

DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA PARA AUXILIAR ENSINO DE SISTEMAS TÉRMICOS

Gilliard Fabiano Adriano

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluídos, Faculdade de Engenharia Mecânica,
UNICAMP, Campinas, SP, Brasil Caixa Postal 6088, 13083-970
008779@apollo-11.fem.unicamp.br

Caio Glauco Sánchez

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluídos, Faculdade de Engenharia Mecânica,
UNICAMP, Campinas, SP, Brasil Caixa Postal 6088, 13083-970
caio@fem.unicamp.br

Resumo.Este trabalho apresenta o desenvolvimento de programa de simulação de processos de engenharia térmica: refrigeração, trocador de calor e aquecedor de água a gás. O programa que simula o processo e faz aquisição dos dados do equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Térmicos do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp. O programa, além da aquisição dos dados de temperatura do experimento, permite que outros dados sejam introduzidos e mostra uma simulação do processo, de forma a apresentar ao aluno uma primeira resposta do balanço de energia e da eficiência do equipamento, para posterior comparação com os cálculos efetuados pelo aluno. O programa apresenta também uma descrição do processo e permite que outros dados sejam introduzidos, efetuando simulações que podem ser comparadas com as simulações obtidas dos dados do equipamento. No trabalho mostramos as principais telas do programa e a metodologia de trabalho no laboratório.

Palavras-chave: Sistema de aquisição de dados, trocadores de calor, ciclo de compressão de vapor, aquecedor de água a gás, simulação de processos de engenharia térmica.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas térmicos estão presentes em praticamente todos os tipos de indústrias e muitos bens de consumo. Em indústrias químicas e alimentícias, com trocadores de calor em aviões, nas turbinas; em casa, na geladeira, no aquecedor e no ar condicionado. O laboratório de sistemas térmicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp tem equipamentos que simulam os principais equipamentos e o trabalho consistiu na implantação de um sistema de aquisição de dados e simulação para este laboratório. Para isso foi utilizada uma placa especial para aquisição de temperaturas. Os experimentos incluídos no sistema de aquisição de dados foram, portanto, os que necessitavam de muitas medições de temperatura, o que facilitaria a execução do experimento sem deixar de lado os aspectos teóricos, acrescentando agilidade na obtenção de dados. Foram estes: a geladeira, o aquecedor de água a gás e o trocador de calor de tubo duplo.

2. PROGRAMAÇÃO DO SOFTWARE

Foram instaladas e configuradas as placas de aquisição e o Labview foi o programa utilizado. A seguir serão explicados os módulos do programa, como eles foram feitos, quais foram as principais dificuldades, como foram feitos os testes e quais os resultados obtidos.

2.1 Geladeira

Este experimento reproduz o ciclo de compressão a vapor. Nele há um compressor comprimindo o gás; a seguir o fluido troca calor com o ambiente num condensador, com mudança de fase; expande por meio de válvula, tornando a se transformar em gás; troca calor com o interior da geladeira por meio do evaporador e volta ao compressor. Os alunos devem realizar este experimento com três válvulas de expansão diferentes: uma pressostática, uma termostática e um tubo capilar. Para calcular os resultados teóricos fazemos as considerações tradicionais, que estão descritas de acordo com cada processo do ciclo, mostrado nas figuras 1 e 2:

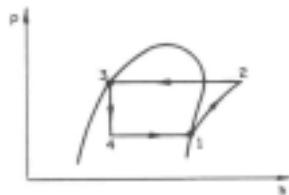


Figura 1 - Diagrama P x h.

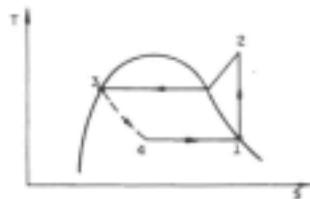


Figura 2 - Diagrama T x s.

Processo 1-2: Compressão adiabática reversível do estado de vapor saturado até a pressão de condensação.

Processo 2-3: Rejeição reversível de calor à pressão constante, diminuindo a temperatura do refrigerante inicialmente e condensando-o depois.

Processo 3-4: Expansão irreversível à entalpia constante do estado de líquido saturado até a pressão de evaporação.

