

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE FORMATURA

SOFTWARE DIDÁTICO

PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE

TERMODINÂMICA DE ESCOAMENTOS COMPRESSÍVEIS

PROFESSOR ORIENTADOR: MARCOS PIMENTA

ALUNOS: ARIEL GOLDSTEIN DA SILVA

GERMANO GAVARRÃO DE FREITAS

4.3 Resolução dos casos particulares	24
4.4 Resolução do Escoamento Generalizado	25
5. Avaliação do Programa	30
5.1 Primeira Parte	30
5.2 Segunda Parte	33
6. Conclusões e Sugestões	45
Bibliografia	
Anexo A - Fluxograma e Diagrama	
Anexo B - Programa Fonte	

LISTA DE SÍMBOLOS

A: área da seção transversal de um duto

c_p : calor específico a pressão constante

c_v : calor específico a volume constante

E: energia total do volume de controle

k : constante do gás

M: número de Mach

m: massa

p: pressão

Q: energia térmica

r: massa específica

R: constante universal do gás

s: entropia

T: temperatura

t: tempo

W: trabalho

$\forall$: volume de controle

G: vazão mássica

1. INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um software didático na área de “Termodinâmica de Escoamentos Compressíveis”. Pretende-se com este software fornecer um auxílio aos alunos deste tópico através do desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo e apresentação.

1.2 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho será abordado o assunto “termodinâmica de escoamentos compressíveis”. O termo compressível implica em variações na massa específica através do campo de escoamento. Estas variações normalmente resultam em mudanças de pressão. A taxa de variação de pressão com respeito à massa específica é, portanto, um parâmetro importante na análise do escoamento compressível e como será explicitado posteriormente, também está diretamente relacionada com a propagação de perturbações no meio, isto é, a velocidade do som.

O relatório que começa a ser descrito inicia-se com uma introdução ao programa, seguido por uma fundamentação teórica dos assuntos a serem tratados, da estrutura global do programa - fornecendo alguns subsídios para a compreensão de seu funcionamento (utilização, capacidades e limitações), análise do funcionamento do programa (através da resolução de alguns casos) finalmente, comentários e conclusões.

2. CONCEITOS BÁSICOS

2.1 EQUACIONAMENTO

Antes de iniciar a modelagem e equacionamento de problemas, deve ser explicitada a principal hipótese assumida na resolução dos problemas: a de escoamento unidimensional. As demais hipóteses assumidas serão fornecidas para os casos específicos.

Não é intenção do presente trabalho apresentar demonstrações e deduções da formulação apresentada. Caso seja necessário para melhor compreensão de algum tópico, sugere-se a leitura da bibliografia utilizada. Todas as equações e relações aqui apresentadas são oriundas das equações básicas de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

- Conservação de massa:

Sendo,

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \dot{m} = 0 \quad \text{e} \quad \text{Eq. 1}$$

$$m = \int_V \rho dV \quad \text{Eq. 2}$$

temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

- Conservação da energia:

$$dE = \delta Q + \delta W \quad \text{Eq. 4}$$

- Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\bar{u}) = \sum \bar{F} \quad \text{e} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\bar{u} \times \bar{r}) = \sum \bar{F} \times \bar{r} \quad \text{Eq. 6}$$

2.2 VELOCIDADE DO SOM

Supondo uma onda plana se propagando da esquerda para direita com velocidade constante a em um dado meio:

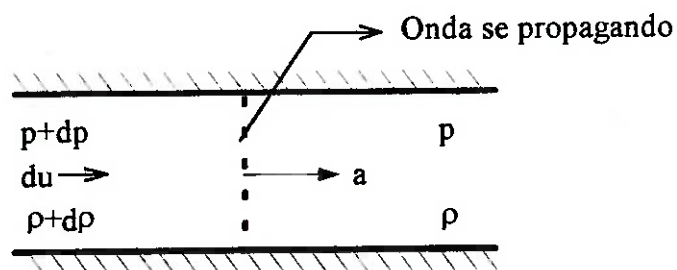


Figura 1 - Esquema ilustrativo

Utilizando-se as equações de conservação podemos deduzir:

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad \text{Eq. 7}$$

e sabendo-se que para um gás perfeito $p = \rho R T$, temos:

$$a = \sqrt{k R T}, \text{ onde} \quad \text{Eq. 8}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{e} \quad \text{Eq. 9}$$

$$R = c_p - c_v \quad \text{Eq. 10}$$

2.3 NÚMERO DE MACH

Define-se o número de Mach M como sendo a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade do som no escoamento:

$$M = \frac{u}{a} \quad \text{Eq. 11}$$

2.4 CONDIÇÕES DE ENTRADA E SAÍDA

Neste trabalho, a resolução dos problemas será realizada baseando-se em um volume de controle $\forall$ adotado e ilustrado em cada caso. O índice "1" refere-se às condições na entrada do volume e consequentemente o índice "2" refere-se às condições de saída.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DO ESCOAMENTO

Com base no diagrama a ser apresentado na Figura 2, chamado de "elipse do regime permanente", serão classificados os escoamentos:

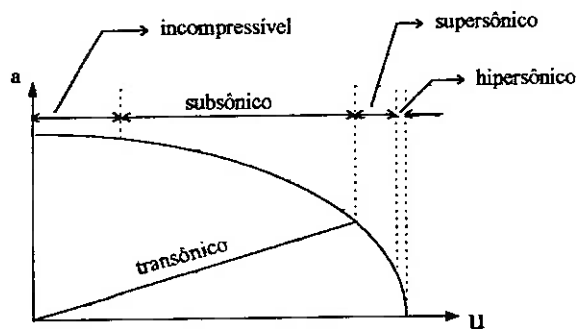


Figura 2 - Elipse do Regime Permanente

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TÓPICOS

O estudo de escoamentos compressíveis é um assunto vasto englobando vários fenômenos independentes. Para simplificar e organizar o desenvolvimento e a utilização do software, o estudo principal foi dividido em vários temas. Cada um destes temas é então estudado e implementado.

Utilizando a abordagem encontrada na literatura citada, dividiu-se o assunto principal em:

- Escoamento com mudança de área;
- Choques normais;
- Escoamento de Fanno e
- Escoamento de Rayleigh.

A seguir encontram-se os temas supracitados com suas respectivas introduções teóricas e equacionamento.

3.2 ESCOAMENTO COM MUDANÇA DE ÁREA

3.2.1 HIPÓTESES ASSUMIDAS :

- _ Regime Permanente;
- _ Escoamento Unidimensional;
- _ Sem Trabalho;
- _ Isoentrópico;

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{M_1}{M_2} \left[\frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_2^2}{1 + \frac{(k-1)}{2} M_1^2} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} e^{\frac{\Delta s}{R}} \quad \text{Eq. 14}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left[\frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_1^2}{1 + \frac{(k-1)}{2} M_2^2} \right]^{\frac{k}{k-1}} e^{\frac{-\Delta s}{R}} \quad \text{Eq. 15}$$

Analisando estas relações pode-se apresentar a seguinte tabela de conclusões:

	Escoamento	
	Subsônico	Supersônico
A	↘	↗
p	↘	↘
ρ	↘	↘
V	↗	↗

Tabela 1 - Tabela de conclusões

3.3 CHOQUES NORMAIS

3.3.1 HIPÓTESES ASSUMIDAS :

- _ Regime Permanente;
- _ Escoamento Unidimensional;
- _ Sem Trabalho;
- _ Adiabático ;
- _ Despreza-se a energia potencial;
- _ Zona de extensão do choque desprezível;
- _ Gás Perfeito.

