considerando a condução através de uma peça de metal tendo área normal ao fluxo de calor A , espessura e (m) e condutividade térmica k (W/m.K), se uma das faces está a T_1 e a outra a T_2 , o fluxo pode ser definido por

$$Q = \frac{k}{e} A(T_s - T_\infty) = \frac{k}{e} A(\Delta T) \quad (4.4)$$

Esta equação é similar à (4.3), onde $h=k/e$. O coeficiente h deve ser determinado diretamente de dados experimentais e correlacionado em termos adimensionais. Este número depende da superfície de transferência de calor, da velocidade do fluxo, do diâmetro do tubo em que escoa, e outras propriedades físicas.

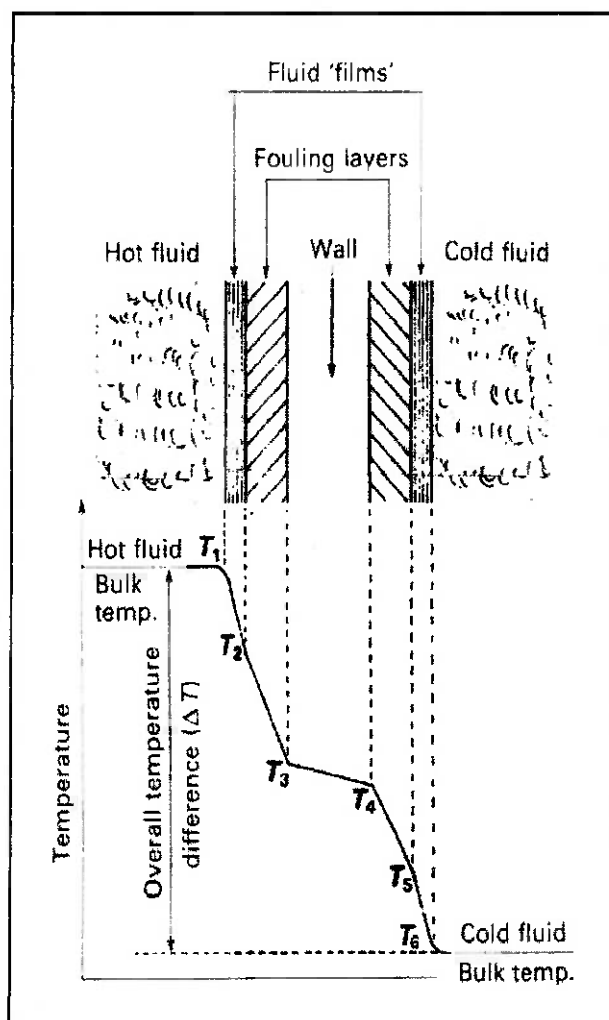


Figura 4.4 Todas as interfaces presentes na transferência de calor num trocador

Como a transferência de calor para um fluido está sujeita à resistência de cada camada interveniente na troca de calor, a resistência total à transferência é definida como a soma de todas as resistências: da sub-camada, de possíveis crostas e da parede do tubo.

$$T_1 - T_2 = \frac{q}{h_q A} \quad (4.5a)$$

$$T_2 - T_3 = \frac{q}{h_c A} \quad (4.5b)$$

$$T_3 - T_4 = \frac{q}{h_p A} \quad (4.5c)$$

$$T_4 - T_5 = \frac{q}{h_c A} \quad (4.5d)$$

$$T_5 - T_6 = \frac{q}{h_f A} \quad (4.5e)$$

onde

h_q = coeficiente de transferência de calor do fluido quente

h_f = coeficiente de transferência de calor do fluido frio

h_c = coeficiente de transferência de calor da crosta formada no tubo

h_p = coeficiente de transferência de calor da parede

A = área de troca de calor

T_i = temperaturas de cada superfície i

Somando as cinco equações acima, temos

$$T_1 - T_6 = \Delta T = \frac{q}{A} \left(\frac{1}{h_q} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_p} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} \right) \quad (4.6)$$

Então temos que

$$A \cdot \Delta T = \frac{q}{U_{ref}} \quad (4.7)$$

onde $1/U_{ref}$ é a resistência global à transferência de calor, e é a soma de todas as resistências individuais.

$$\frac{1}{U_{ref}A} = \frac{1}{U_q A_q} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{(\eta_o hA)_q} + \frac{R''_{f,q}}{(\eta_o hA)_q} + R_p + \frac{R''_{f,f}}{(\eta_o hA)_f} + \frac{1}{(\eta_o hA)_f} \quad (4.8)$$

Onde

U_q, U_f = resistência global à transferência de calor do lado quente e frio, respectivamente

A_q, A_f = área de troca de calor do lado quente e frio, respectivamente

η_o = eficiência superficial global da superfície aletada

$R''_{f,q}, R''_{f,f}$ = fator de incrustação do lado quente e do lado frio, respectivamente

R_p = resistência da parede à condução

sendo

$$R_{p,A} = \frac{A \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_p L} \quad (4.9)$$

a resistência à condução na parede de um tubo cilíndrico e

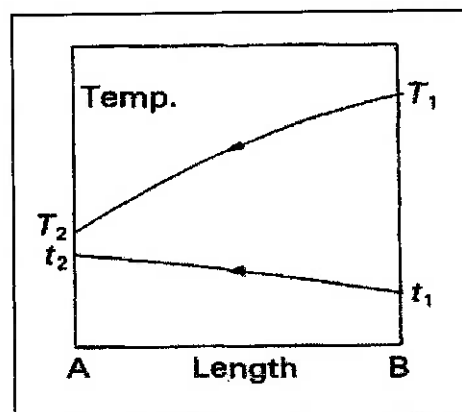
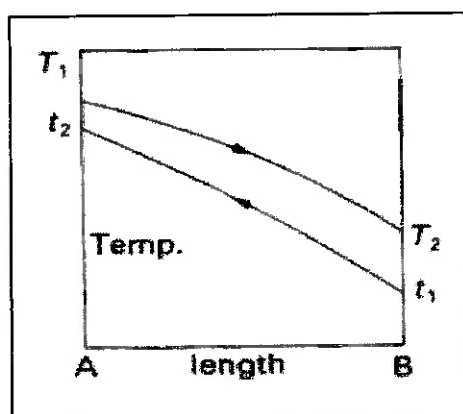
$$R_{p,A} = \frac{e}{k_p} \quad (4.10)$$

Em geral, a equação (4.7) é expressa simplificada da maneira:

$$q = UA\Delta T_m \quad (4.11)$$

onde ΔT_m é a diferença de temperatura local entre o fluido quente e o fluido frio.

Tendo-se em conta que as temperaturas locais variam no decorrer do trocador, é necessário averiguar-se um valor apropriado para ΔT_m . No geral, essas variações de temperatura não são lineares quando plotadas em função do comprimento do trocador.



Figuras 4.5 Diferenças de temperatura no trocador CC e CP, respectivamente

5. Diferença média de temperatura no TC: DMLT

O gradiente de temperatura que motiva a transferência de calor entre os dois fluidos acima estudados é simplesmente a diferença aritmética de temperatura entre esses dois fluidos, $T_1 - T_2$. Já num trocador de calor, onde o calor é transferido entre dois fluidos cujas temperaturas variam ao longo do percurso do trocador, a determinação da diferença média de temperatura é mais complexa.

Para analisar a transferência de calor ocorrida num trocador pode-se aplicar as relações de balanço global de energia aos fluidos quente e frio. Sendo q a taxa total de transferência de calor entre os fluidos (cuja diferença de energia potencial e cinética é desprezível e cujo calor é apenas trocado entre si e não com o meio vizinho) temos:

$$q = m_q (i_{q,e} - i_{q,s}) \quad (5. 0a)$$

$$q = m_f (i_{f,s} - i_{f,e}) \quad (5. 2a)$$

onde i é a entalpia do fluido. Os índices q e f se referem aos fluidos quente e frio, enquanto que s e e se referem à saída e entrada do fluido. Admitindo que não haja mudança de fase em quaisquer dos fluidos e que os calores específicos sejam constantes, podemos escrever:

$$q = m_q c_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s}) \quad (5. 1b)$$

$$q = m_f c_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (5. 2b)$$

As temperaturas das expressões acima estão relacionadas às temperaturas médias locais dos fluidos, independentemente do tipo de trocador ou da configuração das correntes. Calculando-se as inúmeras trocas locais de calor ao longo do comprimento do trocador, podemos somá-las e comparar a taxa de transferência total à lei do resfriamento de Newton. Assim, conhecendo-se o coeficiente global de troca de calor U do trocador e estipulando-se uma diferença de temperatura média ΔT_m chegamos novamente à equação:

$$q = UA\Delta T_m \quad (4.11)$$

Mas qual o valor de ΔT_m ? Para determinar seu valor é necessário analisar um trocador de calor mais detalhadamente.

5.1 Determinação da temperatura média logarítmica

O valor de ΔT_m pode ser determinado por um balanço de energia em elementos diferenciais de volume conforme indicado na figura. Cada elemento tem comprimento dx e área dA . Para prosseguir o balanço de energia e sua posterior análise, são estabelecidas as seguintes hipóteses:

1. Perdas de calor são desprezíveis.
2. Não há condução axial no tubo.
3. Não há variação de energia cinética ou potencial.
4. Os calores específicos dos fluidos são constantes ao longo do percurso.
5. O valor de U é constante ao longo de toda a extensão do tubo.
6. Não há mudança no fluxo de massa, isto é, o regime é permanente.

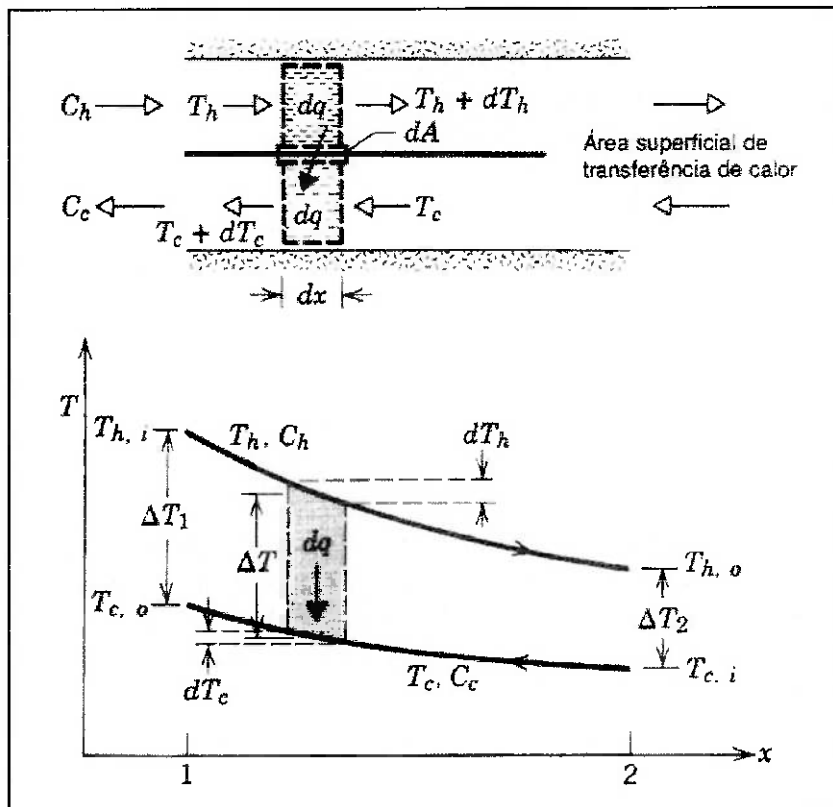


Figura 5.1: Elemento infinitesimal de um trocador CP

O balanço de energia em cada elemento infinitesimal da figura resulta:

$$dq = -\dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s}) \equiv -C_q dT_q \quad (5.3a)$$

$$dq = -\dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,e} - T_{f,s}) \equiv -C_f dT_f \quad (5.3b)$$

Integrando estas equações em dA , temos

$$dq = U \Delta T dA \quad (5.4)$$

onde ΔT representa a diferença local das temperaturas de cada um dos volumes diferenciais.

Chamando

$$\Delta T = T_q - T_f \quad (5.5a)$$

e aplicando as equações (5.3a) e (5.4a) na anterior temos:

$$d(\Delta T) = dT_q - dT_f \quad (5.5b)$$

e portanto

$$d(\Delta T) = -dq \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \quad (5.5c)$$

Assim, integramos a equação

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \int_1^2 dA \quad (5.5d)$$

que resulta

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \quad (5.5)$$

Portanto, temos que

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{T_{q,e} - T_{q,s}}{q} + \frac{T_{f,s} - T_{f,e}}{q} \right) \quad (5.6)$$

onde

$$\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,e}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,s}$$

Assim obtemos:

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \quad (5.7)$$

Comparando esta equação com a equação (4.11), concluímos que a diferença média de temperatura correta para os cálculos envolvendo trocadores de calor é a chamada diferença média logarítmica, ΔT_{ml} , também chamada DMLT:

$$q = UA \Delta T_{ml} \quad (5.8)$$

onde

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (5.9)$$

Portanto, admitindo as mesmas condições de entrada e saída dos fluidos quente e frio num trocador, observa-se que no CP a diferença de temperatura dos fluidos ao longo do comprimento é mais uniforme. Assim, a diferença média logarítmica do trocador CC é sempre menor que no CP. Admitindo-se que ambos tenham o mesmo valor de U , concluímos que a área de troca necessária para um mesmo efeito é menor para o trocador em contracorrente.

Por uma demonstração análoga à anterior, podemos afirmar que no trocador em contracorrente, a expressão (5.8) é válida, salvo o fato de as grandezas ΔT_1 e ΔT_2 serem

$$\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,s}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,e}$$

A equação (5.8) também pode ser aplicada na determinação da transferência de calor em condensadores e evaporadores. Nestes, a capacidade calorífica de um dos fluidos é muito maior que o outro, o que faz com que sua temperatura seja aproximadamente constante através do trocador. Num evaporador, $C_q \ll C_f$ e num condensador $C_f \ll C_q$. Portanto, nestes casos, a configuração CC e CP são equivalentes, não há diferença.

Uma das hipóteses usadas na derivação do DMLT que é mais sujeita a desvios é o de que o trocador tem um coeficiente global de transferência de calor U constante. Em uma troca de calor fluido-fluido, o fluido tem uma viscosidade na entrada que se torna maior à medida em que o fluido se resfria. Já o fluido frio em contracorrente tem sua viscosidade diminuída. Há uma extremidade quente T_1-t_2 e um terminal frio T_2-t_1 e os valores de h dos fluidos varia ao longo do comprimento do tubo produzindo U mais elevado na ponta quente que na fria. Há casos ainda em que a variação de U pode ser maior que a de h_i , já que o coeficiente de película varia ao mesmo tempo e na mesma direção que h_i .

Uma menor diferença média de temperatura significa menor área requerida para ocorrer a troca de calor, o que diminui as dimensões necessárias do trocador de calor. É interessante observar que para uma dada configuração de vazões e temperaturas de entrada e saída, o trocador CP requer a máxima área de troca de calor dentre todos os tipos de trocadores enquanto que o CC requer a mínima área possível. Por este motivo, os trocadores CP são menos utilizados em aplicações industriais em detrimento do trocador CC, preferido. Mas há também os trocadores de correntes cruzadas, que são bastante aplicados em virtude da sua facilidade de montagem, já que é mais fácil adequar conexões de cabeça para os fluxos de entrada e saída neste TC do que o trocador CC.

Em corrente paralela a menor temperatura teoricamente alcançável pelo fluido quente é o da saída da temperatura do fluido frio, t_2 . Se esta temperatura fosse atingida, o DMLT seria zero. Pela lei do resfriamento de Newton $Q=UADT$, já que Q e U são finitos, a superfície de transferência de calor A teria de ser infinita, o que obviamente não é factível. Em corrente paralela, a transferência de calor é restringida pela temperatura de saída do fluido frio ao invés da temperatura de entrada do fluido frio e a diferença entre esses dois extremos é calor recuperável. Corrente paralela é utilizado para fluidos viscosos, no entanto, já que esta disposição permitiu atingir um valor de U mais elevado.

6. O método F

A diferença média logarítmica de temperatura (DMLT) é utilizada aproximadamente desde 1920; antes disso, era utilizada uma diferença média aritmética de temperatura (DMAT). Diante das incoerências inevitáveis decorrentes da utilização desse dado nos cálculos de transferência de calor, Nusselt deduziu o método DMLT conforme acima.

Apesar da solução de Nusselt, muitos obstáculos ainda impediam uma boa previsão do comportamento dos trocadores. Isso porque o cálculo da diferença média logarítmica de temperatura era eficaz para o estudo das trocas de calor estritamente em contracorrente e em correntes paralelas. Porém, em grande parte das aplicações de TC's, é necessário construir-se mais de um passe no trocador, de modo a aumentar a transferência de calor do processo. Assim, esses trocadores de calor não podem ser considerados contracorrente (CC) nem corrente paralela (CP), já que alguns passes estão em contracorrente e outros em corrente paralela.

Por esse motivo, os dados teóricos calculados serviam apenas para os TC's estritamente CP ou CC, mas continuavam discordando dos dados experimentais obtidos em trocadores casco e tubo e trocadores de corrente cruzada. Os projetistas então chegaram à conclusão de que o DMLT não se aplicava a esses trocadores.

Os primeiros dados a serem publicados no tocante a um método de correção dos cálculos do DMLT para outros tipos de trocadores datam de 1931 (Davis). Ele estipulou fatores pelos quais o DMLT teria de ser multiplicado de modo a se obter uma diferença média de temperatura corrigida. Estes fatores, adimensionais denominados fatores de correção F, obtidos empiricamente, não foram acompanhados de nenhum estudo teórico que os justificasse.

Foi somente em 1933 que apareceu a primeira publicação fundamentada a respeito dos fatores de correção. O engenheiro W. M. Nagle publicou uma demonstração matemática obtida pela integração das equações envolvidas na troca de calor em trocadores de calor do tipo casco e tubo. Nesta demonstração, Nagle enunciou que:

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{ml,CC} \quad (6.1)$$

$$q = UAF \Delta T_{ml,CC} \quad (6.2)$$

onde

F= fator de correção da diferença média logarítmica de temperatura para trocadores multipasse e de correntes cruzadas.

Ao contrário de Davis, Nagle provou por que o DMLT não podia ser utilizado em cálculos envolvendo trocadores casco e tubo e corrente cruzadas. Ele chegou a suas conclusões pelo estudo de trocadores casco e tubo 1/2, 1/4, 1/6 (1/2+) e 2/4, 2/8 e 2/12 (2/4+) [ver item 7.1.1], e deduziu as primeiras expressões algébricas para o fator F. Como as fórmulas que levavam ao cálculo de F eram muito extensas e especialmente incômodas num tempo em que calculadoras não existiam, Nagle então organizou estes dados em gráficos mais palatáveis e rápidos. Ao invés de obrigar o usuário a calcular extensas fórmulas, Nagle organizou gráficos em função de apenas

dois fatores, funções da temperatura de entrada e saída dos fluidos do TC. Assim, o usuário tinha apenas o trabalho de calcular duas frações para chegar ao fator de correção F .

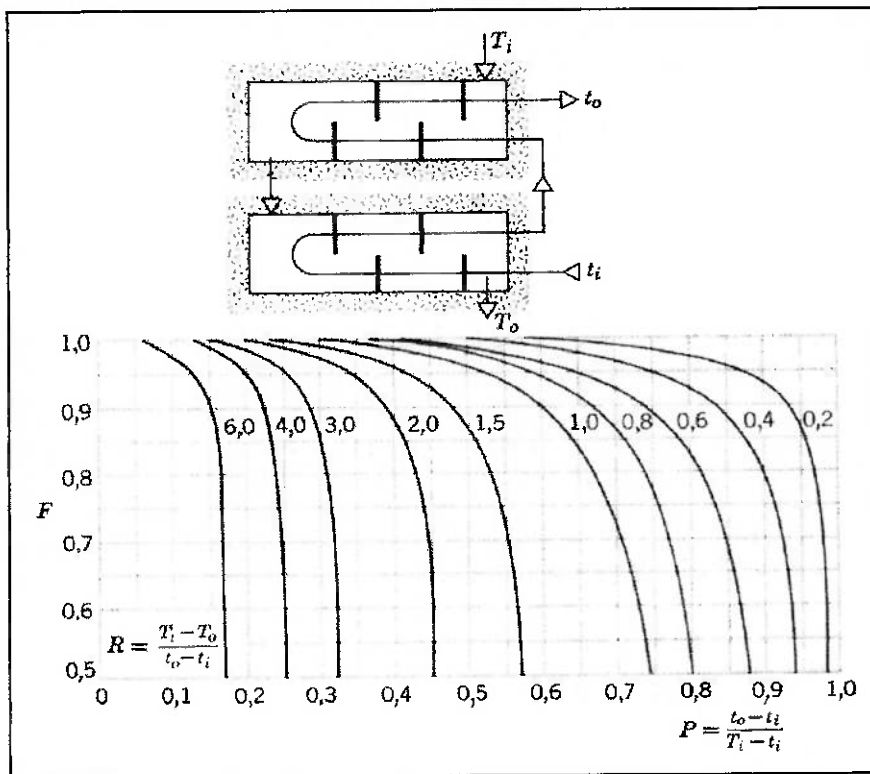


Figura 6.1 Fatores de correção para trocador casco e tubo 2/4+

$$P = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (6.3)$$

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)}$$

onde $t(K)$ se refere à temperatura do fluido frio, $T(K)$ ao fluido quente, índice 1 à entrada e índice 2 à saída.

Assim, gráficos foram montados em função de P , R e N (número de passes no casco). Ao fator P chamamos de eficiência térmica, que corresponde à razão entre a mudança de temperatura do fluxo frio e a maior diferença possível entre as temperaturas de entrada dos dois fluidos. Já a grandeza R é a razão da capacidade de calor do fluxo.

