

FERNANDO FRAGA E SILVA

**SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS HIDRÁULICOS COM EFEITO DE
TERMOSSIFÃO: PROGRAMAÇÃO DE UM SIMULADOR
UNIDIMENSIONAL E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

**Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador :
Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira**

**São Paulo
2004**

DEDICATÓRIA

Alexandre, o Grande, quando indagado porque valorizava mais o seu mestre que o seu próprio pai, respondera :

"O meu pai me trouxe do céu para a terra, mas meu mestre me eleva da terra aos céus".

Dedico este trabalho ao meu pai e tutor, Suamy, e à minha mãe Graça pelo estímulo que sempre me proporcionou

O autor

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao **Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira** pela orientação, paciência, e a disposição, indispensáveis para me guiar com êxito durante o trabalho, ao **Prof. Dr. Antonio Luis Campos Mariani** que me cedeu o material de construção, os instrumentos de medição e todo o suporte necessário para a manufatura da experiência, ao **Prof. Sérgio Roberto Ceccato** que cedeu espaço no laboratório de máquinas hidráulicas para a instalação do experimento, a **Guilherme Silveira Santos** que foi indispensável neste trabalho, apoiando-me nos momentos difíceis, ajudando a idealizar o projeto e a fabricar o aparato experimental.

RESUMO

Este trabalho desenvolve um **simulador de circuitos hidráulico-térmico** que resolve numericamente escoamentos permanentes, unidimensionais, e laminares; com fluidos incompressíveis, monofásicos e newtonianos; e com troca de calor à temperatura constante ou a fluxo de calor constante. Em especial, este se adequa a resolução de circuitos submetidos a termossifão, isto é, as diferenças de densidade do fluido ao longo do circuito são levadas em conta no cálculo das pressões. Este simulador tem a capacidade de resolver circuitos abertos ou fechados, com ramos ou malhas.

A simulação numérica é confrontada com uma experiência simples, através do uso de um circuito hidráulico em que possível controlar a pressão de saída, mantendo a pressão de entrada constante, e controlar a potência elétrica de aquecimento do fluido interno ao circuito. Esta experiência consiste em medir a vazão e a temperatura do fluido na saída do circuito hidráulico em função de parâmetros, como, a pressão na saída e a potência de aquecimento. Isto permite verificar se os dados medidos conferem com os dados simulados.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	iii
1 - Introdução.....	1
1.1 - Importância do problema.....	1
1.2 - Descrição do problema.....	4
1.3 - Objetivos.....	5
2 - Análise do Problema.....	6
2.1 - Metodologia.....	6
2.2 - Aproximações e hipóteses.....	6
2.3 - Equacionamento do escoamento de dutos.....	6
2.4 - Equacionamento do escoamento na entrada de duto.....	10
2.5 - Equacionamento do escoamento na saída de duto.....	10
2.6 - Equacionamento do escoamento em curva de duto.....	11
2.7 - Condições de contorno do escoamento em malhas.....	11
2.8 - Condições de contorno do escoamento em ramos.....	12
3 - Resolução Numérica.....	13
3.1 - Linguagem de programação	13
3.2 - Estrutura de dados.....	13
3.3 - Algoritmos.....	14
3.4 - Descrição e comentários do programa.....	15
3.5 - Simulação 1.....	16
3.6 - Simulação 2.....	18
4 - Aferição Experimental.....	20
4.1 - Primeira Experiência.....	20
4.2 - Projeto do circuito hidráulico.....	20
4.3 - Descrição do aparato experimental.....	22
4.4 - Equipamentos de Medição.....	22
4.5 - Procedimento Experimental :.....	22
5 - Resultados Experimentais.....	24
5.1 - Coleta de dados 1.....	24

5.2 - Coleta de dados 2.....	25
6 - Discussões.....	29
6.1 - Consideração objetiva dos resultados apresentados.....	29
6.2 - Elucidação de contradições, teorias e princípios relativos ao trabalho.....	29
6.3 - Aplicabilidade e Sugestões de novas pesquisas.....	31
7 - Conclusões.....	34
8 - ANEXO 1 : Coleta de dados 1.....	37
9 - ANEXO 2 : Coleta de dados 2.....	38
10 - ANEXO 3 : Fotos da Experiência.....	39
11 - ANEXO 4 : Materiais usados no equipamento.....	44
12 - ANEXO 5: Listagem do arquivo de descrição do circuito da simulação 1.....	45
13 - ANEXO 6: Listagem do arquivo de descrição do circuito da simulação 2.....	47
14 - ANEXO 7: Listagem do procedimento principal da simulação 2	50
15 - ANEXO 8: Listagem dos procedimentos de plotagem da simulação 2	51
16 - ANEXO 9: Listagem dos procedimentos auxiliares da simulação 2.....	53
17 - ANEXO 10: Listagem do arquivo de propriedades da água.....	60
18 - ANEXO 11: Listagem do arquivo de propriedades do ar.....	62
19 - ANEXO 12: Listagem do arquivo de propriedades do óleo mineral.....	66
20 - ANEXO 13: Listagem do arquivo de propriedades do freon (r12).....	69
LISTA DE REFERÊNCIAS.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cooler experimental da HP que utiliza o efeito termossifão.....	2
Figura 2 - Esquema de evaporador de grande porte que utiliza termossifão.....	3
Figura 3 - Refrigerador doméstico de ciclo de absorção.....	4
Figura 4 - Fluxo de quantidade de movimento em uma seção de duto.....	7
Figura 5 - Esquema do circuito hidráulico da simulação 1.....	16
Figura 6 - Velocidade, diferenças de pressão e temperaturas convergindo ao longo das iterações do programa.....	17
Figura 7 - O campo de temperatura, pressão e velocidade do circuito em regime.....	18
Figura 8 - Esquema do circuito a ser usado para a verificação experimental.....	21
Figura 9 - Foto do aparato experimental montado.....	22
Figura 10 - Gráfico da vazão versus pressão de entrada para diversos regimes de aquecimento.....	26
Figura 11 - Gráfico da temperatura máxima versus pressão de entrada para diversos regimes de aquecimento.....	26
Figura 12 - Temperaturas medidas e simuladas em função da pressão de entrada para tensão elétrica de 220 V	28
Figura 13 - Vazão medida e simulada em função da pressão de entrada para tensão elétrica de 220 V.....	28
Figura 14 - Esquema de diferentes modos de circulação de água quente em prédios....	32
Figura 15 - Foto do circuito hidráulico.....	39
Figura 16 - Foto de todo o conjunto de medição.....	40
Figura 17 - Foto do aparelho de medir vazão.....	40
Figura 18 - Foto do aparelho de medir corrente.....	41
Figura 19 - Foto do aparelho de medir temperatura.....	41
Figura 20 - Becker e saída da caixa d'água.....	42
Figura 21 - Fluido pingando sobre o becker.....	42
Figura 22 - Termopar medindo a temperatura de parede do tubo de cobre.....	43
Figura 23 - Bóia d'água.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de perda localizada para entrada em dutos.....	10
Tabela 2 - Tabelas com os coeficientes para determinar a perda de carga localizada de uma curva.....	11
Tabela 3 - Dados experimentais e simulados da coleta de dados 1.....	24
Tabela 4 - Vazões medidas no conjunto de ensaio 2.....	25
Tabela 5 - Temperaturas máximas medidas no conjunto de ensaio 2.....	25
Tabela 6 - Temperatura máxima medida e simulada para aquecimento com tensão de 220 V.....	27
Tabela 7 - Vazão volumétrica medida e simulada para aquecimento com tensão de 220 V.....	27

LISTA DE SÍMBOLOS

As grandezas em negrito são grandezas vetoriais.

ρ	Densidade do fluido [kg/m ³];
β	Coeficiente de expansão volumétrica a pressão constante [K ⁻¹];
α	Coeficiente de energia cinética;
c_p	Calor específico [kJ/kg.K];
μ	Viscosidade dinâmica [N.s/m ²];
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s];
k	Condutividade térmica do fluido [W/m.K];
g	Gravidade local [m/s ²];
τ	Tensão superficial na interface fluido-superfície
h	Diferença de cotas;
u	Velocidade média do fluido [m/s];
A	Seção transversal do tubo [m ²];
P	Perímetro do tubo [m];
e	Energia interna do fluido [kJ/kg];
i	Entalpia do fluido [kJ/kg];
T_{sup}	Temperatura na superfície do tubo [K];
T	Temperatura do fluido em um determinado ponto [K];
x	Coordenada longitudinal da linha de escoamento 1D [m];
L	Nível de água ou das colunas do aparelho de medição [m];
f	Fator de atrito Darcy [adimensional];
Re	Número de Reynolds [adimensional];
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² .K] .

1 - INTRODUÇÃO

Definição da convecção natural

A troca de calor entre uma superfície e um fluido em movimento é chamada convecção, pode se dar de duas formas, convecção forçada ou natural.

Quando existe algum agente externo transferindo trabalho, com o fim de movimentar o fluido, chamamos isto de convecção forçada.

Quando há mudança da temperatura do fluido próximo a superfície em que há transferência de calor, e há alteração da densidade, e este é submetido a um campo gravitacional, há uma a força motora de movimentação do fluido, então, a esta movimentação e troca de calor se chama de **convecção natural**.

Definição do termossifão

Ao movimento do fluido ordenado devido a mudança de temperatura próximo a uma superfície é chamado de termossifão. Ordenado no sentido que este é usado como efeito motor de um escoamento.

Classificação do termossifão

O termossifão pode ser classificado em uma ou duas fases, sendo que o de duas fases pode ter origem na ebulição de uma fase líquida, ou na dissolução de um gás do líquido solvente.

1.1 - Importância do problema

Coletores solares

A aplicação mais visível do termossifão é o uso deste efeito em sistemas de aquecimento de água com coletores solares. São constituídos de placas coletores solares e acumuladores de água quente, o efeito termossifão é utilizado para realizar a circulação de água no coletor solar e no acumulador.

Transformadores

Uma segunda utilização do termossifão de uma única fase é o seu emprego em transformadores de postes e em auto-transformadores de centrais elétricas. Neste caso, óleo mineral é aquecido no enrolamento de cobre ou no entre-ferros, esse conduz o calor para o exterior do transformador e cede o calor para o ar através de aletas. Para o caso que se requer uma maior troca de calor, usa-se ventiladores sobre as aletas para intensificar a troca de calor do lado do ar; e quando se requer mais troca ainda, usa-se uma bomba de óleo para realizar a movimentação do óleo em lugar do ter-

mossifão. Ao contrário do caso anterior que visava usar o termossifão para esquentar o fluido, quer-se agora utilizar o termossifão para resfriar o fluido e conseqüentemente o transformador.

Automóveis da 2a. Guerra:

Utilizou-se o termossifão de uma única fase no arrefecimento de automóveis de até 25CV fabricados na Europa depois da segunda guerra em modelos como DKW, Goliath, Gutbrod Superior, IFA. Atualmente este emprego foi completamente abandonado em benefício da troca de calor com escoamento forçado através de uma bomba de água.

Modelo matemático das aplicações anteriores:

Normalmente, este tipo de termossifão é associado a um reservatório de água ou óleo, que constitui em uma caixa de estratificação do fluido com a temperatura. A união do modelo do termossifão com o modelo da caixa de estratificação do fluido constitui o modelo completo dos coletores solares, dos transformadores e dos radiadores dos carros antigos.

Bombeamento de produtos químicos:

O efeito termossifão pode ser utilizado com mudança de fase, permitindo que haja uma força motora de maior grandeza; neste caso, utilizado em indústrias como alternativa ao bombeamento de fluidos sensíveis a contaminação. O uso do efeito termossifão como bomba, através do uso de diversos trocadores de calor, o desbalanceamento no aquecimento e o consecutivo superaquecimento de um dos trocadores foi o problema que alavancou a pesquisa sobre o assunto.

Arrefecimento de equipamento eletrônico:

Os processadores dos computadores atuais estão dissipando 50 W/cm², e exigem o emprego de grandes dissipadores aletados e ventilados, peças de até 700 gr e com ventiladores de 6000 rpm. Isto ocasiona grande ruído, até 55db, devido a elevada rotação e dificuldades mecânicas de assentamento deste cooler sobre a placa de circuito impresso. A falência deste paradigma está próximo e este mercado entra em um momento de indeterminação.



Figura 1- Cooler experimental da HP que utiliza o efeito termossifão

Com o desafio de solucionar um problema ainda maior de dissipação dos processadores, que deverão chegar em um futuro próximo a 100 W/cm^2 , fabricantes de computadores e consultorias de engenharia térmica têm analisado sistemas de dissipação alternativos que possam ser eficazes neste novo paradigma de dissipação. Uma possível solução é utilizar fluidos que sejam mais eficien-

tes no transporte de energia que o ar, combinado com um circuito hidráulico que possibilite a rejeição deste calor diretamente para o ambiente externo, fora do gabinete. Na figura 1 pode-se ver um computador Vectra da HP equipado em um sistema como descrito acima.[1] [2]

Evaporadores de Grande Porte :

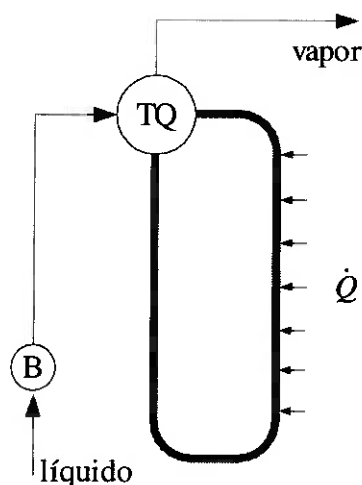


Figura 2 - Esquema de evaporador de grande porte que utiliza termossifão

Em evaporadores de ciclos de refrigeração de grande porte é muito comum utilizar-se o efeito termossifão. É necessário evaporar todo o líquido refrigerante para absorver o calor da câmara refrigerada; Se se utiliza um único duto para evaporar o líquido, haverá no princípio da evaporação uma grande eficiência de troca de calor quando as primeiras bolhas começarem a se formar até haver um jato contínuo de vapor no centro do duto, porém, em seguida, haverá uma região de eficiência de troca de calor muito baixa, a velocidade aumenta muito dentro do tubo e bloqueia o escoamento, limitando a troca de calor em todo o tubo.

Para resolver este problema, nas plantas de grande porte utiliza-se um circuito fechado de evaporação junto com um tanque de separação de fase, como pode ser visto no esquema da figura 2. Neste caso, a evaporação se dá até haver a formação de um jato contínuo de vapor, retornando, agora ao tanque que partiu para separar o vapor do líquido restante. Este tipo de evaporador é muito efici-

ente e compacto.

Refrigeração por absorção :

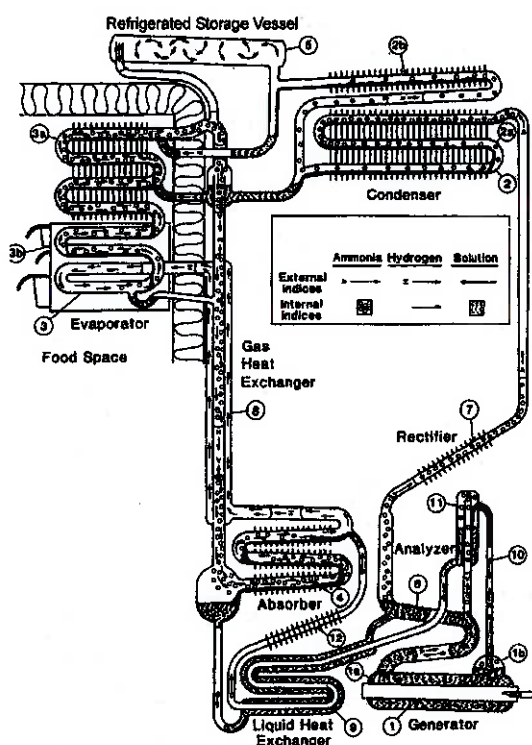


Figura 3 - Refrigerador doméstico de ciclo de absorção

Existe um ciclo de refrigeração de absorção doméstico, muitas vezes chamado de ciclo Eletrolux, que utiliza intensamente o termossifão e a convecção natural. É empregado aqui no Brasil pela Consul para a fabricação do modelo Consul biplex rural 215.[3]

Trata-se de um circuito fechado composto de três substâncias, água, amônia e hidrogênio, e através de mudanças de fase da amônia e sua dissolução no hidrogênio e em água produzem o frio.[4]

Neste caso, o termossifão possui finalidades múltiplas, podendo ser usado para transportar calor, no caminho do condensador-evaporador-absorvedor-gerador, como usado para produzir trabalho, na parte do circuito chamado de bomba de bolhas. Este esquema de refrigeração doméstica por absorção pode ser visto na figura 3.

Cafeteiras :

Outras vezes o objetivo não é o transporte de calor, mas o de massa. Atuando como uma bomba, as cafeteiras domésticas possuem um duto em que a água é aquecida até que parte da água evapore e forme um escoamento do fluido até o cone de papel com pó de café. Neste caso, temos o efeito termossifão em um circuito aberto com o fluido em duas fases, líquido e vapor d'água.

1.2 - Descrição do problema

O problema a ser analisado consiste em estudar a circulação de fluidos monofásicos, incompressíveis e newtonianos em circuitos hidráulico-térmicos unidimensionais submetidos a efeitos de termossifão sem mudança de fase. Isto é, as diferenças

de densidade do fluido ao longo do circuito devem ser levadas em conta no cálculo das pressões para a correta resolução dos mesmos.

1.3 - Objetivos

Desenvolver um **simulador de circuitos hidráulico-térmico** que resolva numericamente escoamentos permanentes, unidimensionais, e laminares; com fluidos incompressíveis, monofásicos e newtonianos; e com troca de calor à temperatura constante ou a fluxo de calor constante; e, em circuitos hidráulicos compostos de perdas de carga distribuídos ou localizados.

Desenvolver este simulador consiste em **produzir um modelo físico de termossifão e software de simulação** associado que seja suficiente e adequado para um primeiro projeto de sistemas comuns que utilizem a técnica do termossifão. Devendo ser capaz de produzir informações úteis ao projeto destes sistemas, como: determinar a **vazão mássica** do circuito e determinar o **campo de temperaturas**.