Neste tema abordou-se as mudanças de características e propriedades de um escoamento ao atravessar uma onda de choque normal estacionária. Este fenômeno consiste basicamente em um processo de compressão do escoamento ao atravessar uma frente de onda estacionária perpendicular ao sentido do escoamento.

Para realizar esta análise tomaremos como volume de controle um trecho infinitesimal de duto aonde encontra-se presente uma onda de choque. Será considerado que a frente de onda possui dimensões desprezíveis, e que no volume de controle adotado não há variação de área, energia potencial e influência de forças de cisalhamento.

Resolvendo as equações de conservação de massa e energia deduz-se as seguintes equações relacionando as propriedades e características nas seções de entrada e saída de um determinado volume de controle $\forall$.

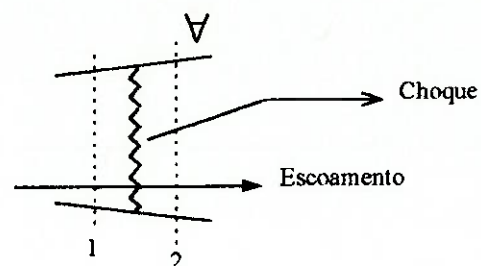


Figura 4 - Choques Normais

$$M_2 = \frac{M_1^2 + \frac{2}{(k-1)}}{\frac{2k}{(k-1)} M_1^2 - 1} \quad \text{Eq. 16}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{(k-1)}{2} M_1^2}{1 + \frac{(k-1)}{2} M_2^2} \quad \text{Eq. 17}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + k M_1^2}{1 + k M_2^2} \quad \text{Eq. 18}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(k+1) M_1^2}{(k-1) M_2^2 + 2} \quad \text{Eq. 19}$$

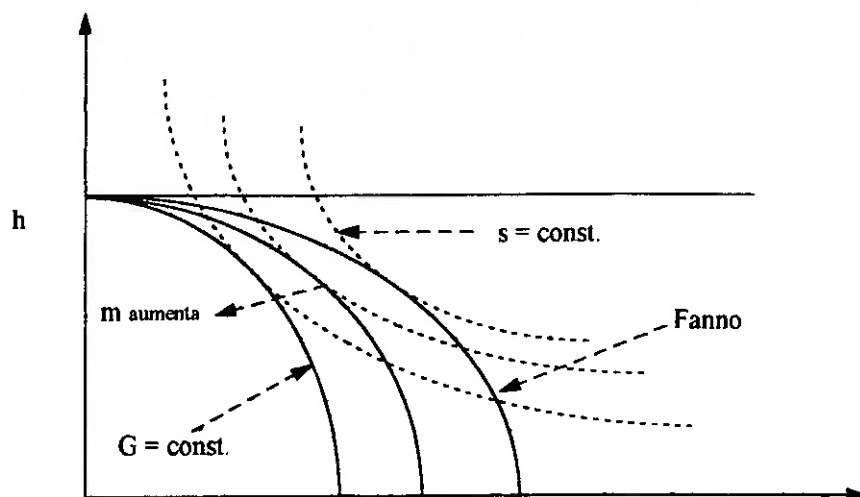


Figura 5 - Curvas de Fanno em um Plano $h - v$

Uma outra forma de representação segue abaixo, desta vez num plano ($h \times s$).

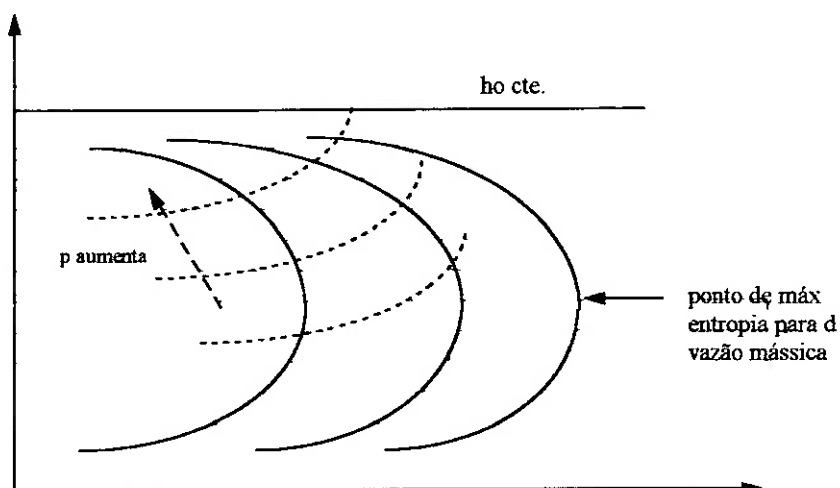


Figura 6 - Curvas em um Plano $h - s$

Na figura apresentada anteriormente, mostramos uma linha de Fanno com as linhas de pressão típicas. Podemos dividi-la em duas partes distintas. O ramo superior e o ramo inferior. Para o ramo superior, no decorrer do escoamento, os efeitos do atrito propiciarão uma geração interna de calor, com uma conseqüente redução da densidade do fluido. Porém, como temos o produto ($\rho \cdot V = \text{cte}$), uma diminuição de ρ acarreta um aumento de V , gerando um aumento de energia cinética. Este, conseqüentemente, gerará uma queda de entalpia, desde que a entalpia de estagnação permaneça constante.

No ponto limite da curva temos o ponto de máxima entropia e velocidade sônica. Já no ramo inferior, nossa intuição nos faria pensar que com a queda da pressão houvesse uma queda de entalpia e uma queda de entropia. Isso não ocorre senão violaria o 2. Princípio da termodinâmica. Este ramo, a esquerda do ponto de máxima entropia não tem significado físico. Apenas representa um fluxo que parte de baixos valores de entalpia e pressão estática para um ponto de máxima entropia. Este fluxo caminha para um ponto de elevada pressão estática, em outras palavras, um processo de compressão.

3.4.3 EQUAÇÕES DE TRABALHO PARA GÁS PERFEITO

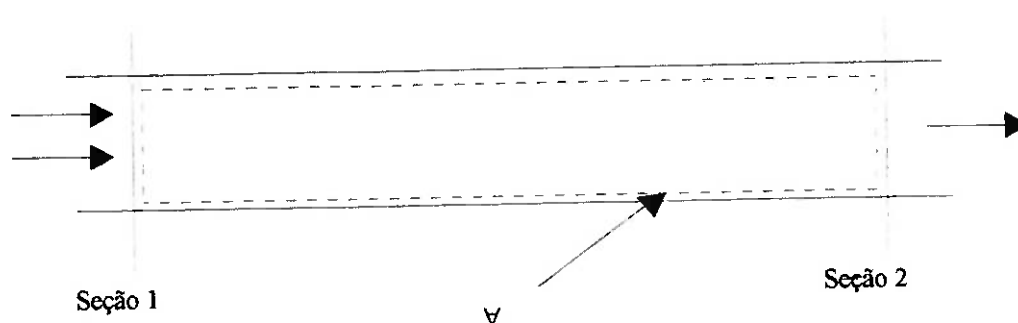


Figura 7 - Escoamento de Fanno

Sem procurar deduzir, apenas descrevendo de onde elas partiram e sob quais simplificações, vem a seguir as principais equações utilizadas no programa para a resolução de problemas. Caso o leitor julgue necessário observar as deduções, consulte as referências bibliográficas :

_ Relação entre as temperaturas de entrada e saída do volume de controle estudado :

Partida : Equação de Energia.