Nagle também determinou que os gráficos válidos para um trocador 1/2 eram na verdade válidos para qualquer trocador 1/2+. Além disso, enunciou que é indiferente se o fluido da carcaça entra por uma extremidade ou outra. Prosseguiu em seus estudos demonstrando os fatores de correção para os trocadores 2/4+. Em 1940 Nagle, Bowman e Mueller então publicaram numa publicação da ASME os fatores de correção para os trocadores 3/6+, 4/8+, 6/12+. Nessa mesma edição foram publicados os fatores F que dão origem às curvas plotadas. Outro fato interessante

foram as curvas do fator F para trocadores 3/6+, em que foi estabelecido que era determinante o fato de a maioria dos tubos estar em CC ou CP com o fluido da carcaça. Também nesta ocasião determinaram os fatores de correção para diversos trocadores de correntes cruzadas. Os fatores de correção F havia estabelecido-se definitivamente na ciência dos trocadores de calor de casco e tubo.

Para determinar-se o fator de correção F de cada trocador são necessárias, além da configuração construtiva do trocador (no. de passes por casco), as temperaturas de entrada e saída nos bocais dos fluidos (temperaturas de entrada e saída do fluido quente T_1 e T_2 ; e do fluido frio, t_1 e t_2).

Hoje em dia, com o auxílio de planilhas de cálculo em computadores, por exemplo, a determinação do fator F tornou-se mais precisa e rápida. Fornecendo-se as temperaturas e a configuração construtiva do trocador a um programa, o fator F é prontamente determinado através das fórmulas:

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \frac{\ln \left[\frac{1 - P_x}{1 - RP_x} \right]}{\ln \left[\frac{(2/P_x) - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{(2/P_x) - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}} \right]} \quad (6.5)$$

onde P_x vale:

$$P_x = \frac{1 - \left[\left(\frac{RP - 1}{P - 1} \right) \right]^{\frac{1}{N}}}{R - \left[\left(\frac{RP - 1}{P - 1} \right) \right]^{\frac{1}{N}}} \quad (6.6)$$

No caso em que R vale 1, a equação torna-se indeterminada. Nesse caso, a fórmula acima deve ser substituída por:

$$F = \frac{P_x \sqrt{R^2 + 1}}{1 - P_x} \frac{1}{\ln \left[\frac{(2/P_x) - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{(2/P_x) - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}} \right]} \quad (6.7)$$

onde

$$P_x = \frac{P}{(N - NP + P)} \quad (6.8)$$

6.1 Curvas F : aplicação geral

A grandeza F é indicativa da penalidade decorrida do de o fluxo não ser estritamente CC. O estudo dos gráficos de F revela que nos casos em que $R > 1$, as curvas são mais íngremes que $R < 1$. Todas as linhas dos gráficos se tornam íngremes a partir de $F = 0.75$, o que significa que a eficiência se torna sensível a pequenas mudanças das temperaturas de operação. Portanto, esta porção do gráfico deve ser evitada na operação de um TC. A condição de encontro das temperaturas dos fluidos quente e frio, $P(R + 1) = 1$, é indicada em algumas curvas. Esta linha é chamada limite designa as condições em que a temperatura dos fluidos é igual. Acima desta linha temos a fase de aproximação de temperatura enquanto que a parte inferior corresponde ao cruzamento de temperaturas.

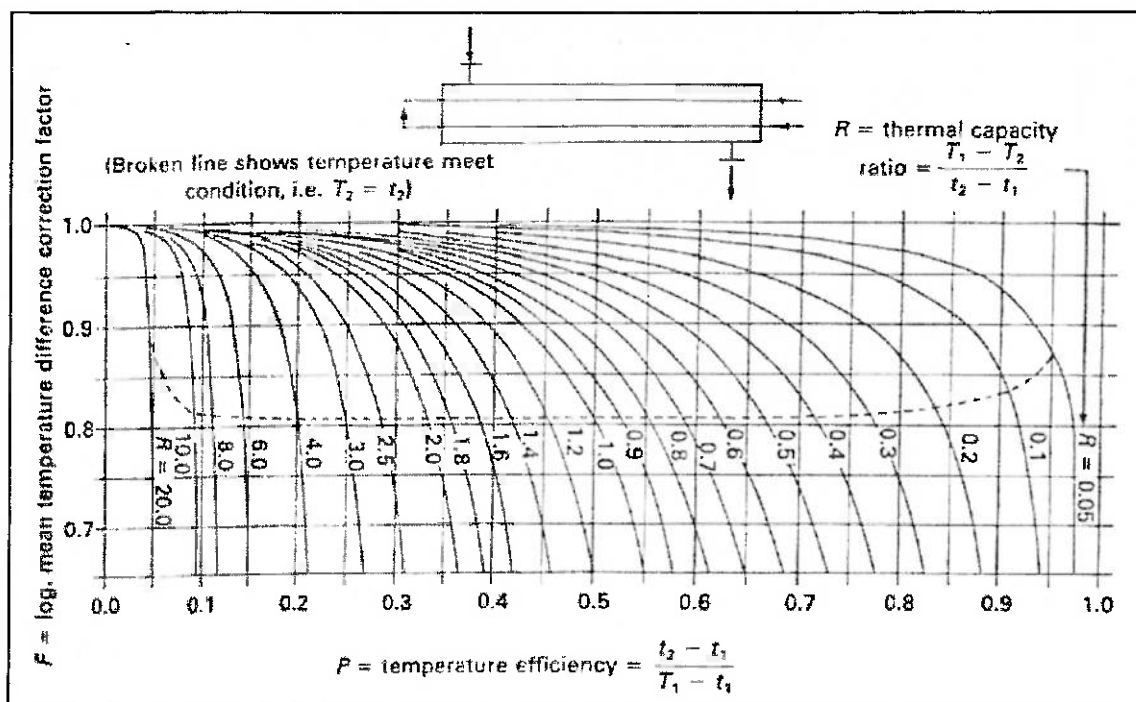


Figura 6.2: Fatores de correção para trocador 1/2+. A curva tracejada indica quando as temperaturas se encontram.

No trocador de fluxos cruzados o valor de F não depende apenas de P e R , mas também do fato de os fluidos se misturarem ao longo do trajeto do TC. Sabe-se que $F(\text{ambos não misturados}) > F(\text{misturado, não misturado}) > F(\text{ambos misturados})$.

À medida em que aumenta o número de passes, o comportamento do trocador de calor se aproxima de um trocador CC, isto é, seu rendimento justifica o investimento maior.

6.2 Alternativa ao método F : o método G

Da mesma forma que o método citado anteriormente, este método fornece os valores do fator de correção F . A diferença reside nos parâmetros utilizados, enquanto que no método tradicional $F = f(P, R, N)$, neste método $F = f(G, R, N)$. Há casos inclusive em que

$F=f(G)$. O parâmetro G é definido como a razão da diferença de temperatura de saída com relação à de entrada.

$$G = \frac{(T_2 - t_2)}{(T_1 - t_1)} \quad (6.0)$$

Os valores de G podem ir de +1 (onde não existe troca de calor) até -1 (maior troca de calor possível). Quando as temperaturas de saída são iguais ($T_2=t_2$), $G=0$. Um valor negativo de G representa temperaturas cruzadas, isto é, a temperatura de saída do fluido frio é maior que a temperatura de saída do fluido quente. Os valores de G podem ir de +1 (onde não existe troca de calor) até -1 (maior troca de calor possível). Esta ferramenta se utiliza pelo fato de ser G um parâmetro mais poderoso que P e R , já que, sozinho, G fornece mais informação sobre F que os dois outros juntos. Isto é evidenciado pelo intervalo em que $0,33 < R < 3,0$, em que o fator F é função apenas de G . Os gráficos deste método são plotados a partir de fórmulas semelhantes às do método F .

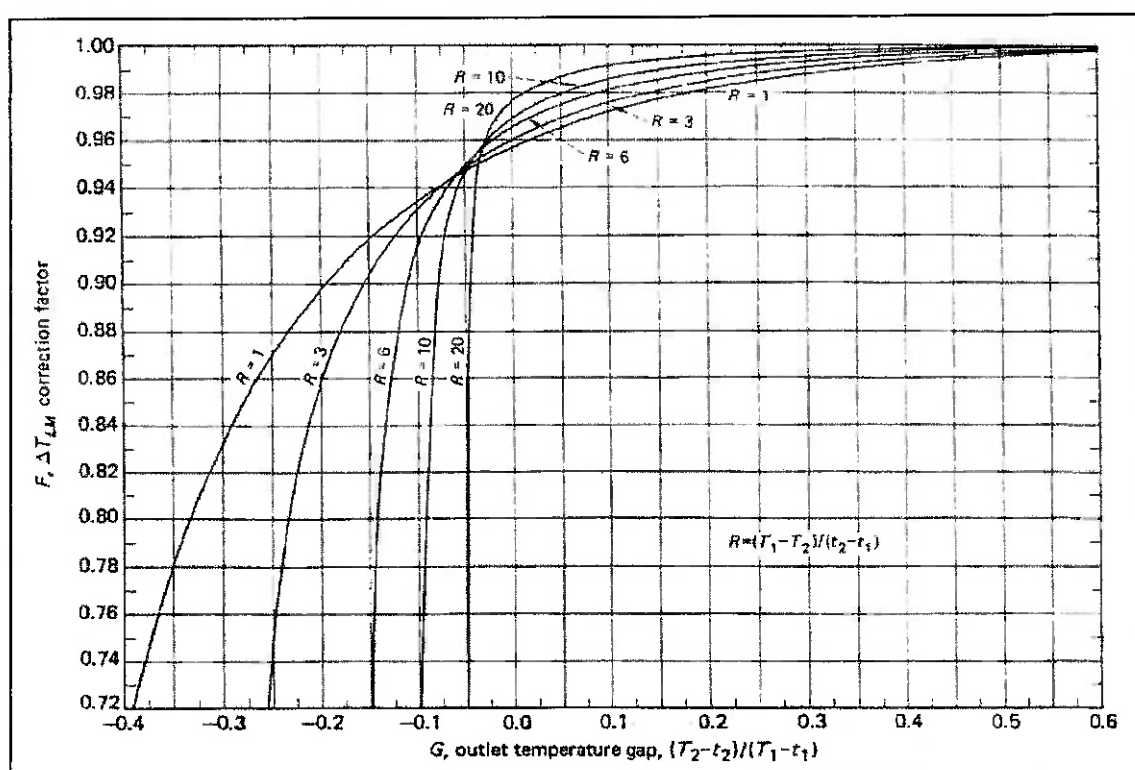


Figura 6.3 Gráfico de F em função de R e G

7. Trocadores que empregam o fator F

7.1 Casco e tubo

O trocador de casco e tubos é o trocador de calor mais comum de todos os trocadores com exceção dos trocadores do tipo fornalha. Apesar de não ser especialmente compacto, é robusto e sua forma o permite trabalhar em elevadas pressões. É também um trocador versátil, pode utilizado em quase qualquer aplicação. Excetuando-se os trocadores de calor especiais, resfriados a ar, é usualmente o único tipo de trocador que pode ser utilizado para superfícies extensas tendo pressões maiores que 30 bar e temperaturas maiores que 260°C.

Como indica o nome, esse trocador consiste de uma carcaça ou casco, invariavelmente cilíndrica, contendo uma grande quantidade de tubos, planos ou aletados, que correm paralelamente ao eixo longitudinal da carcaça e são sustentados por lâminas furadas presas nas extremidades. Há também chicanas instaladas ao longo do trocador, que servem para dar maior suporte aos tubos e direcionarem o fluido que corre na carcaça.

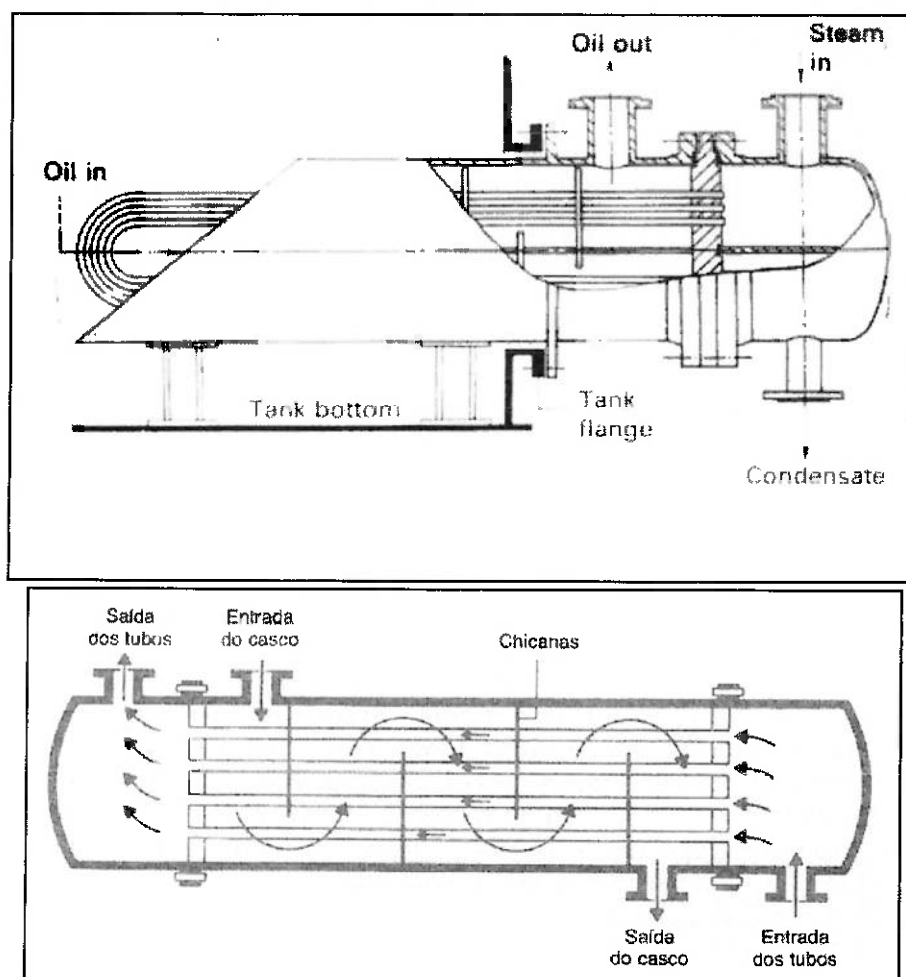


Figura 7.1: Algumas configurações típicas de trocadores de casco e tubos

A TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.) é um código de fabricação de TC's de casco e tubos, que regulamenta a fabricação e comercialização destes equipamentos. Neste código, a cada tipo de TC é atribuído uma letra, genérica para aqueles trocadores.

Dentre as regulamentações, estão especificados os tipos de trocadores disponíveis no mercado segundo o seu projeto. Estas especificações podem ser encontradas na literatura especializada. Algumas classificações de TC's de casco e tubo são: lâmina de tubos fixos (TEMA L, M e N), tubos em U (TEMA U), externamente vedado (TEMA W) dentre outros.

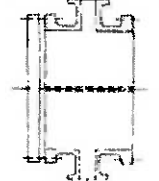
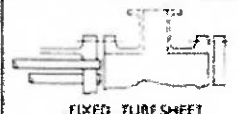
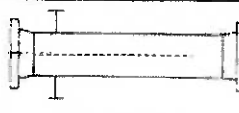
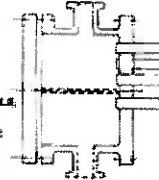
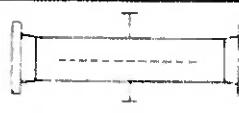
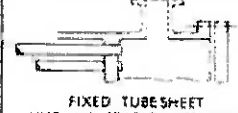
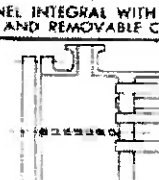
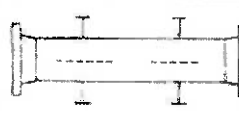
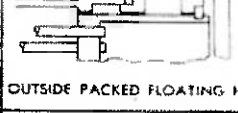
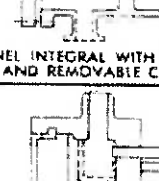
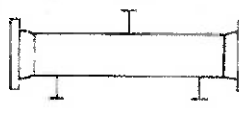
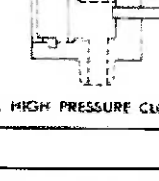
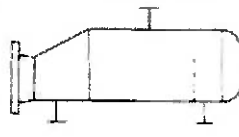
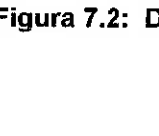
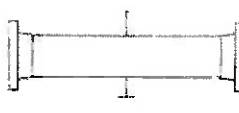
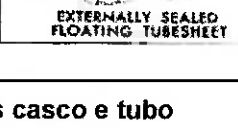
FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
A		E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
		F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
		G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
		H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
		J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
N		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
D		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Figura 7.2: Designações da TEMA para trocadores casco e tubo

7.1.1 Sistema de designação de passes

Em TC's de casco e tubo o arranjo de passes na carcaça e no tubo tem uma importância particular no cálculo do calor trocado. Não existe um sistema padrão de designação, mas um dos métodos utilizados é o m/n , onde m e n são indicativos do número de passes na carcaça e no tubo, respectivamente. Além disso, o sinal + denota um número par não especificado de passes no tubo. Por exemplo, um trocador 2/4+ denota um caso geral de uma carcaça F com um número não especificado múltiplo de quatro passes no tubo. Deve ser notado que 1/1 e 2/2 são TC's em CC.

7.2 Casco e tubo resfriados a ar

Um tipo importante de TC's de casco e tubo são os resfriados a ar. Nestes, ar ambiente passa na parte externa dos tubos fazendo o fluido dos tubos condensar e/ou refrigerar-se. Este tipo de trocador é tão importante por ser o ar o fluido mais abundante na atmosfera, daí sua versatilidade. No entanto, o ar é um péssimo meio de transferência de calor se comparado com a água, cuja condutividade térmica é 23 vezes maior (a 35°C). Mas o sucesso destes refrigeradores é inquestionável, e alguns dos motivos que contribuíram para este trocador ser tão importante são a abundância ilimitada do ar, a dificuldade de formação de incrustações, manutenção barata, e o fato de o ar não ser um meio corrosivo. Dentre suas limitações estão o tamanho, seu custo inicial, o ruído gerado e o espaço ocupado pelo TC.

7.3 Trocadores de correntes cruzadas

Além dos trocadores CC e CP, os trocadores de fluxos cruzados são muito comuns na indústria. A versatilidade na construção destes trocadores é incrível. Dentre as configurações típicas dos trocadores de fluxo cruzado temos: ambos fluidos sem misturar-se, um fluido misturando-se ou ambos fluidos misturando-se. Em cada um destes casos, a troca de calor é diferente.

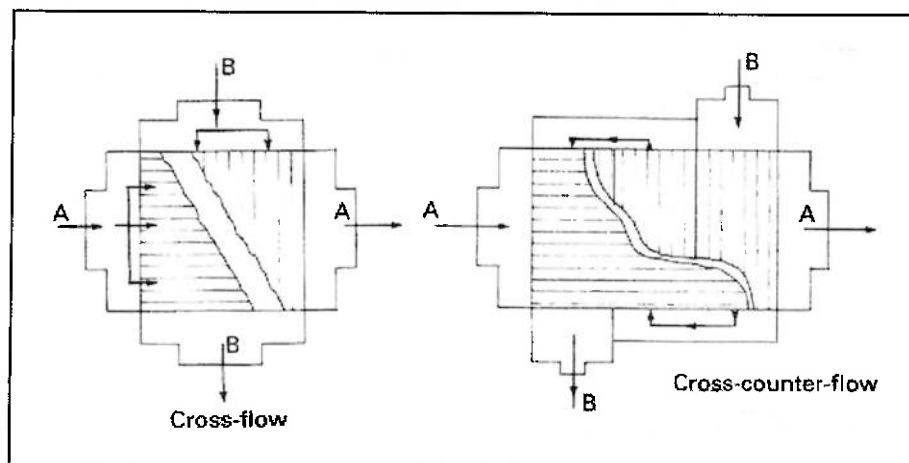
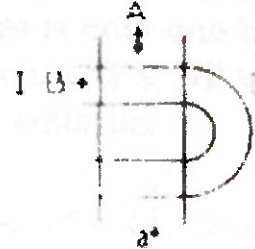
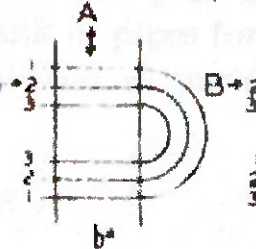
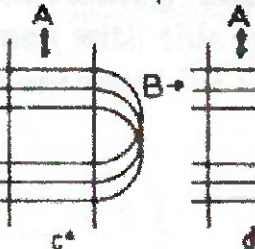
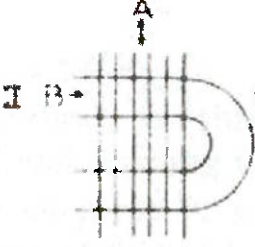
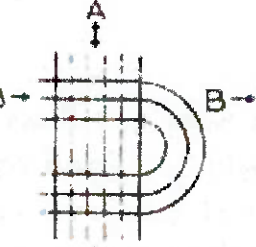
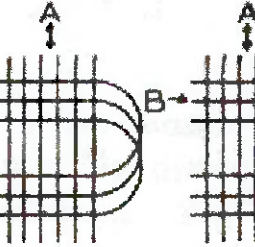
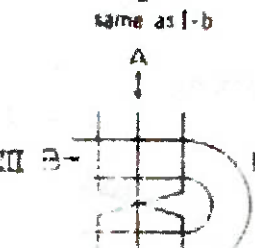
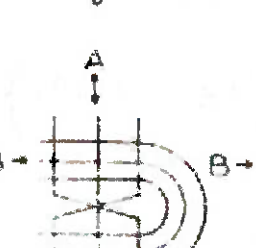
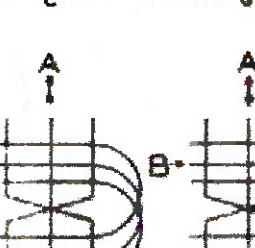
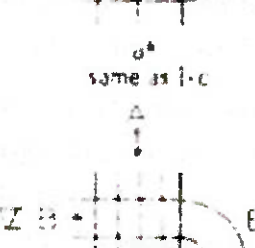
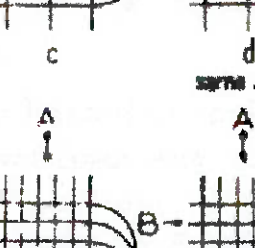


Figura 7.3 Configurações de trocadores de correntes cruzadas

A figura a seguir apresenta diversos tipos de trocadores de correntes cruzadas encontrados no mercado.