Processo 4-1: Ganhos de calor à pressão constante, produzindo a evaporação do refrigerante até o estado de vapor saturado.

Os cálculos a serem realizados estão nas equações de 1 a 5 (Stoecker e Jones, 1985):

$$\text{Trabalho de compressão (trab. Compr.)} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

$$\text{Efeito refrigerante (ef. Refr.)} = h_1 - h_3 \quad (2)$$

$$\text{Coeficiente de Desempenho (COP)} = (h_1 - h_3) / (h_2 - h_1) \quad (3)$$

$$\text{Coeficiente de desempenho máximo ou de Carnot (COPmax)} = T_e / (T_c - T_e) \quad (4)$$

$$\text{Calor trocado no Condensador (Q. Cond.)} = h_2 - h_3 \quad (5)$$

Onde:

h_1 = entalpia do gás de expansão

h_2 = entalpia do vapor superaquecido

h_3 = entalpia do líquido na pressão de condensação

T_e = temperatura do evaporador

T_c = temperatura do condensador

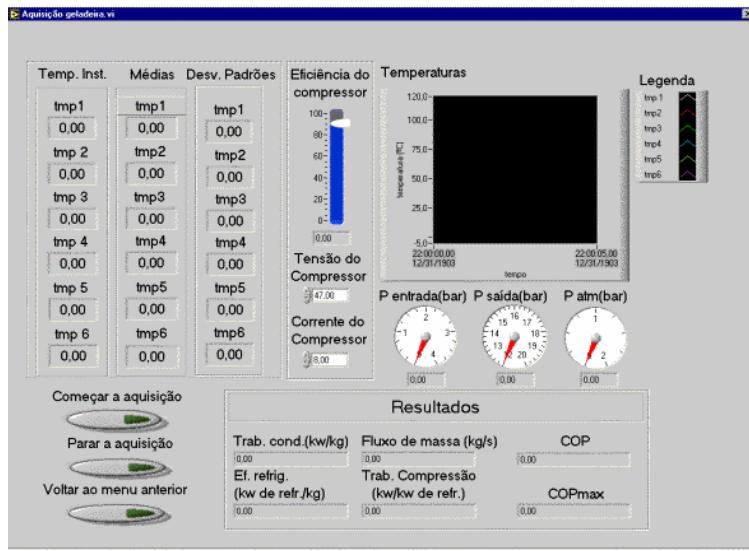


Figura 3 – Tela de aquisição de dados.

Apesar de fácil compreensão, temos de usar tabelas termodinâmicas para obter os valores de entalpia e fazer os cálculos de troca de calor. Essa foi a primeira dificuldade. Foi necessário utilizar o software Engineering Equation Solver (EES). Como a FEM possui apenas a versão para estudantes, teve-se de elaborar várias tabelas bidimensionais no programa, de acordo com os parâmetros de entrada. Quanto ao programa, pode-se observar na figura 3 como ficou a tela de aquisição. Na tela de aquisição o usuário entra com os dados necessários e o programa faz a aquisição das temperaturas , realiza os cálculos e grava os dados em uma tabela que pode ser aberta pelo excel. Enquanto os dados são aquisitados o usuário pode acompanhar as temperaturas nos indicadores na parte superior esquerda ou verificar o gráfico em tempo real das temperaturas na parte superior direita. Na tela de simulação (figura 4) o usuário entra com as pressões de entrada e de saída do compressor, além da pressão atmosférica e verifica os resultados teóricos para o trabalho do condensador, o efeito refrigerante, o trabalho de compressão e o COP, desconsiderando perdas e seguindo os ciclos ideais já apresentados.



Figura 4 – Tela de simulação.

Obs.: Para gravar os dados aquisitados, com as devidas legendas, foi necessário converter todos os dados para *strings* (linhas rosas) e colocar num *array*, transformando-o logo em seguida para *spreadsheet file* (formato compatível com o excel), para então gravar em disco.

A figura 5 mostra a programação e a figura 6 mostra o resultado. Como se pode ver, este programa auxiliará bastante os alunos na aquisição de temperaturas, pois em uma só aula eles devem aquisitar os dados em três tipos de válvulas (vide teoria), e o equipamento demora a entrar em regime. O sistema agilizará a aquisição, principalmente das temperaturas, que é o que dá mais trabalho e possibilitará uma análise mais cuidadosa de elementos mais importantes da experiência.