Desenvolver, também, **experimentos físicos adequados à validação** das simulações numéricas e que consigam caracterizar os aspectos simulados pelo programa supra-citado.

2 - ANÁLISE DO PROBLEMA

2.1 - Metodologia

Este trabalho se propõe a realizar um modelo de termossifão e posteriormente através de experimentos de medição de vazão e temperatura **validar a simulação numérica**. Para tanto, inicialmente ir-se-á desenvolver um modelo para regime permanente e seus desdobramentos analisados.

2.2 - Aproximações e hipóteses

O equacionamento será modelado para **regime de escoamento permanente, unidimensional e laminar; e, com fluido incompressível, monofásico e newtoniano**. A aproximação de **Boussinesq não será utilizada**, esta aproximação prevê que todo o equacionamento seja feito usando-se densidade constante com exceção do termo de quantidade de movimento no sentido vertical.[5]

Os efeitos de entrada nos tubos serão desprezados de forma que a simulação somente levará em conta o escoamento plenamente desenvolvido.[5]

2.3 - Equacionamento do escoamento de dutos

Para calcular o escoamento em dutos ir-se-á resolver as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, escritas na forma diferencial. Em seguida estas equações escritas para o contínuo, serão reescritas para o discreto, ficando assim aptas a serem resolvidas por um computador digital.

Resolver o escoamento em um duto significa encontrar as variáveis incógnitas : **u**, velocidade média do escoamento , **T**, temperatura média, **p**, pressão estática.

Equação da conservação da massa :

$$\frac{\partial(\rho A u)}{\partial x} = 0 \rightarrow \rho_x A_x u_x = \rho_0 A_0 u_0 \rightarrow u(x) = \frac{\rho_0 A_0 u_0}{\rho(x) A(x)} \quad (1)$$

Equação da conservação da massa na forma discreta :

$$u_k \approx \frac{A_0 \rho_0}{A_k \cdot \rho_k} u_0 \quad (2)$$

Isto é, o valor de velocidade de um segmento depende aproximadamente do valor da densidade do segmento anterior, além é claro, dos valores iniciais de densidade, diâmetro, velocidade inicial e do diâmetro da próprio segmento. Usa-se o valor de densidade do segmento anterior como melhor aproximação para o valor do segmento

atual.

Equação da conservação da quantidade de movimento linear :

A segunda lei do movimento de Newton fornece a segunda equação necessária para solucionar o problema. Para um volume de controle diferencial em uma camada limite fluidodinâmica, exige-se que a soma de todas as forças que atuam sobre o volume de controle devem ser iguais à taxa líquida de saída de momento do volume de controle (saída - entrada).

São dois os tipos de forças que podem atuar sobre o fluido no interior da camada limite: forças de campo, que são proporcionais ao volume, e as forças de contato, que são proporcionais à área. A força peso será a única força de campo considerada, e as forças de pressão estática e devido as tensões viscosas serão as forças de contato abordadas.

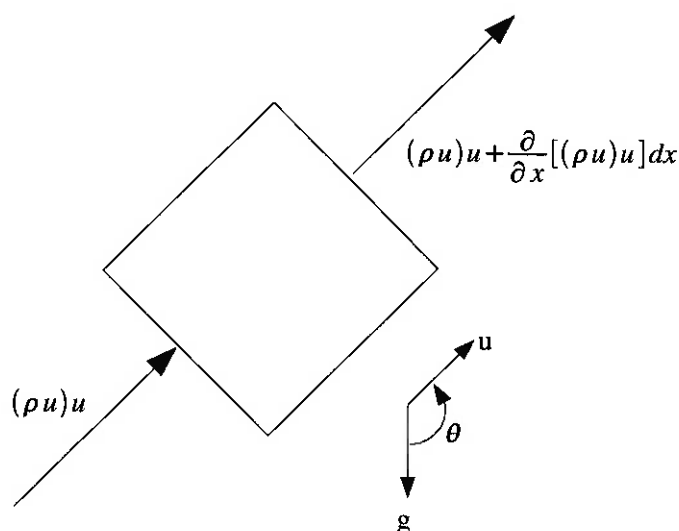


Figura 4 - Fluxo de quantidade de movimento em uma seção de duto

$$QM_{s-e} = F_{superfície} + F_{corpo} \quad (3)$$

$$\rho u du = -dp - d\tau - dP \quad (4)$$

$$\rho u du = -dp - d\tau - \rho g \cos \theta dx \quad (5)$$

O gradiente de pressão devido às tensões de cisalhamento devidas à viscosidade no elemento podem ser escritas para uma seção de duto pela expressão seguinte, esta requer escoamento plenamente desenvolvido, porém, pode ser usado para escoamen-

tos laminares ou turbulentos :

$$dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} dx \quad (6)$$

Resolvendo a equação para dp , obtemos a equação geral da pressão estática em dutos:

$$dp = \rho \left(g \cos \theta dx - u du - f \frac{u^2 dx}{2D} \right) \quad (7)$$

Esta equação deve ser reescrita em função de termos discretos:

$$p_k = p_{k-1} + \rho_k \left[g h \cos \theta_k - u_k (u_k - u_{k-1}) - f \frac{u_k^2 h}{2D_k} \right] \quad (8)$$

Sendo f o fator de Atrito de Darcy definido segundo a seguinte formula:

$$f = - \frac{(dp/dx) \cdot D}{\rho (u_m^2/2)} \quad (9)$$

Para o caso de interesse, isto é, escoamento laminar, o fator de atrito de Darcy é deduzido na referência [6] como segue:

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (10)$$

Aonde Re_D é o número de Reynolds, definido como :

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (11)$$

ou

$$Re_D = \frac{u_m D}{\nu} \quad (12)$$

A dependência do tipo de fluido empregado no termossifão pode ser exposta neste momento, cada fluido possui um coeficiente de expansão volumétrica, definido como segue:

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (13)$$

Cada fluido possui um determinado valor para uma determinada temperatura, normalmente este coeficiente é calculado a partir de uma tabela medida de densidades, a exceção fica por conta do coeficiente dos gases perfeitos que é deduzida e é função da temperatura absoluta, como segue:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (14)$$

Quanto maior for este coeficiente, maior o efeito termossifão sobre o escoamento. Ainda a grandeza da viscosidade também influencia o escoamento, conforme pode-se demonstrar a partir das equações 7 e 13.

Equação da conservação da energia

Ao aplicar a conservação de energia na seção elementar, menospreza-se a energia cinética, as parcelas de transferência de calor por difusão ou condução entre as seções adjacentes. Somente os termos de troca de calor advectivos e a troca de calor com a superfície do duto são levados em conta.

São duas condições de contorno a serem desenvolvidas sob o aspecto térmico, transferência de calor na parede do tubo a fluxo constante de calor e temperatura constante. O primeiro tipo é importante em coletores solares e o segundo é importante em aplicações semelhantes a dissipadores em chips de computador.

Troca de calor a temperatura constante

A equação de troca de calor com a parede do duto a temperatura constante assume a forma seguinte :

$$\frac{dT}{dx} = \left(\frac{h_c P}{\rho A u c_p} \right) (T_{\text{sup}} - T) \quad (15)$$

Ou, se escrevermos de forma discreta, obtemos o seguinte:

$$T_k = T_{k-1} + \left(\frac{h_c P_k h}{A_k \rho_{k-1} u_k c_p} \right) (T_{\text{sup}} - T_{k-1}) \quad (16)$$

A equação de troca de calor com a temperatura constante exige o conhecimento do coeficiente de troca de calor por convecção, a referência [7] deduz o valor deste coeficiente para escoamentos completamente desenvolvidos, laminares e em tubos circulares.

$$Nu_D = \frac{h_c D}{k_c} = 3,66 \quad (17)$$

Troca de calor a fluxo de calor constante

Forma contínua da equação de troca de calor com fluxo de calor constante no duto:

$$\frac{dT}{dx} = \left(\frac{P}{A \rho u c_p} \right) q''_{\text{sup}} \quad (18)$$

Forma discreta da equação acima :

$$T_k = T_{k-1} + \frac{P q''_{\text{sup}} h}{A_k \rho_{k-1} u_k c_p} \quad (19)$$

Um caso importante da troca de calor a fluxo de calor constante é quando o tubo é enjaquetado com isolante térmico, neste caso, o duto não apresenta fluxo de calor considerável pelas paredes, então: $T_k = T_{k-1}$.

2.4 - Equacionamento do escoamento na entrada de duto

A entrada de um circuito hidráulico implica em perda de carga do sistema, isto é, a viscosidade do fluido aliada a desorganização do movimento do fluido na entrada de um duto, a partir de um reservatório, causa uma perda de pressão localizada.

A perda de pressão pode ser estimada a partir da seguinte equação:

$$dp = C(1/2 \rho u^2) \quad (20)$$

Onde u é a velocidade do fluido a jusante no duto, ρ é a densidade do fluido, e C é o coeficiente de perda localizada para entrada em dutos e é determinado experimentalmente. Valores de C podem ser consultados na tabela 1, adaptado da referência [8], onde, D é o diâmetro do duto de entrada, t é a espessura do duto de entrada, e L é o comprimento da reentrância do duto na caixa de entrada.

C	L/D = 0	L/D = 0,002	L/D = 0,01	L/D = 0,05	L/D = 0,2	L/D = 0,5	L/D >= 1,0
t/D = 0	0,50	0,57	0,68	0,80	0,92	1,00	1,00
t/D = 0,02	0,50	0,51	0,52	0,55	0,66	0,72	0,72
t/D >= 0,05	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Tabela 1 - Coeficiente de perda localizada para entrada em dutos

2.5 - Equacionamento do escoamento na saída de duto

A saída de um circuito hidráulico também implica em perda de carga do sistema, isto é, a energia cinética do fluido é simplesmente dissipada na saída para um meio estagnado na forma de perda por atrito. Esta energia cinética ocorre devido a conversão de energia potencial, e este não pode ser mais recuperado, então a perda de pressão no sistema é igual energia cinética na saída, então pode ser escrito da seguinte forma:

$$dp = \alpha C(1/2 \rho u^2) \quad (21)$$

Onde α é o coeficiente de energia cinética que segundo a referência [8], assume valor 2 para escoamento laminar e 1,03 a 1,08 para escoamentos turbulentos co-

muns, C é unitário para saídas abruptas e menor que um para saídas divergentes, ρ é igual a densidade do fluido na saída, e u a velocidade do fluido na saída.

2.6 - Equacionamento do escoamento em curva de duto

O equacionamento das curvas tem como parâmetros a razão do raio pelo diâmetro do duto (R/D), e o ângulo do arco da curva (θ). Estes parâmetros foram escritos de forma a serem independentes um do outro e plotados em duas tabelas adaptadas da referência [8]. Para calcular o coeficiente de perda de carga, basta multiplicar K_1 e K_2 :

$$C = K_1 \cdot K_2 \quad (22)$$

R/D	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5
K_1	0,71	0,33	0,22	0,15	0,13	0,12

	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K_2	0	0,31	0,45	0,6	0,78	0,9	1	1,13	1,2	1,28	1,4

Tabela 2 - Tabelas com os coeficientes para determinar a perda de carga localizada de uma curva

2.7 - Condições de contorno do escoamento em malhas

Neste item há o objetivo de ligar condição de contorno do escoamento com condição de parada do algoritmo e com o elemento "termosyphon".

Condição de contorno

O escoamento em uma malha, isto é, um circuito fechado em regime permanente, a temperatura, pressão e a velocidade do fluido após uma volta no circuito devem ser os mesmos.

Quando tivermos um circuito fechado, iremos somente utilizar pressões relativas, pois, a determinação da pressão absoluta é complicada e desnecessária para os casos que aqui nos referimos. Então, do ponto de vista de simulação iremos considerar pressão zero em um ponto arbitrário qualquer do circuito, isto é: $p_{x=0}=0$.

O elemento "temosyphon" é o responsável por verificar se o algoritmo já convergiu e por realizar a parada das iterações deste, trata-se não de um elemento físico como uma curva ou um duto, mas, um elemento de lógica do circuito e que representa o elemento de "fechamento" do circuito.

Condição de parada

Como a malha é um circuito fechado, as grandezas de pressão (p), velocidade (u) e temperatura (T) variam segundo as propriedades do circuito, porém em regime, ao completar uma volta no circuito estas grandezas devem ter mesmo valor inicial. Como a pressão e a temperatura são dependentes da velocidade, sugere-se as seguintes condições de parada :

Regras da próxima iteração:

quando $p(1) > p(m) \implies$ diminui $u(1)$

quando $p(1) < p(m) \implies$ aumenta $u(1)$

quando $p(1) = p(m) \implies$ mantém $u(1)$

e

quando $T(1) > T(m) \implies$ diminui $T(1)$

quando $T(1) < T(m) \implies$ aumenta $T(1)$

quando $T(1) = T(m) \implies$ mantém $T(1)$

Condição de Parada :

se $T(1) = T(m)$ e $p(1) = p(m) \implies$ convergiu.

2.8 - Condições de contorno do escoamento em ramos

Agora passa-se a ligar condição de contorno do escoamento com condição de parada do algoritmo e com o elemento "sink". Este elemento "sink" é o responsável por realizar a terminação de um circuito aberto, ou , em ramo, controlando a condição de parada, checando se esta já atingiu a condição de contorno.

No caso de termos um circuito aberto a condição de parada se modifica e somente a pressão é controlada. Se a pressão no sorvedouro for igual à pressão da atmosfera, então o algoritmo convergiu.

se $p(m) - p(atm) = 0 \implies$ convergiu

3 - RESOLUÇÃO NUMÉRICA

A resolução numérica, sob ponto de vista matemático, é composta de três partes: a definição de uma linguagem, de uma estrutura de dados e os algoritmos que serão utilizados para tratar estes dados. Estes terão um subitem para cada um destes abaixo.

3.1 - Linguagem de programação

A escolha de uma linguagem para traduzir as idéias matemáticas em instruções computacionais é uma tarefa árdua, pois, existem diversas linguagens disponíveis sendo que diversas delas adequadas. Foi escolhida a linguagem de programação Scilab [9] pelos motivos que seguem:

- Interpretador com download disponível na Internet (open source);
- Funcional na plataforma Linux/i386 ;
- Projeto maduro (início em 1989) e bem mantido (INRIA);
- Uso anterior do produto em outras disciplinas;
- Linguagem de alto nível e elegante;
- Operação em conjuntos como matrizes, números complexos, polinômios, sistemas lineares, etc;
- Programação orientada a variáveis estruturáveis;
- Biblioteca de plotagem de gráficos, funções matemáticas, sistemas lineares e não-lineares, otimização, strings, etc.

3.2 - Estrutura de dados

Um circuito hidráulico é composto de uma lista ordenada de "objetos". Cada "objeto" possui um estrutura de dados própria. Seguem as descrições das estruturas de dados dos objetos:

duct. temperatura pressão vazão_massica diâmetro comprimento ângulo rugosidade elemento_posterior	==> Variáveis de estado ==> Variáveis geométricas e construtivas ==> Variáveis de posicionamento no circuito
--	--

elemento_anterior

curve. ângulo_curvatura ==> Variáveis geométricas e construtivas
 .raio
 .diâmetro
 .elemento_posterior ==> Variáveis de posicionamento no circuito
 .elemento_anterior

entrada. vazão_massica ==> Variáveis de estado
 .temperatura_do_fluido
 .elemento_posterior ==> Variáveis de posicionamento no circuito
 .elemento_anterior

sink. .pressão_saída ==> Variáveis de estado
 .temperatura_saida
 .elemento_posterior ==> Variáveis de posicionamento no circuito
 .elemento_anterior

Ainda diversos componentes podem ser acrescentados conforme a necessidade, no caso elementos como "tee", "pump", etc, ou alterações para acomodar informações necessárias a otimização como fonte de fluido (CC pressão ou vazão constante (porque não $p(t)$, ou $v(t)$), T , p , u), sorvedouro de fluido (CC pressão constante ou vazão constante, T , p , u) e intermediários (número de ramos, perda de pressão, modelo balanço de energia e massa)

3.3 - Algoritmos

Equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia

Serão resolvidas as equações de quantidade de movimento e energia de forma acopladas usando o método das diferenças finitas. Cada um dos nós está submetido às equações de conservação acima escrito. Então iremos escrever as equações de conservação para cada um dos nós. As EDOs das equações de conservação serão resolvidas pelo **método de Euler** por um motivo de simplicidade, sendo usado a referência [10].

3.4 - Descrição e comentários do programa

Propriedades físicas

Uma grande dificuldade ao escrever o programa é quanto ao cálculo das propriedades físicas dos fluidos. São quatro as propriedades físicas de interesse, calor específico, condutividade térmica, viscosidade cinemática e densidade, todas fortemente dependentes da temperatura. Estas propriedades também são dependentes da pressão, porém, este é um fenômeno de segunda ordem, sendo desprezado.

Normalmente este tipo de informação se apresenta na forma de tabelas de propriedades físicas. Apesar da variação da densidade pela temperatura ser um fenômeno bem conhecido e poder ser enunciado na forma de uma equação genérica, as demais propriedades não, devendo ser consultadas a partir de uma tabela. Então, por uma questão de simplicidade, as propriedades físicas são determinadas através de consultas à tabelas interpoladas.

Amortecimento

Certos fluidos apresentam uma variação muito grande de uma propriedade com a temperatura, inclusive de forma logarítmica, como o caso do óleo mineral, que altera o valor de sua viscosidade em 4 ordens de grandeza. Esta forte não linearidade ocasiona instabilidade na convergência, devendo, para compensar a instabilidade, ser aumentado o amortecimento.

Função densidade ("density")

Consulta uma tabela de densidade e realiza uma interpolação linear para calcular o valor da densidade da água para uma temperatura.