TABLE 2 — SCHEMATIC ARRANGEMENTS OF VARIOUS
CASES OF TWO-PASS CROSS-FLOW
(CASES MARKED WITH TRIANGLE ARE EITHER
PARTIALLY OR WHOLLY SOLVED)

		FLUID B MIXED		FLUID B UNMIXED IN ANY PASS			
				UNMIXED BETWEEN PASSES		MIXED BETWEEN PASSES	
				INVERTED ORDER	IDENTICAL ORDER		
FLUID A MIXED	I	B →					
			a*	b*	c*	d*	
							
			a*	b	c	d*	
			same as I-b				
	II	B →					
			a*	b	c	d	
			same as I-c		same as II-c		
					same as IV-c		
	III	B →					
			a*	b*	c	d*	
			same as I-d		same as II-d		

7.4 Casco e tubo de fluxo dividido

Em casos em que ocorre cruzamento de temperatura, os trocadores 1/2+ comuns costumam requerer área muito grande para a troca de calor, o que implica em espaço e custo elevados e eficiência baixa. O trocador de fluxos divididos utiliza a diferença de temperatura eficientemente e portanto uma melhora relativamente aos trocadores convencionais. Ao mesmo tempo, a queda de pressão nestes trocadores é a mesma.

Para baixos valores de UA/wc , o trocador convencional de casco e tubos é mais eficiente. Porém, à medida em que o valor de UA/wc aumenta (cruzamento de temperaturas), estes se tornam mais eficientes.

8. Conclusões

O método F foi um método desenvolvido na primeira metade do século e ainda hoje é uma descoberta muito útil ao engenheiro, já que boa parte dos trocadores de calor em uso hoje são trocadores que se utilizam do método da correção da diferença média logarítmica. Novos desenvolvimentos na área foram conseguidos, como o parâmetro G, que chega a fornecer aproximações do fator F desconsiderando os parâmetros R e P, o que reduz a quantidade de cálculos necessários para sua obtenção.

Dada a importância dos TC's na indústria, não é de se estranhar o investimento em pesquisa que esta área consome. Novas tecnologias estão em desenvolvimento, como películas superficiais e novos arranjos, que possam aumentar a transferência de calor de modo a tornar o processo cada vez mais eficiente. Além de novos desenvolvimentos físicos, novos softwares que ajudam o engenheiro no projeto de equipamentos estão sendo criados.

A intenção deste projeto de graduação é a elaboração de um programa de computador com fins didáticos que forneça a grandeza F aos usuários. O programa deverá conter fórmulas que descrevam o comportamento de diversos trocadores de calor, não apenas os de casco e tubo simples, como os 1/2+, 1/3+, 2/4+, etc. As fórmulas de trocadores diversos de corrente cruzada e corrente dividida serão procurados na literatura especializada.

Com a rapidez da computação e aumento brutal de suas memórias hoje em dia, pode-se perguntar qual seria a aplicação prática da economia de memória ou processos numéricos mais simples. E a resposta é que estes métodos vêm a simplificar o projeto das grandes redes de trocadores de calor. Antes da escolha final do projeto de uma rede de trocadores, um grande número de propostas têm de ser geradas - aí entram em ação os novos métodos. O escopo deste projeto não é este, já que para calcular-se a efetividade de uma malha de trocadores interligados seriam necessárias ferramentas mais complexas.

A aplicação dos trocadores de calor ainda hoje é brutal, e novamente deve ser lembrada a questão da conservação de energia: ora, se a engenharia consegue cada vez mais aproveitar a energia de processos em sua totalidade, gastando apenas o mínimo possível indispensável, um novo horizonte despontará na história da humanidade. E o papel nos trocadores de calor nesse novo rumo é notável.

Para os engenheirandos e engenheiros de hoje, a energia se revela um campo de muitas possibilidades. Muito dinheiro será pago aos que economizam energia às indústrias. A humanidade também agradece tanto a conservação de energia quanto sua recuperação. Isso acarreta em diminuição de poluição e gastos. O que mais pode querer o homem hoje?

PARTE II

**Relatório do programa de
cálculo do fator F de
correção da DMLT**

1. Introdução

Trocadores de calor são dispositivos essenciais na indústria. Nesses equipamentos, um fluido a alta temperatura é levado de encontro a um fluido a baixa temperatura com o intuito de realizar uma troca de calor. Os fluidos geralmente não se misturam, são separados por barreiras mecânicas - especialmente tubos - e nesses tubos, os fluidos percorrem uma certa distância para realizarem a troca de calor desejada.

Procurando otimizar a construção de um trocador que exigiria uma grande distância de tubulação, pode-se serpentinar um tubo dentro de uma cápsula (casco). Dessa forma, um fluido passa dentro do tubo serpentinado e outro passa fora do tubo e dentro do casco do trocador. Ainda melhorando a construção de um equipamento dimensionado para lidar com elevadas vazões, tubos podem ser empacotados em feixes que conduzem o fluxo.

Assim, inúmeros tipos de trocadores foram elaborados de modo a resolver problemas de troca de calor para as mais diversas condições de contorno. Foram elaborados trocadores grandes, compactos, muito eficientes, pouco eficientes, complexos ou banais em sua concepção, enfim.

A associação americana TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.) foi criada especificamente para regulamentar a construção e comercialização dos inúmeros tipos diferentes de trocadores tubulares - os mais comumente utilizados na indústria.

Existem dois modelos de trocadores que representam os extremos da eficiência na troca de calor: a eficiência máxima ocorre no trocador em contracorrente e a eficiência mínima ocorre no trocador em correntes paralelas.

No trocador em contracorrente (CC), dois fluidos se deslocam paralelamente em sentidos contrários. A diferença de temperatura entre os fluidos propicia uma troca de calor muito intensa. Nesse tipo de trocador pode inclusive ocorrer o cruzamento de temperaturas: a temperatura de saída do fluido frio ser maior que a temperatura de saída do fluido quente. Assim, quando falamos em troca térmica, teremos como paradigma de eficiência esse trocador de calor.

Construído identicamente ao anterior mas com os fluidos deslocando-se no mesmo sentido, o trocador de correntes paralelas (CP) é o paradigma da ineficiência. É o pior trocador em termos de eficiência. Nesse trocador, a diferença de temperatura na entrada do trocador é muito grande mas diminui à medida em que o fluxo se desloca. Assim, o trocador de correntes paralelas é eficiente apenas para curtas distâncias. Nesse trocador o cruzamento de temperaturas é impossível.

Entre o polo da eficiência máxima (contracorrente) e o da eficiência mínima (correntes paralelas) residem inúmeros tipos construtivos de trocadores.

Cálculo da transferência de calor

Para fazer-se o dimensionamento de um trocador de calor, é necessário calcular-se a quantidade de calor trocado. A troca de calor líquida realizada em um trocador de calor é dada por

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

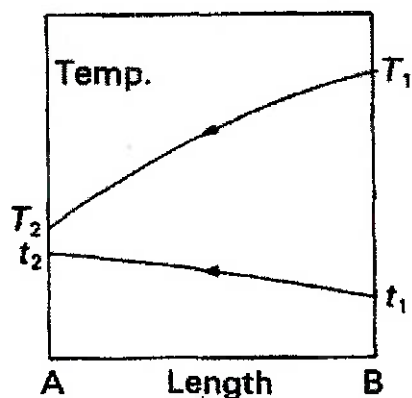
onde U é o coeficiente global de troca de calor, A é a área de troca e T_m representa a temperatura média.

Admitindo-se U fixo e sabendo-se o valor de A , restaria apenas a diferença média de temperatura para poder-se determinar a troca de calor realizada. Dessa forma seria possível dimensionar o equipamento corretamente.

Mas essa diferença de temperatura não é constante ao longo do trocador, isto é, a diferença de temperatura local de cada ponto da trajetória dos fluidos é única no trocador (excepcionalmente ocorrerá um caso em que a diferença média de temperatura será constante ao longo do trajeto). Assim, uma temperatura média de troca dos fluidos seria obtida pela integração matemática das diferenças de temperaturas locais em infinitesimais porções da trajetória dos fluidos.

Essa questão levou a inúmeras tentativas mal-sucedidas de dimensionamento de trocadores de calor: utilizava-se a diferença média aritmética de temperatura (DMAT) até 1920. Nessa, era feita uma média aritmética entre a diferença de temperatura dos fluidos em uma extremidade e a diferença de temperatura dos fluidos na outra extremidade.

Por fim, foi adotada a diferença média logarítmica de temperatura (DMLT).

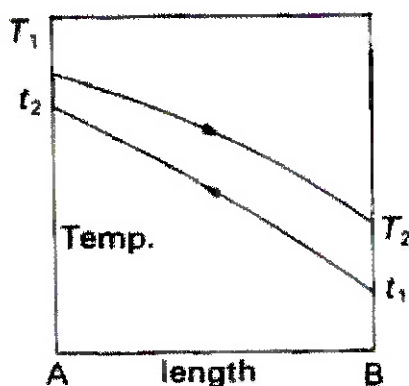


$$\Delta T_{ml,CP} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}}$$

ou então

$$\Delta T_{ml,CP} = \frac{(T_2 - t_2) - (T_1 - t_1)}{\ln \frac{(T_2 - t_2)}{(T_1 - t_1)}}$$

para trocadores em correntes paralelas e



$$\Delta T_{ml,CC} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}}$$

ou também

$$\Delta T_{ml,CC} = \frac{(T_2 - t_1) - (T_1 - t_2)}{\ln \frac{(T_2 - t_1)}{(T_1 - t_2)}}$$

para trocadores em contracorrente. T_1 , T_2 , t_1 , t_2 representam respectivamente as temperaturas de entrada e saída do fluido quente e as temperaturas de entrada e saída do fluido frio.

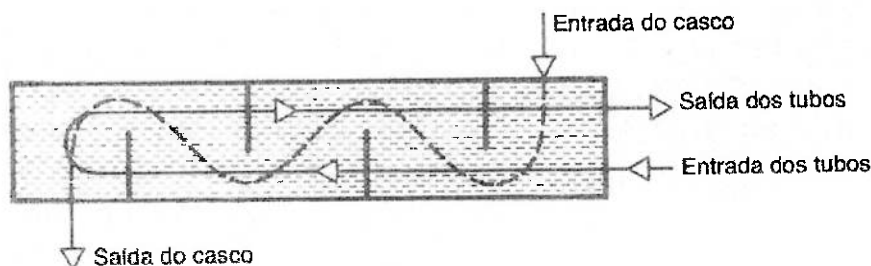
Estava determinada a diferença de temperatura exata para o cálculo da transferência de calor nesses dois tipos de trocadores.

Os casos reais da diferença de temperatura

Os casos extremos CC e CP não são os mais comumente usados na indústria por motivos variados - custo, espaço, função etc. O trocador em contracorrente, por exemplo, exige uma construção sofisticada e custosa; o de correntes paralelas exige

uma longa trajetória para realizar-se a troca, o que acarreta em custos, maior dificuldade de manutenção e assim por diante. Por isso a indústria já utilizava inúmeros outros tipos de trocadores, conforme sua necessidade.

Imaginemos um trocador em que um tubo é dobrado em forma de U. Imaginemos agora colocar esse tubo dobrado dentro de uma carcaça. Depois, por dentro do tubo, alimentamos o fluxo de um fluido. Por fora do tubo mas dentro da carcaça escoamos outro fluido. Essa figura está ilustrada abaixo:



Pois o fluido que passa dentro do tubo ora se desloca em CC com o fluido do casco ora em CP. Surge novamente a questão: qual a diferença média de temperatura que devemos adotar, CC ou CP? Resposta: devemos somar aritmeticamente a DMLT CC com a DMLT CP já que um passe está em CC e outro em CP. Portanto, a temperatura média é intermediária entre as temperaturas médias dos trocadores CC e CP.

E se estivermos lidando com tipos de trocadores cuja diferença média de temperatura é ainda mais difícil de ser calculada, por exemplo um trocador de fluxos cruzados, onde a diferença de temperatura varia com o comprimento e a largura do trocador?

O fator F de correção da DMLT

Cada tipo construtivo de trocador tem seu próprio valor de DMLT. O que fazer então para dimensionar-se um equipamento, começar a deduzir fórmulas matemáticas da DMLT para cada trocador? Incômodo, não? Numa época que não existiam calculadoras...

Ao invés de se deduzirem fórmulas matemáticas para cada trocador, convencionou-se usar a DMLT CC como padrão em cálculos de trocadores. O que fizeram então foi atribuir um fator de correção (F , adimensional), valendo entre 0 e 1, uma porcentagem que caracterizaria o quanto o comportamento de um trocador qualquer se aproxima do

trocador CC.

$$\Delta T_{ml,trocador} = F \cdot \Delta T_{ml,CC}$$

Foram obtidos experimentalmente diversos valores de F para trocadores em função das temperaturas de entrada e saída do trocador. Os dados foram plotados num gráfico em função de duas grandezas: R (razão da capacidade de calor) e P (eficiência térmica).

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{com } R \in [0, \infty[\text{ e } P \in [0, 1]$$

Assim, para saber o fator F de correção de qualquer trocador, seria necessário apenas ter acesso a esses gráficos para fazer-se o dimensionamento. Diversos gráficos foram sendo construídos a partir de então.

Um dado acrescentado a esses gráficos foi a linha do limiar - o limiar é o ponto em que ocorre cruzamento de temperatura, isto é, a temperatura de saída do fluido quente é menor que a temperatura de saída do fluido frio. Dessa forma, na porção do gráfico superior à linha de limiar não ocorre cruzamento de temperatura; na porção inferior, ocorre.

Como a eficiência dos trocadores é decrescente com F decrescente, convencionou-se plotar os gráficos de F começando de F=0,7. Isso porque um trocador com F muito baixo é economicamente desinteressante. Na maior parte da literatura consultada os gráficos não eram plotados para valores de F inferiores a esse.

O parâmetro G

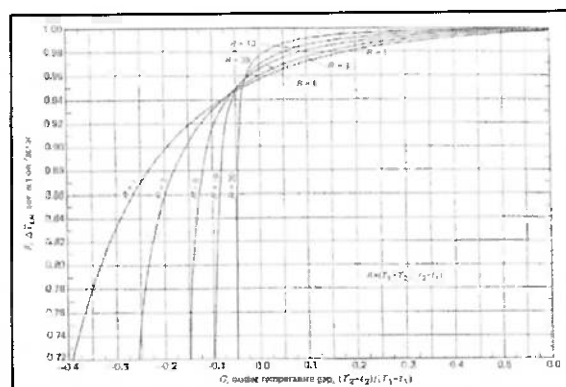
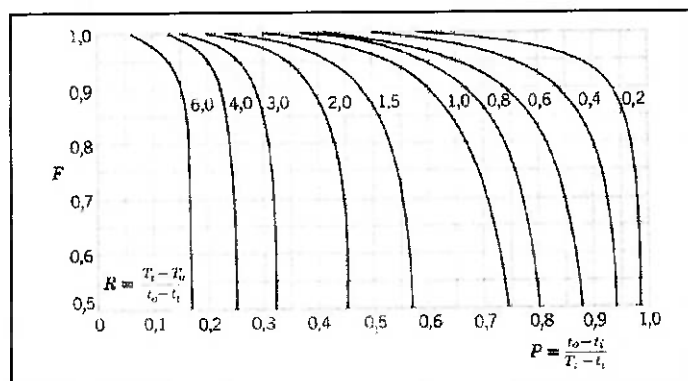
Recentemente a construção desses gráficos vem incorporando um novo parâmetro em detrimento de P, o fator G (discrepância térmica):

$$G = \frac{T_2 - t_2}{T_1 - t_1}$$

O adimensional $G \in [-1, 1]$ tem como vantagem a fácil visualização do limiar ($G=0$). À direita da ordenada G têm-se os pontos em que não ocorre cruzamento de temperatura; à esquerda, ocorre. Como desvantagem, a visualização do gráfico é pior, o gráfico é mais "embolado".

Portanto, hoje em dia é possível encontrarem-se dois tipos de gráficos de F :

$F=f(R,P, \text{ trocador})$ ou $F=f(R,G, \text{ trocador})$.



Gráficos de F em função de R, P , tipo de trocador ou R, G , tipo de trocador (respectivamente)

2. Justificativa do problema

O programa foi elaborado para que os alunos da disciplina PMC-402 (Trocadores de calor) pudessem visualizar um aspecto específico dado no curso. É um programa didático para alunos de engenharia mecânica ou química.

As curvas do fator de correção F da DMLT em trocadores podem ser obtidas na literatura sobre engenharia mecânica e química. Alguns livros contêm muitos tipos de trocadores de calor e suas curvas, outros apenas mostram as curvas mais comuns.

Mas mesmo nos livros que contêm diversos tipos trocadores, as curvas são construídas para valores fixos de R , por exemplo, 0,1, 0,2, 0,3 etc. Ou seja, o usuário que deseje obter os valores de F para $R=0,15$ terá de interpolar as curvas do livro. Assim, o programa também permitiria uma visualização precisa de qualquer fator F que o usuário precisasse.

Procurando literatura sobre o assunto, foram surgindo descobertas muito interessantes. A bibliografia consultada abrange tanto *papers* antigos (um de 1933, um de 1940 etc.) como publicações mais recentes. Dentre os títulos consultados estão as revistas Chemical Engineering e The Transactions of the ASME.

A primeira das descobertas foi a de as curvas do fator F não serem construídas experimentalmente hoje em dia, isto é, foram elaboradas fórmulas para o cálculo dos coeficientes F para os mais diversos tipos de trocadores. Assim, na bibliografia citada são encontradas diversas fórmulas para o cálculo de F – algumas confiáveis, outras não. Essas fórmulas foram construídas tendo por base a troca de calor envolvida em cada trocador diferente.

Outra descoberta interessante foi um parâmetro, G (discrepância térmica), que pode substituir o parâmetro P (eficiência térmica) nos cálculos de trocadores – com a vantagem de ser o parâmetro G excelente para uma melhor compreensão intuitiva do que acontece num trocador de calor (se $G < 0$ houve cruzamento de temperatura, se $G > 0$ não houve e se $G = 0$ então a temperatura de saída do fluido frio é igual à temperatura de saída do fluido quente).

Uma terceira descoberta interessante – mas não coberta pelo programa – são os intervalos de R e G ($0,33 < R < 3.0$ e $G > 0$) em que os valores de F podem ser obtidos, com boa aproximação, apenas em função de G ao invés de G e R . Essas aproximações numéricas são feitas para os trocadores tipo casco e tubo. Publicados na revista Chemical Engineering de Novembro/96, os dados têm excelente margem de erro, 2%.

3. Revisão bibliográfica das fórmulas empregadas

O programa emprega diversas fórmulas, algumas obtidas em livros, outras em publicações técnicas. As publicações mais antigas contêm fórmulas mais complicadas; as mais contemporâneas foram simplificadas, o que facilita a vida do usuário.

Algumas publicações (principalmente as mais antigas) trazem as deduções matemáticas das fórmulas, o que é muito interessante. A terminologia de 70 anos atrás era bastante diferente da de hoje. Uma publicação muito interessante é a de Bowman, Nagle e Mueller, apresentada em 1939, em que os autores apresentam diversos tipos de trocadores e suas fórmulas para cálculo de F. Também tive o prazer de encontrar a publicação "pai de todas": datada de 1933, escrita por Nagle, intitulada "Mean Temperature Differences in Multipass Heat Exchangers", essa publicação é citada em toda a bibliografia que consultei.

Dentre os problemas encontrados com a aplicação das fórmulas houve erros de digitação por parte dos livros especializados, presença de singularidades nas fórmulas, simplificação insuficiente por parte do autor etc. Perda muito grande para o programa foi faltarem as fórmulas N/3N+ e a fórmula geral dos trocadores tipo U-bend section, N tubos.

As fórmulas abaixo foram obtidas do livro *Handbook of Heat Exchanger Design*, [11] pgs. 1.5.2-2 até 1.5.3-8, citado na bibliografia. As fórmulas que não foram obtidas desse livro estão explicitadas abaixo da fórmula correspondente.

1. Fórmula do trocador de correntes paralelas

$$F = \frac{-(R+1)}{\delta \cdot \ln[1 - P(R+1)]}$$

onde

$$\delta = \frac{R-1}{\ln \left[\frac{1-P}{1-PR} \right]} \bigg|_{R \neq 1} = \frac{1-P}{P} \bigg|_{R \rightarrow 1}$$

Esse parâmetro, delta, foi de utilidade para o programa inteiro.