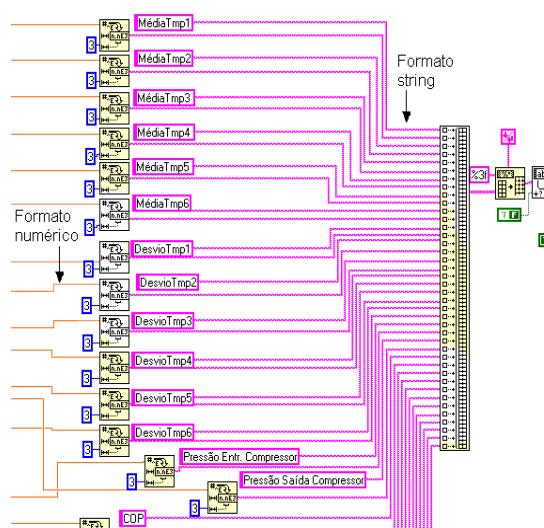


Figura 5 - Tela da programação

Microsoft Excel - Aquisição geladeira	
	A1
1	MédiaTmp1
2	2,82E+01
3	MédiaTmp2
4	2,83E+01
5	MédiaTmp3
6	2,84E+01
7	MédiaTmp4
8	2,84E+01
9	MédiaTmp5
10	2,86E+01
11	MédiaTmp6
12	2,85E+01
13	DesvioTmp1
14	6,25E-02
15	DesvioTmp2
16	2,92E-02
17	DesvioTmp3
18	3,02E-02

Figura 6 - Arquivo aberto em excel

2.2. Aquecedor de água a gás

Este experimento é bem simples e busca exemplificar um sistema térmico em regime permanente, onde há troca de calor entre dois fluidos, os gases gerados pela combustão e a água. O experimento busca também estimar as perdas ocorridas em todas as partes do processo e a performance do aquecedor. A performance de um aquecedor de água é dada pela razão entre a variação de entalpia da água e a energia disponível no gás. As perdas na performance vêm em consequência da combustão incompleta do gás, perda de calor sensível nos gases de escape e perda de calor através do revestimento do aquecedor. Na figura 7 vemos um esquema deste experimento.

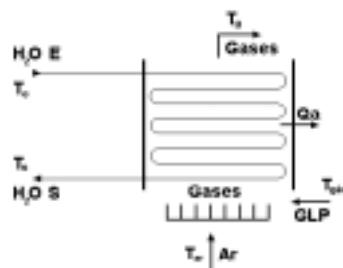


Figura 7 – Esquema do aquecedor de água a gás.

O aquecedor estudado neste experimento é utilizado para aquecimento de água, muito comum em uso doméstico. Constitui-se de um queimador principal, ativado por chama piloto que acende o queimador principal, fornecendo o calor para uma serpentina, por onde a água escoa. Alguns equipamentos de segurança são utilizados devido aos riscos de se utilizar um sistema com gás combustível, como uma válvula que corta a vazão de gás se a vazão de água for muito reduzida ou caso a chama se apague.

O modelo físico trata basicamente das trocas de calor entre a água e o gás queimado, segundo Francis, 1970. Este equipamento possui também um sistema de medição da vazão do gás pelo sistema de placa de orifício. A diferença de pressão é medida por um manômetro de tubo em U que se encontra preenchido com álcool. Há também um manômetro Bourdon que mede a pressão do gás. A placa de orifício foi calibrada. As equações utilizadas são as de números 6 a 9:

$$m_{glp} = P_{glp} \cdot V_{glp} \cdot M_{glp} / (R \cdot T_{glp}) \quad (6)$$

$$\eta = m_{H2O} \cdot C_{pH2O} \cdot (T_s - T_e) / (m_{glp} \cdot PCI) \quad (7)$$

$$Perdas = Q_a + (m_{ar} + m_{glp}) \cdot C_{pgases} \cdot (T_g - T_{ar}) \quad (8)$$

$$(A/C)_{glp} = 14,7 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{glp} \quad (9)$$