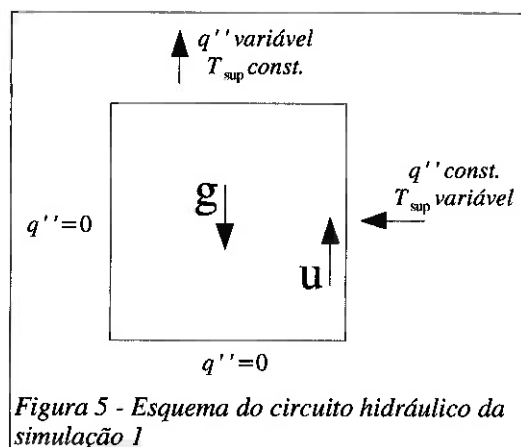
Entrada: temperatura em Celsius.

Saída: densidade da água na temperatura da entrada.

3.5 - Simulação 1

O programa foi desenvolvido em torno de um caso padrão definido aleatoriamente, mas, que satisfizesse as limitações do programa. Definiu-se, então, um circuito fechado, quadrado de 1 metro de aresta, com curvas suaves, 2 arestas verticais e 2 horizontais; com dutos de 10 mm de diâmetro interno; e preenchido com água. Com aquecimento a fluxo de calor constante e igual a $q = 500 \text{ W/m}^2$ em uma lateral vertical e resfriamento a temperatura constante na aresta horizontal superior com temperatura uniforme na parede do duto de $T_{\text{sup}} = 299 \text{ K}$, os demais dutos encontram-se isolados termicamente do meio externo. Este circuito está submetido a uma gravidade de $g = 9,781 \text{ m/s}^2$, e que equivale a gravidade da cidade de São Paulo.

A figura 5 mostra o esquema físico e algumas propriedades do circuito e o "ANEXO 5: Listagem do arquivo de descrição do circuito da simulação 1" da página 45 mostra o código do arquivo de entrada deste circuito.



Convergência da Simulação 1

Nesta etapa o algoritmo deve ser capaz de mostrar-se consistente em seus resultados, se possível, estável e convergir para o mesmo resultado. Por isto conduziu-se uma série de testes de estabilidade quanto a convergência à esquerda e à direita, e a velocidade de convergência alterando a o fator de “amortização”.

Valor da velocidade do fluido no segmento 1 ao longo das iterações com $\text{amort}=0.05$ e convergência à esquerda.

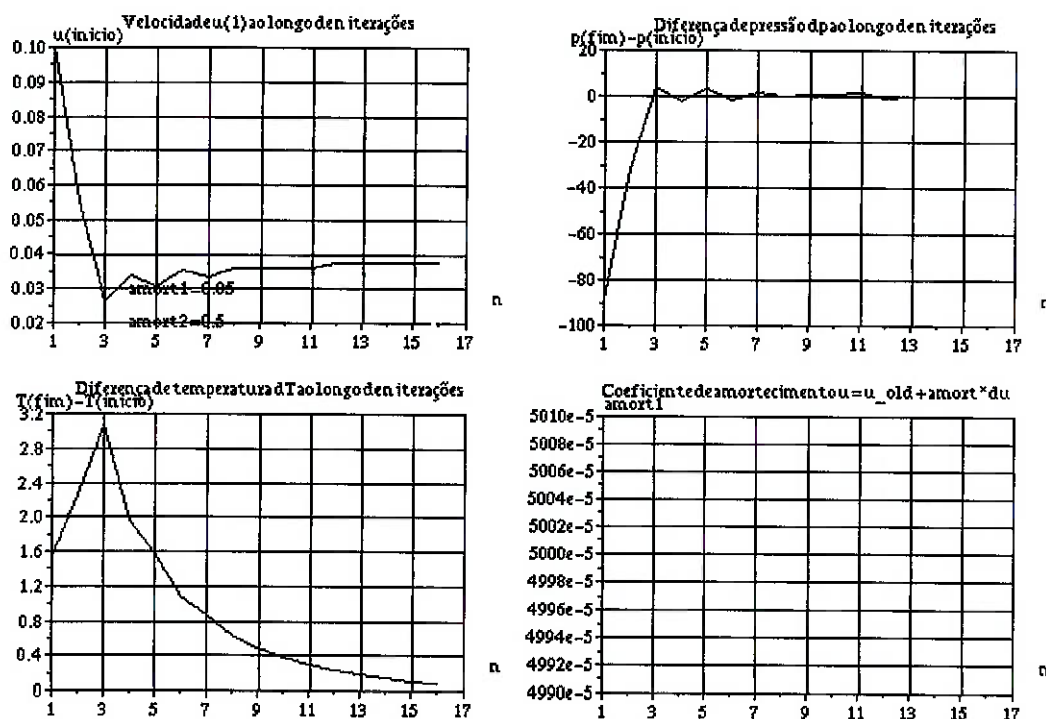


Figura 6 - Velocidade, diferenças de pressão e temperaturas convergindo ao longo das iterações do programa

Resultado da Simulação 1

São apresentados 4 gráficos obtidos da simulação 1: o gráfico 1 - "Temperatura versus Comprimento", gráfico 2 - "Velocidade versus Comprimento", gráfico 3 - "Pressão versus Comprimento", gráfico 4 - "Detalhe da pressão entre 1 m a 2 m".

O gráfico 4, nos mostra a perda de pressão em um trecho horizontal de 1 m, nas condições da simulação, a perda total de pressão é próximo a 10 Pa. Uma das formas cogitadas de medir a velocidade do circuito é medir a pressão estática em dois pontos neste tubo e através da perda de pressão ao longo deste estimar a velocidade média do escoamento. Porém, a medição diferenças de pressão de 10 Pa representaria medir em uma coluna de água somente 1 mm, o que é realmente impraticável.

A reta de aquecimento no gráfico 1, mostra um método interessante de medir o fluxo de água, através da medição da temperatura no início e no fim do aquecimento, e usando um modelo sólido desenvolvido a partir da 1a. lei da termodinâmica e das propriedades físicas da água, também bem conhecidas. Usando um método como este teríamos que medir diferenças de temperaturas da ordem de 1,3 K, podendo ser medido com o uso de resistores de fio de platina em montagem de ponte de Wheastone.

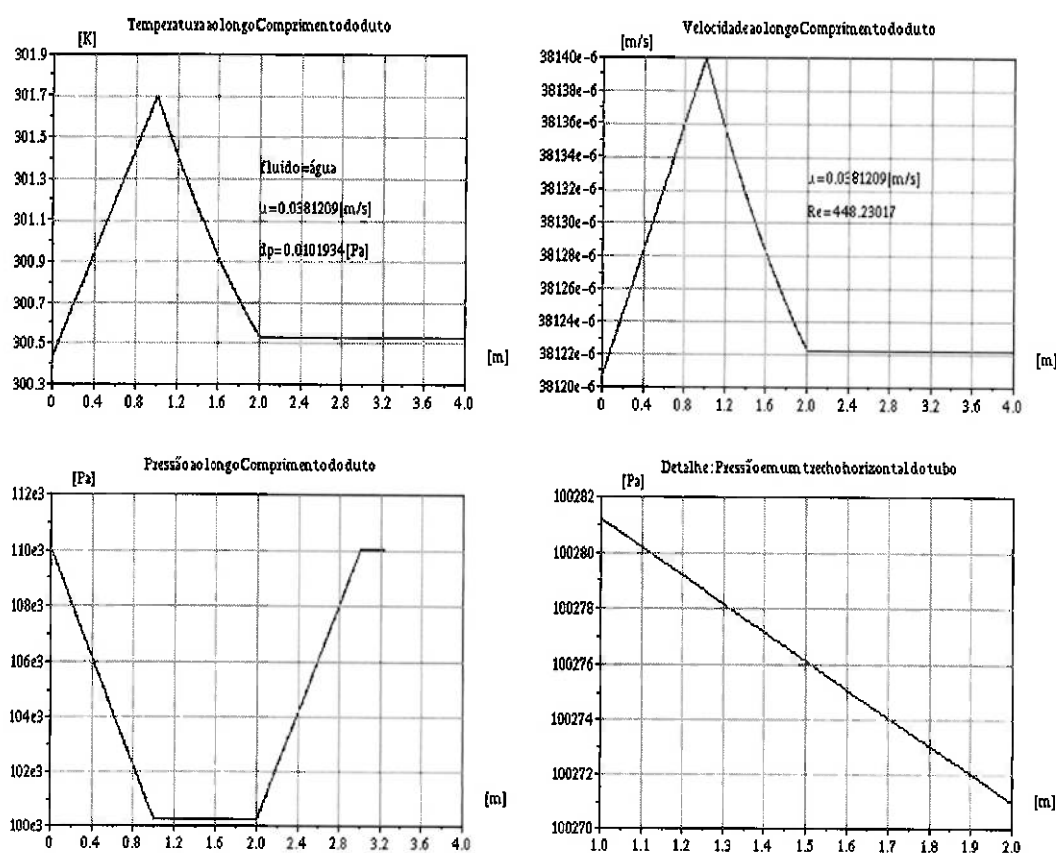


Figura 7 - O campo de temperatura, pressão e velocidade do circuito em regime

Outras simulações de interesse

Possivelmente outros tipos de simulações de circuitos fechados são interessantes, variando-se algumas características, poder-se-ia entender melhor a dinâmica dos processos envolvidos, lista-se como simulações de interesse :

- Diferentes modos de aquecimento e resfriamento: aquecimento e resfriamento por fluxo térmico constante ou a temperatura constante. Por exemplo, com $T_{\text{sup1}} = 373 \text{ K}$, $T_{\text{sup2}} = 397 \text{ K}$.
- Diferentes Fluidos : por exemplo a amônia (NH_3), que possui um coeficiente de expansibilidade 10 vezes maior que a água $\beta_{\text{NH}_3} = 2,4 \cdot (10)^{-3} \text{ K}^{-1}$.
- Diferentes Locais de aquecimento e resfriamento : Aquecimento por fluxo de calor constante e resfriamento por temperatura constante ambos na vertical.

3.6 - Simulação 2

Uma vez que o programa poderia simular sem maiores problemas circuitos fecha-

dos, iniciava-se a necessidade de projetar experimentos para verificar a fidelidade das simulações produzidas em relação a um circuito físico. Porém, o problema de medição da vazão volumétrica de um circuito fechado, fez com que o programa fosse expandido para suportar circuitos abertos. Neste caso, a medição da vazão mássica ou volumétrica de circuitos abertos poderia ser feita pelo método direto sem maiores problemas.

Tendo o programa sido expandido para suportar a alteração acima, é realizado o projeto de um circuito para ser usado na experiência 1. Este projeto é tema do próximo item e conta com simulações deste programa recentemente expandido.

Com o projeto de uma experiência pronta, passa-se a construir o circuito da experiência 1, e uma vez terminados os ensaios retorna-se às simulações. Agora, com os ensaios finalizados, passa-se a simular o circuito da experiência 1 utilizando-se um modelo descrito no "ANEXO 6: Listagem do arquivo de descrição do circuito da simulação 2", para todas as condições de medição realizados e muitos outros pontos também, uma vez que o custo de realizar simulações é muito menor que o custo de realizar medições.

Arquivo de descrição do circuito da simulação 2

A simulação 2 consiste de um circuito feito de dutos de cobre redondo com 3 mm de diâmetro interno, no qual dentro deste percorre água comum. O circuito tem formato de um U com 2,2 m de lado e uma curva na parte inferior de raio 10 cm. Este circuito é montado em uma prancha de madeira colocado na vertical com as pontas do circuito, entrada e saída, na parte mais elevada do mesmo. Nestes são colocados dutos de plástico de diâmetro internos de 4 mm que conectam o circuito à caixa d'água e ao equipamento de medição de volume e controle da coluna d'água aplicada ao mesmo.

O aquecimento é realizado com resistor de níquel-cromo isolados com encapsulamento de silicone, neste é aplicado as condições de tensão e correntes iguais aos medidos e anotados no "ANEXO 2 : Coleta de dados 2" da página 38. Os resultados das simulações estão dispostos nas tabelas 6 e 7 da página 27, junto com as respectivas medições realizadas.

4 - AFERIÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 - Primeira Experiência

A primeira experiência terá como fim medir a acurácia do programa em um circuito simples aberto e com variáveis controladas. Isto é, iremos oferecer uma geometria, uma fonte com pressão e temperaturas bem definidas e constantes, e um aquecimento a fluxo constante de calor. Como resposta iremos medir a temperatura e fluxo volumétrico no sorvedouro do circuito. Com estes dados em mãos, ir-se-á efetuar a verificação do programa.

Um dos maiores obstáculos em se ensaiar um circuito fechado, está na dificuldade de medir pequenas velocidades ou pressões envolvidas na circulação natural dos fluidos. Sendo a metodologia de cálculo idêntica e os programas para circuito fechado e aberto muito semelhantes, a verificação de um circuito aberto irá verificar um circuito fechado também.

4.2 - Projeto do circuito hidráulico

O projeto do circuito tem como meta determinar o comprimento dos dutos e a potência de aquecimento de forma que a velocidade média do fluido sem aquecimento seja de algumas dezenas de mm/s, e que a velocidade deste quando aquecido seja de ao menos 10% maior.

Há três fenômenos envolvidos no aumento da velocidade, a diminuição da densidade específica do fluido, a diminuição da viscosidade cinemática da água, o efeito termossifão do aquecimento do fluido. O aumento da velocidade pela diminuição da densidade é completamente desinteressante pelo fato de não provocar o aumento da vazão mássica. Já o aumento da velocidade por efeito da redução da viscosidade é muito interessante, e, este fenômeno deve ser contemplado nas experiências para verificar se o programa consegue descrevê-lo com exatidão. O aumento da velocidade pelo efeito termossifão é o fenômeno de maior interesse e deve ser contemplado também. Para que estes dois últimos fenômenos possam ser ensaiados, exige-se um circuito com variação de temperatura e variação da cota. Para satisfazer estes 2 requisitos e mantendo a simplicidade propõe-se o seguinte circuito.

Para criar uma condição adequada de simulação e verificação o circuito em questão foi simulado com os seguintes parâmetros: Potência de aquecimento $q''=5000$

W/m^2 , $h = 125$ mm. A simulação usada para realizar o projeto é a mesma que a utilizada no item 3.6 - Simulação 2 da página 18, porém, somente utilizando os parâmetros acima.

O resultado da simulação indica que teremos um escoamento laminar, com temperaturas variando de $18^\circ C$ com aquecimento ligado, e vazão de $Q_1 = 1,02$ cc/s¹ e $Q_2 = 1,24$ cc/s, respectivamente, sem aquecimento e com aquecimento. Oferecendo uma variação de 21% entre as vazões possibilitando uma fácil caracterização dos dois regimes de escoamento.

Um problema deste tipo de configuração é que o nível de água do reservatório, sem reposição, decai, reduzindo a pressão de entrada. Se admitirmos até 1% de variação da pressão, e nível inicial de água $h_0 = 125$ mm, então, poderemos admitir que a caixa perca até $V = 138^2 \cdot \pi \cdot 0,125 / 4 = 1869$ cc, ou seja, até 25 min de experiência, o suficiente para realizar uma medição.

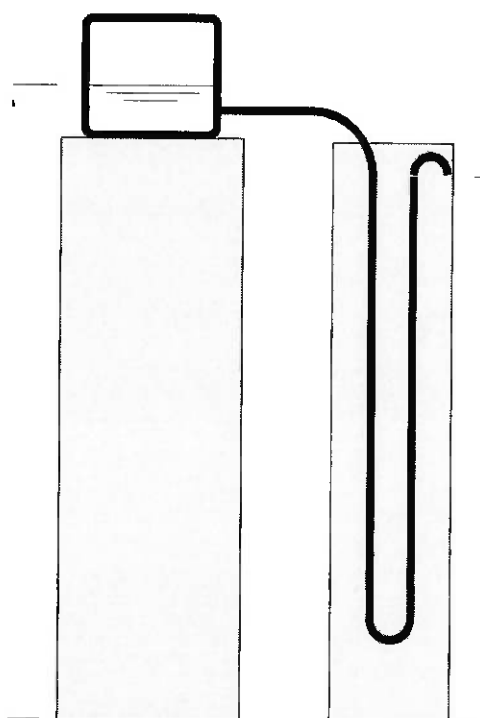


Figura 8 - Esquema do circuito a ser usado para a verificação experimental

¹ cc/s - centímetro cúbico por segundo

4.3 - Descrição do aparato experimental

O aparato é composto de uma caixa d'água de 500 litros, um circuito hidráulico em U com um aquecedor resistivo e uma bancada de medição de vazão e nível.

A **caixa d'água** é alimentada por uma mangueira com água comum, a alimentação passa por uma válvula tipo bóia para manter o nível de água constante, há uma saída de dreno com válvula globo que descarta a água para limpeza, e há uma segunda saída da caixa para o aparato experimental, esta ligada a uma válvula globo e em seguida a um "Tê", um ramo vai para o nível da caixa d'água e o outro ramo vai para o circuito experimental em si.