2. Fórmula para os trocadores de casco e tubo com N passes no casco e $2N$ passes no tubo.

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{\delta \cdot \ln \left[\frac{2 - P_N \cdot (1 + R - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P_N \cdot (1 + R + \sqrt{R^2 + 1})} \right]}$$

onde

$$P_N = \frac{1 - \left[\frac{PR - 1}{P - 1} \right]^{\frac{1}{N}}}{R - \left[\frac{PR - 1}{P - 1} \right]^{\frac{1}{N}}} \bigg|_{R \neq 1} = \frac{P}{N - P(N - 1)} \bigg|_{R \rightarrow 1}$$

3. Fórmula do trocador P TEMA J com um único passe de tubo

Essa fórmula funcionou apenas na singularidade ($R=0,5$). A fórmula geral deve conter erro de digitação. Por isso não foi incluído no programa esse trocador.

$$P = 1 - \left(\frac{2R - 1}{2R + 1} \right) \cdot \frac{2R + \exp(NUT)^{(R+0,5)}}{2R - \exp(NUT)^{(R+0,5)}} \bigg|_{R \neq 0,5} = 1 - \frac{1 + \exp(NUT)^{-1}}{2 + NUT} \bigg|_{R=0,5}$$

Obtido P então calculamos

$$F = \frac{1}{\delta \cdot NUT}$$

Algumas fórmulas do programa não calculam F diretamente, isto é, primeiramente calculam P a partir de NUT para depois calcular F. Sempre que isso acontece, utiliza-se a fórmula acima para calcular F.

4. Fórmula do trocador P TEMA J com $2N$ passes de tubo

$$P = \left(\frac{R \cdot \exp(NUT)^R}{\exp(NUT)^R - 1} + \frac{\exp(NUT)}{\exp(NUT) - 1} - \frac{1}{NUT} \right)^{-1}$$

5. Fórmula do trocador P TEMA G com 2N passes de tubo

$$a = \frac{2R+1}{4} \cdot NUT$$

$$b = \frac{2R-1}{2} \cdot NUT$$

$$D = \frac{1 - \exp(-a)}{2R+1}$$

$$J = \frac{1}{1-D} [(1+G+2RG) \cdot \exp(a) + 2RD]$$

$$G = \frac{1 - \exp(-b)}{2R-1} \Big|_{R \neq 0,5} = \frac{1}{2F\delta} \Big|_{R=0,5}$$

$$P = \frac{J-1}{J+2R \cdot \exp(a)}$$

6. Fórmula do trocador de fluxos cruzados, fluidos não misturados

Por fluido misturado entende-se que a temperatura do fluxo é igual em qualquer direção normal ao escoamento. No fluxo não misturado pode existir diferença de temperatura dentro do fluido em ao menos uma direção normal ao fluxo.

Esta é a fórmula mais complicada e demorada de se calcular,

$$P = \frac{1}{RN} \sum_{n=0}^p \left\{ \left(1 - e^{-N \sum_{m=0}^n \frac{N^m}{m!}} \right) \cdot \left(1 - e^{-RN \sum_{m=0}^n \frac{(RN)^m}{m!}} \right) \right\}$$

onde $p=10$ (define a precisão do método, quanto maior p , melhor a precisão). O parâmetro p foi adotado como 10 no programa por sugestão do livro

7. Fórmula do trocador de fluxos cruzados, um dos fluidos misturados

As fórmulas dos trocadores de fluxos cruzados a seguir foram obtidos da publicação de 1940 de Bowman, Mueller e Nagle intitulada "Mean Temperature Difference in Design" citada na bibliografia. O parâmetro Ro será usado para a realização dos cálculos:

$$R_o = \frac{RP - P}{\ln \left[\frac{1 - P}{1 - RP} \right]}$$

e então

$$F = \frac{P}{\ln \frac{1}{1 - \frac{1}{R} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - RP} \right)}} \cdot R_o$$

8. Fórmula do trocador de fluxos cruzados, ambos misturados

$$F = \frac{\frac{RP}{1 - e^{-\frac{RP}{R_o}}} + \frac{P}{1 - e^{-\frac{P}{R_o}}} - R_o^2}{R_o^2}$$

9. Fórmula do trocador de fluxos cruzados com dois passes, fluxos de entrada do fluido quente e frio na mesma extremidade

$$F = \frac{P}{2 \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{R} \cdot \ln \left(\frac{P(1+R)}{P + RP \sqrt{1 - P(R+1)}} \right)}} \cdot R_o$$

10. Fórmula do trocador de fluxos cruzados com dois passes, fluxos de entrada do fluido quente e frio em extremidades opostas

$$F = \frac{P}{2 \ln \frac{1}{1 - \frac{1}{R} \cdot \frac{\ln \left(\frac{\sqrt{1-P}}{\sqrt{1-PR}} - \frac{1}{R} \right)}{1 - \frac{1}{R}}}} \cdot R_o$$

11. Fórmula dos trocadores de bancos de tubos com um passe no casco e 1,2,3 e 4 linhas de tubos

As fórmulas foram obtidas do livro *Heat Exchanger Handbook*, citado na bibliografia. A primeira fórmula apresentada é para um trocador que tem uma sequência paralela de tubos num plano (linha de tubos) paralelamente por onde passa um fluxo. O outro fluxo passa perpendicularmente a esses tubos. A segunda fórmula apresentada é para duas sequências de tubos (dois planos paralelos de tubos), por onde passa um dos fluxos. A terceira fórmula é para três planos de tubos, e assim por diante.

Para os cálculos a seguir será utilizado o parâmetro k :

$$k = 1 - e^{\frac{-NUT}{N}}$$

a. uma linha de tubos (N=1)

$$P = \frac{1}{R(1 - e^{-kR})}$$

b. duas linhas de tubos (N=2)

$$P = \frac{[1 - e^{-2kR} \cdot (1 + Rk^2)]}{R}$$

c. três linhas de tubos (N=3)

$$P = \frac{\left[e^{(3kR)} - (1 + Rk^2 \cdot (3 - k)) + \frac{3}{2} R^2 k^4 \right]}{R \cdot e^{(3kR)}}$$

d. quatro linhas de tubos (N=4)

$$P = \frac{\left[e^{(4kR)} - (1 + Rk^2 \cdot (6 - 4k + k^2) + 4R^2k^4(2 - k) + \frac{8}{3}R^3k^6) \right]}{R \cdot e^{(4kR)}}$$

Para um maior número de linha de tubos a solução se aproxima do trocador de fluxos cruzados ambos não misturados.

12. Fórmulas para trocadores de fluxos cruzados com N tubos em U (U-bend sections)

Neste tipo de trocador, assim como no anterior, uma sequência de tubos é disposta lado a lado. A diferença é que aqui os tubos são serpentinados em U. O primeiro exemplo é para N=2, isto é, um tubo em forma de U. Para N=3, o tubo parece um N, para N=4 um M e assim por diante. A fórmula geral para N tubos apresentada no livro contém erros de digitação.

Para todos os trocadores será utilizado o mesmo parâmetro k do item 11. O valor de P, para todos os trocadores, vale:

$$P = \frac{1}{R} \left(1 - \frac{1}{A} \right)$$

onde A é diferente para cada tipo de trocador.

a. Para trocadores N=2 (duas linhas de tubos, dois passes)

$$A = \frac{k}{2} + \left(1 - \frac{k}{2} \right) e^{2kR}$$

b. Para trocadores N=3 (três linhas de tubos, três passes)

$$A = k \left[1 - \frac{k}{4} - Rk \left(1 - \frac{k}{2} \right) e^{kR} + \left(1 - \frac{k}{2} \right)^2 \cdot e^{3kR} \right]$$

c. Para trocadores N=4 (quatro linhas de tubos, quatro passes)

$$A = \frac{k}{2} \left(1 - \frac{k}{2} + \frac{k^2}{4} \right) + k \left(1 - \frac{k}{2} \right) \left(1 - 2Rk \left(1 - \frac{k}{2} \right) \right) \cdot e^{2kR} + \left(1 - \frac{k}{2} \right)^3 \cdot e^{4kR}$$

d. Para trocadores N=5 (cinco linhas de tubos, cinco passes)

$$A = \left[k \left(1 - \frac{3}{4}k + \frac{k^2}{2} - \frac{k^3}{8} \right) - Rk^2 \left(1 - k + \frac{3k^2}{4} - \frac{k^3}{4} - \frac{Rk^2}{2} \left(1 - \frac{k}{2} \right) \right)^2 \right] \cdot e^{kR} +$$

$$+ \left[k \left(1 - \frac{3}{4}k + \frac{k^3}{16} \right) - 3Rk^2 \left(1 - \frac{k}{2} \right)^3 \right] \cdot e^{3kR} + \left(1 - \frac{k}{2} \right)^4 \cdot e^{5kR}$$

e. Para trocadores N=6 (seis linhas de tubos, seis passes)

$$A = \frac{k}{2} \left(1 - k + k^2 - \frac{k^3}{2} + \frac{k^4}{8} \right) + k \left(1 - k + \frac{3}{4}k^2 + \frac{5k^3}{16} + \frac{k^4}{32} \right) \cdot e^{2kR} +$$

$$- Rk^2 \left[2 - 3k + 3Rk^2 - \frac{7k^3}{4} + \frac{3k^4}{8} - Rk^2 \left(2 - 3k + \frac{3k^2}{2} - \frac{k^3}{4} \right) \right] \cdot e^{2kR} +$$

$$+ \frac{k}{2} \left(2 - 2k + \frac{k^3}{2} - \frac{k^4}{8} \right) - 4Rk^2 \left(1 - \frac{k}{2} \right)^4 \cdot e^{4kR} + \left(1 - \frac{k}{2} \right)^5 \cdot e^{6kR}$$

4. Desenvolvimento do método

Os cálculos

Há dois tipos de fórmulas que calculam F no programa: as que calculam F em função de R e P ou as que calculam F em função de R e NUT. Mas os dados que o usuário fornece ao programa são apenas R e P (ou as temperaturas, que redundam em R e P também).

Exemplo: F em função de R e P	Exemplo: P em função de R e NUT
$F = \frac{-(R+1)}{\delta \cdot \ln[1 - P(R+1)]}$	$P = \left(\frac{R \cdot \exp(NUT)^R}{\exp(NUT)^R - 1} + \frac{\exp(NUT)}{\exp(NUT) - 1} - \frac{1}{NUT} \right)^{-1}$
	$F = \frac{1}{\delta \cdot NUT}$

No primeiro caso, quando o trocador selecionado tem seu F programado em função de R e P, o cálculo é simples – é necessário apenas substituir os valores do usuário na respectiva fórmula. Antes disso, porém, o programa se certifica de que os dados fornecidos pelo usuário estão corretos – se R é positivo, se P está no intervalo [0,1] e se para os valores de R e P entrados é possível calcular F. Esta última checagem remete à questão do P máximo de um trocador (para determinado R).

Para qualquer valor de R fornecido pelo usuário, existe um ponto em que F=0, ou seja, a linha do R selecionado irá cruzar a abcissa do gráfico FxP. O ponto em que a abcissa é cruzada ocorre no valor máximo de P que um trocador admite para o R dado. Assim, se o usuário entra com um valor de P superior a P máximo, o programa avisa ao usuário o valor de P máximo dizendo que não existe o valor de F para os dados entrados. Se o valor de P for inferior a P_{máx} então os cálculos são realizados elementarmente.

Como a eficiência de um trocador deve ser a mais elevada possível, este programa assume – como boa parte da bibliografia – que valores de F inferiores a 0,7 são indesejáveis, isto é, desperdiça-se demasiada energia num trocador operando sob essas condições. Assim, o programa calcula valores de P_{máx} para F = 0,7.

O valor de $P_{\max}$ é calculado por um método numérico iterativo – o método da dicotomia – chegando a uma precisão de 4 casas decimais. Para isso são chutados valores iniciais de P procurando isolar a raiz da equação em um intervalo conhecido $[a,b] \subset [0,1]$.

```
chute(0) = 0.01
chute(1) = 0.1
chute(2) = 0.25
chute(3) = 0.4
chute(4) = 0.55
chute(5) = 0.7
chute(6) = 0.85
chute(7) = 1.00001
```

Nesse processo, o valor de $F=f(R,a)$ é sempre um número real. Já o valor $F=f(R,b)$ poderá ser negativo (absurdo), dar erro, ser complexo, enfim. Quando o cálculo de $F=f(R,b)$ tem algum erro então o primeiro intervalo da raiz foi determinado: $[a,b]$. Assim, realizam-se iterações até que o valor a_i esteja a apenas 4 casas decimais de diferença com o valor a_{i+1} (onde o índice i corresponde a cada uma das iterações).

No segundo caso, quando o trocador não tem F programado em função de R e P mas sim P em função de R e NUT , primeiramente é preciso descobrir o valor de NUT correspondente ao R e P entrados. Isso porque a fórmula utilizada para calcular F é função do NUT , $F=(\delta \cdot NUT)^{-1}$.

Para descobrir-se o NUT de um conjunto de dados R e P utiliza-se também do processo iterativo da dicotomia. Valores iniciais de NUT são chutados e os valores de P calculados a partir daquele, procurando isolar o intervalo de $NUTs$ $[a,b] \subset [0,\infty[$ em que se encontra o P fornecido pelo usuário:

```
chute(0) = 0.01
chute(1) = 0.2
chute(2) = 0.5
chute(3) = 1
chute(4) = 3
chute(5) = 10
chute(6) = 20
```

Para cada chute é calculado o valor de P. O valor do P calculado é comparado com o valor fornecido pelo usuário até que o valor do usuário e o valor calculado pela fórmula não tenham diferença maior que 0,0001. Encontrado o valor de NUT correspondente ao R e P entrados, a fórmula de F pode ser calculada.

Outros valores calculados pelo programa são a discrepância térmica (G), o F_{limiar} e o P_{limiar} . Para calcular-se G é necessário apenas substituir os valores de R e P na seguinte fórmula:

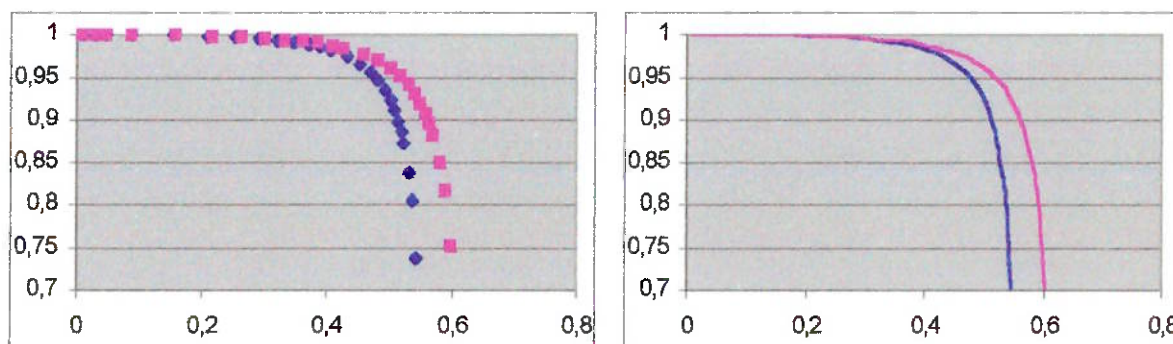
$$G = \frac{T_2 - t_2}{T_1 - t_1} = 1 - P(1 + R)$$

Já o limiar (definido como sendo o ponto em que a temperatura de saída do fluido quente é igual à temperatura de saída do fluido frio, i.e., $t_2 = T_2$) é calculado também pela fórmula acima, fazendo-se $G=0$. Tendo R e assumindo $G=0$, podemos calcular P_{limiar} pela fórmula e consequentemente F_{limiar} .

Os gráficos

O programa suporta construir o gráfico de até 8 trocadores simultaneamente. Para cada trocador, ainda, admite 8 valores diferentes de R. Cada valor de R corresponde a uma linha nos gráficos. Isso significa que o programa plotará, no máximo, até 64 linhas de R ao mesmo tempo.

Cada linha R do gráfico é construída em uma planilha independente. Isso economiza tempo nos cálculos do programa, já que no Excel a alteração de uma única célula acarreta em recalculando todo o arquivo (o que se traduz em perda de tempo). Dessa forma, no programa, as planilhas estão sempre desabilitadas para realizar quaisquer cálculos e só são reabilitadas as planilhas estritamente necessárias na hora em que o usuário dá o comando de visualização dos gráficos.



Como ao todo podem ser plotadas 64 curvas de R, o arquivo contém 64 planilhas só de cálculos para os gráficos. Caso o usuário selecione somente um trocador e dois valores de R, por exemplo, então ao invés de realizar cálculos para todas as 64 planilhas, são realizados cálculos somente em 2 planilhas. É necessário enfatizar que as outras 62 planilhas, se não estivessem desligadas, tardariam alguns segundos recalculando todas as suas células, mesmo que essas não interessassem ao usuário.

Para construir cada linha de R são utilizados 40 valores de P denominados $P_{\text{gráf}}$, onde $P_{\text{gráf}} \in [0, P_{\text{máx}}]$. Dessa forma, o programa calculará, no máximo, 2560 pontos (40×64) para plotar todos os gráficos. Isso pode tornar a construção bastante demorada, já que os cálculos não são elementares, envolvem somatórias, singularidades (exemplo $R=1$, $R=0,5$), processos iterativos etc.

Para cada trocador e cada valor de R entrado, o gráfico é construído varrendo-se os valores de P desde $P=0$ até $P=P_{\text{máx}}$. Na coluna “% $P_{\text{máx}}$ ” são colocados valores de porcentagens. Esses valores são multiplicados por $P_{\text{máx}}$, determinando os pontos $P_{\text{gráf}}$ para os quais serão calculados os valores de F a serem construídos no gráfico. Para os trocadores cujo F não é função de R e P mas sim de R e NUT, valores de NUT são colocados na coluna correspondente de forma a construir o gráfico para diversos valores de NUT. O valor calculado para cada NUT é colocado na coluna Pgraf e o valor Fgraf é calculado em função desses dois valores.

O cálculo de Ggraf é elementar e está descrito na fórmula de $G=f(R,P)$ exibida anteriormente.

Outro tipo de gráfico coberto pelo programa é o limiar. Para construir-se esse gráfico são varridos 40 pontos com valores de R diferentes colocados na coluna NUT/R_{limiar} . Para cada valor de R é determinado o valor de P_{limiar} e então em função de cada dupla R e P_{limiar} é calculado F_{limiar} . Procurando facilitar os cálculos dos trocadores cujo $F=f(R,NUT)$, os valores de P_{limiar} estão determinados na coluna $\%P_{\text{máx}}/P_{\text{limiar}}$. Assim, encontra-se o NUT_{limiar} correspondente a cada ponto P_{limiar} e então calcula-se F_{limiar} .

Casco e tubo 1/2+			%Pmax	NUT	Gráficos			LIMIAR		
N	N2	R	Plimiar	Rlimiar	Pgraf	F graf	G graf	P	F	NUT
1	0	1,500	0,001000	0,01	0,000	1,000	0,999	0,001	0,910	0,000
1	0	1,500	0,010000	0,03	0,005	1,000	0,988	0,010	0,876	0,000
1	0	1,500	0,050000	0,05	0,023	1,000	0,942	0,050	0,843	0,000
1	0	1,500	0,100000	0,10	0,046	0,999	0,884	0,100	0,828	0,000
1	0	1,500	0,150000	0,20	0,070	0,999	0,826	0,150	0,819	0,000
1	0	1,500	0,200000	0,30	0,093	0,997	0,768	0,200	0,813	0,000
1	0	1,500	0,250000	0,40	0,116	0,995	0,709	0,250	0,809	0,000
1	0	1,500	0,300000	0,50	0,139	0,993	0,651	0,300	0,807	0,000
1	0	1,500	0,350000	0,60	0,163	0,989	0,593	0,350	0,805	0,000
1	0	1,500	0,400000	0,70	0,186	0,985	0,535	0,400	0,803	0,000
1	0	1,500	0,450000	0,80	0,209	0,980	0,477	0,450	0,803	0,000
1	0	1,500	0,500000	0,90	0,232	0,972	0,419	0,500	0,802	0,000
1	0	1,500	0,550000	1,00	0,256	0,963	0,361	0,550	0,803	0,000
1	0	1,500	0,600000	1,20	0,279	0,952	0,303	0,600	0,803	0,000
1	0	1,500	0,650000	1,40	0,302	0,937	0,245	0,650	0,805	0,000
1	0	1,500	0,700000	1,60	0,325	0,918	0,187	0,700	0,807	0,000
1	0	1,500	0,725000	1,80	0,337	0,907	0,158	0,725	0,808	0,000
1	0	1,500	0,750000	2,00	0,349	0,893	0,128	0,750	0,809	0,000
1	0	1,500	0,775000	2,20	0,360	0,878	0,099	0,775	0,811	0,000
1	0	1,500	0,800000	2,40	0,372	0,860	0,070	0,800	0,813	0,000
1	0	1,500	0,825000	2,60	0,383	0,840	0,041	0,825	0,816	0,000
1	0	1,500	0,850000	2,80	0,395	0,815	0,012	0,850	0,819	0,000
1	0	1,500	0,875000	3,00	0,407	0,785	-0,017	0,875	0,823	0,000
1	0	1,500	0,900000	3,50	0,418	0,749	-0,046	0,900	0,828	0,000
1	0	1,500	0,920000	4,00	0,428	0,713	-0,069	0,920	0,833	0,000
1	0	1,500	0,930000	5,00	0,432	0,692	-0,081	0,930	0,836	0,000
1	0	1,500	0,940000	6,00	0,437	0,669	-0,092	0,940	0,839	0,000
1	0	1,500	0,950000	7,00	0,442	0,641	-0,104	0,950	0,843	0,000
1	0	1,500	0,960000	8,00	0,446	0,610	-0,116	0,960	0,848	0,000
1	0	1,500	0,970000	10,00	0,451	0,571	-0,127	0,970	0,854	0,000
1	0	1,500	0,980000	12,00	0,456	0,522	-0,139	0,980	0,863	0,000
1	0	1,500	0,982000	14,00	0,456	0,511	-0,141	0,982	0,865	0,000
1	0	1,500	0,984000	16,00	0,457	0,498	-0,143	0,984	0,867	0,000
1	0	1,500	0,986000	20,00	0,458	0,484	-0,146	0,986	0,870	0,000
1	0	1,500	0,988000	24,00	0,459	0,469	-0,148	0,988	0,873	0,000
1	0	1,500	0,990000	28,00	0,460	0,452	-0,150	0,990	0,876	0,000
1	0	1,500	0,999000	32,00	0,464	0,304	-0,161	0,999	0,910	0,000
1	0	1,500	0,999990	40,00	0,465	0,181	-0,162	1,000	0,943	0,000

Calculados os valores de F para cada ponto, os pontos são colocados no gráfico e uma linha é construída pelo Excel, unindo os pontos.