Onde :

V = vazão volumétrica de gás (m^3/s)

m = vazão mássica (kg/s)

η = rendimento

C_p = calor específico a pressão constante, $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

M_{GLP} = massa molar do GLP (49)

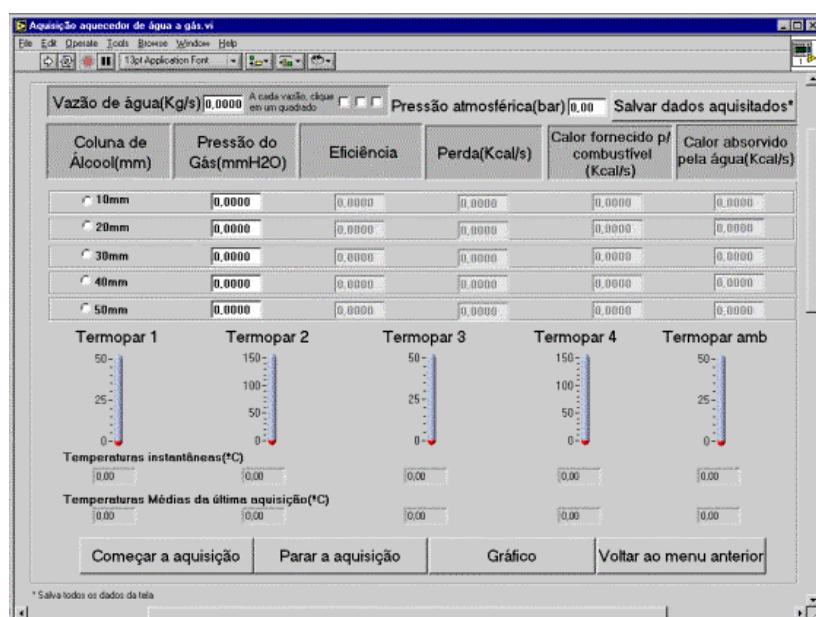


Figura 8 – Tela de aquisição de dados do aquecedor de água a gás.



Figura 9 – Gráfico da Temperatura por vazão

No aquecedor de água a gás não foi necessário utilizar tabelas termodinâmicas, pois foram utilizados os Calores Específicos a pressão Constante (Cps) da água e do ar, já conhecidos para estes fluidos. Na tela de aquisição de dados (figura 8) o usuário entra com o valor da vazão mássica de água, o desnível preestabelecido da coluna de álcool, a pressão atmosférica e a pressão do gás. O programa faz a aquisição dos dados de temperatura, calcula a performance e as perdas. Há possibilidade de salvar os dados e ainda plotar um gráfico (figura 9) da vazão mássica de água versus a temperatura de saída da água, com 5 vazões de GLP e 3 vazões de água, totalizando 15 pontos. Neste gráfico são plotadas linhas de cores diferentes para cada vazão.

É importante comentar também um procedimento que em outras linguagens poderia ser elementar, mas no Labview não é. Como se pode ver na figura 8 era necessário um conjunto de botões para selecionar o nível da coluna de álcool, que deveria ser único para cada aquisição. Como não havia este botão na biblioteca do Labview foi necessário criá-lo. Para criá-lo foi necessário fazer uso de um recurso especial do loop que permite usar o estado anterior, além de lógica combinacional. O programa final ficou como apresentado na figura 10.