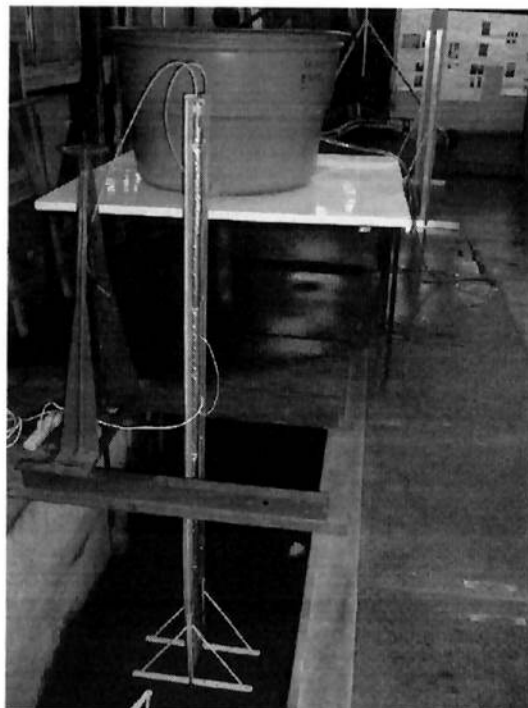


Figura 9 - Foto do aparato experimental montado

O **circuito hidráulico** é composto de um painel vertical de madeira onde é montado o circuito hidráulico

4.4 - Equipamentos de Medição

- Amperímetro de alicate, usado para medir corrente e tensão alternados;
- Proveta graduada de 250 ml;
- Becker de 900 ml;
- Termômetro de platina, para imersão, com escala 0 a 100 °C, precisão de 0,1°C, e sensor platina PT-100;
- Termômetro de junção metálica, de superfície, com escala de 0 a 200 °C, precisão de 1 °C, e sensor junção tipo K;
- Cronômetro digital de quartzo, precisão de centésimos de segundo;

4.5 - Procedimento Experimental :

[Medição da Potência do Resistor]

- Manter aquecimento desligado;
- Medir e anotar a resistência do elemento resistivo em ohms (R_1);

- Medir e anotar a tensão da fonte (V_1);
- Calcular e anotar a potência do elemento resistivo (P_1);

[Setup Inicial do Circuito Hidráulico]

- Fechar válvula globo;segundo
- Abastecer a caixa até atingir o nível de $h = 125$ mm;
- Medir e anotar a temperatura da água na caixa d'água (T_0);
- Abrir a válvula globo;

[Medição sem Aquecimento]

- Zerar o cronômetro;
- Colocar o vasilhame graduado vazio na saída do circuito;
- Iniciar sincronamente o enchimento do vasilhame com o início da contagem do cronômetro;
- Parar o cronômetro quando o nível do vasilhame atingir 60 cc, e anotar o tempo de enchimento;
- Medir e anotar a temperatura da água;

[Medição com Aquecimento]

- Ligar o circuito de aquecimento;
- Repetir seguidamente por 25 vezes o procedimento de "Medição sem Aquecimento".

5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Coleta de dados 1

Com o experimento montado procedeu-se uma bateria de medições com o fim de ambientalização da operação e detecção de eventuais problemas, isto é, uma pré-medição.

Os dados originais de medição encontram-se no anexo A, e os dados processados encontram-se na tabela 3 abaixo. Esta tabela relaciona dados experimentais e dados simulados com o programa, e em função da tensão aplicada ao resistor e da pressão expressa em termos de coluna de água, tabela-se a vazão e temperaturas máximas obtidas.

EXPERIMENTAL			SIMULADO		
Vazão [ml/s]			Vazão [ml/s]		
	V=0	V=220		V=0	V=220
H = 0	0,00	0,19	H = 0	0	0,16
H = 50	0,37	0,32	H = 50	0,19	0,29
H = 100	0,26	0,50	H = 100	0,39	0,47
Temperatura [°C]			Temperatura [°C]		
	V=0	V=220		V=0	V=220
H = 0	18	85	H = 0	18	88
H = 50	18	62	H = 50	18	55
H = 100	16	47	H = 100	18	41

Tabela 3 - Dados experimentais e simulados da coleta de dados 1

5.2 - Coleta de dados 2

Seguinte a primeira coleta de dados, foi realizada uma segunda bateria de medições, incorporando a prática e os melhoramentos de instrumentação, de procedimento e de alteração física do experimento. Este conjunto de medições, então, será usado para efetivamente produzir os resultados, enquanto as medições antigas não serão usadas por serem defectivas.

Os dados originais encontram-se no anexo B, enquanto os dados já processados encontram-se nas tabelas 4 e 5, respectivamente as vazões e temperaturas máximas medidos.

Vazão [ml/s]				
H [mm]	T=0	T=127	T=220	T=440
0	0		0,19	
50	0,16	0,22	0,31	
100	0,38		0,49	
150	0,55		0,65	
200	0,75		0,83	1,04

Tabela 4 - Vazões medidas no conjunto de ensaio 2

Temp. Máxima [°C]				
H [mm]	V=0	V=127	V=220	V=440
0	17		87	
50	17	37	63	
100	17		48	
150	18		40	
200	18		36	82

Tabela 5 - Temperaturas máximas medidas no conjunto de ensaio 2

Os dados tabelados foram plotados, respectivamente nos gráficos das figuras 10 e 11, a seguir. O gráfico da figura 10 mostra as vazões obtidas em função da pressão de entrada para diversos regimes de aquecimento.

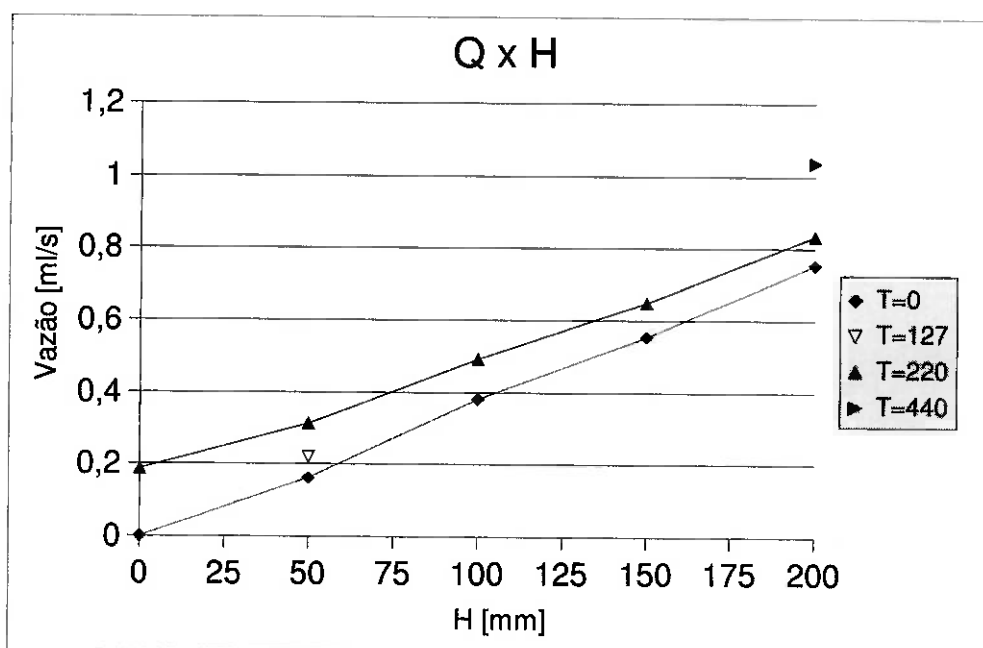


Figura 10 - Gráfico da vazão versus pressão de entrada para diversos regimes de aquecimento

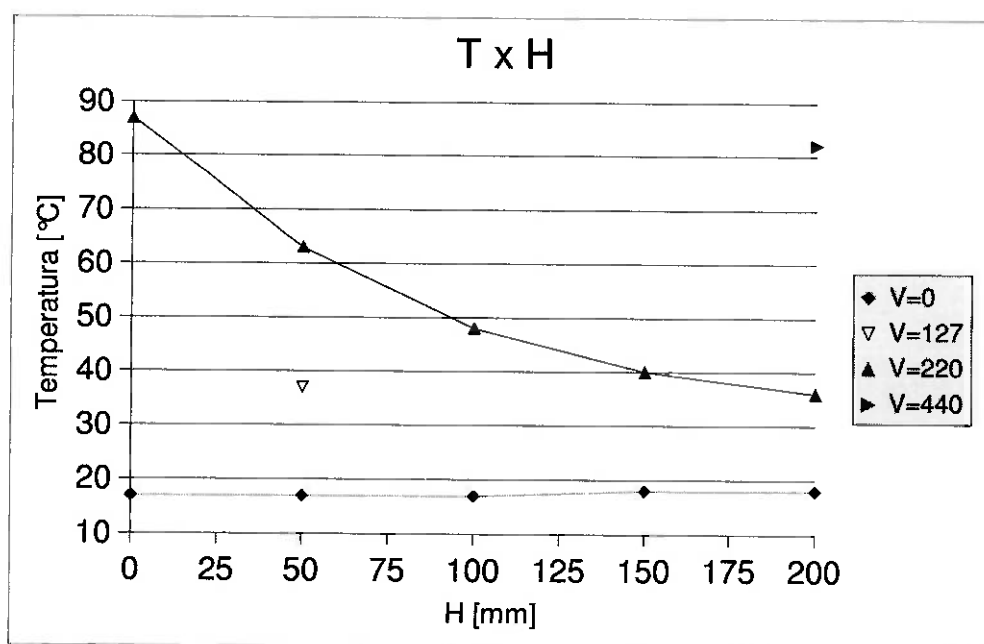


Figura 11 - Gráfico da temperatura máxima versus pressão de entrada para diversos regimes de aquecimento

Uma vez que foram obtidos os dados experimentais, simulou-se no programa o comportamento do circuito ensaiado para diversas condições de pressão de entrada e somente uma condição de aquecimento, a de resistor alimentado com 220V. Organi-

zou-se na tabela 7 e 8 os dados simulados junto com os dados medidos, ambos para esta condição de potência elétrica supracitada.

H [m]	Q simulado	Q medidas	H [m]	T simulado [°C]	T medido [°C]
0,00	0,17	0,19	0,00	93	87
0,01	0,19		0,01	84	
0,02	0,21		0,02	76	
0,03	0,27		0,03	64	
0,04	0,27		0,04	63	
0,05	0,30	0,31	0,05	59	63
0,06	0,33		0,06	55	
0,07	0,36		0,07	51	
0,08	0,40		0,08	48	
0,09	0,43		0,09	46	
0,10	0,47	0,49	0,10	44	48
0,11	0,51		0,11	41	
0,12	0,54		0,12	40	
0,13	0,56		0,13	39	
0,14	0,61		0,14	37	
0,15	0,65	0,65	0,15	36	40
0,16	0,68		0,16	35	
0,17	0,72		0,17	34	
0,18	0,76		0,18	33	
0,19	0,79		0,19	33	
0,20	0,83	0,83	0,20	32	36
0,21	0,87		0,21	31	
0,22	0,90		0,22	31	
0,23	0,94		0,23	30	
0,24	0,98		0,24	30	
0,25	1,01		0,25	29	

Tabela 6 - Temperatura máxima medida e simulada para aquecimento com tensão de 220 V

Tabela 7 - Vazão volumétrica medida e simulada para aquecimento com tensão de 220 V

Ambas as tabelas foram plotadas nos gráficos das figuras 12 e 13, mostrando o comportamento dos dados medidos ante os dados simulados.

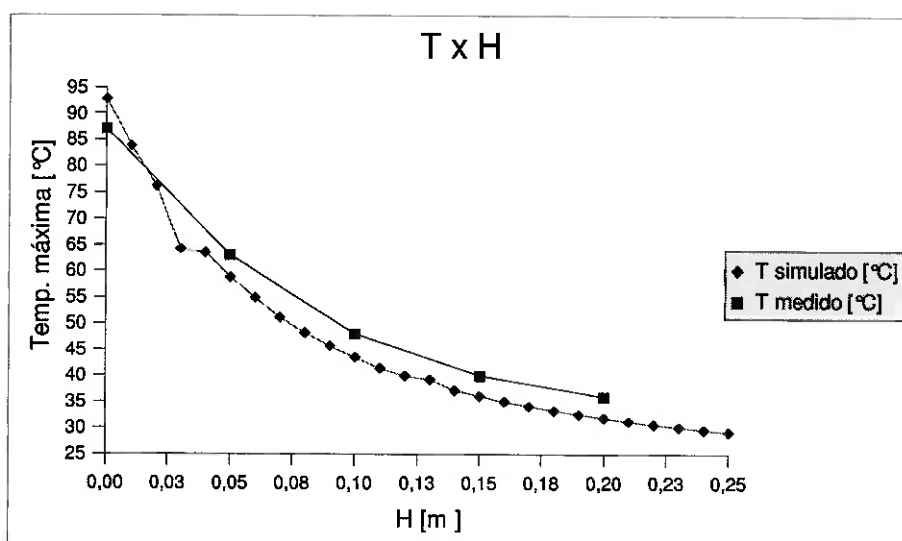


Figura 12 - Temperaturas medidas e simuladas em função da pressão de entrada para tensão elétrica de 220 V

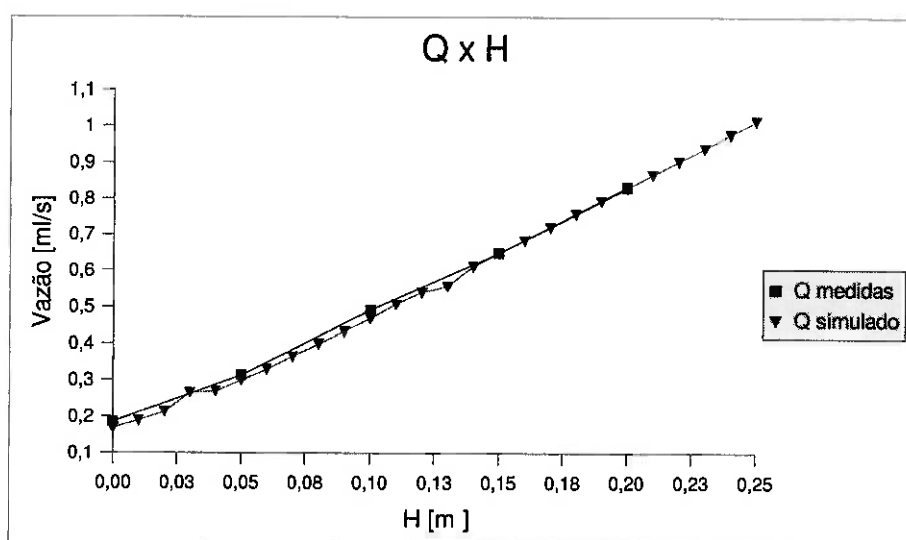


Figura 13 - Vazão medida e simulada em função da pressão de entrada para tensão elétrica de 220 V

6 - DISCUSSÕES

O primeiro problema encontrado neste trabalho foi encontrar na literatura um paradigma de modelagem de escoamento unidimensional com termossifão, pois, ao menos na literatura consultada, como as referências [5] [11] [12] [7], não há modelos para escoamento unidimensional. Os desenvolvimentos partem de problemas bidimensionais e seguem correlações empíricas de geometrias determinadas.

Então, seguindo a teoria genérica de escoamento em dutos da referência [6], e teoria genérica de convecção da referência [7], pode-se montar o equacionamento visto no tópico 2.3 - "Equacionamento do escoamento de dutos", página 6. Pela falta de paradigma de grandes autores, as chances de realizar erros são grandes, portanto, nada melhor que a verificação experimental da teoria desenvolvida.

6.1 - Consideração objetiva dos resultados apresentados

Relacionamento das causas e efeitos

Todo o trabalho culmina na análise dos gráficos da figura 12 e 13. O gráfico da figura 13, nos apresenta a vazão medida e simulada de uma determinada condição de aquecimento (tensão de 220V), as curvas plotadas são praticamente coincidentes. Não somente as curvas seguem o mesmo padrão, como os valores de ambas as curvas possuem valores muito semelhantes, isto é, há uma forte correlação entre elas.

Já o gráfico da figura 7 apresenta uma pequena anomalia que será exposta no item "O problema da curva de temperatura medida x simulada" logo a seguir.

6.2 - Elucidação de contradições, teorias e princípios relativos ao trabalho

O problema do estado de energia

A maior fraqueza do programa é o uso da temperatura do fluido como variável de estado ao invés do uso da energia interna. Isto permite que erros de integração do calor específico possibilitem a violação da primeira lei da termodinâmica, além de impossibilitar a expansão do programa para tratar de escoamentos com duas fases. A solução deste problema, todavia, é trivial e exige apenas algumas horas de programação.

O problema da curva de temperatura medida x simulada

A análise do gráfico da figura 12 nos mostra que a temperatura medida média é maior que a temperatura simulada média, alguém poderia pensar a princípio que o natural seria que a temperatura simulada devesse ser maior que a temperatura medida

devido a tendência de haver "fuga" de calor pelo isolamento. Porém, deve-se observar que a temperatura medida corresponde à temperatura da parede do duto, enquanto a temperatura simulada corresponde à temperatura média do fluido. Se pesquisarmos na referência [7], poderemos descobrir uma relação entre a temperatura de parede com a temperatura média do fluido em um escoamento laminar, dada por :

$$T_m - T_s = \frac{-11}{48} \frac{q''_s D}{k} \quad (23)$$

E se calcularmos esta diferença usando valores típicos como : $q''_s = 5000$ W/m² , $D = 0,003$ m , $k = 0,645$ W/(m K) , obteremos :

$$T_m - T_s = -5,2^\circ \text{C}$$

Iremos descobrir que o valor da temperatura média do fluido é 5,2 °C menor que a temperatura medida na parede do duto, e esta diferença de temperatura é aproximadamente igual a diferença de temperatura média constatada no gráfico da figura 12 que é de - 4°C.

Percebe-se, então, que o gráfico que aparentemente continha uma anomalia, na realidade é completamente coerente e preciso.

O problema das duas seqüências de medições

Realizou-se duas seqüências de medição de dados, a segunda se diferencia da primeira devido ao método de cálculo da potência elétrica e pela seqüência de medições.

Na primeira seqüência, a potência foi calculada através da resistência do aquecedor e da tensão da rede medidos antes do procedimento experimental, na segunda seqüência, a potência foi medida através da corrente e tensão medidos durante a experiência. Esta alteração do método da medição de potência do resistor aumenta precisão da medição, uma vez que a resistência do aquecedor se altera em função da temperatura.

A seqüência de medição também foi alterada, na primeira seqüência, fixou-se a alimentação elétrica e alterou-se a pressão de entrada, na segunda seqüência, fixou-se uma pressão de entrada e alterou-se a alimentação elétrica. Pois, os valores medidos de vazão e temperaturas são mais sensíveis a variação e a imprecisão da pressão de entrada que a variação e a imprecisão da alimentação elétrica.

A medição da temperatura poderia ser melhor se o instrumento de medição fosse mais adequado, pois, tratava-se de um amperímetro de alicate com um termopar tipo

K, não sendo um aparelho de instrumentação científica, mas sim, um aparelho de uso geral. Se a temperatura medida fosse a temperatura média do fluido em si ao invés da superfície externa do tubo de cobre. Se o transdutor pudesse ser um tipo adequado, como um transdutor de fio de platina ou termoresistor.