Para que o programa saiba que fórmula deve ser usada para cada tipo de trocador, foi atribuído um número para cada trocador. Esse número está colocado na coluna N da tabela acima. Assim, quando o programa chama o procedimento de cálculo de F, o valor N será o parâmetro que dirá a fórmula a ser usada para aquele cálculo.

Os valores de N do programa são:

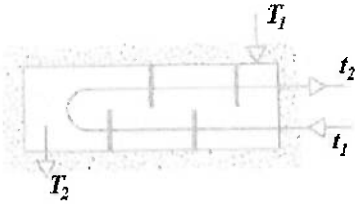
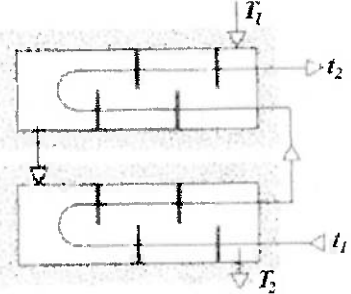
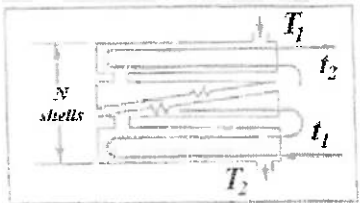
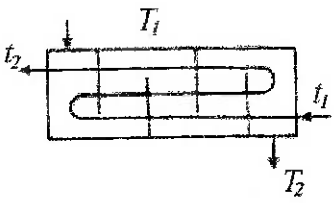
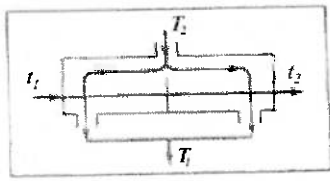
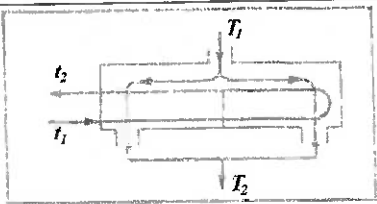
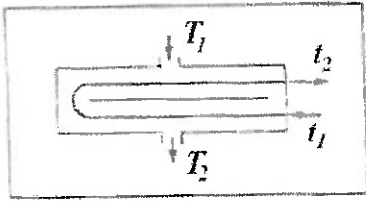
N	Trocador
0	Correntes paralelas
1	Casco e Tubo 1/2+
2	Casco e Tubo 2/4+
3	Casco e Tubo N/2N+
4	Casco e Tubo 1/3+
5	Casco e Tubo 2/6+
6	Casco e Tubo 3/3N+
7	TEMA J, 1 passe no tubo
8	TEMA J, 2N passes no tubo
9	TEMA G, 2N passes no tubo
10	Cruzado, sem misturar
11	Cruzado, um lado misturado

12	Cruzado, ambos lados misturados
13	Cruzado dois passes, quente-quente
14	Cruzado dois passes, quente-frio
15	Tube Rows (1 linha de tubos)
16	Tube Rows (2 linha de tubos)
17	Tube Rows (3 linha de tubos)
18	Tube Rows (4 linha de tubos)
19	Tube Rows (N linha de tubos)
20	U-bend Section (2 linhas de tubos)
21	U-bend Section (3 linhas de tubos)
22	U-bend Section (4 linhas de tubos)
23	U-bend Section (5 linhas de tubos)
24	U-bend Section (6 linhas de tubos)

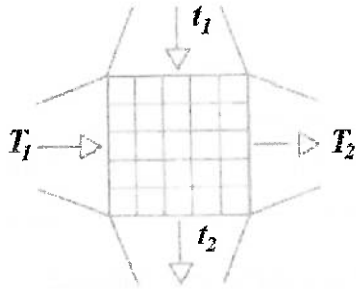
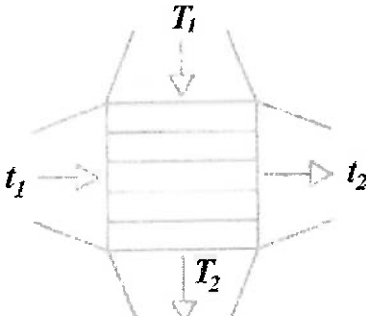
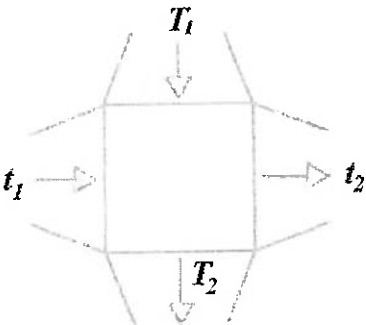
Os trocadores sombreados acima têm problemas no programa. Esses problemas estão descritos na revisão bibliográfica deste relatório.

Na coluna N2 está colocado o número de passes do trocador N/2N+, valor fornecido pelo usuário quando seleciona o trocador N/2N+. Na coluna R está colocado o valor de R para a linha a ser construída.

Tipos de trocadores de calor e seus respectivos valores N no programa

		
Correntes Paralelas: N=0	Casco e Tubo 1/2+	Casco e Tubo 2/4+
		
Casco e Tubo N/2N+	Casco e Tubo 1/3+	TEMA J com 1 passe no casco
		
TEMA J com 2+ passes no casco	TEMA G com 2+ passes no casco	

Trocadores de calor de fluxos cruzados e seus respectivos valores de N no programa

		
Trocador de fluxos cruzados com ambos fluidos não misturados: N=10	Trocador de fluxos cruzados com um fluido misturado: N=11	Trocador de fluxos cruzados com ambos fluidos misturados: N=12

Fluxos cruzados, dois passes, contato quente-quente: N=13	Fluxos cruzados, dois passes, contato quente-frio: N=14	Fluxos cruzados, 1 feixe de tubos (Tube Rows): N=15
Fluxos cruzados, 2 feixes de tubos: N=16	Fluxos cruzados, 3 feixes de tubos: N=17	Fluxos cruzados, 4 feixes de tubos: N=18
Fluxos cruzados, 2 feixes de tubos em U: N=20	Fluxos cruzados, 3 feixes de tubos em U: N=21	Fluxos cruzados, 3 feixes de tubos em U: N=22

5. Descrição do programa

Cálculo do fator F de correção da DMLT em trocadores de calor

Cálculos

Dados de entrada

☐ Temperaturas

☐ Adimensionais (R e P)

Tipos de trocadores:

N:

Adimensionais

R (heat capacity ratio):

P (thermal effectiveness):

Temperatura de...

...entrada do fluido quente (T1):

...entrada do fluido frio (t1):

...saída do fluido quente (T2):

...saída do fluido frio (t2):

Calcular Valores

Resultados

F:

G (thermal gap):

máximo valor de P:

(para o trocador e R selecionados)

F(limiar):

P(limiar):

Gráficos

Operações

☐ Plotar gráficos

☐ Plotar linear

Dados de gráfico

Entrar valores de R:

Entrar Trocadores:

Dados entrados

Tipos de trocadores selecionados:

Valores de R:

Limpar dados

Visualizar gráfico P

Visualizar gráfico G

Figura 1 Tela principal do programa. Na parte superior do formulário só se realizam cálculos; na inferior se fornecem os dados para a construção dos gráficos.

O programa consiste de duas partes independentes. Na moldura superior do programa (Cálculos) são apenas realizados cálculos, isto é, não é possível construírem-se os gráficos. Já na moldura inferior o oposto ocorre: são apenas construídos os gráficos.

Cálculos

Os dados necessários ao cálculo do fator F de correção da DMLT (diferença média logarítmica de temperatura) são R (razão da capacidade de calor) e P (eficiência térmica). Esses fatores podem ser fornecidos diretamente ao programa na moldura Adimensionais. O programa não permite calcular o fator F a partir de R e G.

Quando R e P não são fornecidos pelo usuário, então o programa pode calcular esses fatores desde que o usuário forneça as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio. O inverso é impossível: a partir de R e P, determinarem-se todas as

temperaturas de entrada e saída do trocador.

Além de fornecer as temperaturas ou os fatores adimensionais R e P, o usuário deve selecionar o tipo de trocador de calor em questão na caixa combo intitulada "Tipos de trocadores".

Os dados calculados pela parte superior do programa são (1) o fator F, (2) o fator G (discrepância térmica), (3) o valor de F no limiar (o ponto em que ocorre cruzamento de temperaturas), (4) o valor de P no limiar e (5) o máximo valor de P para um valor de R (com $F_{\min}=0,7$). Esses dados não são plotados em gráfico.

Figura 2 Resultados calculados pelo programa. Caixa combo "Tipos de trocadores" em destaque também.

Gráficos

Para a construção dos gráficos, devem ser selecionados até 8 trocadores simultaneamente. Além disso, devem ser escolhidos até 8 valores de R para os quais se deseja plotar o gráfico. Existem 25 valores de R sugeridos para se plotarem os

gráficos. Esses valores aparecem quando é clicado o botão "Entrar Rs". Se quiser, o usuário pode optar por entrar os valores de R personalizados.

Entrar valores de R

Valores sugeridos de R

☒ 0,1	☐ 0,6	☐ 1,2	☐ 2,0	☐ 5,0
☐ 0,2	☒ 0,7	☐ 1,4	☐ 2,5	☐ 7,5
☐ 0,3	☒ 0,8	☒ 1,5	☐ 3,0	☐ 10,0
☐ 0,4	☐ 0,9	☒ 1,6	☐ 3,5	☐ 15,0
☐ 0,5	☐ 1,0	☐ 1,8	☒ 4,0	☐ 20,0

Valores de R escolhidos:

- 0,1
- 0,7
- 0,8
- 1,5
- 1,6
- 4,0

Entre com seu valor de R

R:

Confirma valores

(Para excluir um valor de R clique duas vezes sobre o valor.)

Figura 3 Formulário para seleção de valores de R.

O usuário pode escolher plotar o limiar ou não. Pode-se inclusive contruir um gráficos só com o limiar, caso em que não é necessário entrar qualquer valor de R.

A legenda do gráfico é construída para cada novo gráfico plotado. Os valores de R plotados são mostrados na legenda. Os valores estão na ordem em que aparecem na tela - Rs maiores à esquerda no gráfico $f(R,P,trocador)$. No gráfico $f(R,G,trocador)$ ocorre o contrário, única exceção sendo o trocador em correntes paralelas, onde os maiores valores de R estão à esquerda.

Para plotar o gráfico o usuário também deve selecionar o(s) tipo(s) de trocador(es) que deseja estudar. Isto é feito no formulário seguinte, de seleção de trocadores. Nesse formulário são apresentados os vinte tipos de trocadores cobertos pelo programa. A seleção é feita por "checkboxes". Quando o usuário seleciona o tipo de trocador Casco e tubo N/2N+, também é pedido o valor de N para o trocador que ele deseja estudar (igualmente como na parte de cálculos do programa).

Selecionados os tipos de trocadores e os valores de R que o usuário deseja, estes valores são plotados na planilha geral para que o usuário possa confirmar se seus dados estão corretos. Desejando corrigir os dados, ele deve voltar aos formulários de seleção de trocadores e de valores de R.

Seleção de trocadores

☐ Correntes paralelas	☐ Cruzado dois passes, quente-frio
☐ Casco e tubo 1/2+	☐ Uma linha de tubos
☒ Casco e tubo 2/4+	☒ Duas linhas de tubos
☒ Casco e tubo N/2N+ N: 5	☐ Três linhas de tubos
☒ TEMA J 2N	☒ Quatro linhas de tubos
☐ TEMA G 2N	☐ U-bend section, 2 tubos
☐ Cruzado sem misturar	☒ U-bend section, 3 tubos
☒ Cruzado, um lado misturado	☐ U-bend section, 4 tubos
☐ Cruzado, ambos lados misturados	☒ U-bend section, 5 tubos
☐ Cruzado dois passes, quente-quente	☒ U-bend section, 6 tubos

Confirma seleção

Figura 4 Formulário para seleção e trocadores de calor dos gráficos.

Selecionados os dados então o usuário seleciona o tipo de gráfico que ele deseja visualizar.

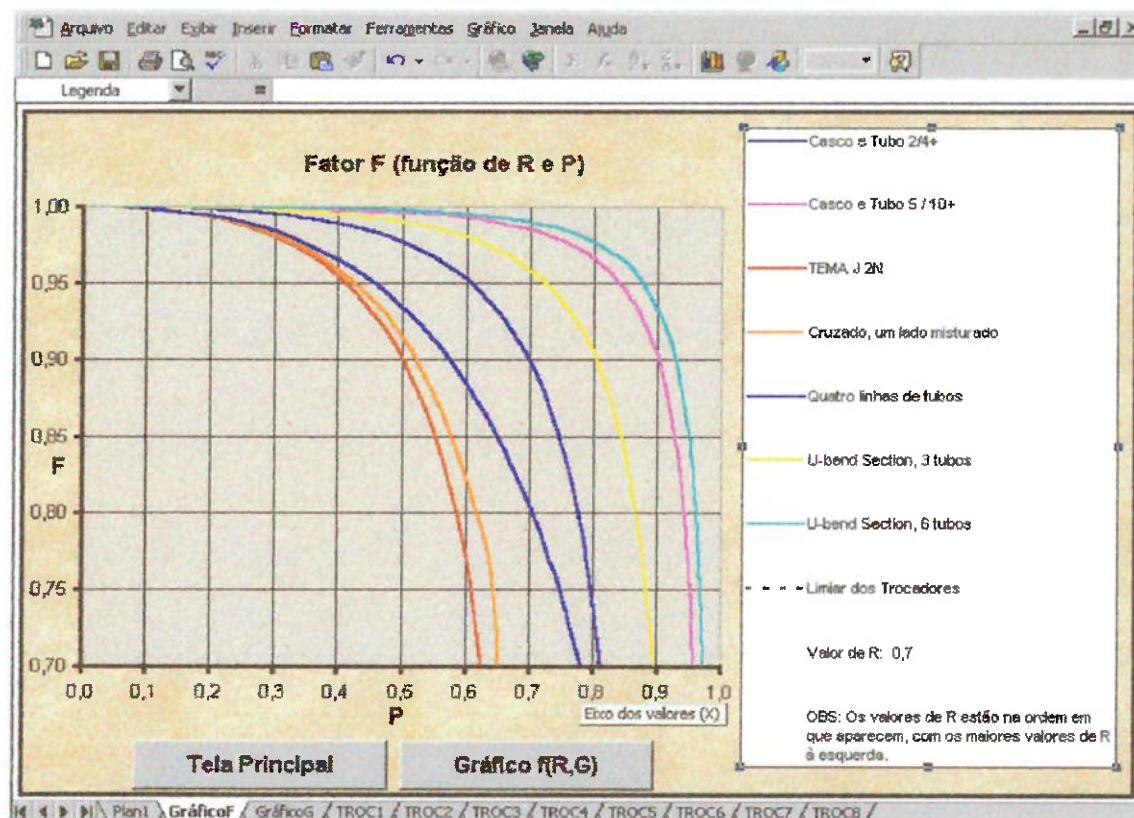


Figura 5 Gráfico de F como função de R e P (gráfico F).

Desejando visualizar o outro tipo de gráfico, $F = f(R, G, \text{tipo de trocador})$, o usuário verá este outro tipo de tela:

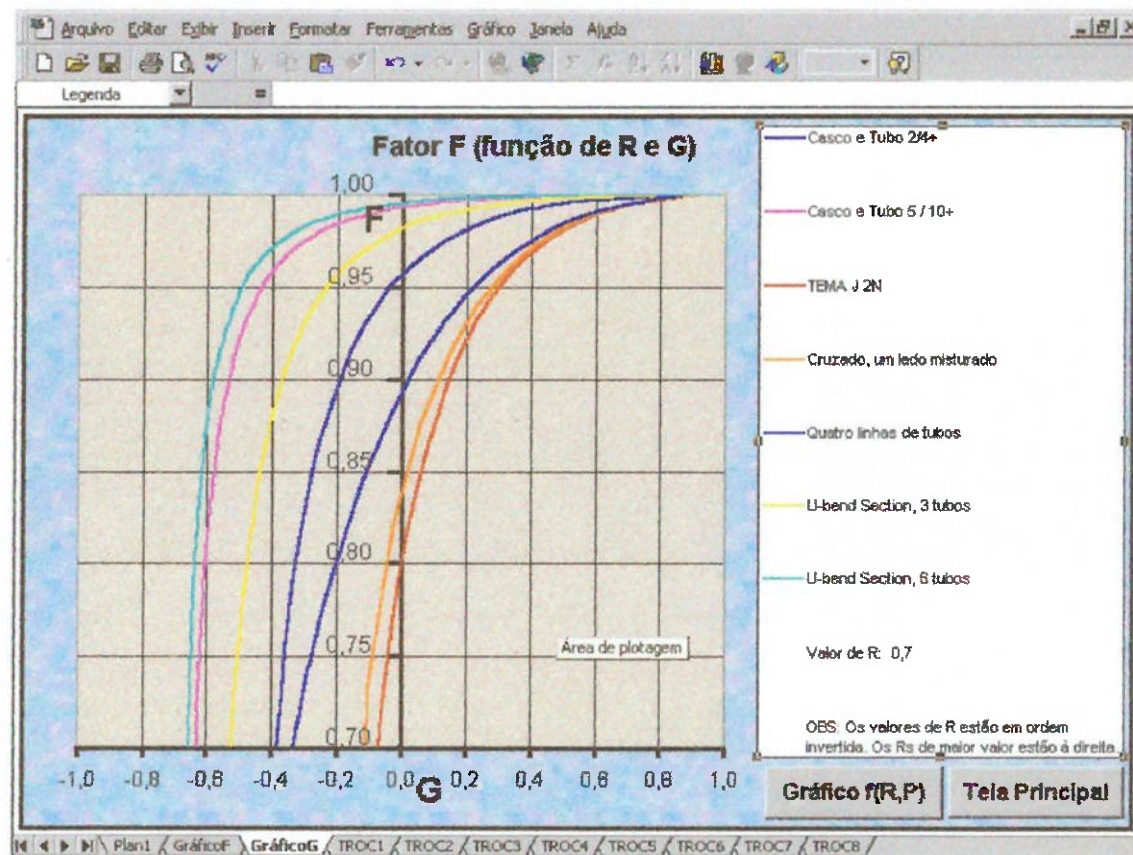


Figura 6 Apresentação do gráfico F em função de G (gráfico G).

6. Conclusões

Um programa didático

O programa de cálculo do fator F é essencialmente um programa didático. Sua interface é bastante simples e tem poucos recursos para o usuário: ao total são vinte os tipos de trocador que o usuário pode estudar, são sete os parâmetros que o programa calcula (R , P , G , F , F_{limiar} , P_{limiar} e P_{max}) e três os tipos de gráfico (P , G e limiar). Não caberia fazer um programa de maior escopo pois as ferramentas que tenho em mão como programador são escassas e o tempo exigido seria muito maior que o sugerido para a disciplina de conclusão de curso.

Este *software* permite a comparação da eficiência de diferentes trocadores de calor, o que já é bastante interessante *per se*. Pode-se escolher, dentre uma série de trocadores, o mais adequado para uma determinada aplicação. É lógico que este programa não deve ser a única ferramenta na escolha de um trocador de calor pois o programa não leva em conta espaço, custo, manutenção etc. Além disso, ao se pensar em um projeto, onde a responsabilidade do engenheiro é extrema, apelar para ferramentas tecnicamente mais apuradas é indispensável.

Ao fazer este programa, fui levado a considerar o quanto o computador revolucionaria a educação. Acho que o curso de engenharia se beneficiaria enormemente por programas que pudessem ilustrar aos alunos os problemas que eles resolvem. Logo me vieram à mente programas de termodinâmica, de transferência de calor, mecânica dos fluidos, resistência dos materiais, elementos de máquina e tantas outras disciplinas. Pensei também que para o colegial poderiam ser construídos softwares que ilustrassem problemas de física como lançamentos oblíquos, eletricidade, termofísica, óptica etc.

Também fiquei mais alerta ao que as lojas oferecem em termos de programas educacionais e fiquei bastante empolgado com alguns *softwares* didáticos de Matemática e História. Li em alguma revista que algumas escolas começam a dar algumas aulas com programas e os alunos assistem às aulas com óculos 3D, não precisam de cadernos, etc. Alguns professores também já começam a dar aula em Powerpoint, por exemplo, assim o aluno não precisa dividir sua atenção entre copiar a

louza e compreender o que o professor diz. Na época de prova o professor deixa o material do curso em seu site pessoal, disponível para download dos alunos, ou mesmo o deixa disponível para os alunos em algum outro lugar.

Esses horizontes me fizeram desejar continuar o curso de engenharia, agora como mestrando.

Escolha da linguagem de programação

No início, o Visual Basic parecia ser a escolha mais adequada pois tornaria a interface amigável. Apesar da interface *user friendly* o problema da adoção do VB seria o fato de que a programação da construção dos gráficos seria bastante complicada, especialmente porque minha experiência em programação é pequena. Além disso, também, o VB é uma linguagem totalmente diferente das linguagens de programação que eu trabalhara até então. Suas convenções – objetos, métodos, classe – tudo isso era novo para mim.