Simplificações Assumidas : Gás Perfeito com calor específico constante.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2} \quad \text{Eq. 22}$$

_ Relação entre as pressões de entrada e saída do volume de controle estudado :

Partida : Equação da continuidade.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{M_1}{M_2} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad \text{Eq. 23}$$

_ Variação da entropia de entrada e saída do volume de controle estudado :

$$\frac{s_2 - s_1}{R} = \ln \frac{M_2}{M_1} \frac{\frac{k+1}{2(k-1)} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}}{\sqrt{\frac{T_2}{T_1}}} \quad \text{Eq. 24}$$

_ Razão : Fator de Atrito x Trecho do duto pelo Diâmetro hidráulico.

Partida : Equação da quantidade de movimento.

Simplificação : Fator de Atrito constante ao longo do tubo.

$$\frac{f(\Delta x)}{D_e} = \left(\frac{k+1}{2k}\right) \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right) - \frac{1}{k} \left(\frac{1}{M_2^2} - \frac{1}{M_1^2}\right) - \left(\frac{k+1}{2k}\right) \ln \frac{M_2^2}{M_1^2} \quad \text{Eq. 25}$$

3.5 ESCOAMENTO DE RAYLEIGH

3.5.1 HIPÓTESES ASSUMIDAS

- _ Regime Permanente;
- _ escoamento Unidimensional;
- _ Sem Trabalho;
- _ Sem atrito ;
- _ Despreza-se a energia potencial;
- _ Duto de área constante;
- _ Gás Perfeito.

3.5.2 ASPECTOS TERMODINÂMICOS. CURVAS DE RAYLEIGH

Para o escoamento de Rayleigh o alvo de estudo é o escoamento com troca de calor, desprezando-se o efeito do atrito. Esta situação, apesar de irreal, constitui-se numa aproximação para muitos problemas reais. Tal fato ocorre pois em sistemas onde há elevadas taxas de transferência de calor a variação de entropia causada pelo atrito é desprezível se comparada com a variação devida a troca de calor. Abaixo segue a análise para um fluido qualquer.

$$h_{o1} + q = h_{o2} + w \quad \text{Eq. 26}$$

como $w = 0$:

$$h_{o1} + q = h_{o2} \quad \text{Eq. 27}$$

Equação da quantidade de movimento :

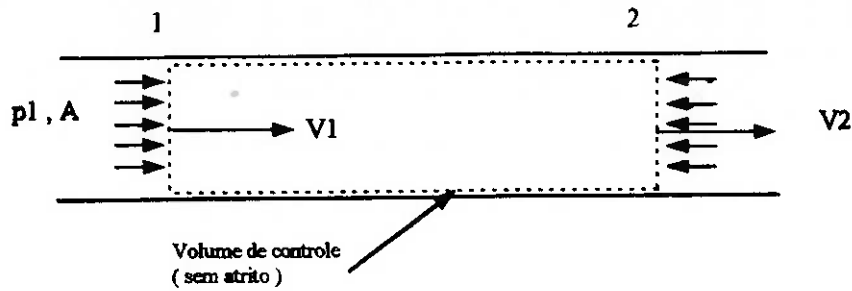


Figura 8 - Escoamento de Rayleigh

observando a figura :

$$p_1 \cdot A - p_2 \cdot A = r \cdot A \cdot V / g_c (V_2 - V_1) \quad \text{Eq. 28}$$

dividindo por A, esta equação pode ser escrita como :

$$p + G \cdot V / g_c = \text{const.} \quad \text{Eq. 29}$$

ou, uma forma alternativa a equação (29)

$$p + G^2 \cdot v / g_c = \text{const.} \quad \text{Eq. 30}$$

multiplicando-se (30) por A :

$$p \cdot A + m \cdot V / g_c = \text{const.} = F \quad \text{Eq. 31}$$

A equação acima é conhecida como função impulso, que é constante para um escoamento de Rayleigh. A equação (30) é uma linha reta no diagrama ($p \times v$), reta esta denominada curva de Rayleigh para determinada vazão mássica G. Conhecido o fluido, podemos desenhar linhas de isotermas.

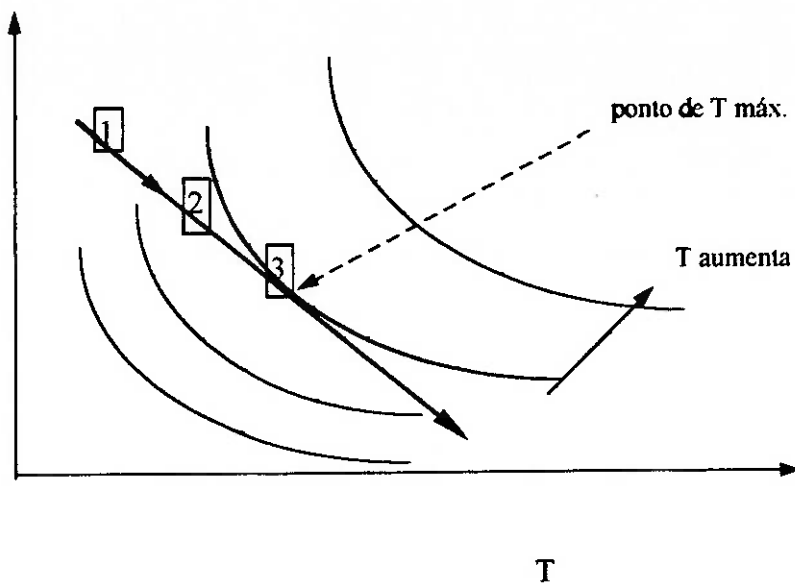


Figura 9 - Curva de Rayleigh

Do ponto 1 ao ponto 2, o efeito do aquecimento acarreta no aumento da temperatura e no decréscimo da densidade. Adicionando-se mais calor, moveremos ainda mais na curva de Rayleigh até chegarmos no ponto de máxima temperatura indicado no ponto 3. Lembrando-se da relação,

$$ds = \delta q / T \quad \text{Eq. 32}$$

percebemos que o aumento do calor acarreta um aumento de entropia. Agora resta determinar se a situação limite ocorre no ponto de temperatura máxima ou no ponto de entropia máxima. Devemos analisar as curvas de entropia no diagrama ($p \times v$):

Para um gás perfeito :

$$p \cdot v = R \cdot T = \text{const.} \quad \text{Eq. 33}$$

diferenciando e sabendo-se que para $S = \text{cte.}$ temos $p \cdot v^k = \text{cte.}$ temos :

$$dp / dv = -k (p / v) \quad \text{Eq. 34}$$

O equacionamento acima nos permite desenhar as curvas isoentrópicas no diagrama ($p \times v$), conforme mostrado abaixo :