A medição da potência elétrica poderia ser melhor realizada utilizando-se um amperímetro convencional para medir corrente ao invés de um amperímetro de alicate, e, a utilização de uma fonte de tensão regulada para permitir o fornecimento de tensão e corrente controlados em uma maior gama de possibilidades de tensão e corrente.

6.3 - Aplicabilidade e Sugestões de novas pesquisas

A aplicabilidade dos resultados obtidos e suas limitações

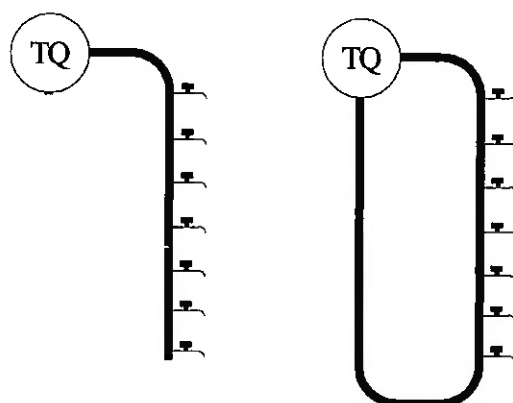
Assim, o modelo numérico desenvolvido anteriormente é aplicável em todas as condições a que ele se propõe, a saber, simulações de escoamento laminar, unidimensionais, de fluido newtoniano, monofásico, com aquecimento a calor ou a temperatura constante, de circuitos fechados ou abertos.

Simulação em regime turbulento e transitório

Todas as medições e simulações realizadas tinham números de Reynolds abaixo de 500, significando que os regimes de escoamento foram sempre laminares. Uma extensão natural seria a adaptação do programa e do experimento para uso em regimes turbulentos e transitórios. Reconhece-se na literatura com clareza os princípios teóricos do escoamento turbulento, porém, percebe-se ainda que o regime transitório é um tema em aberto. O estudo destes dois regimes de escoamento são importantes, pois, são escoamentos corriqueiros na prática da engenharia.

Simulação de circulação de água quente em prédios

Uma aplicação imediata deste programa poderia ser feito no estudo de prédios com caldeira e recirculação de água aquecida através de termossifão. Normalmente, o circuito de distribuição de água quente em prédios é realizado em ramos, como na figura 14-A, porém, há grandes vantagens operacionais em se construir o circuito em malha, como mostrado na figura 14-B.



A : circuito em ramo

B : circuito em malha

Figura 14 - Esquema de diferentes modos de circulação de água quente em prédios

São dois os motivos que justificam esta alteração; o primeiro, se os consumidores dos andares inferiores passarem um longo período sem consumir água quente, como no período noturno, não haverá circulação da água quente, havendo o resfriamento da água nestes segmentos inferiores. Isto causa a estratificação térmica na coluna de água, isto é, a parte inferior torna-se fria e a parte superior permanece quente. O consumidor do andar inferior ao querer consumir a água quente liga sua torneira e descarta a água fria até que possa se servir de água suficientemente quente. Este descarte é um incômodo ao consumidor que espera ser servido instantaneamente por água quente e, acumulado ao longo de todo o mês esse descarte, faz com que o consumo e a conta de água sejam elevados.

O segundo motivo: a estratificação térmica do fluido e as perdas de calor ao longo da tubulação faz que a temperatura média da água quente consumida nos andares inferiores seja significativamente menor que a temperatura média dos andares superiores. Se a temperatura da água quente nos andares inferiores for agradável, isto é, perto dos 40 °C, a temperatura nos andares superiores poderá ser inapropriada para o consumo, digamos perto dos 50 °C, devendo ser misturada com água fria. Este segundo problema ocasiona o aumento desnecessário da temperatura da caldeira.

A circulação da água em uma malha causa a uniformidade de temperaturas ao longo da coluna de água quente, eliminando os dois efeitos supracitados, permitindo a redução de água descartada e a não necessidade de mistura da água quente ou do superaquecimento da água na caldeira.

Simulação e balanceamento de redes de dutos

O programa desenvolvido mostra-se suficientemente bom para uso genérico em redes de dutos. Faz-se pensar que o uso deste em balanceamento automático de redes de dutos de ar condicionado, em balanceamento de redes de dutos de água de sistema de combate a incêndio, dentre outros, sejam aplicações que possam ser satisfeitas com algum trabalho de desenvolvimento do programa. Sendo excelentes temas a serem desenvolvidos para trabalhos deste nível.

Simulação de escoamento unidimensional bifásico

O desenvolvimento de um simulador de sistemas de duas fases seria realmente muito interessante, a aplicação de sistemas de termossifão de duas fases tem mais uso que o monofásico. Este tipo de expansão deste trabalho é a natural, mas, o desenvolvimento do escoamento em duas fases em dutos, seja de vapor, ou, de um gás, consumiria um considerável esforço de desenvolvimento do modelamento e da codificação, podendo ser próprio de uma dissertação de nível mais elevado.

7 - CONCLUSÕES

Sobre a validação do programa de simulação pelas experiências

A conclusão mais importante deste trabalho é que o programa de simulação desenvolvido, respeitadas as limitações de uso, consegue simular com uma precisão excepcional o escoamento real de um circuito unidimensional de termossifão. Porém, outras conclusões podem ser extraídas do trabalho corrente e serão expostas nos demais parágrafos.

Sobre o efeito motor do termossifão

A partir da equação 07, podemos observar que o efeito termossifão em um circuito fechado somente se apresenta quando o $\sin(\theta)$ do 1º termo do 2º membro daquela equação for diferente de nulo, ou melhor ainda, pode-se deduzir que somente se o resultado do circulatório do produto escalar da velocidade pela gravidade não for nulo, isto é: $C = \oint (\vec{u} \cdot \vec{g}) dl \neq 0$, é que haverá força motora.

Isto nos leva a conclusões interessantes, uma delas é que determinados tipos de circuitos que intuitivamente iriam funcionar, na realidade não irão. Por exemplo, um circuito com dois dutos verticais, um de aquecimento e outro de resfriamento, ambos com o perfil de temperaturas semelhante. O circulatório do produto vetorial será próximo de nulo, o elemento motor cessa e a velocidade do escoamento se reduz.

Sobre o projeto da geometria do termossifão

O projeto de um circuito com termossifão segue os mesmos princípios observados nos projetos de circuito com bombeamento. Por exemplo, há o aumento do comprimento do duto, há o aumento da perda de carga; se há o aumento do diâmetro, há diminuição da perda de carga; se há o aumento das singularidades, há o aumento da perda de carga; e assim por diante.

A exceção do cálculo do efeito motor do escoamento, neste caso, é requerido que haja aquecimento ou resfriamento do fluido em um duto que haja diferença de nível entre o início do duto para o fim do mesmo. Quanto maior a diferença de nível, o aquecimento ou o resfriamento, maior o efeito motor. É de se perceber que o uso de dutos inclinados não influi sobre o efeito motor do termossifão, mas, tão somente a sua projeção na vertical.

Sobre a maximização do efeito motor do termossifão

Pode-se agora imaginar circuitos que maximizam o circulatório acima citado, por

exemplo, em um circuito fechado, é preferível que haja o aquecimento na vertical e o resfriamento na horizontal, ou, o resfriamento na vertical e aquecimento na horizontal.

Isto é, não há efeito termossifão se o aquecimento e resfriamento forem na horizontal, e o efeito termossifão é prejudicado se ambos ocorrerem na vertical.

Há, também, a maximização do efeito de motor do termossifão quando o modo de troca de calor é diverso no aquecimento e no resfriamento, por exemplo, no caso de coletores solares, que o aquecimento é lento e gradual e o resfriamento é rápido.

Sobre os fluidos utilizados no termossifão

Os fluidos com coeficiente de expansibilidade (β) elevados são os fluidos mais adequados a utilização em circuitos com termossifão. Não obstante as regras que valem para a seleção de um fluido no caso de utilização de uma bomba também valem para o caso do termossifão, por exemplo, fluidos viscosos originam grandes perdas de pressão por atrito, fluidos com coeficiente de condutibilidade elevados são mais aptos a trocar calor por convecção, e portanto, permitem uma área de troca de calor menor, e fluidos com calor específicos maiores permitem o transporte de calor com menos fluxo de massa, e assim por diante.

Sobre a diferença entre o termossifão de uma fase e duas fases

O efeito termossifão de duas fases mostra uma ordem de grandeza mais potente que o similar de uma única fase, apesar deste trabalho não correlacionar especificamente esta comparação; no entanto, a literatura correlacionada e a análise de equipamentos que empregam termossifão indicam tal relação.

Isto, porém, não significa que o efeito termossifão de única fase seja sempre pior que o de duas fases, em alguns problemas de engenharia, esta é a solução técnica mais recomendável, exemplo disto são os autotransformadores de centrais elétricas. Estes equipamentos devem eliminar o calor através de circulação natural ou forçada, mas o fluido de resfriamento não pode sofrer mudança de fase para não haver diminuição da rigidez dielétrica do mesmo, tornando impossível o uso de termossifão de duas fases.

Sobre o quando usar o bombeamento a termossifão

Muitas vezes algum projetista poderá lançar mão do termossifão para almejar maior robustez do projeto, ou menor ruído, ou custos menores ao querer suprimir o uso

de uma bomba em favor de um termossifão.

Em aplicações de descarte de calor para o ambiente, o natural é esperar que o próprio ar ambiente possa fazê-lo naturalmente, quando não for possível, talvez este queira lançar mão de um ventilador ou forçando a passagem de ar pelo equipamento; outras vezes, devido a restrições de volume ou ruído, este possa usar um termossifão.

Normalmente recomendaria o uso de um termossifão quando um sistema de ar parece ser insuficiente e um sistema com água bombeada parecesse sobredimensionado, isto é, o uso de um termossifão como meio de resfriamento é intermediário entre a convecção natural a ar e um sistema de com radiador e bomba.

Impressão geral

Parece-me que o uso de termossifões perde inúmeras oportunidades de emprego pelos projetistas devido a pouca intimidade destes com este fenômeno.

8 - ANEXO 1 : COLETA DE DADOS 1

Temp.da cx. água = 17,16 C

Temp. ambiente = 17,49 C

Tensão = 211 V , Resistência = 496 ohm

medida 1 : H = 0 [mm], V=220 [V]

tempo = 9'00"

volume = 100 ml

temp. max = 85 C

medida 2 : H = 50 [mm], V = 220 [V]

tempo = 7'47"

vasilhame = 150 [ml]

temp. max = 62 C

medida 3 : H = 100 [mm], V=220[V]

tempo = 5'22"

vasilhame = 160 [ml]

temp. max = 47 C

medida 4 : H = 50 [mm], V = 0 [V]

tempo = 11' 06"

vasilhame = 170 [ml]

temp.max = 16 C

medida 5 : H = 100 [mm], V = 0 [V]

tempo = 7'42"

volume = 170 ml

temp.max = 18 C

9 - ANEXO 2 : COLETA DE DADOS 2

Temperatura da cx. água - 16,90 C

Resistência - 496 ohm

Tensão "220" - 212 V

H=150 mm	V= 0	T=12'01"93	Vol=400ml	A=0	Tmax=18	
H=150 mm	V=220	T=12'51"47	Vol=500ml	A=0,41	Tmax=40/42	
H=150 mm	V=440	Há formação de vapor, medida descartada				

H=200 mm	V=0	T=8'51"44	Vol=400ml	A=0	Tmax=18	
H=200 mm	V=220	T=5"59"60	Vol=300ml	A=0,43	Tmax=36	
H=200mm	V=440	T=4'58"37	Vol=300ml	A=0,83	Tmax=80	
H=200mm	V=440	T=3'36"66	Vol=300ml	A=0,83	Tmax=82	
H=200mm	V=440	T=5'20"69	Vol=300ml	A=0,83	Tmax=82	
H=200mm	V=440	T=1'00"97	Vol=50ml	A=0,83	Tmax=82	

H=100mm	V=0	T=10'56"44	Vol=250ml	A=0	Tmax=17	
H=100mm	V=220	T=8'29"00	Vol=250ml	A=0,46	Tmax=48/49	V=215

H=50mm	V=0	T=27'50"10	Vol=250ml	A=0	Tmax=17	
H=50mm	V=0	T=5'10"50	Vol=50ml	A=0	Tmax=17	
H=50mm	V=220	T=13'20"16	Vol=250ml	A=0,45	Tmax=63	V=212
H=50mm	V=110	T=7'34"35	Vol=100ml	A=0,24	Tmax=37	V=122

H=0 mm	V=220	T=8'58"44	Vol=100ml	A=0,44	Tmax=87	V=213	Esco-
--------	-------	-----------	-----------	--------	---------	-------	-------

amento Instável devido a presença de bolhas de ar.