Decidi então mudar para Excel. Mas também usar exclusivamente o Excel se revelou inconveniente demais, porque era necessário programar cada célula com pesadas fórmulas de cálculo, o que tornava o programa ininteligível para mim. Cada célula tinha que estar preparada para calcular o resultado de qualquer um dos vinte trocadores – e portanto seria necessário programar cada uma das células com as fórmulas de todos os trocadores. Some-se a isso o fato de que algumas fórmulas não estavam em função de R e P, mas sim de R e NUT.

A escolha do Visual Basic for Applications, VBA, veio como única solução possível. Assim eu teria uma visualização boa da programação dos gráficos pois eu veria os números expostos na planilha durante a programação e além disso a parte gráfica do Excel já estava pronta. Não precisei perder tempo descobrindo como programar gráficos – pude concentrar meu tempo em outras coisas menos “braçais”.

No VBA eu pude programar todas as fórmulas necessárias da forma mais conveniente. Os cálculos no Excel são realizados rapidamente mesmo quando temos planilhas com cálculos complexos.

Evolução do método

Na primeiras soluções gráficas muitos pontos eram calculados. Isso onerava o programa com cálculos pesados. Por tentativa e erro fui conseguindo determinar um conjunto de pontos suficientes para a construção do gráfico sem sobrecarregar de cálculos o programa. O Excel tem a função da “linha suavizada”, o que esconde os “buracos” deixados pelo espaçamento muito grande entre pontos.

São calculados 38 pontos para cada gráfico. Alguns desses pontos podem não estar plotados no gráfico por não estarem contidos no intervalo $[0.7, 1]$. Mas os 38 pontos são mais que suficientes para tornar todos os gráficos suaves – o que é o mais importante para o usuário, pois a escolha do valor de F é visual.

Uma das descobertas mais interessantes no programa foi a adequação de alguns pontos para funcionarem como parâmetro para outro cálculo, dessa forma reduzindo o número de variáveis totais do programa. Por exemplo, como $P \in [0, 1]$, um outro parâmetro, uma porcentagem, faz a função de P em alguns cálculos; ou então o parâmetro NUT ($NUT \in [0, \infty[$) serve também como R ($R \in [0, \infty[$). Esse intercâmbio é melhor exemplificado nas funções contidas no módulo “gerais” do programa.

Um teste rapidamente descartado foi a construção da planilha por VBA, isto é, calcular os valores dos pontos do gráfico no VBA e mandar esses valores para a planilha. A demora é absurda e a construção de uma linha de R leva segundos. Já na planilha do Excel, apenas aproveitando fórmulas programadas no VBA, os cálculos são quase instantâneos.

Uma solução interessante sob o ponto de vista da eficiência dos cálculos foi manter as planilhas do Excel constantemente desligada para os cálculos. Dessa forma, milhares de cálculos são economizados. Só são ligadas as planilhas que realmente precisam realizar cálculos. Também realizada dessa forma é a legenda: só são mostrados na legenda o nome dos trocadores e valores de R pertinentes à seleção do usuário.

Na construção do gráfico também são incorporados somente os dados pertinentes. Antes dessa construção dinâmica dos dados contidos nos gráficos, todos os pontos indesejados de uma planilha tinham de ser zerados. Agora não, simplesmente os

dados desejados são incorporados ao gráfico. Isso aumentou bastante a velocidade do programa.

Se hoje eu fosse começar o programa novamente, mudaria muita coisa. Isso para mim explica o porquê de versões em programas que usamos correntemente: versão 2.0, 2.1 etc. Além de acrescentar conteúdo cada vez maior aos programas, refazer uma solução de uma forma mais clara é uma vitória para o programador. Assim como um cientista da NASA que consegue eliminar algumas gramas em uma expedição espacial, ou o desportista que melhora em centésimos seu resultado, eliminar uma linha de código é uma vitória para o programador.

Este programa acabou sendo maior do que eu esperava. O que mais ocupou espaço nele são as planilhas, que são idênticas, ocupando espaço desnecessário de memória. Uma grande porção de memória foi ocupada simplesmente para abrigar cálculos que o usuário jamais usará, que são os cálculos que dão origem aos gráficos. Por isso, numa segunda vez, eu dispensaria o Excel e tentaria resolver o problema gráfico “no braço”, isto é, descobrindo como programar a plotagem de gráficos, o que além de economizar bastante espaço do programa, me daria experiência em programação gráfica.

PARTE III

Listagem do programa

1. FormGeral

Cálculo do fator F de correção da DMLT em trocadores de calor

Cálculos

Dados de entrada

☐ Temperaturas

☐ Adimensional (R e P)

Tipo de trocadores: ▼

N:

Adimensionais

R (heat capacity ratio):

P (thermal effectiveness):

Temperatura de ...

...entrada do fluido quente (T1):

...entrada do fluido frio (t1):

...saída do fluido quente (T2):

...saída do fluido frio (t2):

Calcula Valores

Resultados

F:

G (thermal gap):

máximo valor de P:
(para o trocador e R selecionados)

P(limiar):

P(limiar):

Gráficos

Operações

☐ Plotar gráficos

☐ Plotar limiar

Dados do gráfico

Entrar valores de R:

Entrar Trocadores:

Dados entrados

Tipo de trocadores selecionados:

Valores de R:

Limpar dados

Visualizar gráfico F

Visualizar gráfico G

```
Public numtroc As Integer
Public Npasses As Integer
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
Dim troc As Integer

FrameTemps.Enabled = False
FrameAdim.Enabled = False
FrameDadosGraf.Enabled = False
FrameDadosEntrados.Enabled = False
Call DesligaTodasPlanilhas
Call RememoraDados
Call InicializaCombo

numtroc = 25
Npasses = 0
End Sub
```

```
Private Sub InicializaCombo()
```

```
    ComboTrocs.AddItem "Contracorrente"
    ComboTrocs.AddItem "Casco e Tubo 1/2+"
    ComboTrocs.AddItem "Casco e Tubo 2/4+"
    ComboTrocs.AddItem "Casco e Tubo N/2N+"
    ComboTrocs.AddItem "TEMA J 2N"
    ComboTrocs.AddItem "TEMA G 2N"
    ComboTrocs.AddItem "Cruzado, sem misturar"
    ComboTrocs.AddItem "Cruzado, um lado misturado"
    ComboTrocs.AddItem "Cruzado, ambos lados misturados"
    ComboTrocs.AddItem "Cruzado dois passes, quente-quente"
    ComboTrocs.AddItem "Cruzado dois passes, quente-frio"
    ComboTrocs.AddItem "Uma linha de tubos"
    ComboTrocs.AddItem "Duas linhas de tubos"
    ComboTrocs.AddItem "Três linhas de tubos"
    ComboTrocs.AddItem "Quatro linhas de tubos"
    ComboTrocs.AddItem "U-bend Section, 2 tubos"
    ComboTrocs.AddItem "U-bend Section, 3 tubos"
    ComboTrocs.AddItem "U-bend Section, 4 tubos"
    ComboTrocs.AddItem "U-bend Section, 5 tubos"
    ComboTrocs.AddItem "U-bend Section, 6 tubos"
```

```
End Sub
```

```
'cálculos
```

```
Private Sub OptionAdim_Click()
    FrameTemps.Enabled = False
    FrameAdim.Enabled = True
    TextBoxR.SetFocus
End Sub
```

```
Private Sub OptionTemp_Click()
    FrameTemps.Enabled = True
    FrameAdim.Enabled = False
    TextBoxTQ1.SetFocus
End Sub
```

```
Private Sub ComboTrocs_Click()
    Select Case ComboTrocs.Value
        Case "Contracorrente"
            numtroc = 0
        Case "Casco e Tubo 1/2+"
            numtroc = 1
        Case "Casco e Tubo 2/4+"
            numtroc = 2
        Case "Casco e Tubo N/2N+"
            numtroc = 3
            TextBoxN.Enabled = True
            TextBoxN.SetFocus
        Case "TEMA J 2N"
            numtroc = 8
        Case "TEMA G 2N"
            numtroc = 9
        Case "Cruzado, sem misturar"
            numtroc = 10
```

```

    Case "Cruzado, um lado misturado"
        numtroc = 11
    Case "Cruzado, ambos lados misturados"
        numtroc = 12
    Case "Cruzado dois passes, quente-quente"
        numtroc = 13
    Case "Cruzado dois passes, quente-frio"
        numtroc = 14
    Case "Uma linha de tubos"
        numtroc = 15
    Case "Duas linhas de tubos"
        numtroc = 16
    Case "Três linhas de tubos"
        numtroc = 17
    Case "Quatro linhas de tubos"
        numtroc = 18
    Case "U-bend Section, 2 tubos"
        numtroc = 20
    Case "U-bend Section, 3 tubos"
        numtroc = 21
    Case "U-bend Section, 4 tubos"
        numtroc = 22
    Case "U-bend Section, 5 tubos"
        numtroc = 23
    Case "U-bend Section, 6 tubos"
        numtroc = 24
    End Select

    If numtroc <> 3 Then
        TextBoxN.Value = ""
    End If
End Sub

Private Sub TextBoxN_AfterUpdate()

    If TextBoxN.Value = "" Then
        Npasses = 0
    ElseIf Not N_adequado(TextBoxN.Value) Then
        MsgBox "O número de passes deve ser um inteiro positivo."
        TextBoxN.Value = ""
    Else
        TextBoxN.Value = Int(TextBoxN.Value)
        Npasses = TextBoxN.Value
    End If

End Sub

Private Sub TextBoxTQ1_AfterUpdate()
    PlanTrab.Cells.Range("B17").Value = TextBoxTQ1.Value
    TextBoxTQ1.Value = Format(TextBoxTQ1.Value, "#0.0")
End Sub

Private Sub TextBoxTF1_AfterUpdate()
    PlanTrab.Cells.Range("B18").Value = TextBoxTF1.Value
    TextBoxTF1.Value = Format(TextBoxTF1.Value, "#0.0")
End Sub

```

```

Private Sub TextBoxTQ2_AfterUpdate()
    PlanTrab.Cells.Range("B19").Value = TextBoxTQ2.Value
    TextBoxTQ2.Value = Format(TextBoxTQ2.Value, "#0.0")
End Sub

Private Sub TextBoxTF2_AfterUpdate()
    PlanTrab.Cells.Range("B20").Value = TextBoxTF2.Value
    TextBoxTF2.Value = Format(TextBoxTF2.Value, "#0.0")
End Sub

Private Sub TextBoxP_AfterUpdate()
    PlanTrab.Cells.Range("B21").Value = TextBoxP.Value
    TextBoxP.Value = Format(TextBoxP.Value, "#0.00")
End Sub

Private Sub TextBoxR_AfterUpdate()
    PlanTrab.Cells.Range("B22").Value = TextBoxR.Value
    TextBoxR.Value = Format(TextBoxR.Value, "#0.00")
End Sub

Private Sub CommandCalculaValores_Click()

    If Not OptionAdim.Value And Not OptionTemp.Value Then
        MsgBox "Entre com os valores das temperaturas ou dos  
adimensionais. Clique o botão de opção para selecionar o tipo de  
dados que deseja entrar."
        OptionTemp.SetFocus
    Exit Sub

    ElseIf ComboTroc.Value = "Tipos de trocadores" Then
        MsgBox "Entre com o tipo de trocador."
        ComboTroc.SetFocus
    Exit Sub

    ElseIf OptionTemp.Value Then
        If Not temp_adequada(TextBoxTQ1.Value) Or Not  
temp_adequada(TextBoxTF1.Value) Or Not temp_adequada(TextBoxTQ2.Value)  
Or Not temp_adequada(TextBoxTF2.Value) Then
            MsgBox "Entre com os valores corretos das temperaturas.  
Devem ser valores numéricos positivos."
            TextBoxTQ1.SetFocus
        Exit Sub
        ElseIf CDbl(TextBoxTQ1.Value) < CDbl(TextBoxTF1.Value) Then
            MsgBox "A temperatura de entrada do fluido quente deve ser  
maior que a do fluido frio."
            TextBoxTQ1.SetFocus
        Exit Sub
        ElseIf CDbl(TextBoxTQ1.Value) < CDbl(TextBoxTQ2.Value) Then
            MsgBox "A temperatura de saída do fluido quente deve ser  
menor que a de entrada."
            TextBoxTQ1.SetFocus
        Exit Sub
        ElseIf CDbl(TextBoxTF1.Value) > CDbl(TextBoxTF2.Value) Then
            MsgBox "A temperatura de saída do fluido frio deve ser  
maior que a de entrada."
            TextBoxTQ1.SetFocus
        Exit Sub
    End If
End Sub

```

```

ElseIf CDbl(TextBoxTQ1.Value) < CDbl(TextBoxTF2.Value) Then
    MsgBox "A temperatura de saída do fluido frio deve ser
    menor que a de entrada do fluido quente."
    TextBoxTQ1.SetFocus
    Exit Sub
Else
    TextBoxR.Value = R_temps(TextBoxTQ1.Value,
    TextBoxTQ2.Value, TextBoxTF1.Value, TextBoxTF2.Value)
    TextBoxR.Value = Format(TextBoxR.Value, "#0.000")

    TextBoxP.Value = P_temps(TextBoxTQ1.Value,
    TextBoxTF1.Value, TextBoxTF2.Value)
    TextBoxP.Value = Format(TextBoxP.Value, "#0.000")
End If

ElseIf OptionAdim.Value = True Then
    If Not R_adequado(TextBoxR.Value) Or TextBoxR.Value = "" Then
        MsgBox "Entre com o valor correto de R. Deve ser um número
        real positivo."
        TextBoxR.SetFocus
        Exit Sub
    ElseIf Not P_adequado(TextBoxP.Value) Or TextBoxP.Value = ""
Then
        MsgBox "Entre com o valor correto de P. Deve ser um número
        entre [0,1]."
        TextBoxP.SetFocus
        Exit Sub
    End If

    ElseIf ComboTroc.Value = "Casco e Tubo N/2N+" And Npases = 0
Then
        MsgBox "Entre com o número de passes do trocador N/2N+."
        TextBoxN.SetFocus
        Exit Sub

End If

TextBoxG.Value = CalculaG(TextBoxP.Value, TextBoxR.Value)
TextBoxG.Value = Format(TextBoxG.Value, "#0.000")

TextBoxPmax.Value = AchaPmax(TextBoxR.Value, numtroc, Npases)
TextBoxPmax.Value = Format(TextBoxPmax.Value, "#0.000")

If (CDbl(TextBoxP.Value) > CDbl(TextBoxPmax.Value)) Then
    MsgBox "O valor máximo de P para esse trocador é " +
    TextBoxPmax.Value
Else
    TextBoxPlim.Value = Plimiar(TextBoxP.Value,
    AchaNUTfunções(TextBoxR.Value, TextBoxP.Value, numtroc),
    AchaNUTLimiar(TextBoxR.Value, numtroc), numtroc)
    TextBoxPlim.Value = Format(TextBoxPlim.Value, "#0.000")

    TextBoxFlim.Value = Flimiar(TextBoxR.Value,
    TextBoxP.Value, AchaNUTLimiar(TextBoxR.Value, numtroc),
    TextBoxPlim.Value, AchaNUTfunções(TextBoxR.Value, TextBoxP.Value,
    numtroc), numtroc, Npases)
    TextBoxFlim.Value = Format(TextBoxFlim.Value, "#0.000")

```

```

        TextBoxF.Value = CalcF(TextBoxR.Value, TextBoxP.Value,
numtroc, Npasses)
        TextBoxF.Value = Format(TextBoxF.Value, "#0.000")
    End If

```

```
End Sub
```

```
'gráficos
```

```
Private Sub CheckBoxPlotGraf_Click()
```

```
    Call LigaFrameDadosGraf
```

```
    If CheckBoxPlotGraf.Value Then
```

```
        Call RememoraListBoxTroc
```

```
        Call RememoraListBoxRs
```

```
    ElseIf Not CheckBoxPlotLim.Value Then
```

```
        ListBoxTrocadores.Clear
```

```
        ListBoxRs.Clear
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CheckBoxPlotLim_Click()
```

```
    Call LigaFrameDadosGraf
```

```
    If CheckBoxPlotLim.Value Then
```

```
        PlanTrab.Cells.Range("E3").Value = "limiar"
```

```
        If Not CheckBoxPlotGraf.Value Then
```

```
            Call RememoraListBoxTroc
```

```
        Else
```

```
            Call RememoraListBoxTroc
```

```
            Call RememoraListBoxRs
```

```
        End If
```

```
    Else
```

```
        PlanTrab.Cells.Range("E3").Value = 0
```

```
        If Not CheckBoxPlotGraf.Value Then
```

```
            ListBoxRs.Clear
```

```
            ListBoxTrocadores.Clear
```

```
        End If
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub LigaFrameDadosGraf()
```

```
    If CheckBoxPlotGraf.Value Or CheckBoxPlotLim.Value Then
```

```
        FrameDadosGraf.Enabled = True
```

```
    Else
```

```
        FrameDadosGraf.Enabled = False
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

'vai para outras planilhas

```
Private Sub CommandEntrarR_Click()
    If Not CheckBoxPlotGraf.Value Then
        MsgBox "Para plotar os gráficos de limiar não é necessário
            entrar com o valor de R."
    Else
        FormRs.Show
    End If
End Sub
```

```
Private Sub CommandEntrarTroc_Click()
    FormTroc.Show
End Sub
```

```
Private Sub CommandGrafF_Click()
    Call ConstroiLegendaG(ListBoxTrocadores.ListCount,
        ListBoxRs.ListCount)
    Call ConstroiLegendaF(ListBoxTrocadores.ListCount,
        ListBoxRs.ListCount, CheckBoxPlotLim.Value)
    FormGeral.Hide
    GraficoF.Select
    Call LiberaCalculos(ListBoxTrocadores.ListCount,
        ListBoxRs.ListCount)
    Call MandaDados
End Sub
```

```
Private Sub CommandGrafG_Click()
    Call ConstroiLegendaF(ListBoxTrocadores.ListCount,
        ListBoxRs.ListCount, CheckBoxPlotLim.Value)
    Call ConstroiLegendaG(ListBoxTrocadores.ListCount,
        ListBoxRs.ListCount)
    FormGeral.Hide
    GraficoG.Select
    Call LiberaCalculos(ListBoxTrocadores.ListCount,
        ListBoxRs.ListCount)
    Call MandaDados
End Sub
```

```
Private Sub MandaDados()
    For i = 0 To 7
        PlanTrab.Cells.Range("A" & CStr(i + 17)).Value =
        PlanTrab.Cells.Range("A" & CStr(i + 17)).Value
        PlanTrab.Cells.Range("A" & CStr(i + 2)).Value =
        PlanTrab.Cells.Range("A" & CStr(i + 2)).Value
    Next i
End Sub
```

'limpa dados

```

Private Sub CommandLimpardados_Click()
    Call LimpaPlanilha
    Call UserForm_Initialize
End Sub
Sub LimpaPlanilha()

Dim i As Integer

PlanTrab.EnableCalculation = True

Call DesligaTodasPlanilhas

'limpa Trocs

For i = 2 To 9
    PlanTrab.Cells.Range("A" + CStr(i)).Value = 25
    PlanTrab.Cells.Range("A" + CStr(i + 15)).Value = 0
    PlanTrab.Cells.Range("K" + CStr(i)).Value = 0
    PlanTrab.Cells.Range("B" + CStr(i + 15)).Value = 0
Next i

    PlanTrab.Cells.Range("E3").Value = 0
    PlanTrab.Cells.Range("C3").Value = 0

End Sub
Sub RememoraDados()

    If PlanTrab.Cells.Range("K9").Value <> 0 Then
        CheckBoxPlotGraf.Value = True
        Call RememoraListBoxRs
        Call RememoraListBoxTrocs
    Else
        CheckBoxPlotGraf.Value = False
    End If

    If PlanTrab.Cells.Range("E3").Value = "limiar" Then
        CheckBoxPlotLim.Value = True
        If Not CheckBoxPlotGraf.Value Then RememoraListBoxTrocs
    Else
        CheckBoxPlotLim.Value = False
    End If

End Sub

Sub RememoraListBoxRs()

Dim j, cont As Integer
Dim Rs As Double

ListBoxRs.Clear

cont = 0

For j = 2 To 9

    Rs = PlanTrab.Cells.Range("K" & CStr(j)).Value

```

```
        If Rs <> 0 Then
            ListBoxRs.AddItem Rs
        End If
    Next j

End Sub

Sub RememoraListBoxTroc()

    Dim j, cont, Trocs As Integer

    cont = 0

    ListBoxTrocadores.Clear
    If PlanTrab.Cells.Range("A1").Value <> 25 Then
        FrameDatosEntrados.Enabled = True

        For j = 2 To 9

            Trocs = PlanTrab.Cells.Range("B" & CStr(j)).Value

            If Trocs <> 25 Then
                ListBoxTrocadores.AddItem TipoTrocador(Trocs,
PlanTrab.Cells.Range("C2").Value)
            End If

        Next j

    End If

End Sub
```

2. FormRs

Entrar valores de R

Valores sugeridos de R

☐ 0,1	☐ 0,6	☐ 1,2	☐ 2,0	☐ 5,0
☐ 0,2	☐ 0,7	☐ 1,4	☐ 2,5	☐ 7,5
☐ 0,3	☐ 0,8	☐ 1,5	☐ 3,0	☐ 10,0
☐ 0,4	☐ 0,9	☐ 1,6	☐ 3,5	☐ 15,0
☐ 0,5	☐ 1,0	☐ 1,8	☐ 4,0	☐ 20,0

Valores de R escolhidos:

Entre com seu valor de R

R:

Confirma valores

(Para excluir um valor de R clique duas vezes sobre o valor.)