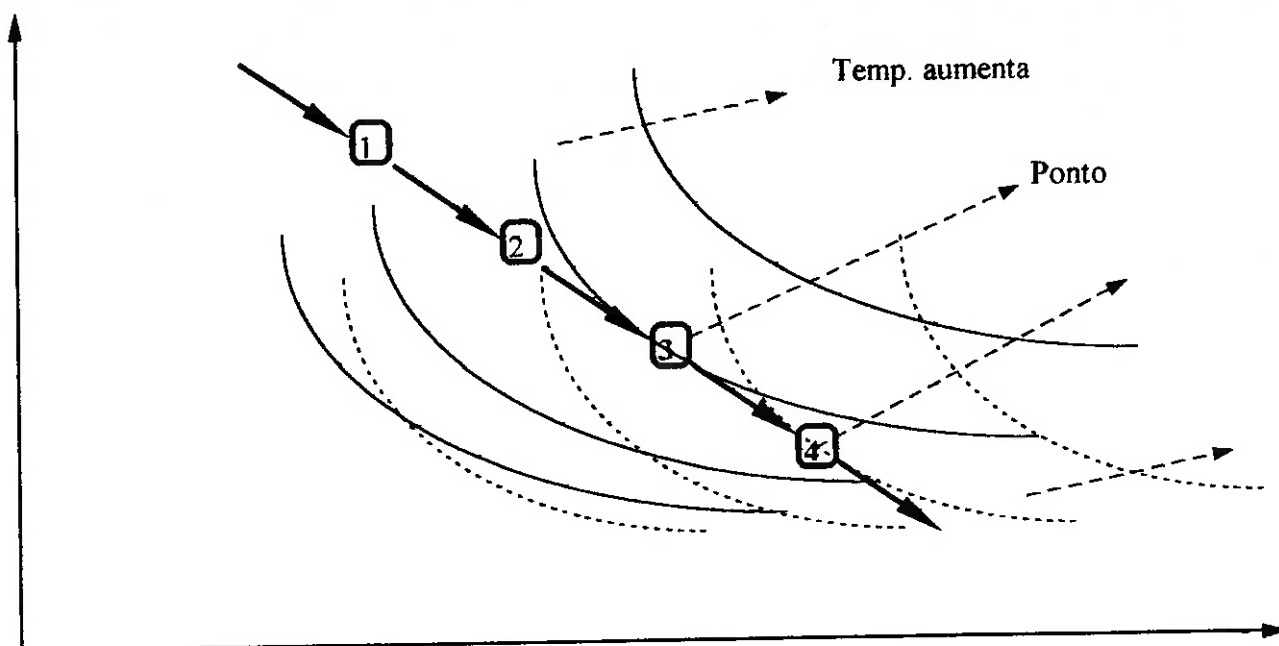


Figura 10 - Curva de Rayleigh

O que chama atenção na curva descrita acima é o trecho 3 - 4. Neste trecho, adicionando-se calor, diminui-se a temperatura e aumenta-se a entropia atingindo-se o ponto de entropia máximo. A explicação é a seguinte :

_ A adição de calor força um aumento da energia cinética do fluido. Parte do calor é adicionada ao sistema e convertido no aumento de energia cinética do fluido e o excesso de energia térmica aumenta a entalpia do fluido. Como a energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade conclui-se que para velocidades muito altas a adição de mais calor é acompanhada por um aumento muito grande de energia cinética. Eventualmente alcançamos um ponto onde toda a energia térmica adicionada converte-se num aumento de energia cinética. Neste ponto não há excesso de energia térmica e o sistema está num ponto de entalpia máxima. A partir daí, quantidade adicional de calor causa um aumento maior de energia cinética que a energia térmica adicionada. Portanto a entalpia deve decrescer para prover o balanço de energia.

Podemos visualizar a discussão acima através da construção da curva de Rayleigh no diagrama ($h - s$).

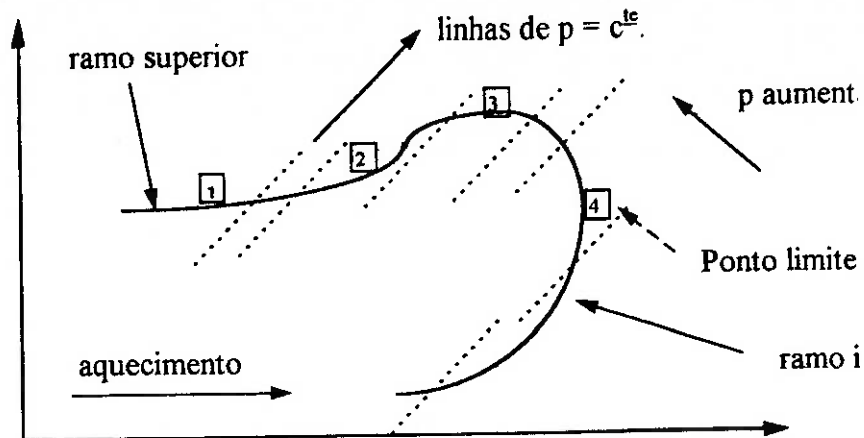
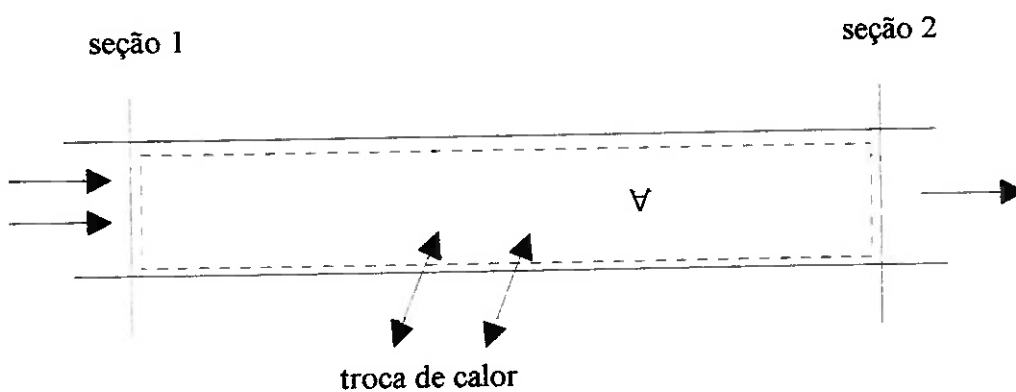


Figura 11 - Curva de Rayleigh - Diagrama $h - s$

Na curva acima, o processo de aquecimento durante o percurso 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4 já foram descritos. No ponto 4 temos o chamado ponto limite que corresponde ao ponto de máxima entropia com velocidade sônica, isto é, número de Mach igual a 1. Já no trecho inferior da curva, o escoamento encontra-se em velocidade supersônica, onde o aumento do aquecimento tende a desacelerar o fluido até a situação limite de $M = 1$.