10 - ANEXO 3 : FOTOS DA EXPERIÊNCIA

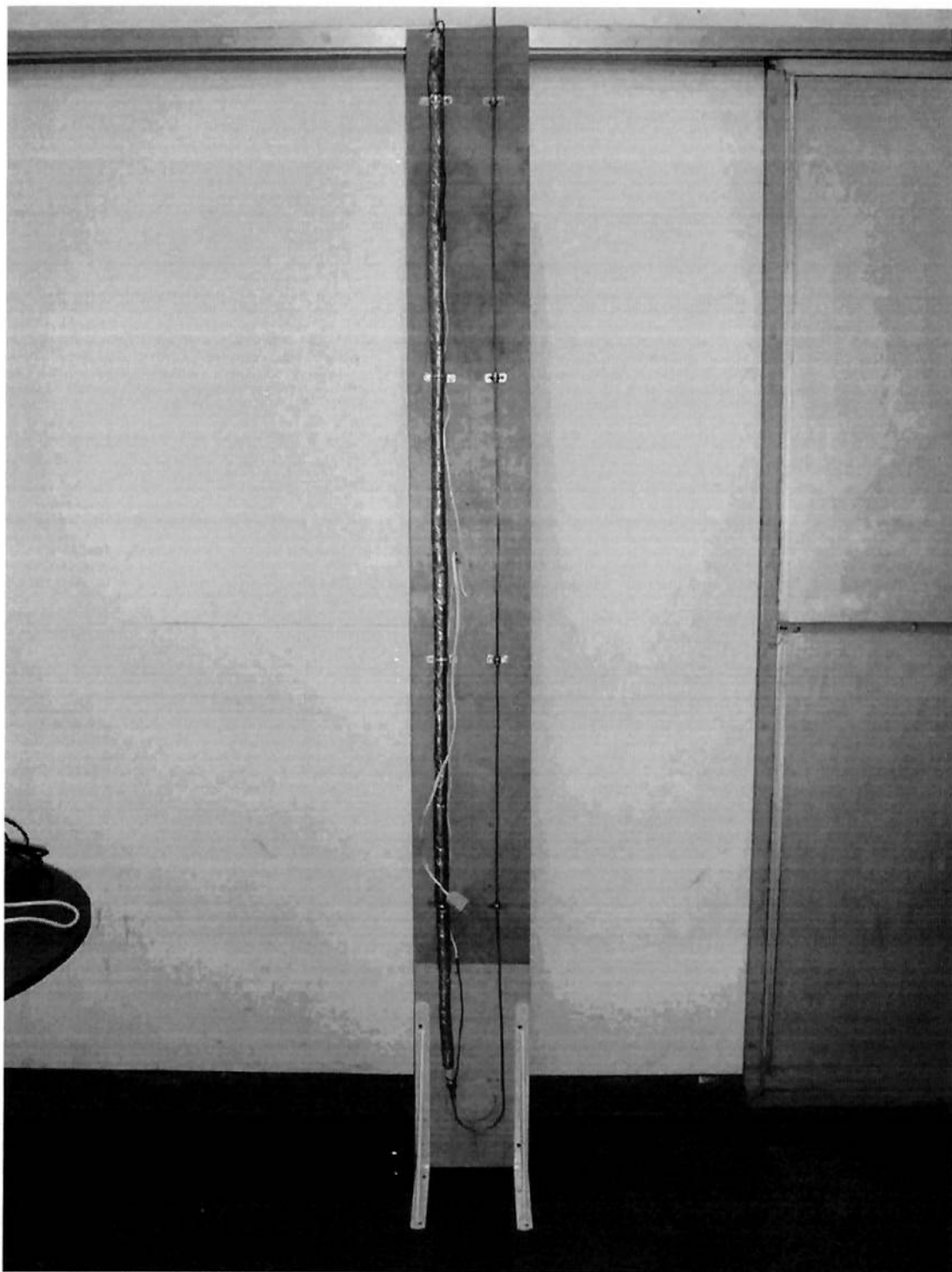


Figura 15 - Foto do circuito hidráulico

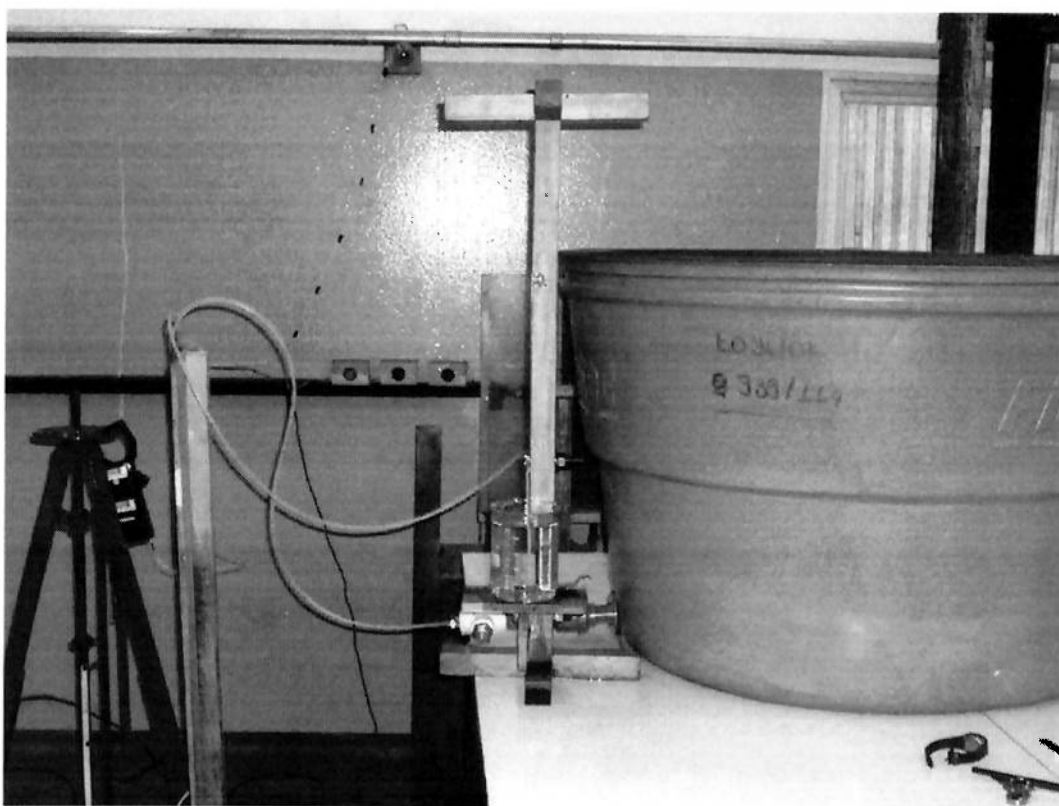


Figura 16 - Foto de todo o conjunto de medição



Figura 17 - Foto do aparelho de medir vazão

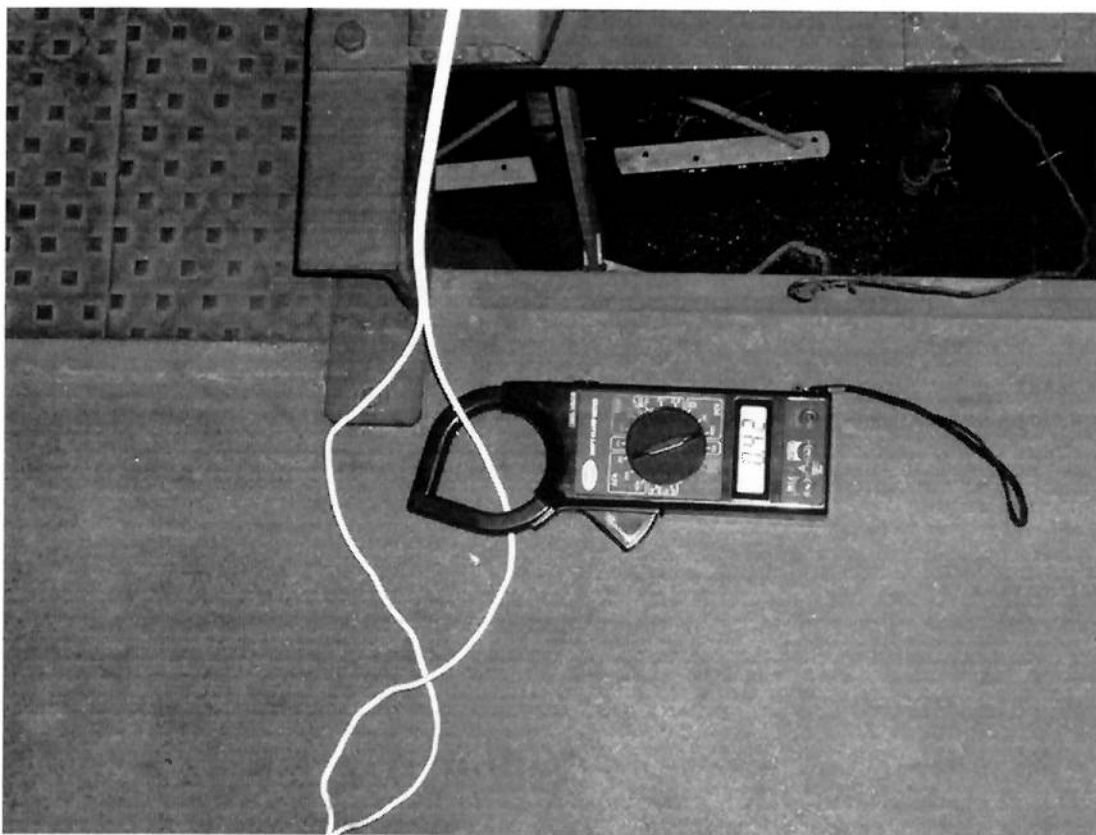


Figura 18 - Foto do aparelho de medir corrente



Figura 19 - Foto do aparelho de medir temperatura

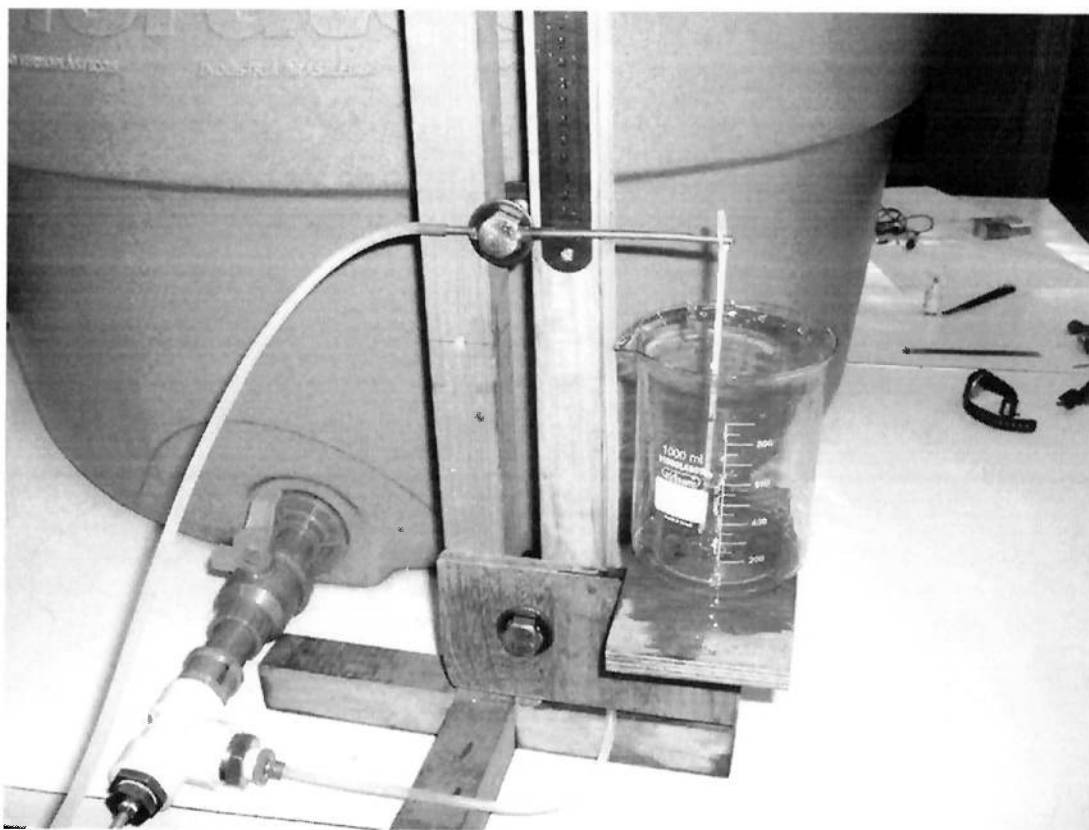


Figura 20 - Becker e saída da caixa d'água

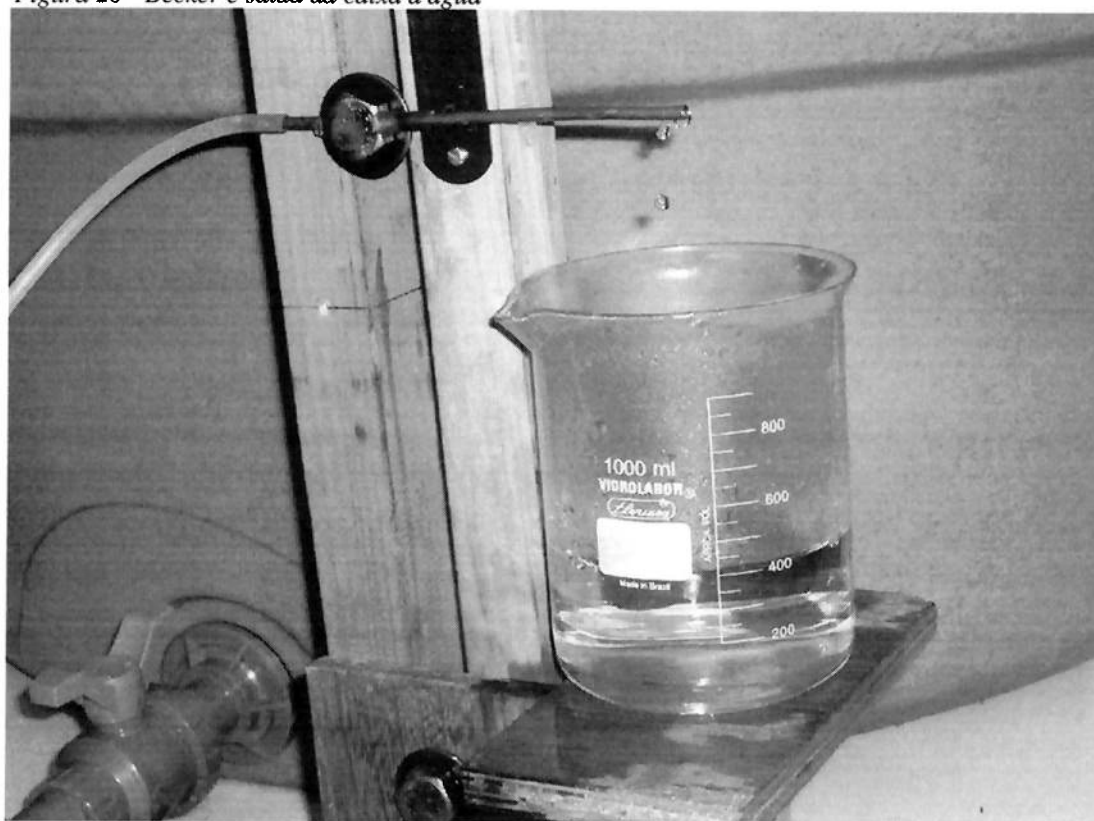


Figura 21 - Fluido pingando sobre o becker

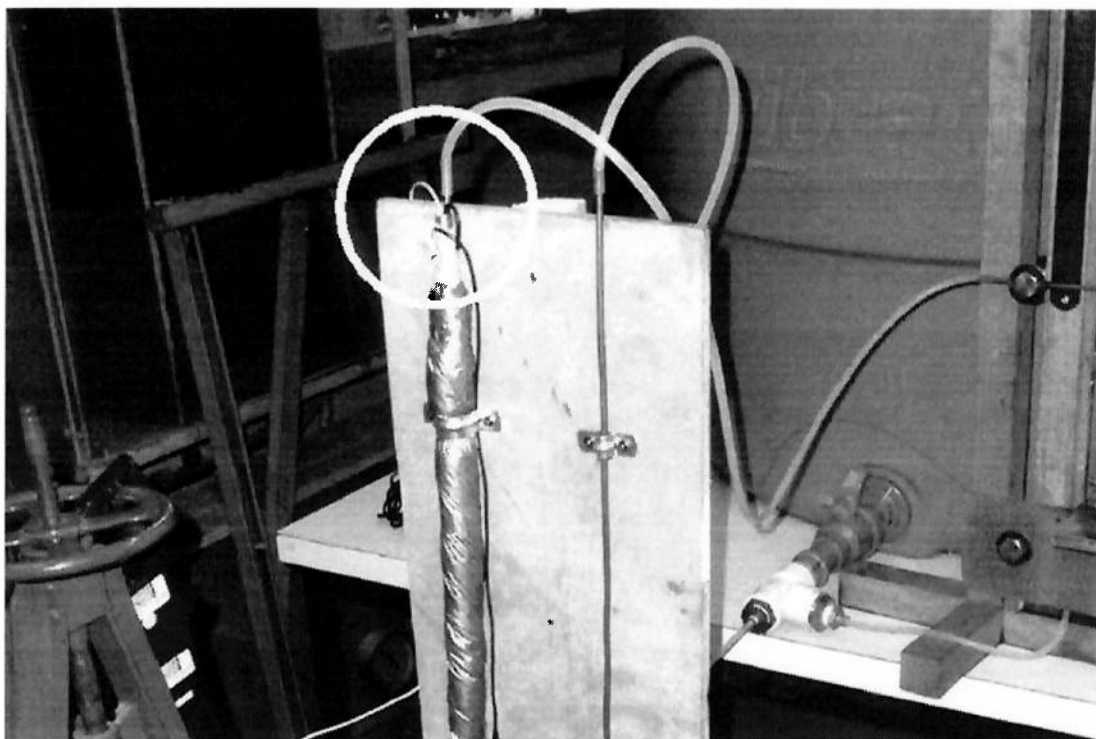


Figura 22 - Termopar medindo a temperatura de parede do tubo de cobre

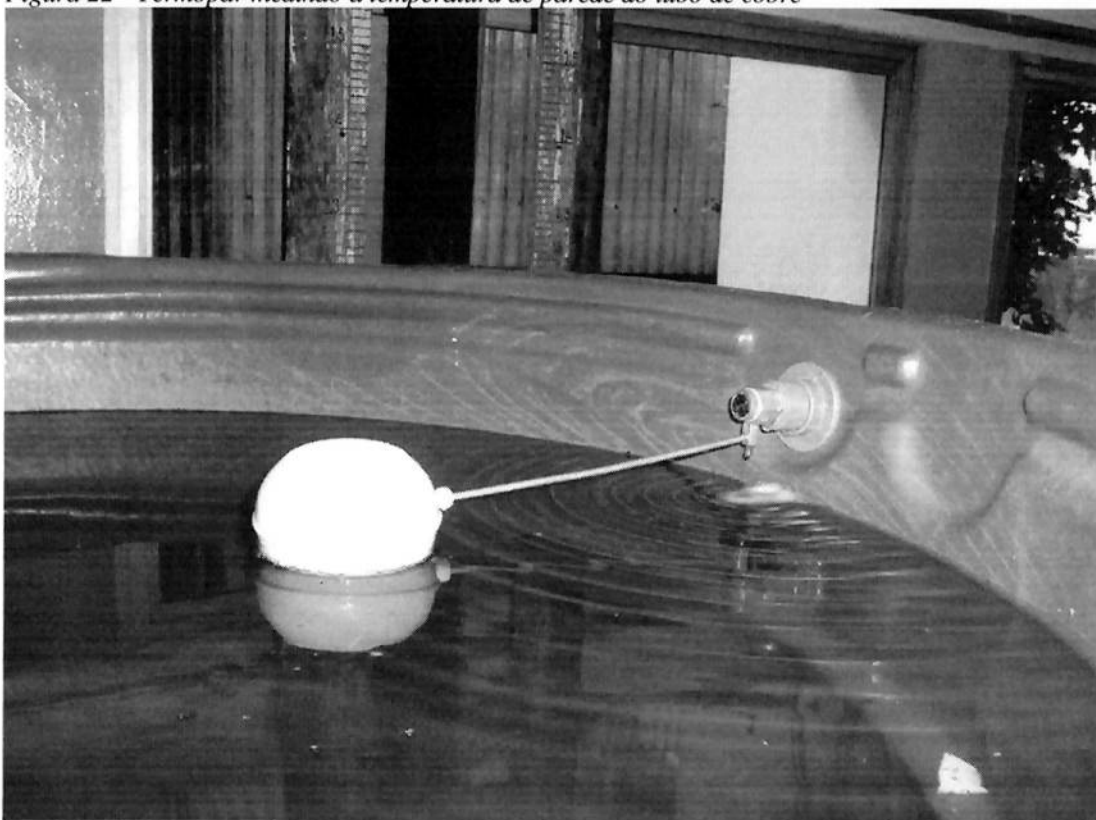


Figura 23 - Bóia d'água

11 - ANEXO 4 : MATERIAIS USADOS NO EQUIPAMENTO

- caixa d'água de 500 litros
- transformador 1050 W 110V/220V
- 2 mesas com 90 cm de altura
- 2 metros de tubo de cobre de 3/16" com diâmetro interno de 3 [mm] (R\$2,10/m);
- 4 metros de tubo de polietileno de 1/4" com diâmetro interno de 4 [mm] (R\$0.72/m);
- Bucha de redução em latão 3/4" rosca macho por 1/8" rosca fêmea (R\$3.15/un);
- Espigão macho 1/8" rosca macho por 1/8" mangueira(R\$1.00/un);
- 30 cm de manta de fibra de cerâmica de 64 Kg/m³ para até 1260°C com 60 cm de largura(R\$33/m);
- 4 metros de resistência com revestimento de silicone de 25W/m em 220V (R\$7.50/m)
- 4 Braçadeiras de 1"
- 4 Braçadeiras de 3/8"
- 20 parafusos autoroscante para compensado com cabeça philips de 16 mm de comprimento;
- Tábua de compensado para suporte, dimensões 200 x 30 x 1 [cm];