```
Public contValoresR As Integer
Public item As Integer
Public entrouR As Boolean
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
    Call RememoraDados
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox1_Click()
    item = 0
    Call leia_box
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox2_Click()
    item = 1
    Call leia_box
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox3_Click()
    item = 2
    Call leia_box
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox4_Click()
    item = 3
    Call leia_box
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox5_Click()
    item = 4
    Call leia_box
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox6_Click()
    item = 5
    Call leia_box
End Sub
```

```
Private Sub CheckBox7_Click()
```

```
        item = 6
        Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox8_Click()
    item = 7
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox9_Click()
    item = 8
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox10_Click()
    item = 9
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox11_Click()
    item = 10
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox12_Click()
    item = 11
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox13_Click()
    item = 12
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox14_Click()
    item = 13
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox15_Click()
    item = 14
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox16_Click()
    item = 15
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox17_Click()
    item = 16
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox18_Click()
    item = 17
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox19_Click()
    item = 18
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox20_Click()
    item = 19
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox21_Click()
    item = 20
    Call leia_box
End Sub
```

```

Private Sub CheckBox22_Click()
    item = 21
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox23_Click()
    item = 22
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox24_Click()
    item = 23
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox25_Click()
    item = 24
    Call leia_box
End Sub

Sub leia_box()
    Dim j As Integer
    Dim caixas
    caixas = Array(CheckBox1, CheckBox2, CheckBox3, CheckBox4, CheckBox5,
    CheckBox6, CheckBox7, CheckBox8, CheckBox9, CheckBox10, CheckBox11,
    CheckBox12, CheckBox13, CheckBox14, CheckBox15, CheckBox16,
    CheckBox17, CheckBox18, CheckBox19, CheckBox20, CheckBox21,
    CheckBox22, CheckBox23, CheckBox24, CheckBox25)

    If caixas(item).Value Then
        contValoresR = contValoresR + 1
        If contValoresR > 8 Then
            MsgBox "O programa suporta somente até 8 valores de R."
            caixas(item).Value = False
        Else
            FormRs.ListBoxRs.AddItem caixas(item).Caption
        End If
    Else
        contValoresR = contValoresR - 1
        For j = 0 To ListBoxRs.ListCount - 1
            If ListBoxRs.List(j) = caixas(item).Caption Then
                ListBoxRs.RemoveItem j
                Exit For
            End If
        Next j
    End If
End Sub

Private Sub CommandButtonConfirmaR_Click()
    Dim j As Integer

    If ListBoxRs.ListCount = 0 Then
        MsgBox "Não foi escolhido um valor para R. O gráfico não
        poderá ser plotado."
        FormRs.Hide
        Exit Sub
    End If

    FormGeral.ListBoxRs.Clear

    For j = 0 To (ListBoxRs.ListCount - 1)
        FormGeral.ListBoxRs.AddItem FormRs.ListBoxRs.List(j)
    
```

```

    PlanTrab.Cells.Range("A" + CStr(j + 17)).Value =
FormRs.ListBoxRs.List(j)
Next j

For j = j + 17 To 24
    PlanTrab.Cells.Range("A" + CStr(j)).Value = 0
Next j

Call BubbleSort(PlanTrab.Cells.Range("A17").Value,
PlanTrab.Cells.Range("A18").Value, PlanTrab.Cells.Range("A19").Value,
PlanTrab.Cells.Range("A20").Value, PlanTrab.Cells.Range("A21").Value,
PlanTrab.Cells.Range("A22").Value, PlanTrab.Cells.Range("A23").Value,
PlanTrab.Cells.Range("A24").Value)
Call FormTrocs.EntrouTrocs_e_R
FormRs.Hide

End Sub

Private Sub ListBoxRs_DblClick(ByVal Cancel As MSForms.ReturnBoolean)
Dim j As Integer
Dim temp As Double
Dim caixas
caixas = Array(CheckBox1, CheckBox2, CheckBox3, CheckBox4, CheckBox5,
CheckBox6, CheckBox7, CheckBox8, CheckBox9, CheckBox10, CheckBox11,
CheckBox12, CheckBox13, CheckBox14, CheckBox15, CheckBox16,
CheckBox17, CheckBox18, CheckBox19, CheckBox20, CheckBox21,
CheckBox22, CheckBox23, CheckBox24, CheckBox25)

If IsNull(ListBoxRs.Value) Then
    Exit Sub
Else
    temp = ListBoxRs.Value
    j = ListBoxRs.ListIndex
    ListBoxRs.RemoveItem j
    For i = 0 To 24
        If caixas(i).Caption = temp Then
            caixas(i).Value = False
        End If
    Next i
End If

End Sub

Private Sub TextBoxRProprio_AfterUpdate()

    If TextBoxRProprio.Value = "" Then
        TextBoxRProprio.SetFocus
        Exit Sub

    ElseIf Not IsNumeric(TextBoxRProprio.Value) Or
TextBoxRProprio.Value <= 0 Then
        MsgBox "R deve ser um valor numérico positivo."
        TextBoxRProprio.Value = ""
        TextBoxRProprio.SetFocus
        Exit Sub

```

```

ElseIf ultrapassouMaximo Then
    MsgBox "O valor máximo de curvas R é 8. Exclua um dos
    valores anteriores se quiser colocar outro valor.",
    vbExclamation
    TextBoxRProprio.Value = ""
    TextBoxRProprio.SetFocus
    Exit Sub

Else
    TextBoxRProprio.Value = Format(TextBoxRProprio.Value, "#0.00")
    ListBoxRs.AddItem TextBoxRProprio.Value
    TextBoxRProprio.Value = ""
End If

End Sub

Sub VoltaFoco()
    TextBoxRProprio.Value = ""
    TextBoxRProprio.SetFocus
End Sub

Private Function ultrapassouMaximo() As Boolean

    If ListBoxRs.ListCount >= 8 Then
        ultrapassouMaximo = True
    Else
        ultrapassouMaximo = False
    End If

End Function

Sub RememoraDados()
    Dim i, j, cont As Integer
    Dim temp As Double
    Dim caixas
    caixas = Array(CheckBox1, CheckBox2, CheckBox3, CheckBox4, CheckBox5,
    CheckBox6, CheckBox7, CheckBox8, CheckBox9, CheckBox10, CheckBox11,
    CheckBox12, CheckBox13, CheckBox14, CheckBox15, CheckBox16,
    CheckBox17, CheckBox18, CheckBox19, CheckBox20, CheckBox21,
    CheckBox22, CheckBox23, CheckBox24, CheckBox25)

    cont = 0

    For j = 2 To 9

        temp = PlanTrab.Cells.Range("K" & CStr(11 - j)).Value

        If temp <> 0 Then

            For i = cont To 24

                If temp = caixas(i).Caption Then
                    caixas(i).Value = True
                    cont = i + 1
                    Exit For
                ElseIf i = 24 Then
                    ListBoxRs.AddItem temp
                End If
            Next i
        End If
    Next j

```

```

        Else
            Exit Sub
        End If
    Next j

End Sub

Sub BubbleSort(R1 As Double, R2 As Double, R3 As Double, R4 As Double,
R5 As Double, R6 As Double, R7 As Double, R8 As Double)

    caixas = Array(R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8)

    For i = 0 To 7
        For j = i + 1 To 7
            If caixas(i) > caixas(j) Then
                temp = caixas(j)
                caixas(j) = caixas(i)
                caixas(i) = temp
            End If
            If j = 7 Then
                PlanTrab.Cells.Range("K" + CStr(i + 2)).Value = caixas(i)
            End If
        Next j
        PlanTrab.Cells.Range("K" + CStr(i + 2)).Value = caixas(i)
    Next i
End Sub

```

3. FormTroc

Seleção de trocadores

☒ Correntes paralelas	☐ Cruzado dois passes, quente-frio
☐ Casco e tubo 1/2+	☐ Uma linha de tubos
☐ Casco e tubo 2/4+	☐ Duas linhas de tubos
☐ Casco e tubo N/2N+ N:	☐ Três linhas de tubos
☐ TEMA J 2N	☐ Quatro linhas de tubos
☐ TEMA G 2N	☐ U-bend section, 2 tubos
☐ Cruzado sem misturar	☐ U-bend section, 3 tubos
☐ Cruzado, um lado misturado	☐ U-bend section, 4 tubos
☐ Cruzado, ambos lados misturados	☐ U-bend section, 5 tubos
☐ Cruzado dois passes, quente-quente	☐ U-bend section, 6 tubos

Confirma seleção

```

Public entroutroc As Boolean
Public conttroc As Integer
Public numero As Integer
Public nada As Boolean
Public Npasses As Integer

Private Sub UserForm_Initialize()
    Call RememoraDados
End Sub

Private Sub CheckBox1_Click()
    numero = 0
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox2_Click()
    numero = 1
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox3_Click()
    numero = 2
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox4_Click()
    numero = 3
    Call acende_N
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox5_Click()
    numero = 8
    Call leia_box

```

```
End Sub
Private Sub CheckBox6_Click()
    numero = 9
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox7_Click()
    numero = 10
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox8_Click()
    numero = 11
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox9_Click()
    numero = 12
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox10_Click()
    numero = 13
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox11_Click()
    numero = 14
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox12_Click()
    numero = 15
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox13_Click()
    numero = 16
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox14_Click()
    numero = 17
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox15_Click()
    numero = 18
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox16_Click()
    numero = 20
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox17_Click()
    numero = 21
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox18_Click()
    numero = 22
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox19_Click()
    numero = 23
    Call leia_box
End Sub
Private Sub CheckBox20_Click()
    numero = 24
```

```

    Call leia_box
End Sub
Sub leia_box()

Dim caixas

caixas = Array(CheckBox1, CheckBox2, CheckBox3, CheckBox4, nada, nada,
nada, nada, CheckBox5, CheckBox6, CheckBox7, CheckBox8, CheckBox9,
CheckBox10, CheckBox11, CheckBox12, CheckBox13, CheckBox14,
CheckBox15, nada, CheckBox16, CheckBox17, CheckBox18, CheckBox19,
CheckBox20)

nada = False

If caixas(numero).Value Then
    conttroc = conttroc + 1
    If conttroc > 8 Then
        MsgBox "O programa suporta até 8 trocadores somente."
        caixas(numero).Value = False
    End If
Else
    conttroc = conttroc - 1
End If

End Sub
Sub acende_N()

If CheckBox4.Value Then
    Label1.Visible = True
    TextBox1.Visible = True
    TextBox1.SetFocus
Else
    Label1.Visible = False
    TextBox1.Visible = False
End If

End Sub
Private Sub CommandButtonConfirmaTroc_Click()

Dim j As Integer
Dim cont As Integer
Dim caixas
caixas = Array(CheckBox1, CheckBox2, CheckBox3, CheckBox4, nada, nada,
nada, nada, CheckBox5, CheckBox6, CheckBox7, CheckBox8, CheckBox9,
CheckBox10, CheckBox11, CheckBox12, CheckBox13, CheckBox14,
CheckBox15, nada, CheckBox16, CheckBox17, CheckBox18, CheckBox19,
CheckBox20)

cont = 2
nada = False

If CheckBox19.Value = True Then
    MsgBox "A fórmula para o trocador U-bend section 5 tubos só
funciona para  $R \geq 0,8$ . Valores de R inferiores serão distorcidos."
End If

If conttroc < 1 Then
    MsgBox "Nenhum trocador foi entrado. O gráfico não será plotado."

```

```

ElseIf CheckBox4.Value And Npases = 0 Then
    MsgBox "Não foi entrado o número de passes do trocador N/2N+. O
    gráfico não será plotado."
    PlanTrab.Cells.Range("C3").Value = 0
    Npases = 0
    Exit Sub

Else

    FormGeral.ListBoxTrocadores.Clear

    For j = 0 To 24

        If j = 4 Then
            j = 8
        ElseIf j = 19 Then
            j = 20
        End If

        If caixas(j).Value Then
            FormGeral.ListBoxTrocadores.AddItem TipoTrocador(j,
Npases)
            PlanTrab.Cells.Range("A" + CStr(cont)).Value = j
            cont = cont + 1
        End If

    Next j

    For cont = cont To 9
        PlanTrab.Cells.Range("A" + CStr(cont)).Value = 25
    Next cont

End If

If FormGeral.CheckBoxPlotGraf Then
    Call EntrouTroc_e_R
Else
    FormGeral.FrameDadosEntrados.Enabled = True
End If

FormTroc.Hide

End Sub

Private Sub TextBox1_AfterUpdate()

    If TextBox1.Value = "" Then
        Npases = 0
    ElseIf Not N_adequado(TextBox1.Value) Then
        MsgBox "O número de passes deve ser um inteiro positivo."
        TextBox1.Value = ""
    Else
        TextBox1.Value = Int(TextBox1.Value)
        PlanTrab.Cells.Range("C3").Value = TextBox1.Value
        Npases = TextBox1.Value
    End If

```

End Sub

```
Sub EntrouTrocse_R()
    If (PlanTrab.Cells.Range("A2").Value <> 25) And
    (PlanTrab.Cells.Range("A17").Value <> 0) Then
        FormGeral.FrameDadosEntrados.Enabled = True
    Else
        FormGeral.FrameDadosEntrados.Enabled = False
    End If
End Sub
```

```
Sub RememoraDados()
    Dim j As Integer
    Dim temp As Double
    Dim caixas
    caixas = Array(CheckBox1, CheckBox2, CheckBox3, CheckBox4, nada, nada,
    nada, nada, CheckBox5, CheckBox6, CheckBox7, CheckBox8, CheckBox9,
    CheckBox10, CheckBox11, CheckBox12, CheckBox13, CheckBox14,
    CheckBox15, nada, CheckBox16, CheckBox17, CheckBox18, CheckBox19,
    CheckBox20)
```

```
For j = 2 To 9

    temp = PlanTrab.Cells.Range("A" & CStr(j)).Value

    If temp = 25 Then
        Exit Sub
    Else
        caixas(temp).Value = True
    End If
```

Next j

End Sub

4. Cálculos

```
Public logneg As Boolean
```

```
    'correntes paralelas, N=0
```

```
Function FCP(R As Double, P As Double)
```

```
    FCP = -(R + 1) / (DELT(R, P) * lognat(1 - P * (R + 1)))
```

```
End Function
```

```
Function PmaxCP(R As Double)
```

```
    PmaxCP = 1 / (R + 1)
```

```
End Function
```

```
    'TEMA_E (casco e tubo comum), N=1 (1/2+), N=2 (2/4+), N=3 (N/2N+)
```

```
Function PmaxCT(R As Double, N As Integer)
```

```
    Dim Z As Double
```

```
    Dim eta As Double
```

```
    If R <> 1 Then
```

```
        eta = (R ^ 2 + 1) ^ (1 / 2)
```

```
        Z = (eta - R + 1) / (eta + R - 1)
```

```
        PmaxCT = (Z ^ N - 1) / (Z ^ N - R)
```

```
    Else
```

```
        PmaxCT = 2 * N / (2 * N + 2 ^ (1 / 2))
```

```
    End If
```

```
End Function
```

```
Function PN(R As Double, P As Double, N As Integer)
```

```
On Error GoTo trataxcomplexo
```

```
    Dim x As Double
```

```
    x = (P * R - 1) / (P - 1)
```

```
    If R <> 1 Then
```

```
        PN = (1 - x ^ (1 / N)) / (R - x ^ (1 / N))
```

```
    Else
```

```
        PN = (P / (N - P * (N - 1)))
```

```
    End If
```

```
Exit Function
```

```
trataxcomplexo:
```

```
    logneg = True
```

```
    PN = 1
```

```
End Function
```

```
Function FTEMA_E(R As Double, P As Double, N As Integer)
```

```
    Dim eta, pnloc As Double
```

```
    eta = (R ^ 2 + 1) ^ (1 / 2)
```

```
    If N = 1 Then
```

```
        FTEMA_E = eta / (DELT(R, P) * lognat((2 - P * (1 + R - eta)) /  
(2 - P * (1 + R + eta))))
```

```
    Else
```

```
        pnloc = PN(R, P, N)
```

```
        FTEMA_E = eta / (DELT(R, pnloc) * lognat((2 - pnloc * (1 + R -  
eta)) / (2 - pnloc * (1 + R + eta))))
```

```
    End If
```

```
End Function
```

```
Function LimiarCT(P As Double, N As Integer)
```

```

    LimiarCT = FTEMA_E(1 / P - 1, P, N)
End Function

```

```

'TEMA_J 2N, N=8
Function PTEMA_J2N(R As Double, NUT As Double)
On Error GoTo trataexpinfinito
Dim expnut, expnutR As Double
    expnut = Exp(NUT)
    expnutR = expnut ^ R
    PTEMA_J2N = (R * expnutR / (expnutR - 1) + expnut / (expnut - 1) -
1 / NUT) ^ -1
Exit Function
trataexpinfinito: PTEMA_J2N = (R + 1 - 1 / NUT) ^ -1
End Function

```

```

'TEMA_G 2N, N=9
Function PTEMA_G2N(R As Double, NUT As Double)
On Error GoTo trataexpinfinito
Dim a, b, d, g, j As Double
    b = (2 * R - 1) / 2 * NUT
    a = (2 * R + 1) / 4 * NUT
    d = (1 - Exp(-a)) / (2 * R + 1)
    If R <> 0.5 Then
        g = (1 - Exp(-b)) / (2 * R - 1)
    Else
        g = NUT * 1 / 2
    End If
    j = 1 / (1 - d) * ((1 + g + 2 * R * g) * Exp(a) + 2 * R * d)
    PTEMA_G2N = (j - 1) / (j + 2 * R * Exp(a))
Exit Function
trataexpinfinito: PTEMA_G2N = 0.15

End Function

```

```

'Correntes Cruzadas, ambos sem misturar, N=10
Function P_UU(R As Double, NUT As Double)
Dim a, b, c As Integer
Dim soma3, soma2, soma1 As Double
Dim termo3, termo2, termo1, total2, total3 As Double
soma1 = 0
For b = 0 To 10
    soma3 = 0
    soma2 = 0
    For c = 0 To b
        termo3 = (R * NUT) ^ c / Factorial(c)
        soma3 = soma3 + termo3
        termo2 = NUT ^ c / Factorial(c)
        soma2 = soma2 + termo2
    Next c
    total3 = (1 - Exp(-R * NUT) * soma3)
    total2 = (1 - Exp(-NUT) * soma2)
    soma1 = soma1 + (total3 * total2)
Next b
P_UU = soma1 / (R * NUT)
End Function

```

```

'cruzadol1-14 ainda nem todos funcionaram
Function FCruzado(R As Double, P As Double, N As Integer)
On Error GoTo Trataerro

```

```

Dim Ro As Double
If R <> 1 Then
Ro = (R * P - P) / lognat((1 - P) / (1 - R * P))
Else
Ro = 1 - P
End If

Select Case N
Case 11
FCruzado = (P / lognat(1 / (1 - ((1 / R) * lognat(1 /
(1 - R * P)))))) / Ro
Case 12
FCruzado = (R * P / Ro / (1 - Exp(-R * P / Ro)) + P /
Ro / (1 - Exp(-P / Ro)) - 1) ^ -1 / Ro
Case 13
If R = 1 Then
R = 1.0001
End If
FCruzado = (P / (2 * lognat(1 / (1 - (1 / R) *
lognat((((1 - P) / (1 - R * P)) ^ (1 / 2) - (1 / R)) / (1 - 1 /
R)))))) / Ro
Case 14
FCruzado = P / (2 * lognat(1 / (1 - 1 / R * lognat(P *
(1 + R) / (P + P * R * (1 - R * P - P) ^ (1 / 2)))))) / Ro
End Select

If (FCruzado < 0.7 Or FCruzado > 1) Then FCruzado = 0

Exit Function
Trataerro:
FCruzado = -1
End Function

'TUBEROWS 1-4: N = 15 - 18
Function PTubeRows(R As Double, NUT As Double, N As Integer)
Dim k As Double
k = (1 - Exp(-NUT / (N - 14)))
Select Case N
Case 15
PTubeRows = 1 / R * (1 - Exp(-k * R))
Case 16
PTubeRows = 1 / R * (1 - Exp(-2 * k * R) * (1 + R * k ^ 2))
Case 17
PTubeRows = 1 / R * (1 - (1 + R * k ^ 2 * (3 - k) + (3 / 2) * R ^
2 * k ^ 4) / Exp(3 * k * R))
Case 18
PTubeRows = (1 - (1 + R * k ^ 2 * (6 - 4 * k + k ^ 2) + 4 * R ^ 2
* k ^ 4 * (2 - k) + 8 / 3 * R ^ 3 * k ^ 6) / Exp(4 * k * R)) * 1 / R
End Select
End Function

'U bend sections N=20 - 24
Function PUBend(R As Double, NUT As Double, N As Integer)
Dim k, g As Double
k = (1 - Exp(-NUT / (N - 18)))
Select Case N
Case 20
g = k / 2 + (1 - k / 2) * Exp(2 * k * R)
Case 21

```

```

    g = k * (1 - k / 4 - R * k * (1 - k / 2)) * Exp(k * R) + (1 -
k / 2) ^ 2 * Exp(3 * k * R)

```

```

Case 22

```

```

    g = k / 2 * (1 - k / 2 + k ^ 2 / 4) + k * (1 - k / 2) * (1 - 2
* R * k * (1 - k / 2)) * Exp(2 * k * R) + (1 - k / 2) ^ 3 * Exp(4 * k
* R)

```