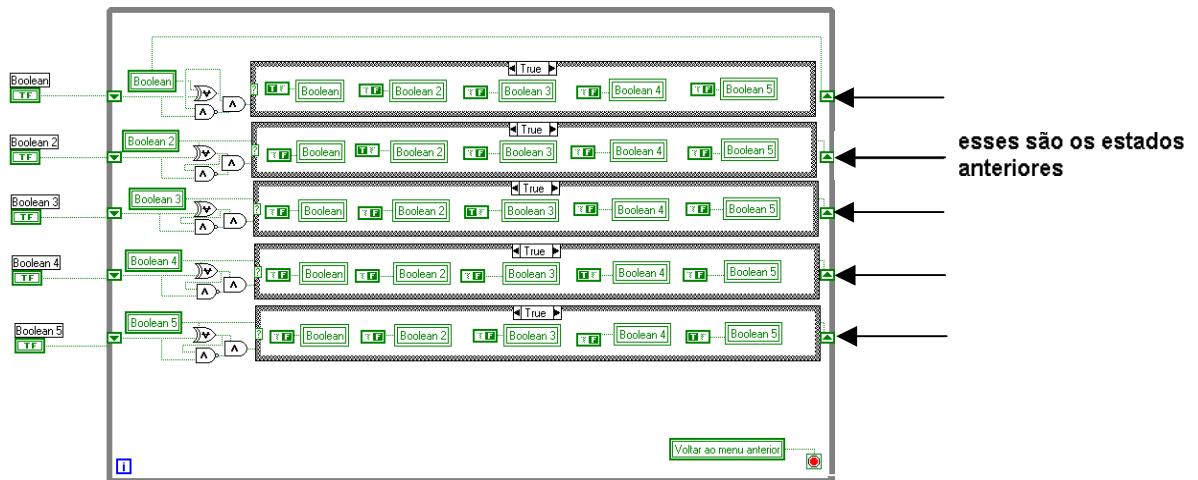


Figura 10 – lógica para botões de seleção alternados

2.3. Trocador de calor de tubo duplo

Este experimento é um trocador de calor simples, muito utilizado em indústrias, principalmente químicas e alimentícias. Ele consiste em dois tubos concêntricos onde, em um passa um fluido quente e no outro, um fluido frio. É importante citar resumidamente alguns aspectos teóricos (Incropera e Dawit, 1994) de modo que se faça entender como foi a programação. Sabemos que o calor perdido pelo fluido quente é calculado pela eq 10:

$$q_h = m_h \cdot c_{p,h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (10)$$

Com isso conseguimos calcular o coeficiente global de transferência de calor para o escoamento ensaiado pelas eqs 11 e 12:

$$q = U \cdot A_i \cdot \Delta T_{lm} \Rightarrow U = \frac{q}{A_i \cdot \Delta T_{lm}} \quad (11)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{[(T_{h,o} - T_{c,i}) - (T_{h,i} - T_{c,o})]}{\ln \left[\frac{(T_{h,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,o})} \right]} \quad (12)$$

Onde os índices *h* e *c* significam “hot” e “cool” e os índices *i* e *o* significam “inlet” e “outlet”. ΔT_{lm} será explicado mais adiante, mas pode ser entendido como uma média de temperaturas. A partir de correlações da literatura para $Nu=Nu(Re,Pr)$, da fórmula de Fourier para condução de calor, e da posse dos coeficientes de convecção podemos calcular o coeficiente global de troca de calor pela eq. 13:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{A_i \cdot \ln(r_e/r_i)}{2\pi \cdot k \cdot l} + \frac{A_i}{A_0 \cdot h_0}} \quad (13)$$

Assim precisaremos calcular os coeficientes de convecção da parede interna e externa. Para isso precisamos verificar se o escoamento é turbulento. Calculamos então o número de Reynolds, conforme a eq. 14:

$$Re_{di} = \frac{4 \cdot m_h \cdot D_i}{\pi \cdot D_i \cdot \mu} \quad (14)$$

Se $Re_D \leq 2300$, o escoamento é laminar, temos então pela eq. 15:

$$Nu_D = \frac{h_i \cdot D_i}{k} = 3,66 \quad (T_s = \text{cte}) \quad (15)$$

Se $Re_D > 2300$, o escoamento é turbulento, logo temos a seguinte relação (eq. 16):

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{0,3} \quad (\text{Relação de Dittus-Boelter}) \quad (16)$$

Assim, o coeficiente de película é obtido através da eq. 17:

$$h_i = \frac{Nu_{D_i} \cdot k}{D_i} \quad (17)$$

Já o coeficiente externo da parede do tubo interior, neste caso um escoamento anular, fica como na eq. 18:

$$Nu_i = \frac{h_0 \cdot D_h}{k} = \frac{h_0 \cdot [D_0 - (D_i + 2E)]}{k} \Rightarrow h_0 = \frac{k}{D_0 - (D_i + 2E)} \cdot Nu_i \quad (18)$$