3.5.3 EQUAÇÃO DE TRABALHO PARA GÁS PERFEITO



— Relação de pressões entre a entrada e saída do volume de controle estudado :

Partida : Equação da quantidade de movimento :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + k \cdot M_1^2}{1 + k \cdot M_2^2} \quad \text{Eq. 35}$$

_ Relação de temperaturas entre a entrada e saída do volume de controle estudado :

Partida : Equação da continuidade :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \frac{M_2^2}{M_1^2} \quad \text{Eq. 36}$$

_ Relação de densidades entre a entrada e saída do volume de controle estudado :

Partida : Equação da continuidade :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{M_1^2}{M_2^2} \frac{p_1}{p_2} \quad \text{Eq. 37}$$

_ Relação de temperaturas de estagnação entre a entrada e saída do volume de controle estudado :

$$\frac{T_{02}}{T_{01}} = \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2} \right) \quad \text{Eq. 38}$$

_ Relação de temperaturas de estagnação entre a entrada e saída do volume de controle estudado :

4. PROGRAMA

4.1 ESTRUTURA GERAL DO PROGRAMA

O núcleo e os procedimentos adotados no programa para a resolução de problemas foram implementados pelos autores deste trabalho em conjunto. Uma vez estabelecidos todos os parâmetros do programa, cada um os utilizou para resolver alguns casos específicos. A Freitas coube a aplicação em escoamentos em dutos com variação de área e ondas de choque normal, a Goldstein coube a aplicação do programa em escoamento de Fanno e Rayleigh.

A princípio foi decidido o uso de uma linguagem Visual (Basic ou Delphi, por exemplo) para servir como ferramenta na implementação do programa. Porém, recursos já disponíveis em pacotes prontos como a Planilha Excel, em muito atraíram por facilitar o trabalho de programação. A resolução de equações fica muito facilitada com o "Atingir Meta" disponível na planilha; a utilização de "Macros" automatiza as operações do programa (tornando-o "User Friendly"), a capacidade gráfica contribui para uma melhor apresentação dos resultados e, o Visual Basic implementado no ambiente Excel, em muito se assemelha com o Pascal, linguagem previamente conhecida pelos alunos. Deve ser ressaltado que o fato deste ambiente de programação não ser otimizado para programas de engenharia, sendo algumas vezes mais lento em relação a outros ambientes, foi analisado. A escolha do ambiente foi feita tendo em vista não só as respostas dos problemas, mas também a interface com o usuário

O programa visa constituir-se numa alternativa para o estudante resolver problemas de escoamentos compressíveis, fazendo-o "fugir" um pouco das tabelas. Sua estrutura foi desenvolvida o mais aberta possível para que modificações sejam implementadas conforme a conveniência de cada usuário.

O software consiste de várias telas, cada qual com sua função específica. Podemos classificar as telas em:

- Menu Inicial

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{p_2}{p_1} \frac{k}{k-1} \sqrt{\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}} \quad \text{Eq. 39}$$

_ Obtenção do valor do calor transferido :

$$Q = c_p (T_{02} - T_{01}) \quad \text{Eq. 40}$$

- Menus de Temas

- Telas de trabalho

4.2 TELAS DO PROGRAMA

O transporte entre telas tela é realizado através do acionamento de botões, nos quais estão descritas suas respectivas funções.

4.2.1 MENU INICIAL

A tela Menu Inicial tem como função transportar o usuário às telas de Menus de Temas. Existe uma tela Menu de Tema para cada tema proposto.

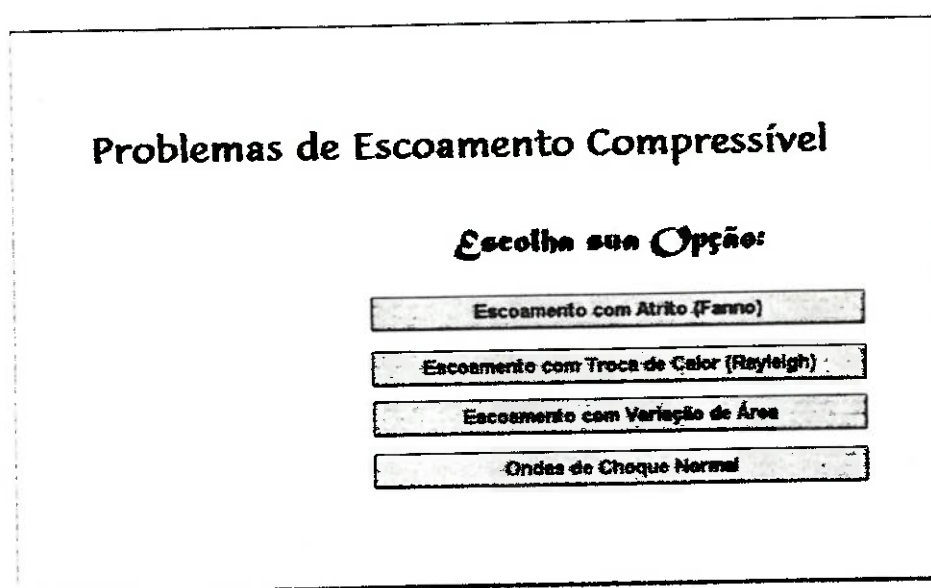


Figura 12 - Menu Inicial

4.2.2 TEMAS

Nas telas de Temas, fica disponível ao usuário a escolha das equações as quais ele gostaria de resolver.

Na Figura 13 está ilustrado como exemplo a tela do tema Escoamento de Rayleigh. Nota-se no lado

esquerdo o título da tela, bem como uma ilustração do tema. No lado direito encontra-se os botões que indicam o tipo de equação a ser resolvida.

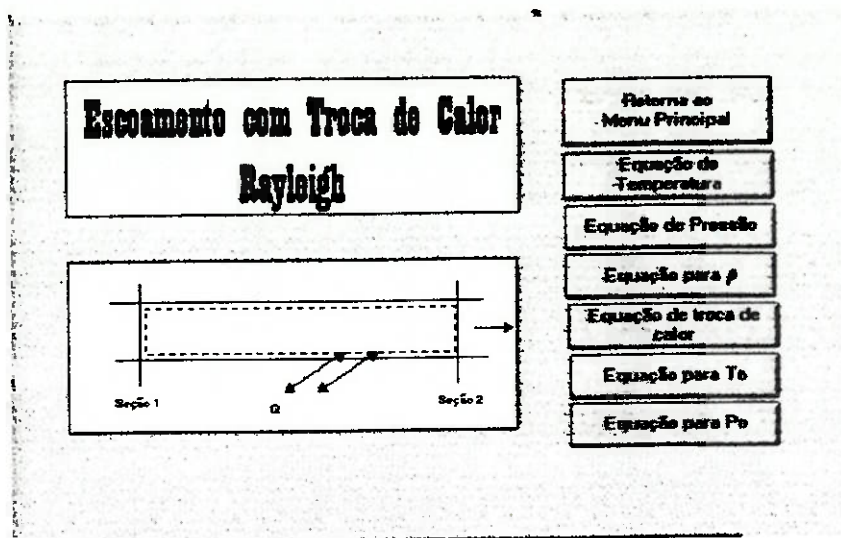


Figura 13 - Tela do tema Escoamento de Rayleigh

4.2.3 TELA DE TRABALHO

É na tela de trabalho aonde se efetuará a resolução do problema. Na figura 14 temos ilustrado a tela de trabalho do Escoamento com Variação de Área, Equação de Área.