```

Case 23

```

```

    g = (k * (1 - 3 / 4 * k + k ^ 2 / 2 - k ^ 3 / 8) - R * k ^ 2 *
(1 - k + 3 / 4 * k ^ 2 - 1 / 4 * k ^ 3 - R / 2 * k ^ 2 * (1 - k / 2))
^ 2) * Exp(k * R) + (k * (1 - 3 / 4 * k + 1 / 16 * k ^ 3) - 3 * R * k
^ 2 * (1 - k / 2) ^ 3) * Exp(3 * k * R) + (1 - k / 2) ^ 4 * Exp(5 * k
* R)

```

```

Case 24

```

```

    g = k / 2 * (1 - k + k ^ 2 - k ^ 3 / 2 + k ^ 4 / 8) + k * (1 -
k + 3 / 4 * k ^ 2 - 5 / 16 * k ^ 3 + 1 / 32 * k ^ 4) * Exp(2 * k * R)
- R * k ^ 2 * (2 - 3 * k + 3 * k ^ 2 - 7 / 4 * k ^ 3 + 3 / 8 * k ^ 4 -
R * k ^ 2 * (2 - 3 * k + 3 / 2 * k ^ 2 - 1 / 4 * k ^ 3)) * Exp(2 * k *
R) + (k / 2 * (2 - 2 * k + k ^ 3 / 2 - k ^ 4 / 8) - 4 * R * k ^ 2 * (1
- k / 2) ^ 4) * Exp(4 * k * R) + (1 - k / 2) ^ 5 * Exp(6 * k * R)

```

```

End Select

```

```

PUbend = 1 / R * (1 - 1 / g)

```

```

End Function

```

'Fórmulas gerais (úteis à maioria dos trocadores)

```

Function DELT(R As Double, P As Double)

```

```

    If R <> 1 Then

```

```

        DELT = (R - 1) / lognat((1 - P) / (1 - P * R))

```

```

    Else

```

```

        DELT = (1 - P) / P

```

```

    End If

```

```

End Function

```

```

Function lognat(num As Double)

```

```

    If num < 0 Then

```

```

        logneg = True

```

```

        lognat = -1

```

```

    Else

```

```

        lognat = Log(num) / Log(Exp(1))

```

```

    End If

```

```

End Function

```

```

Function Factorial(N)

```

```

    If N <= 1 Then

```

```

        Factorial = 1

```

```

    Else

```

```

        Factorial = Factorial(N - 1) * N

```

```

    End If

```

```

End Function

```

```

Function CalculaG(P As Double, R As Double)

```

```

    CalculaG = 1 - P * (1 + R)

```

End Function

```
Function R_temps(TQ1 As Double, TQ2 As Double, TF1 As Double, TF2 As Double)
    R_temps = (TQ1 - TQ2) / (TF2 - TF1)
End Function
```

```
Function P_temps(TQ1 As Double, TF1 As Double, TF2 As Double)
    P_temps = (TF2 - TF1) / (TQ1 - TF1)
End Function
```

'Funções iterativas

```
Function AchaNUTLimiar(R As Double, N As Integer)
```

```
    Dim cont As Integer
    Dim chute(8), a, b As Double
    Dim m As Double
    Dim delta As Double
    Dim Plimiar, NUTloc As Double
    Dim achou As Boolean
```

```
    cont = 0
    chute(0) = 0.01
    chute(1) = 0.2
    chute(2) = 0.5
    chute(3) = 1
    chute(4) = 3
    chute(5) = 10
    chute(6) = 20
    chute(7) = 50
    Plimiar = 1 / (1 + R)
    i = 1
    delta = 1
    '8,9,10,15-18,20-24
    While delta > 0 And i < 8
        NUTloc = chute(i)
        Select Case N
            Case 8
                delta = Plimiar - PTEMA_J2N(R, NUTloc)
            Case 9
                delta = Plimiar - PTEMA_G2N(R, NUTloc)
            Case 10
                delta = Plimiar - P_UU(R, NUTloc)
            Case 15 To 18
                delta = Plimiar - PTubeRows(R, NUTloc, N)
            Case 20 To 24
                delta = Plimiar - PUBend(R, NUTloc, N)
        End Select
        i = i + 1
    Wend
    a = chute(i - 2)
    b = chute(i - 1)
    achou = False

    While cont < 40 And Abs(delta) > 0.0001
        m = (a + b) / 2
        Select Case N
```

```

    Case 8
    delta = Plimiar - PTEMA_J2N(R, m)
    Case 9
    delta = Plimiar - PTEMA_G2N(R, m)
    Case 10
    delta = Plimiar - P_UU(R, m)
    Case 15 To 18
    delta = Plimiar - PTubeRows(R, m, N)
    Case 20 To 24
    delta = Plimiar - PUBend(R, m, N)
End Select

```

```

If Abs(delta) < 0.0001 Then
    achou = True

```

```

Else
    If delta > 0 Then
        a = m
    Else
        b = m
    End If
End If

```

```

    cont = cont + 1

```

```

Wend

```

```

AchaNUTLimiar = m

```

```

End Function

```

```

Function AchaNUTfunções(R As Double, P As Double, N As Integer)

```

```

    Dim cont As Integer
    Dim chute(8), a, b As Double
    Dim m As Double
    Dim delta As Double
    Dim Plimiar, NUTloc As Double
    Dim achou As Boolean

```

```

    cont = 0
    chute(0) = 0.01
    chute(1) = 0.2
    chute(2) = 0.5
    chute(3) = 1
    chute(4) = 3
    chute(5) = 10
    chute(6) = 20
    chute(7) = 50
    chute(8) = 200
    i = 1
    delta = 1

```

```

While delta > 0 And i < 9
    NUTloc = chute(i)
    Select Case N
        Case 8
            delta = P - PTEMA_J2N(R, NUTloc)

```

```

    Case 9
        delta = P - PTEMA_G2N(R, NUTloc)
    Case 10
        delta = P - P_UU(R, NUTloc)
    Case 15 To 18
        delta = P - PTubeRows(R, NUTloc, N)
    Case 20 To 24
        delta = P - PUBend(R, NUTloc, N)
    End Select
    i = i + 1
Wend

a = chute(i - 2)
b = chute(i - 1)
achou = False

If delta < 0 Then
    delta = b - a
    While cont < 30 And Abs(delta) > 0.0001
        m = (a + b) / 2
        Select Case N
            Case 8
                delta = P - PTEMA_J2N(R, m)
            Case 9
                delta = P - PTEMA_G2N(R, m)
            Case 10
                delta = P - P_UU(R, m)
            Case 15 To 18
                delta = P - PTubeRows(R, m, N)
            Case 20 To 24
                delta = P - PUBend(R, m, N)
            End Select

        If Abs(delta) < 0.0001 Then
            achou = True
        Else
            If delta > 0 Then
                a = m
            Else
                b = m
            End If
        End If

        cont = cont + 1
    Wend
Else
    m = b
End If

AchaNUTfunções = m

End Function

```

```

Function AchaPmax(R As Double, N As Integer, N2 As Integer)

Dim cont As Integer
Dim chute(8) As Double
Dim a As Double
Dim b As Double
Dim m As Double
Dim delta As Double
Dim Ploc As Double
Dim achou As Boolean
Dim lixo As Double

Select Case N
    Case 0
        AchaPmax = PmaxCP(R)
    Case 1, 2
        AchaPmax = PmaxCT(R, N)
    Case 3
        AchaPmax = PmaxCT(R, N2)
    Case Else

cont = 0
chute(0) = 0.01
chute(1) = 0.1
chute(2) = 0.25
chute(3) = 0.4
chute(4) = 0.55
chute(5) = 0.7
chute(6) = 0.85
chute(7) = 1.000000001

i = 1
delta = 1

While Not achou
    Ploc = chute(i)
    If CalcF(R, Ploc, N, N2) < 0.7 Then 'lognat é negativo...
        achou = True
    End If
    i = i + 1
Wend

a = chute(i - 2)
b = chute(i - 1)
achou = False

While cont < 30 And delta > 0.001
    m = (a + b) / 2
    If CalcF(R, m, N, N2) < 0.7 Then
        b = m
    Else
        a = m
    End If
    delta = b - a
    cont = cont + 1

Wend

AchaPmax = m

```

End Select

End Function

'Imprime o tipo de trocador selecionado

Function TipoTrocador(N As Integer, N2 As Integer)

Select Case N

Case 0

TipoTrocador = "Correntes Paralelas"

Case 1

TipoTrocador = "Casco e Tubo 1/2+"

Case 2

TipoTrocador = "Casco e Tubo 2/4+"

Case 3

TipoTrocador = "Casco e Tubo " & N2 & " / " & 2 * N2 & "+"

Case 8

TipoTrocador = "TEMA J 2N"

Case 9

TipoTrocador = "TEMA G 2N"

Case 10

TipoTrocador = "Cruzado, sem misturar"

Case 11

TipoTrocador = "Cruzado, um lado misturado"

Case 12

TipoTrocador = "Cruzado, ambos lados misturados"

Case 13

TipoTrocador = "Cruzado dois passes, quente-quente"

Case 14

TipoTrocador = "Cruzado dois passes, quente-frio"

Case 15

TipoTrocador = "Uma linha de tubos"

Case 16

TipoTrocador = "Duas linhas de tubos"

Case 17

TipoTrocador = "Três linhas de tubos"

Case 18

TipoTrocador = "Quatro linhas de tubos"

Case 20

TipoTrocador = "U-bend Section, 2 tubos"

Case 21

TipoTrocador = "U-bend Section, 3 tubos"

Case 22

TipoTrocador = "U-bend Section, 4 tubos"

Case 23

TipoTrocador = "U-bend Section, 5 tubos"

Case 24

TipoTrocador = "U-bend Section, 6 tubos"

End Select

End Function

'Fornece valores de P para os quais o gráfico será plotado

Function Pgraf(R As Double, P As Double, NUT As Double, N As Integer,
N2 As Integer)

```
If R <> 0 Then
  Select Case N
    Case 0
      Pgraf = P * PmaxCP(R)           '(%*PmaxCP(R))
    Case 1 To 2
      Pgraf = P * PmaxCT(R, N)        '(%*PmaxCT(R,N))
    Case 3
      Pgraf = P * PmaxCT(R, N2)       '(%*PmaxCT(R,N2))
    Case 8
      Pgraf = PTEMA_J2N(R, NUT)       '(R,NUT)
    Case 9
      Pgraf = PTEMA_G2N(R, NUT)       '(R,NUT)
    Case 10
      Pgraf = P_UU(R, NUT)            '(R,NUT)
    Case 11 To 14
      Pgraf = P                       '(Pcruz=%)
    Case 15 To 18
      Pgraf = PTubeRows(R, NUT, N)    '(R, NUT,N)
    Case 20 To 24
      Pgraf = PUBend(R, NUT, N)       '(R, NUT,N)
    Case 4 To 7, 19, 25
      Pgraf = -1
    End Select
  Else
    Pgraf = -1
  End If
```

End Function

'Dados os valores de Pgraf, calcula os valores de Fgraf

Function Fgraf(R As Double, P As Double, Pgraf As Double, NUT As
Double, N As Integer, N2 As Integer)

```
If R <> 0 Then
  Select Case N
    Case 0
      Fgraf = FCP(R, Pgraf)           '(R,Pgraf)
    Case 1 To 2
      Fgraf = FTEMA_E(R, Pgraf, N)    '(R,Pgraf, N)
    Case 3
      Fgraf = FTEMA_E(R, Pgraf, N2)   '(R,Pgraf, N2)
    Case 8 To 10, 15 To 24
      Fgraf = (DELT(R, Pgraf) * NUT) ^ -1 '(R,Pgraf),NUT)
    Case 11 To 14
      Fgraf = FCruzado(R, P, N)        '(R,Pcruz,N)
    Case 4 To 7, 19, 25
      Fgraf = -1                       '(não funcionam)
    End Select
  Else
    Fgraf = -1
  End If
```

End Function

'Calcula o valor de F para qualquer trocador

Function CalcF(R As Double, P As Double, N As Integer, N2 As Integer)

Dim NUTloc As Double

logneg = False

Select Case N

Case 0

CalcF = FCP(R, P) '(R,Pgraf)

Case 1 To 2

CalcF = FTEMA_E(R, P, N) '(R,Pgraf, N)

Case 3

CalcF = FTEMA_E(R, P, N2) '(R,Pgraf, N2)

Case 8 To 10, 15 To 25

NUTloc = AchaNUTfunções(R, P, N)

CalcF = (DELT(R, P) * NUTloc) ^ -1 '((R,Pgraf),NUT)

Case 11 To 14

CalcF = FCruzado(R, P, N) '(R,Pcruz,N)

Case 4 To 7, 19, 25

CalcF = -1 '(não funcionam)

End Select

If logneg = True Then

CalcF = -1

End If

End Function

'Acha o NUTlimiar para os trocadores

Function NUTlimiar(Rlimiar As Double, N As Integer)

Select Case N

Case 1 To 3, 11 To 14

NUTlimiar = 0 '(cálculos são feitos

sem NUT)

Case 8 To 10, 15 To 24

NUTlimiar = AchaNUTlimiar(Rlimiar, N) '(Rlimiar=NUT,N)

Case 25

NUTlimiar = -1

End Select

End Function

Function Plimiar(P As Double, NUT As Double, NUTlimiar As Double, N As Integer)

Select Case N

Case 1 To 3

Plimiar = P '(Plimiar=*)

Case 8

Plimiar = PTEMA_J2N(NUT, NUTlimiar)

'(Rlimiar=NUT,NUTlimiar)

Case 9

Plimiar = PTEMA_G2N(NUT, NUTlimiar)

'(Rlimiar=NUT,NUTlimiar)

Case 10

Plimiar = P_UU(NUT, NUTlimiar)

'(Rlimiar=NUT,NUTlimiar)

```

Case 11 To 14
    Plimiar = P                                     '(Plimiar=*)
Case 15 To 18
    Plimiar = PTubeRows(NUT, NUTlimiar, N)
'(Rlimiar=NUT,NUTlimiar)
Case 20 To 24
    Plimiar = PUBend(NUT, NUTlimiar, N)
'(Rlimiar=NUT,NUTlimiar)
Case 4 To 7, 19, 25
    Plimiar = -1
End Select

End Function

'Calcula o valor de F no limiar
Function Flimiar(R As Double, P As Double, NUTlimiar As Double,
Plimiar As Double, NUT As Double, N As Integer, N2 As Integer)
    Dim DELTlimiar As Double

Select Case N
    Case 1 To 2
        Flimiar = LimiarCT(P, N)                     '(Plimiar=*,N)
    Case 3
        Flimiar = LimiarCT(P, N2)                     '(Plimiar=*,N2)
    Case 8 To 10, 15 To 24
        DELTlimiar = DELT(NUT, Plimiar)               '(Rlimiar=NUT,
Plimiar)
        Flimiar = (DELTlimiar * NUTlimiar) ^ -1
'(DELTlimiar,NUTlimiar)
    Case 11 To 14
        Flimiar = FCruzado(1 / P - 1, P, N)          '(P,N)
    Case 4 To 7, 19, 25
        Flimiar = -1
End Select

End Function

```

5. Procedimentos com planilhas

```

Sub LiberaCalculos(NumTroc As Integer, numRs As Integer)
Dim i, j As Integer

    Sheets(4).EnableCalculation = True

    For i = 1 To NumTroc
        For j = 0 To numRs - 1
            Sheets(8 * i + j - 3).EnableCalculation = True
        Next j
    Next i

End Sub

Sub DesligaTodasPlanilhas()

    For i = 1 To 64
        Sheets(i + 4).EnableCalculation = False
    Next i

    Sheets(4).EnableCalculation = True

End Sub

Sub BotãoTelaPrincipal_Clique()
    Sheets("Plan1").Select
End Sub

Sub BotãoGráficoOG_Clique()
    Sheets("GráficoOG").Select
End Sub

Sub GráficoOF_Clique()
    Sheets("GráficoOF").Select
End Sub

Function temp_adequada(N As String) As Boolean
    If Not IsNumeric(N) Then
        temp_adequada = False
    Else
        temp_adequada = True
    End If
End Function

Function N_adequado(N As String) As Boolean
    If Not IsNumeric(N) Then
        N_adequado = False
    ElseIf N < 1 Then
        N_adequado = False
    ElseIf N > 30 Then
        N_adequado = False
    Else
        N_adequado = True
    End If
End Function

```

```

Function P_adequado(N As String) As Boolean
    If Not IsNumeric(N) Then
        P_adequado = False
    ElseIf N < 0 Or N > 1 Then
        P_adequado = False
    Else
        P_adequado = True
    End If
End Function

```

```

Function R_adequado(N As String) As Boolean
    If Not IsNumeric(N) Then
        R_adequado = False
    ElseIf N < 0 Then
        R_adequado = False
    Else
        R_adequado = True
    End If
End Function

```

```

Sub ConstroiLegendaF(numtroc As Integer, numRs As Integer, limiar As
Boolean)
    Dim i, j As Integer

```

```

    Sheets(2).Legend.Delete
    Sheets(2).HasLegend = True

```

```

    If numRs <> 0 Then
        For i = 1 To numtroc
            Sheets(2).SeriesCollection(i).XValues = ("=TROC" + CStr(i) +
"!R3C6:R" + CStr(40 * numRs) + "C6")
            Sheets(2).SeriesCollection(i).Values = ("=TROC" + CStr(i) +
"!R3C7:R" + CStr(40 * numRs) + "C7")
        Next i

```

```

        For i = i To 8
            Sheets(2).SeriesCollection(i).XValues = 0
            Sheets(2).SeriesCollection(i).Values = 0
        Next i

```

```

    Else
        For i = 1 To 8
            Sheets(2).SeriesCollection(i).XValues = 0
            Sheets(2).SeriesCollection(i).Values = 0
        Next i
    End If

```

```

    If limiar Then
        For j = 9 To numtroc + 8
            Sheets(2).SeriesCollection(j).XValues = ("=TROC" + CStr(j - 8)
+ "!R3C10:R" + CStr(40) + "C10")
            Sheets(2).SeriesCollection(j).Values = ("=TROC" + CStr(j - 8)
+ "!R3C11:R" + CStr(40) + "C11")
        Next j

```

```

        For j = j To 16
            Sheets(2).SeriesCollection(j).XValues = 0
            Sheets(2).SeriesCollection(j).Values = 0
        Next j

```

```

Else
    For j = 9 To 16
        Sheets(2).SeriesCollection(j).XValues = 0
        Sheets(2).SeriesCollection(j).Values = 0
    Next j
End If

For cont = numtroc + 1 To 16
    Sheets(2).Legend.LegendEntries(numtroc + 1).Delete
Next cont

End Sub

Sub ConstroiLegendaG(numtroc As Integer, numRs As Integer)
    Dim i As Integer

    Sheets(3).Legend.Delete
    Sheets(3).HasLegend = True

    If numRs <> 0 Then
        For i = 1 To numtroc
            Sheets(3).SeriesCollection(i).XValues = ("=TROC" + CStr(i) +
"!R3C8:R" + CStr(40 * numRs) + "C8")
            Sheets(3).SeriesCollection(i).Values = ("=TROC" + CStr(i) +
"!R3C7:R" + CStr(40 * numRs) + "C7")
        Next i
    Else
        For i = 1 To 8
            Sheets(3).SeriesCollection(i).XValues = 0
            Sheets(3).SeriesCollection(i).Values = 0
        Next i
    End If

    For i = i To 8
        Sheets(3).SeriesCollection(i).XValues = 0
        Sheets(3).SeriesCollection(i).Values = 0
    Next i

    For cont = numtroc + 1 To 8
        Sheets(3).Legend.LegendEntries(numtroc + 1).Delete
    Next cont

End Sub

```

6. Inicialização e fechamento do programa

*Planilha "EstaPasta_de_trabalho"

```
Private Sub Workbook_BeforeClose(Cancel As Boolean)
```

```
    Call FormGeral.LimpaPlanilha
```

```
    Call LiberaCalculos(8, 8)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Workbook_Open()
```

```
    FormGeral.Show
```

```
    Application.DisplayFullScreen = True
```

```
    Call FormGeral.LimpaPlanilha
```

```
    Call ConstroiLegendaF(0, 0, False)
```

```
    Call ConstroiLegendaG(0, 0)
```

```
End Sub
```

*Planilha "PlanPrimeiro"

```
Private Sub Worksheet_Activate()
```

```
    FormGeral.Show
```

```
End Sub
```

Referências bibliográficas

1. Incropera, F.P., de Witt, D.P., *Fundamentos da transferência de calor*, ed. Guanabara Koogan S.A., 3ª ed., Rio de Janeiro, 1992.
2. Shah, R.K., Subbarao, E.C., Mashelkar, R.A., *Heat Transfer Equipment Design*, Hemisphere Publishing Corp., E.U.A., 1988.
3. Saunders, E.A.D., *Heat Exchangers: Selection, Design & Construction*, ed. Longman Scientific & Technical, New York, 1988.
4. Kern, D.Q., *Process Heat Transfer*, McGraw Hill International Book Company, Tokyo, 1965.
5. Nagle, W.M., Mean Temperature Difference in Multipass Heat Exchangers, *Industrial and Engineering Chemistry*, vol.25, no.6, junho 1933.
6. Shcindler, D.L., Bates, H.T., True Temperature Difference in a 1-2 Divided-Flow Heat Exchanger, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, No. 30, Vol.56.
7. Fischer, F.K., *Mean Temperature Difference Correction in Multipass Exchangers*, novembro 1937.
8. Gulyani, B.B, Mohanty, B., Estimating Log Mean Temperature Difference in Multi-Pass Exchangers, *Chemical Engineering*, novembro 1996.
9. Wales, R.E., Mean Temperature Difference in Heat Exchangers, *Chemical Engineering*, fevereiro 1981.
10. Bowman, R.^a, Mueller, ^aC., Nagle, W.M., Mean Temperature Difference in Design, *Transactions of the ASME*, maio 1940.
11. Hewitt, G.F., *Handbook of Heat Exchanger Design*, Begell House, Inc., New York, 1992.