12 - ANEXO 5: LISTAGEM DO ARQUIVO DE DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DA SIMULAÇÃO 1

```

#####

// DESCRIÇÃO DO CIRCUITO / INPUT DO PROGRAMA

#####

// Propriedades do circuito
fluido = 1;      // 1-água, 2-R12, 3-óleo, 4-mercúrio, 5-amônia, 6-ar
h = 0.004;      // passo de x em [m]
T_amb = kelvin(20); // Temperatura ambiente
p_amb = 1.01E5; // Pressão ambiente
T_sup = T_amb+6; // Temperatura na superfície do TC
Diam= 0.01;     // Diâmetro dos dutos em [m]
g = 9.781;     // [m/s^2] Gravidade local

// ESTIMATIVAS E AMORTECIMENTOS E ERROS
u_est = 0.1; // [m/s] Estimativa educada da velocidade média do fluido
temp_error = 0.1; // erro : diferença entre a temp. em l e m
press_error = 1; // erro : diferença entre a temp. em l e m
amort1 = 0.05; // Amortecimento da convergência de u
amort2 = 0.5; // Amortecimento da convergência de T

// DOCUMENTAÇÃO DA DESCRIÇÃO DO CIRCUITO
// elemento -
// stepnum - número de passos do mesmo segmento
// x - comprimento em [m]
// T - temperatura do fluido em [K]
// p - pressão do fluido em [Pa]
// angle - orient.do fluxo do fluido em rad.-orig.vort. p/ baixo
// D - diâmetro em [m]
// heattype - tipo de TC com a parede, 0=fluxo-const 1=isoterm
// heatvalue - [W/m^2] fluxo de calor ou [K] temp da parede

// CIRCUITO
//
//      /--2-\
//      |      |
//      |      |
//      |      |
//      |      |
//      \--4-/
//
// Elemento 1 : Tressifão
elemento = 1;
stepnum(elemento) = 1;
element_knots = calc_range (elemento-1, elemento);
name(element_knots) = "tsyphon";
T(element_knots) = T_amb;
p(element_knots) = p_amb;
u(element_knots) = u_est;
D(element_knots) = Diam;

// Elemento 2 : Trecho 1 - Aquecimento A Fluxo-Constante
elemento = 2;
duct_length = 2.2;
stepnum(elemento)= round(duct_length/h);
element_knots = calc_range (elemento-1,elemento);

```

```

name(element_knots) = "duct";
x(element_knots) = h * element_knots;
T(element_knots) = T_amb;
p(element_knots) = p_amb;
u(element_knots) = u_est;
angle(element_knots) = rad(180);
D(element_knots) = Diam;
heattype(element_knots) = 0;
heatvalue(element_knots) = 500;

// Elemento 3: Trecho 2 - Restriç o a Temp. Constante
elemento = 3;
duct_length = 2.2;
stepnum(elemento) = round(duct_length/h);
element_knots = calc_range (elemento-1,elemento);
name(element_knots) = "duct";
x(element_knots) = h * element_knots;
T(element_knots) = T_amb;
p(element_knots) = p_amb;
u(element_knots) = u_est;
angle(element_knots) = rad(270);
D(element_knots) = Diam;
heattype(element_knots) = 1;
heatvalue(element_knots) = T_sup;

// Elemento 4 : Trecho 3 - Escoamento Adiabático
elemento = 4;
duct_length = 2.2;
stepnum(elemento) = round(duct_length/h);
element_knots = calc_range (elemento-1,elemento);
name(element_knots) = "duct";
x(element_knots) = h * element_knots;
T(element_knots) = T_amb;
p(element_knots) = p_amb;
u(element_knots) = u_est;
angle(element_knots) = 0;
D(element_knots) = Diam;
heattype(element_knots) = 0;
heatvalue(element_knots) = 0;

// Elemento 5 : Trecho 4 - Escoamento Adiabático
elemento = 5;
duct_length = 2.2;
stepnum(elemento) = round(duct_length/h);
element_knots = calc_range (elemento-1,elemento);
name(element_knots) = "duct";
x(element_knots) = h * element_knots;
T(element_knots) = T_amb;
p(element_knots) = p_amb;
u(element_knots) = u_est;
angle(element_knots) = rad(90);
D(element_knots) = Diam;
heattype(element_knots) = 0;
heatvalue(element_knots) = 0;

// Elemento 6 : Loop
elemento = 6;
stepnum(elemento) = 1;
element_knots = calc_range (elemento-1,elemento);
name(element_knots) = "loop";

```


13 - ANEXO 6: LISTAGEM DO ARQUIVO DE DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DA SIMULAÇÃO 2

```

////////////////////
// DESCRIÇÃO DO CIRCUITO / INPUT DO PROGRAMA
// Arquivo : input.sci
////////////////////

// Function rad
// converts grad into radians
function y = rad (angle)
    y = 0.0174533 * angle;
    //y = angle * %pi / 180;
endfunction

function y = calc_range (y1,y2)

    if y1 == 0,
        y = 1:stepnum(y2);
    else
        y = sum(stepnum(1:y1))+1:sum(stepnum(1:y2));
    end
endfunction

// Propriedades do circuito
fluido = 1; // 1-água, 2-R12, 3-óleo, 4-mercúrio, 5-amônia, 6-ar
h = 0.01; // passo de x em [m]
T_amb = 273+26; // Temperatura ambiente
p_amb = 1.01E5; // Pressão ambiente
D_Cu = 0.003; // Diâmetro do duto de Cobre [m]
D_Pl = D_Cu; // Diâmetro do duto de Plástico [m]
//D_Pl = 0.004; // Diâmetro do duto de Plástico [m]
g = 9.781; // [m/s^2] Gravidade local

// ESTIMATIVAS E AMORTECIMENTOS E ERROS
u_est = 0.5; // [m/s] Estimativa educada da velocidade média do fluido
press_error = 1; // erro : diferença entre a temp. em l e m
amort1 = 0.01; // Amortecimento da convergência de u

// DOCUMENTAÇÃO DA DESCRIÇÃO DO CIRCUITO
// elemento -
// stepnum - número de passes do m'esimo segmento
// x - comprimento em [m]
// T - temperatura do fluido em [K]
// p - pressão do fluido em [Pa]
// angle - orient.do fluxo do fluido em rad.-orig.vert. p/ baixo
// D - diâmetro em [m]
// heattype - tipo de TC com a parede, 0=fluxo-const 1=isoterm
// heatvalue - [W/m^2] fluxo de calor ou [K] Temp da parede

// CIRCUITO
//
// TQ --A //1-
// 1 1
// 1 3
// 1 1
// A-2-//
//

```

```

// Elemento 1 : Tank - Tanque Nível Constante
elemento = 1;
stepnum(elemento) = 1;
range = calc_range (elemento-1,elemento);
name(range) = "tank";
x(range) = h;
T(range) = T_amb;
p(range) = p_amb+ 1000 * g * 0.125; // p + rho g h
u(range) = u_est;
D(range) = D_P1;

// Elemento 2 : Trecho 1 - Escoamento Adiabático
elemento = 2;
stepnum(elemento)= 200;
range = calc_range (elemento-1,elemento);
name(range) = "duct";
x(range) = h * range;
T(range) = T_amb;
p(range) = p_amb;
u(range) = u_est;
angle(range) = 0;
D(range) = D_P1;
heattype(range) = 0;
heatvalue(range) = 0;

// Elemento 3 : Trecho 2 - Escoamento Adiabático
elemento = 3;
stepnum(elemento) = 10;
range = calc_range (elemento-1,elemento);
name(range) = "duct";
x(range) = h * range;
T(range) = T_amb;
p(range) = p_amb;
u(range) = u_est;
angle(range) = rad(90);
D(range) = D_P1;
heattype(range) = 0;
heatvalue(range)= 0;

// Elemento 4: Trecho 3 - Aquecimento A Fluxo-Constante
elemento = 4;
stepnum(elemento) = 200;
range = calc_range (elemento-1,elemento);
name(range) = "duct";
x(range) = h * range;
T(range) = T_amb;
p(range) = p_amb;
u(range) = u_est;
angle(range) = rad(180);
D(range) = D_Cu;
heattype(range) = 0;
// heatvalue(range)= 0; // [W/m²]
heatvalue(range)= 5000; // [W/m²]

// Elemento 5: Trecho 4 - Escoamento Adiabático
elemento = 5;
stepnum(elemento) = 10;
range = calc_range (elemento-1,elemento);

```

```

name(range) = "duct";
x(range) = h * range;
T(range) = T_amb;
p(range) = p_amb;
u(range) = u_est;
angle(range) = rad(90);
D(range) = D_Pl;
heattype(range) = 0;
heatvalue(range) = 0;

// Elemento 7: Sink = Pressão Atmosférica
elemento = 7;
stepnum(elemento) = 1;
range = calc_range (elemento-1,elemento);
name(range) = "sink";
p(range) = p_amb; // Condição de Contorno da Saída
p(range+1) = p_amb; // Condição de Contorno da Saída
u(range) = u_est;

```

14 - ANEXO 7: LISTAGEM DO PROCEDIMENTO PRINCIPAL DA SIMULAÇÃO 2

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// Resolve um Escoamento em um Circuito Simples Aberto
// ou Fechado com Termosifão
//
// CAF - Circuito Aberto e Fechado
//
// IOS - Input Orientado a Segmentos, ie, cada segmento
// armazena todas as propriedades e variáveis do elemento
// (P,T,u) que lhe corresponde.
//
// Pode resolver um ramo (circuito aberto) ou uma malha
// (circuito fechado) com dutos de qualquer geometria e
// disposição (ângulo, comprimento, diâmetro) com duas
// condições de troca de calor, temperatura constante,
// fluxo de calor constante.
//
// Versão : CAF-IOS-20040423
// Autor : Fernando.Fraja@poli.usp.br
// Arquivo : Main.sci
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

// Inicialização de funções auxiliares
exec('auxiliary_functions.sci');
exec('ca_plot_utilities.sci');

// Inicialização de uma tabela de propriedades físicas
exec('tabela_de_propriedades_da_agua.sci');

outputfile=file('open','results.csv','unknown');

fprintf(outputfile,"Simulacao do circuito do TF\n");

//V = 220; R = 469; potencia = V^2/R; // V em Volt, R em Ohm e pot em W
V = 212; A_med = 0.44; potencia = V*A_med;
T_amb = kelvin(17);

for i=0:10E-3:250E-3,
    H = i; exec('input.sci');
    solve_circuit (name,x,T,p,u,angle,D,heattype,heatvalue);
end

file('close',outputfile)

```

15 - ANEXO 8: LISTAGEM DOS PROCEDIMENTOS DE PLOTAGEM DA SIMULAÇÃO 2

```
// Arquivo : ca_plot_utilities.sci

function y = ypos(a,b)
    y = a * max(b) + (1-a) * min(b)
    //y = min(b) + a * (max(b)-min(b))
endfunction

function ca_plot_properties()

    xpos = h*k/2;

    // Plota a Temperatura
    xbaso(0);
    subplot(221);
    [ a,b ] = size(x);
    plot2d(x(1:b),T(1:b));
    xgrid(3)
    xtitle('Temperatura ao longo Comprimento do duto','[m]','[K]');
    xstring(xpos, ypos(2/4,T), "Fluido = "+nome(fluido) );
    // xstring(xpos, ypos(1/4,T), ["u =", string(u(1)), "[m/s]"]);
    // xstring(xpos, ypos(0/4,T), "amort1 = "+string(amort1));

    // Plota a Velocidade
    subplot(222);
    plot2d(x(1:b),u(1:b));
    xgrid(3)
    xtitle('Velocidade ao longo Comprimento do duto','[m]','[m/s]');

    printf("Re = %f\n", Re( u(k), D(k-1), ni(T(k) ) ))
    reynolds = "Re = "+string( Re( u(k), D(k-1), ni(T(k) ) )) ;
    //vazao = "Qf = "+string( u(k) * %pi * D(k)^2 /4)+"[m^3/s]";
    vazao = "Qf = "+string( 1E6 * u(k) * %pi * D(k-1)^2 /4)+"[ml/s]";
    xstring(xpos, ypos(1/4,u), ["uf =", string(u(k)), "[m/s]"]);
    xstring(xpos, ypos(2/4,u), reynolds );
    xstring(xpos, ypos(3/4,u), vazao);

    // Plota a Pressão
    subplot(223);
    plot2d(x(1:b),p(1:b));
    xgrid(3)
    xtitle('Pressão ao longo Comprimento do duto','[m]','[Pa]');
    xstring(xpos, ypos(3/4,p), ["dp=", string(p(k)-p(1)), "[Pa] "]);
    xstring(xpos, ypos(2/4,p), ["p(saida)=", string(p(k)), "[Pa] "]);

    // Detalhe da Pressão em um duto
    //a = stepnum(1);
    //b = a+stepnum(2);
    //subplot(224); plot2d(x(a:b),p(a:b)); xgrid(3)
    //xtitle('Detalhe : Pressão em um trecho horizontal do
    tubo', '[m]','[Pa]')
```

```

// Imprime os gráficos em um arquivo de
// "Foto" tipo ppm
xs2ppm(0,"grandezas_fisicas"+string(i)+".ppm",1)
endfunction

function ca_plot_properties_history()

// Plota os valores de u ao longo de várias iterações
[a,b] = size(u_hist);

xbasc(0);
subplot(221); plot2d(1:a, u_hist); xgrid();
xlabel('Velocidade u(1) ao longo de n iterações','n','u(inicio)');
xstring(4,u_hist(3),"amort1 =" + string(amort1));
//xstring(4,u_hist(3)-0.01,"amort2 =" + string(amort2));

subplot(222); plot2d(1:a, dp_hist); xgrid();
xlabel('Diferença de pressão dp ao longo de n iterações','n','p(fim)-p(inicio)');

subplot(223); plot2d(1:a, dT_hist); xgrid();
xlabel('Diferença de temperatura dT ao longo de n iterações','n','T(fim)-T(inicio)');

subplot(224); plot2d(1:a, amort1_hist); xgrid();
xlabel('Coeficiente de amortecimento u = u_old + amort * du','n','amort1');

xs2ppm(0,"history_of_properties.ppm",1);
endfunction

```

16 - ANEXO 9: LISTAGEM DOS PROCEDIMENTOS AUXILIARES DA SIMULAÇÃO 2

```
// MAIN PROCEDURE
```

```
// Arquivo :auxiliary_functions.sci
```

```
function solve_circuit(name,x,T,p,u,angle,D,heattype,heatvalue)
```

```
    i=1; //Número de iterações
```

```
    k=1; //Número do nó
```

```
    run=1; //Flag para continuar a iteragir
```

```
    loop=0; //Flag para indicar circuito com loop
```

```
    while 1,
```

```
        select name(k)
```

```
        case "tank",
```

```
            [a, b, c] = solve_entrada(k);
```

```
            u(k+1)=a; p(k+1)=b; T(k+1)=c
```

```
        case "duct",
```

```
            [a, b, c ] = solve_duct(k);
```

```
            printf("case duct : valor de u(k+1) = %f\n", a);
```

```
            u(k+1)=a, p(k+1)=b, T(k+1)=c;
```

```
        case "curve",
```

```
            [a, b, c ] = solve_curve(k);
```

```
            u(k+1)=a, p(k+1), T(k+1)=c;
```

```
        //case "tee",
```

```
        //      [p,T,u] = solve_tee(k);
```

```
        case "sink",
```

```
            [a,c,d,e] = solve_sink(k);
```

```
            u(k+1)=a, T(k+1)=c, u(1)=d, run=e;
```

```
            printf(".");
```

```
            // Plot Properties History
```

```
            if run == 0 then
```

```
                printf("%f,%f,%f\n", ...
```

```
                H, celsius(max(T)), 1E6*A(D(k-1))*u(k-1));
```

```
                //fprintf(outputfile,...
```

```
                //      "%f,%f,%f\n", H, max(T), 1E6*A(D(k-1))
```

```
*u(k-1));
```

```
            return;
```

```
        end;
```

```
        // Reinicia o circuito
```

```
        k = 0;
```

```
        // Conta o numero de iterações feitas
```

```
        i = i + 1;
```

```
    case "loop",
```

```
        loop = k;
```

```

        // Reinicia o circuito
        k = 1;
        // Conta o numero de iterações feitas
        i = i + 1;

    case "tsyphon",
        [a, b, c, f] = solve_tsyphon(k);
        u(k+1)=a, p(k+1)=b, T(k+1)=c, run=f;

        // Anota valores notáveis para observar a
convergência

        u_hist(i) = u(1);
        dp_hist(i) = p(m)-p(1);
        dT_hist(i) = T(m)-T(1);
        amort1_hist(i) = amort1;
        cf_plot_properties()

        // Plot Properties History
        if run == 0 then
            cf_plot_properties_history();
            return;
        end

    end // end select

    k = k + 1
end //end while

endfunction

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// OBJECTS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function solve_loop(k)

endfunction

function solve_tank(k)

endfunction

function [a,b,c] = solve_entrada(k)

    //Coeficiente de Entrada
    C = 0.5;

    // Velocity
    a = u(k);

    // Pressure
    b = p(k) - C * 0.5 * density(T(k)) * u(k)^2;
    //p = P(k);

    // Temperature
    c = T(k);
endfunction

```



```

C = [
0.50 0.71
0.75 0.33
1.00 0.22
1.50 0.15
2.00 0.13
2.50 0.12];
y = interpolacao(R_D,C);
endfunction

function y = K (theta)
K = [
0 0.00; 20 0.31;
30 0.45; 45 0.60;
60 0.78; 75 0.90;
90 1.00; 110 1.13;
130 1.20; 150 1.28;
180 1.40];
y = interpolacao(theta,K);
endfunction

a = next_u_value(k);

b = K(theta) * C(R_D) * 0.5 * density(k) * u(k)^2;

c = next_T_value(k);

endfunction

function [p,T,u] = solve_tee(k)

endfunction

// f = Run
function [a, b, c, f] = solve_tsyphon(k)

    calcula=[1,1];

    // Velocity
    if loop == 0 then,
        a = u(1);
    else
        if abs(p(k)-p(1)) > press_error then,
            u_incr = ( p(k)-p(1) ) * amort1 / ...
                (density(T(1)) * u(1) );
            a = u(1) + u_incr;
        else
            calcula(1) = 0;
        end
    end

    // Pressure
    // Não é calculado, e sempre tido como zero
    b = 0;

    // Temperature
    if loop == 0 then,
        c = T(1);
    else

```

```

        if abs(T(k)-T(1)) > temp_error then,
            c = amort2 * T(1) + (1-amort2) * T(k);
        else
            calcular(2) = 0;
        end
    end

    // Run?
    // Realiza um "E" entre as duas condições de parada
    f = sum(calcular);

endfunction

function [a,c,d,e] = solve_sink(k)

    [a,b,c] = solve_saida(k)