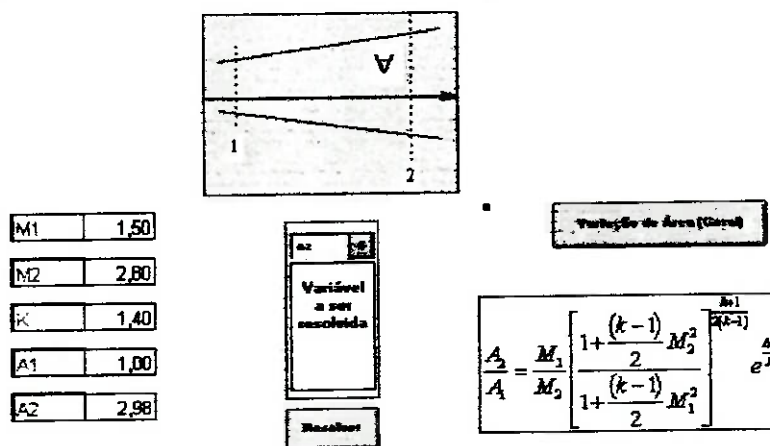


Figura 14 - Tela de Trabalho de Variação de Área - equação de área

Na parte superior da tela encontra-se novamente um esquema do problema a ser resolvido, e no lado direito encontra-se o botão para retorno ao menu de tema e a equação a ser resolvida. Ao centro e ao lado esquerdo encontra-se a interface de entrada de dados com o usuário. A direita encontra-se explicitado as variáveis a serem resolvidas, bem como células contendo seus respectivos valores ao seu lado. Ao centro encontra-se um menu de itens, que pode ser acionado pela seta apontando para baixo, que deverá ser utilizado para indicar qual a variável a ser resolvida.

Uma observação deve ser feita para o escoamento generalizado. Neste caso, não há menu de tema. Ao se escolher este item no menu inicial, o usuário será transportado diretamente para a tela de trabalho. Esta tela de trabalho também diferirá das demais, sendo melhor detalhada no item "resolução do escoamento generalizado"

4.3 RESOLUÇÃO DOS CASOS PARTICULARES

A resolução de casos particulares consiste em escolher um tema e uma equação. O tema é escolhido a partir do Menu Inicial, e a equação é escolhida em seguida nas telas dos respectivos temas. Com exceção da tela do escoamento generalizado, tratado posteriormente, os demais temas são tratados de maneira análoga uns aos outros.

Ao centro e ao lado esquerdo das telas de trabalho, encontra-se a interface de entrada de dados com o usuário. À esquerda encontra-se explicitado as variáveis a serem resolvidas, bem como células contendo seus respectivos valores ao lado. Ao centro encontra-se um menu de itens, o qual é acionado pela seta apontando para baixo, que deverá ser utilizado para indicar qual a variável a ser resolvida admitindo-se os valores das demais variáveis como sendo constantes. Após fornecer ao programa o valor das constantes e indicar qual o valor da variável a ser resolvida, basta apertar o botão "resolver" para iniciar a solução. Logo em seguida, o tempo exato depende da CPU e quantidade de memória RAM disponível, o programa irá fornecer ao usuário uma mensagem, indicando o sucesso ou não da resolução do problema. Caso a mensagem seja de sucesso, após a confirmação solicitada ao usuário, o mesmo poderá conferir ao lado da variável em resolução o seu valor calculado. Caso a mensagem seja de erro, junto com a mesma surgirá

uma mensagem indicando um possível erro na entrada de dados fornecida pelo usuário. Após correção dos valores o botão de solução pode ser novamente acionado.

4.4 RESOLUÇÃO DO ESCOAMENTO GENERALIZADO

4.4.1 MÉTODO DE SOLUÇÃO

Após avaliar diversas combinações de discretizações e métodos de integração, chegou-se à atual estrutura, que será apresentada a seguir com o auxílio da ilustração na figura a seguir :

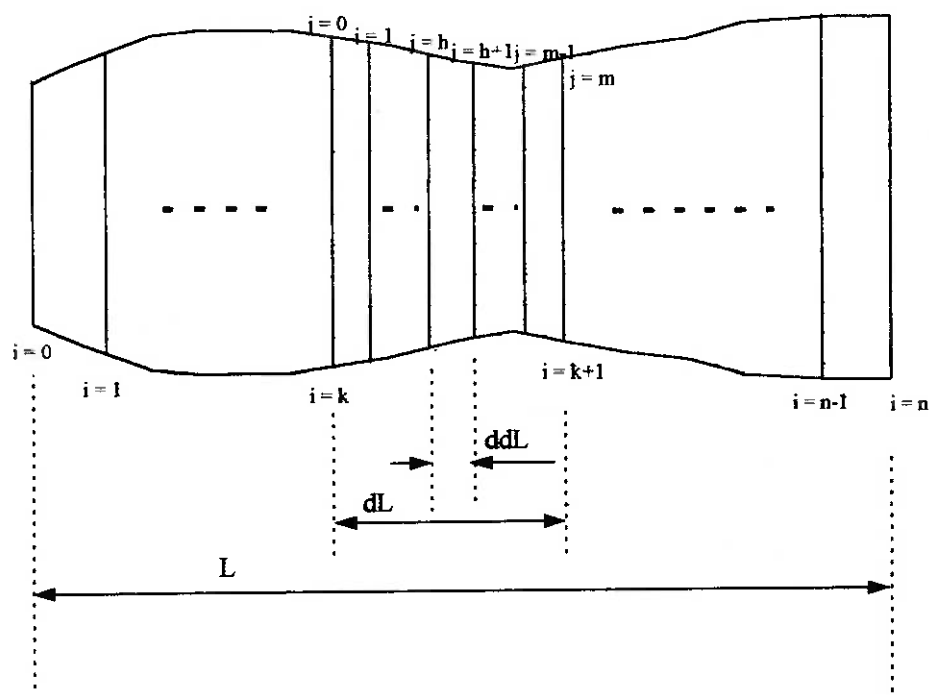


Figura 15 Esquema de discretização

Optou-se pela integração pelo método de Euler, dividindo-se o duto em "n" intervalos principais, aonde serão calculadas e armazenadas as variáveis de interesse (Mach, Temperatura, Pressão e Densidade). Inicialmente dividi-se cada intervalo principal em "m" subintervalos, calcula-se a variação das variáveis e, com um número duas vezes maior de subintervalos ($2.m$), calcula-se novamente. Caso a diferença entre os valores obtidos seja menor que um erro percentual estabelecido, dobra-se novamente o número de subintervalos até que o erro seja satisfatório.