Com isso conseguimos prever o coeficiente global de troca de calor antes de fazer o experimento. Como já foi mencionado, no trocador de calor pede-se o coeficiente global de troca de calor (U), o coeficiente de troca de calor a partir de correlações da literatura e as temperaturas de saída pelo método da efetividade. Para fazer estes cálculos temos que recorrer a tabelas termodinâmicas, muitas delas dependentes da temperatura. Novamente foi necessário elaborar tabelas na programação, felizmente nesse caso dependiam apenas da temperatura. A tela de aquisição deste módulo ficou como mostra a figura 11 e 12 :

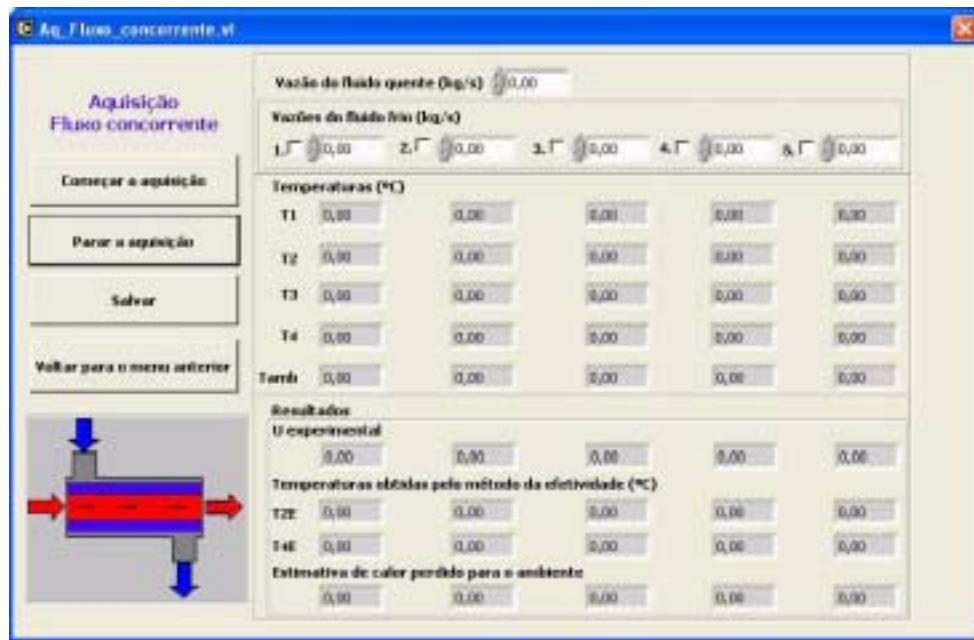


Figura 11 – Tela de aquisição de dados para fluxo concorrente

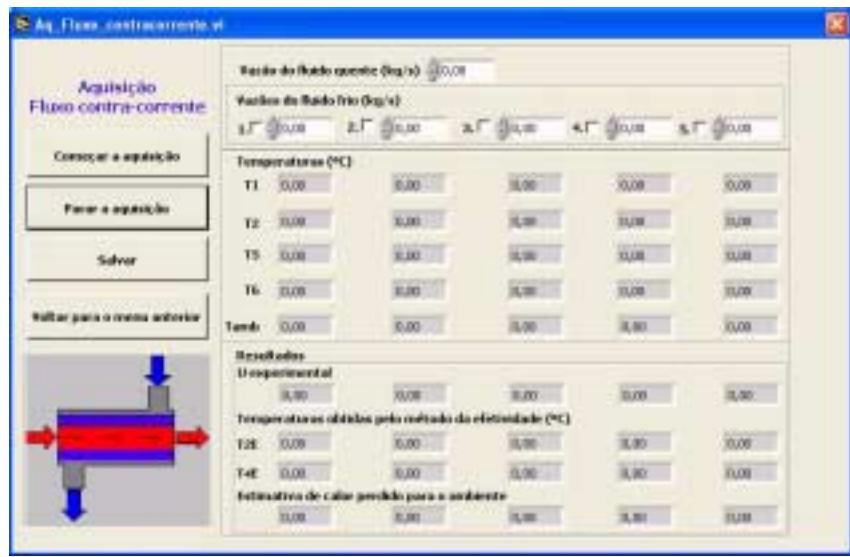


Figura 12 – Tela de aquisição de dados para fluxo contracorrente

A tela de simulação ficou como mostra a figura 13 para concorrente e similar para contracorrente.