    // Plotar as diferenças de pressão nos 3 últimos nós
    //printf("name(%d)= %s p(%d)= %f\n", ...
    //      k-1, name(k-1), k-1, p(k-1) );
    //printf("name(%d)= %s p(%d)= %f\n", k, name(k), k, p(k) );
    //printf("p(%d)= %f\n", k+1, p(k+1) );

    //Velocity
    //a = u(k)

    // Pressure
    // Não é calculado,
    // é imposto pela condição de contorno

    //Temperature
    //c = T(k)

    // New Beginning Velocity : u(1), and
    // run flag

    if abs( b-p(k+1) ) > press_error then,
        u_incr = (b-p(k+1)) * amort1 / (density(T(k)) * u(k));
        d = u(1) + u_incr;
        e = 1;
    else
        e = 0; //Para de iteragir
    end
endfunction

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// Procedures
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function y = next_u_value(k);
    //Fluxo mássico no início do duto
    M= A(D(1)) * density(T(1)) * u(1);
    printf("valor de u(1) = %f\n", u(1) );
    printf("valor de D(1) = %f\n", D(1) );
    //Velocidade Média na seção k
    y= M / ( A(D(k)) * density(T(k)) );
    printf ("next_u_value u(%d)= %f, M = %f\n", k, y, M);
endfunction

```

```

// Esta função contém um Bug de severidade baixa
// o cálculo da derivada da velocidade é feito
// de forma muito ruim, ie.,  $du = u(k+1) - u(k)$ .
function y = next_p_value(k);

    darcy = 64 / Re( u(k), D(k), ni(T(k)) );
    p1 = g * cos(angle(k)) * h;
    p2 = - u(k) * (u(k+1)-u(k));
    p3 = - darcy * u(k)^2 * h / (2*D(k));
    y = p(k) + density(T(k)) * [p1 + p2 + p3];
endfunction

function y = next_T_value(k);

    if heattype(k) == 0 then, // fluxo de calor constante
        y = T(k-1) + heatvalue(k) * P(D(k)) * h / ...
            (A(D(k)) * density(T(k-1)) * u(k) * cp(T(k-1)));

    else // temperatura constante
        hc= 3.66 * kc(T(k-1)) / D(k);
        y = T(k-1) + hc * P(D(k)) * h * (heatvalue(k)-T(k-1)) / ...
            (A(D(k)) * density(T(k-1)) * u(k) * cp(T(k-1)));
    end
endfunction

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// AUXILIARY FUNCTIONS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function y = calc_range (y1,y2)

    if y1 == 0,
        y = 1:stepnum(y2);
    else
        y = sum(stepnum(1:y1))+1:sum(stepnum(1:y2))
    end
endfunction

// DARCY
// Calcula o fator de Atrito de Darcy
// [adimensional] Coeficiente de atrito interno do tubo
function y = f(Re)
    y = abs(64/Re);
endfunction

// REYNOLDS
// Calcula valor do número de Reynolds
function y = Re(v,D,ni)
    y = abs(v*D/ni);
endfunction

// P
// INPUT : Diâmetro em [m]
// OUTPUT: Perimetria em [m]
function y = P(D)
    y = %pi * D;
endfunction

```

```

// A
// INPUT : Diâmetro em [m]
// OUTPUT: Área da Secção Transversal em [m^2]
function y = A(D)
    //y = 0.25*pi*D^2;
    y = 0.78539816 * D * D;
endfunction

```

```

function y = nome (fluido)

    select fluido
        case 1, y = "Água"
        case 2, y = "Freon R12"
        case 3, y = "Óleo Mineral"
        case 4, y = "Mercúrio"
        case 5, y = "Amônia"
        case 6, y = "Ar"
        else y = "prop. error"
    end
endfunction

```

```

// //////////////////////////////////
// UNITS CONVERSION
// //////////////////////////////////

```

```

// Converts temperature
// from celsius to kelvin
function y=kelvin(x)
    y = x + 273.15;
endfunction

```

```

function y=celsius(x)
    y = x - 273.15;
endfunction

```

```

function y = rad (angle)
    y = 0.0174533 * angle;
    //y = angle * 3pi / 180;
endfunction

```

17 - ANEXO 10: LISTAGEM DO ARQUIVO DE PROPRIEDADES DA ÁGUA

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// FUNÇÕES DE PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA
// Version : 20040324
// Arquivo : tabela_de_propriedades_da_agua.sci
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

// Calcula a interpolacao linear de uma tabela
function y = interpolacao(T,n)
    // searches for near density
    k=1;
    while n(k,1) < T then k = k +1; end

    //error condition : out of boundary
    //if k==1 then r=-1; end

    //normal answer condition
    y = n(k,2) - (n(k,2)-n(k-1,2)) * (n(k,1)-T)/(n(k,1)-n(k-1,1));
endfunction

// cp
// INPUT : temperatura em [K]
// OUTPUT : calor especifico em [J/kg.K]
function [y]=cp(T)

n = [
273.15  4217; 275      4211; 280      4198; 285      4189;
290     4184; 295      4181; 300      4179; 305      4178;
310     4178; 315      4179; 320      4180; 325      4182;
330     4184; 335      4186; 340      4188; 345      4191;
350     4195; 355      4199; 360      4203; 365      4209;
370     4214; 373.15  4217; 375      4220; 380      4226;
385     4232; 390      4239; 400      4256; 410      4278;
420     4302; 430      4331; 440      4360; 450      4400;
460     4440; 470      4480; 480      4530; 490      4590;
500     4660; 510      4740; 520      4840; 530      4950;
540     5080; 550      5240; 560      5430; 570      5680;
580     6000; 590      6410; 600      7000; 610      7850;
620     9350; 625      10600;630      12600;635      16400;
640     26000;645      90000]

    y = interpolacao(T,n);

endfunction

// kc
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Condutividade térmica em [W/m.K]
function [y]=kc(T)

n = [
273.15  569; 275      574; 280      582; 285      590;
290     598; 295      606; 300      613; 305      620;
310     628; 315      634; 320      640; 325      645;
330     650; 335      656; 340      660; 345      668;
350     668; 355      671; 360      674; 365      677;
370     679; 373.15  680; 375      681; 380      683;
385     685; 390      686; 400      688; 410      688;
420     688; 430      685; 440      682; 450      678;

```

```

460      673; 470      667; 480      660; 490      651;
500      642; 510      631; 520      621; 530      608;
540      594; 550      580; 560      563; 570      548;
580      528; 590      513; 600      497; 610      467;
620      444; 625      430; 630      412; 635      392;
640      367; 645      331; 647.3      238]

```

```

y = interpolacao(T,n)*1E-3;

```

```

endfunction

```

```

// ni
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Viscosidade cinemática em [m^2/s]
function [y]=ni(T)

```

```

n = [
273.15  1750;275      1652;280      1422;285      1225
290     1081;295      961; 300      858; 305      773
310     700; 315      637; 320      583; 325      535
330     497; 335      461; 340      429; 345      398
350     375; 355      353; 360      335; 365      318
370     301; 373.15    291; 375      286; 380      273
385     261; 390      251; 400      232; 410      215
420     201; 430      190; 440      180; 450      171
460     163; 470      157; 480      151; 490      147
500     142; 510      138; 520      134; 530      132
540     131; 550      128; 560      127; 570      127
580     126; 590      124; 600      125; 610      124
620     123; 625      124; 630      124; 635      124
640     122; 645      127;647.3      143]

```

```

y = interpolacao(T,n)*1E-9;

```

```

endfunction

```

```

// DENSITY
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Densidade em [kg/m^3]

```

```

function [y]=density(T)

```

```

n = [
273.15  1000.00; 275      1000.00; 280      1000.00; 285      1000.00;
290     999.001; 295      998.004; 300      997.009; 305      995.025;
310     993.049; 315      991.080; 320      989.120; 325      987.167;
330     984.252; 335      982.318; 340      979.432; 345      976.563;
350     973.710; 355      970.874; 360      967.118; 365      963.391;
370     960.615; 373.15    957.854; 375      956.938; 380      953.289;
385     949.668; 390      945.180; 400      937.207; 410      928.505;
420     919.118; 430      909.918; 440      900.901; 450      890.472;
460     879.507; 470      868.056; 480      856.898; 490      844.595;
500     831.255; 510      818.331; 520      803.859; 530      788.644;
540     772.798; 550      755.858; 560      738.007; 570      718.391;
580     697.837; 590      674.764; 600      648.929; 610      620.347;
620     586.510; 625      562.430; 630      538.793; 635      516.796;
640     481.928; 645      425.351;647.3      315.457]

```

```

y = interpolacao(T,n);

```

```

endfunction

```

18 - ANEXO 11: LISTAGEM DO ARQUIVO DE PROPRIEDADES DO AR

```

////////////////////
// FUNÇÕES DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO AR
// Version : 20040328
// Arquivo : tabela_de_propriedades_do_ar.sci
////////////////////

// Calcula a interpolacao linear de uma tabela
function y = interpolacao(T,n)
    // searches for near density
    k=1;
    while n(k,1) < T then k = k +1; end

    //error condition : out of boundary
    //if k==1 then r=-1; end

    //normal answer condition
    y = n(k,2) - (n(k,2)-n(k-1,2)) * (n(k,1)-T)/(n(k,1)-n(k-1,1));
endfunction

// cp
// INPUT : temperatura em [K]
// OUTPUT : calor especifico em [J/kg.K]
function [y]=cp(T)

n = [
100    1.032
150    1.012
200    1.007
250    1.006
300    1.007
350    1.009
400    1.014
450    1.021
500    1.030
550    1.040
600    1.051
650    1.063
700    1.075
750    1.087
800    1.099
850    1.110
900    1.121
950    1.131
1000   1.141
1100   1.159
1200   1.175
1300   1.189
1400   1.207
1500   1.230
1600   1.248
1700   1.267
1800   1.286
1900   1.307
2000   1.337
2100   1.372
2200   1.417
2300   1.478
2400   1.558

```



```

2500    1.665
3000    2.726]

```

```

y = interpolacao(T,n)*1E3;

```

```

endfunction

```

```

// kc
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Condutividade térmica em [W/m.K]
function [y]=kc(T)

```

```

n = [
100    9.3
150   13.8
200   18.1
250   22.3
300   26.3
350   30.0
400   33.8
450   37.3
500   40.7
550   43.9
600   46.9
650   49.7
700   52.4
750   54.9
800   57.3
850   59.6
900   62.0
950   64.3
1000  66.7
1100  71.5
1200  76.3
1300  82.0
1400  91.0
1500 100.0
1600 106.0
1700 113.0
1800 120.0
1900 128.0
2000 137.0
2100 147.0
2200 160.0
2300 175.0
2400 196.0
2500 222.0
3000 486.0]

```

```

y = interpolacao(T,n)*1E-3;

```

```

endfunction

```

```

// ni
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Viscosidade cinemática em [m²/s]
function [y]=ni(T)

```

```

n = [
100    2.00
150    4.43
200    7.59
250   11.44

```

```

300    15.89
350    20.92
400    26.41
450    32.39
500    38.79
550    45.57
600    52.69
650    60.21
700    68.10
750    76.37
800    84.93
850    93.80
900    102.90
950    112.20
1000   121.90
1100   141.80
1200   162.90
1300   185.10
1400   213.00
1500   240.00
1600   268.00
1700   298.00
1800   329.00
1900   362.00
2000   396.00
2100   431.00
2200   468.00
2300   506.00
2400   547.00
2500   589.00
3000   841.00]

```

```
y = interpolacao(T,n)*1E-6;
```

```
endfunction
```

```

// DENSITY
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Densidade em [kg/m^3]

```

```
function [y]=density(T)
```

```

n = [
100    3.5562
150    2.3364
200    1.7458
250    1.3947
300    1.1614
350    0.9950
400    0.8711
450    0.7740
500    0.6964
550    0.6329
600    0.5804
650    0.5356
700    0.4975
750    0.4643
800    0.4354
850    0.4097
900    0.3868
950    0.3666

```

```
1000    0.3482
1100    0.3166
1200    0.2902
1300    0.2679
1400    0.2488
1500    0.2322
1600    0.2177
1700    0.2049
1800    0.1935
1900    0.1833
2000    0.1741
2100    0.1658
2200    0.1582
2300    0.1513
2400    0.1448
2500    0.1389
3000    0.1135]
```

```
        y = interpolacao(T,n);
endfunction
```

19 - ANEXO 12: LISTAGEM DO ARQUIVO DE PROPRIEDADES DO ÓLEO MINERAL

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
// FUNÇÕES DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO ÓLEO
// Version : 20040331
// Arquivo : tabela_de_propriedades_do_oleo.cci
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

// Calcula a interpolação linear de uma tabela
function y = interpolacao(T,n)
    // searches for near density
    k=1;
    while n(k,1) < T then k = k +1; end

    //error condition : out of boundary
    //if k==1 then r=-1; end

    //normal answer condition
    y = n(k,2) - (n(k,2) - n(k-1,2)) * (n(k,1) - T) / (n(k,1) - n(k-1,1));
endfunction

// cp
// INPUT : temperatura em [K]
// OUTPUT : calor específico em [J/kg.K]
function [y]=cp(T)

n = [
273    1.796
280    1.827
290    1.868
300    1.909
310    1.951
320    1.993
330    2.035
340    2.076
350    2.118
360    2.161
370    2.206
380    2.250
390    2.294
400    2.337
410    2.381
420    2.427
430    2.471]

    y = interpolacao(T,n)*1E3;

endfunction

// kc
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Condutividade térmica em [W/m.K]
function [y]=kc(T)

n = [
273    147
280    144
290    145
300    145
310    145

```

```

320     143
330     141
340     139
350     138
360     138
370     137
380     136
390     135
400     134
410     133
420     133
430     132]

```

```

y = interpolacao(T,n)*1E-3;

```

```

endfunction

```

```

// ni
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Viscosidade cinemática em [m^2/s]
// NOTA : Estes valores, por variarem muito,
// exigem uma interpolação não-linear
function [y]=ni(T)

```

```

n = [
273     4280
280     2430
290     1120
300     550
310     288
320     161
330     96.6
340     61.7
350     41.7
360     29.7
370     22.0
380     16.9
390     13.3
400     10.6
410     8.52
420     6.94
430     5.83]

```

```

y = interpolacao(T,n)*1E-6;

```

```

endfunction

```

```

// DENSITY
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Densidade em [kg/m^3]

```

```

function [y]=density(T)

```

```

n = [
273     899.1
280     895.3
290     890.0
300     884.1
310     877.9
320     871.8
330     865.8

```

```
340      859.9
350      853.9
360      847.8
370      841.8
380      836.0
390      830.6
400      825.1
410      818.9
420      812.1
430      806.5]
```

```
        y = interpolacao(T,n);
endfunction
```

20 - ANEXO 13: LISTAGEM DO ARQUIVO DE PROPRIEDADES DO FREON (R12)

```

////////////////////////////////////
// FUNÇÕES DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO R12 (FREON)
// Version : 20040323
// Arquivo : tabela_de_propriedades_do_r12.sci
////////////////////////////////////

// Calcula a interpolacao linear de uma tabela
function y = interpolacao(T,n)
    // searches for near density
    k=1;
    while n(k,1) < T then k = k +1; end

    //error condition : out of boundary
    //if k==1 then r=-1; end

    //normal answer condition
    y = n(k,2) - (n(k,2)-n(k-1,2)) * (n(k,1)-T)/(n(k,1)-n(k-1,1));
endfunction

// cp
// INPUT : temperatura em [K]
// OUTPUT: calor especifico da agua em [J/kg.K]
function [y]=cp(T)
n = [
230      882; 240      892
250      904; 260      916
270      930; 280      945
290      961; 300      978
310      996; 320     1016 ]

    y = interpolacao(T,n);

endfunction

// k
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Condutividade termica da agua em [W/m.K]
function [y] = kc(T)
n = [
230      68;240      69
250      70;260      73
270      73;280      73
290      73;300      72
310      69;320      68]

    y = interpolacao(T,n)*1E-3;

endfunction

// ni
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Viscosidade cinetica da agua em [m^2/s]
function [y] = ni(T)
n = [
230      299; 240      257
250      241; 260      224
270      216; 280      206

```

```

290      198; 300      195
310      192; 320      190]

      y = interpolacao(T,n)*1E-9

endfunction

// DENSITY
// INPUT : Temperatura em [K]
// OUTPUT: Densidade em [kg/m^3]
function [y]=density(T)
n = [
230      1528.4; 240      1498.0
250      1469.5; 260      1439.0
270      1407.2; 280      1374.4
290      1340.5; 300      1305.8
310      1268.9; 320      1228.6]

      y=interpolacao(T,n)

endfunction

```


LISTA DE REFERÊNCIAS

- 1- PAL, A. et al., **Design and Performance Evaluation of a Compact Thermosyphon**, DARPA, 2002.
- 2- BEITELMAL, M.; PATEL, C., **Two-Phase Loop: Compact Thermosyphon**, Palo Alto HP Laboratories, 2002.
- 3- CONSUL, <http://www.consul.com.br/produtos.htm>, 2004.
- 4- ASHRAE, **ASHRAE Handbook - Refrigeration**, , 1998.
- 5- BEJAN, A., **Convection Heat Transfer**, John Wiley and Sons, EUA, 1984.
- 6- FOX, R. ; MCDONALD, A., **Introdução a Mecânica dos Fluidos**, LTC, São Paulo, Brasil, 1992.
- 7- INCROPERA, F. ; DEWITT, D., **Fundamental of Heat Transfer**, John Wiley and Sons, NY, EUA, 1980.
- 8- SMACNA, **Diagramas e Tabelas Auxiliares para Determinação de Perdas de Carga**, SMACNA, 1990.
- 9- SCILAB Consortium Group, **Introduction to Scilab**, INRIA, France, 2002.
- 10- KREYZIG, E., **Advanced Engineering Mathematics**, John Wiley & Sons, 1993.
- 11- JALURIA, Y., **Natural Convection - Heat and Mass Transfer**, Pergamon Press, Inglaterra, 1980.
- 12- CEBECI, T. ; BRANDSHAW. P., **Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer**, Springer-Verlag, NY, EUA, 1988.