Estão ainda implementados algumas condições para verificação de bloqueio e análise do número de subinterações, de modo a otimizar o programa quanto à convergência, tempo de execução e precisão dos cálculos. Um fluxograma detalhado do programa, bem como um diagrama, encontram-se no anexo A:

4.4.2 ENTRADA DE DADOS

A entrada de dados é realizada na tela onde o usuário fornecerá os dados necessários para caracterizar as condições de contorno do problema, bem como estabelecer algumas opções de cálculo. No lado direito da tela, o usuário deverá fornecer os valores das seguintes variáveis :

- It: número de iterações principais

_ Sub-It : número de sub-iterações inicial

_ Sit-máx : número máximo de sub-iterações

- Erro % : Erro percentual máximo admissível entre sub-iterações

- k , M_1 , T_1 , p_1 , ρ_1 , R : Propriedades do fluido na seção de entrada

- f : fator de atrito no duto

- Q : quantidade de calor total fornecida ao duto

_ A_1 , A_i , A_2 : Áreas das seções inicial, intermediária e final respectivamente

_ L_1 , L_2 : Comprimento do primeiro e segundo trecho do duto

Além destes valores é necessário estabelecer o estado de dois "flags". Um habilita/desabilita a resolução do segundo estágio e o outro habilita/desabilita a auto-blocação. A auto-blocação consiste numa rotina para, através de um método iterativo, achar o valor de Mach na entrada para que ocorra bloqueio no final do primeiro estágio.

4.4.3 SAÍDA DE DADOS

A saída de dados ocorre em quatro telas nas quais se fornece ao usuário dados sobre a integração e sobre os valores das variáveis durante a execução e na seção final do escoamento.

4.4.3.1 "Resumo"

Na própria tela de trabalho, lado direito, estão apresentados os valores das variáveis de interesse das seções que representam o final do primeiro e segundo estágio. Aqui apresenta-se também o tempo total de execução.

Entrada de Dados		Geometria		Resultados	
h	10	S.h _{max}	4000	Δt	00:06
Sub-h	2,00	Erro %	1,00	M ₁	
Condições Iniciais				Garganta	
k	1,40	A ₀	0,100	M ₂	0,33
M ₀	0,500	A ₁	0,100	T ₁	199,8
T ₀	200,0	A ₂	0,140	P ₁	6,81E+04
P ₀	6,89E+04	L1	2,00	p ₁	0,99
P ₀	1,00	L2	2,00	Salda	
f	0,002	[Executar 2º estágio]		M ₁	0,33
Q	0	R	287,0	T ₁	205,5
				P ₁	7,48E+04
				p ₁	1,06
				[Auto Elocagem]	

Figura 16 Tela de Entrada/Saída de dados Escoamento Generalizado

4.4.3.2 "Informações Adicionais"

Aqui estão apresentados dados sobre as variáveis durante a integração, dados sobre a convergência e discretização utilizada. Com base nestes dados o usuário poderá concluir sobre a precisão do cálculo e a necessidade de "refinar" ou "engrossar" a malha de discretização utilizada, buscando otimizar "tempo x precisão".

Tela de Entrada				Gráfico				
Informações								
Iteração n	Subiterações necessárias	Erro %	X	A	Mach	Temperatura	Pressão	Densidade
0	-	-	0,00	0,10	0,30	300,00	66900,00	1,00
1	2	0,000	0,20	0,10	0,30	199,98	66820,84	1,00
2	1	0,110	0,40	0,10	0,30	199,96	66741,21	1,00
3	1	0,111	0,60	0,10	0,30	199,94	66661,60	1,00
4	1	0,111	0,80	0,10	0,30	199,92	66581,83	1,00
5	1	0,111	1,00	0,10	0,30	199,89	66501,90	0,99
6	1	0,112	1,20	0,10	0,30	199,87	66421,81	0,99
7	1	0,112	1,40	0,10	0,30	199,85	66341,75	0,99
8	1	0,112	1,60	0,10	0,30	199,83	66261,14	0,99
9	1	0,113	1,80	0,10	0,31	199,81	66180,56	0,99
10	1	0,113	2,00	0,10	0,31	199,79	66099,81	0,99
11	2	0,074	2,20	0,10	0,48	200,89	69285,00	1,00
12	2	0,056	2,40	0,11	0,46	201,65	70207,97	1,01
13	2	0,043	2,60	0,11	0,43	202,37	71064,76	1,02
14	2	0,034	2,80	0,12	0,42	203,00	71821,85	1,03
15	2	0,028	3,00	0,12	0,40	203,55	72466,24	1,03
16	2	0,023	3,20	0,12	0,38	204,04	73039,70	1,04
17	2	0,019	3,40	0,13	0,37	204,47	73547,91	1,04
18	2	0,016	3,60	0,13	0,36	204,85	74002,36	1,05
19	2	0,014	3,80	0,14	0,34	205,19	74410,70	1,05
20	2	0,012	4,00	0,14	0,33	205,56	74779,25	1,06

Figura 17 Tela de Informações adicionais

4.4.3.3 "Primeira Tela de Gráficos"

Aqui estão apresentados na forma de gráficos dados sobre a discretização (número de subiterações para convergência), a variação da temperatura e do número de Mach ao longo do escoamento, e um esquema da geometria do duto.

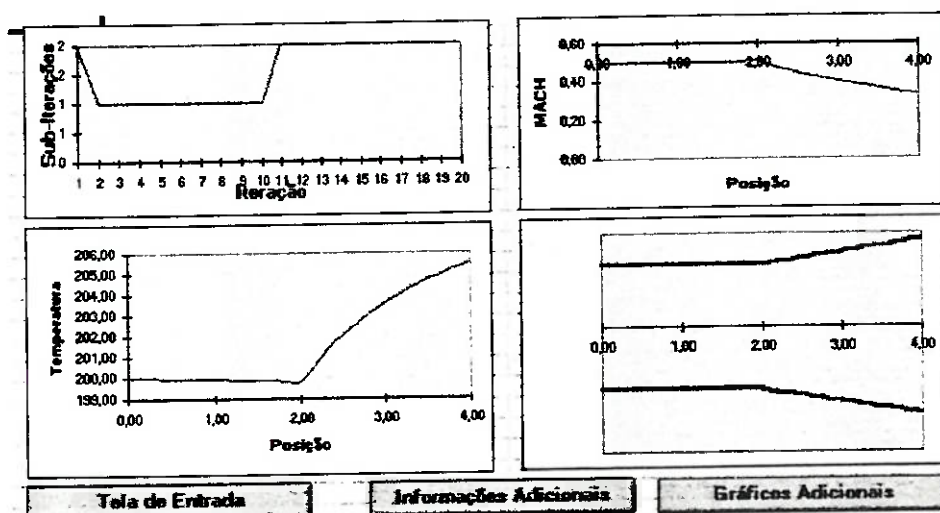


Figura 18 Primeira Tela de gráficos

4.4.3.4 "Segunda Tela de Gráficos"

Analogamente à segunda tela temos dados sobre a densidade e a pressão ao longo do escoamento, novamente um esquema do duto e, caso necessário, dados sobre a convergência do cálculo do Mach de bloqueio.