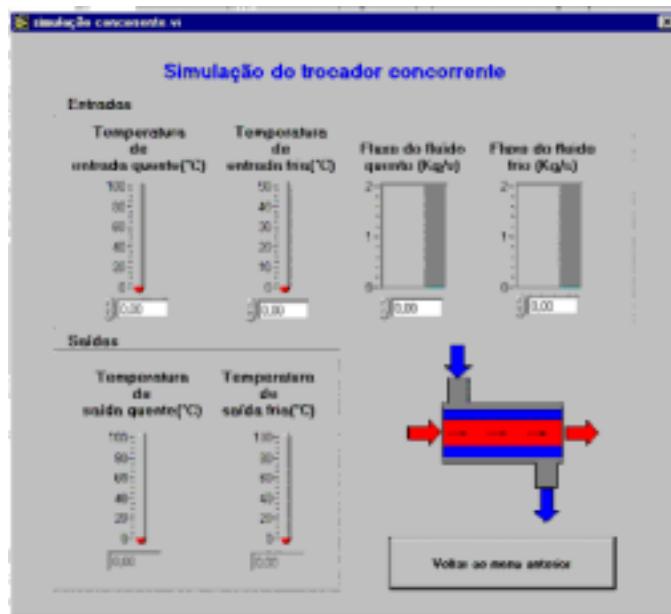


Figura 13 – Simulação de aquisição para regime concorrente

Veja que com esse programa, o aluno pode obter os dados, que serão gravados em formato “spreadsheet file”, e com isso montar gráficos, comparando os fluxos concorrentes e contracorrentes para diversos fluxos. Dessa maneira os alunos focarão seu estudo nos aspectos teóricos deste experimento e não precisarão gastar tempo calculando as médias das temperaturas, que são muitas e oscilam bastante. Além disso, o experimento demora por si só pois a cada vazão e configuração escolhida deve-se esperar o equipamento entrar em regime. Com a simulação pode-se prever os coeficientes extraídos da literatura e pelo método da efetividade o que acontecerá no experimento. A simulação foi feita especialmente para este equipamento, ou seja, já tem os dados dos diâmetros e

comprimentos inseridos na programação, assim como as tabelas, que são exclusivamente para a água.

3. CONCLUSÃO

O programa se mostrou estável e fácil de ser operado. Os alunos da disciplina de laboratório o testaram durante um semestre, período no qual vários pequenos erros foram sanados, comparando-se os resultados do programa com cálculos manuais.

A próxima etapa será incluir outros sensores como vazão e pressão, além de eletro válvulas para o controle dos processos.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Francis, W., 1970, - Fuels and fuel technology, Pergamon Press.

Incropera, F. P. e Dawit , D.P.,1994, “Fundamentals of Heat Transfer”, John Wiley e Sons.
Stoecker W.F. e Jones J.W.,1985, “Refrigeração e ar condicionado”, McGraw – Hill do Brasil.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SOFTWARE RESEARCH FOR AUXILIAR TEACHING OF THERMAL SYSTEMS

Gilliard Fabiano Adriano

Thermal and Fluids Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty,
UNICAMP, Campinas, SP, Brasil Caixa Postal 6088, 13083-970
008779@apollo-11.fem.unicamp.br

Caio Glauco Sánchez

Thermal and Fluids Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty,
UNICAMP, Campinas, SP, Brasil Caixa Postal 6088, 13083-970
caio@fem.unicamp.br

Abstract. This work shows the development of a software for thermal process simulation: Steam compression cycle, heat exchanger and gas-water heater. The simulation and data acquisition software was developed at the Thermal Systems Laboratory of the Mechanical Engineering Faculty at the State University of Campinas, Unicamp. The software samples temperatures and performs the process simulation, showing, as result, the energy balance and the process efficiency. The main screens and the work methodology are shown in this work.

Keywords. Data logger, Heat exchanger, Steam compression cycle, gas water heater, thermal process simulation