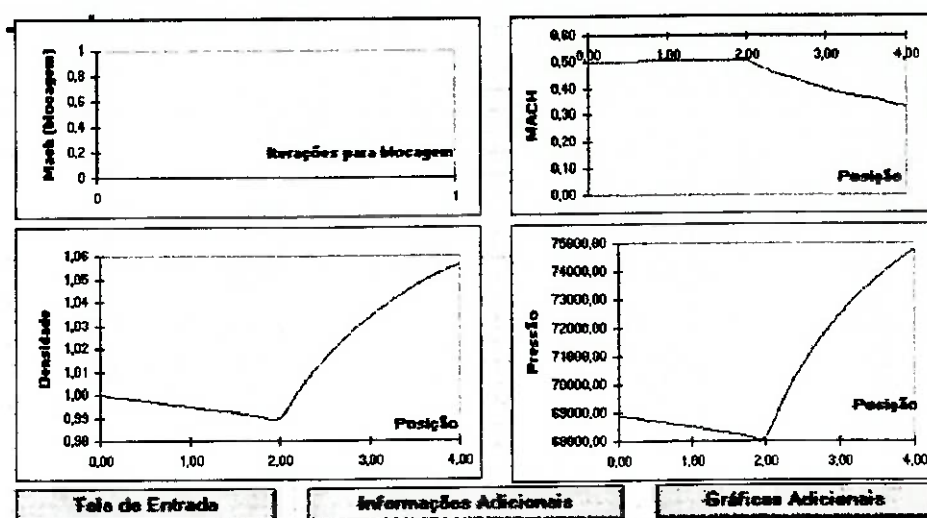


Figura 19 Segunda Tela de gráficos.

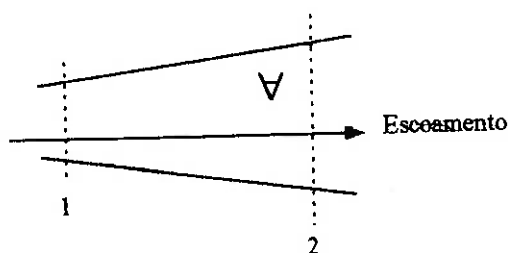
5. AVALIAÇÃO DO PROGRAMA :

A seguir serão apresentados as resoluções de exercícios. Numa primeira parte, os exercícios a serem resolvidos encontram-se em PIMENTA[1] e servem como base de comprovação do correto funcionamento do programa. Estes serão resolvidos utilizando a parte do programa que resolve simples equações e após serão resolvidos pelo método do escoamento generalizado. Os resultados serão comparados com os resultados obtidos analiticamente.

Na segunda parte, serão analisados casos de escoamento envolvendo apenas um parâmetro variável (ex. mudança de área) e mantidos demais parâmetros constantes para, em seguida, inserindo-se um parâmetro de cada vez, observar como varia o comportamento das propriedades de saída do escoamento.

5.1 PRIMEIRA PARTE:

5.1.1 EXERCÍCIO 5.1 DO PIMENTA[1] (ESCOAMENTO COM VARIAÇÃO DE ÁREA)



$$M_1 = 1,5$$

$$A_2/A_1 = 2,98$$

Figura 20 - Sistema Físico

Resultados obtidos analiticamente na seção de saída :

$$\text{Mach} = 2,8$$

Resultados obtidos pelo método do Escoamento Generalizado :

Mach = 2,79

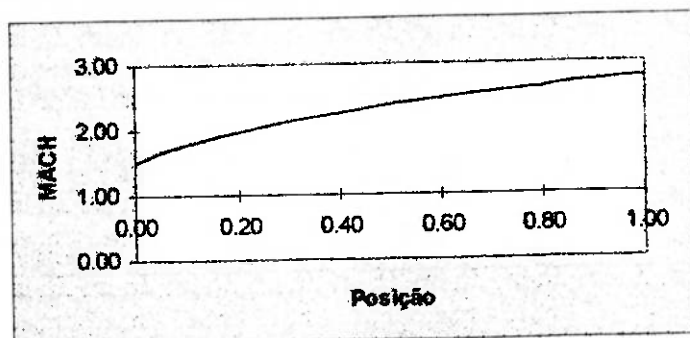


Figura 21 - Gráfico da variação de Mach ao longo do duto

Resultados Obtidos pela tela de resolução de equações :

$M_2 = 2,8$

5.1.2 EXERCÍCIO 8.3 DO PIMENTA[1] (ESCOAMENTO DE RAYLEIGH)

$T_1 = -50,9 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $P_1 = 6,89 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

$M_1 = 0,410$

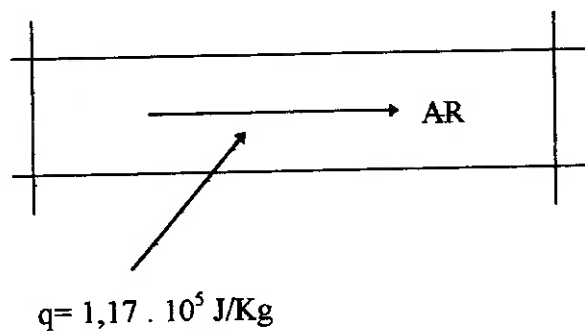


Figura 22 - Sistema físico

Resultados obtidos analiticamente na seção de saída :

Mach = 0,605

Pressão = 56300 Pa

Temperatura = 322,4 K

Resultados obtidos pelo método do Escoamento Generalizado :

Mach = 0,603

Pressão = 56383 Pa

Temperatura = 322,6 K

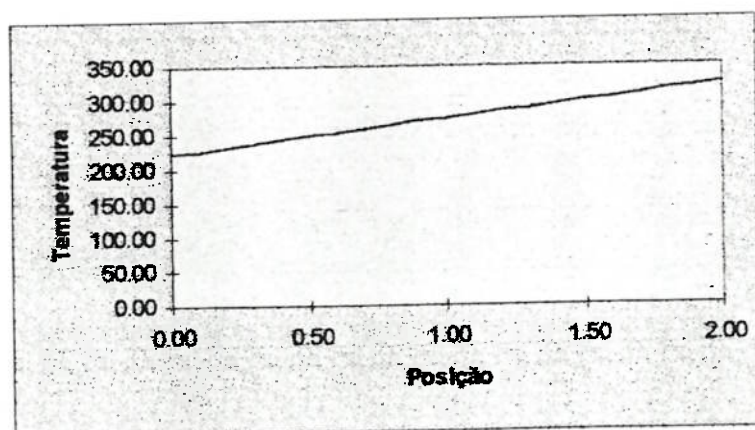
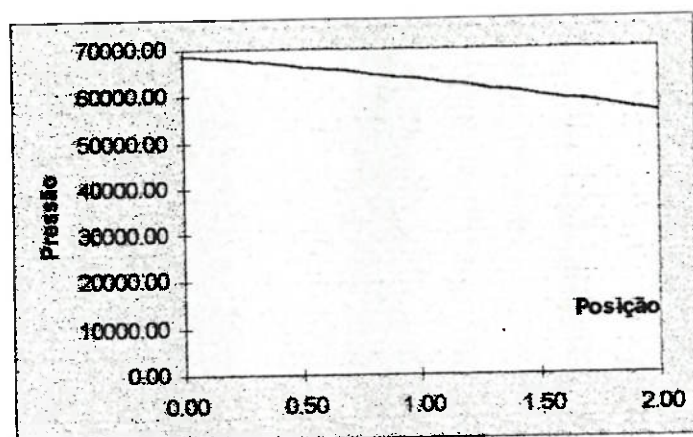
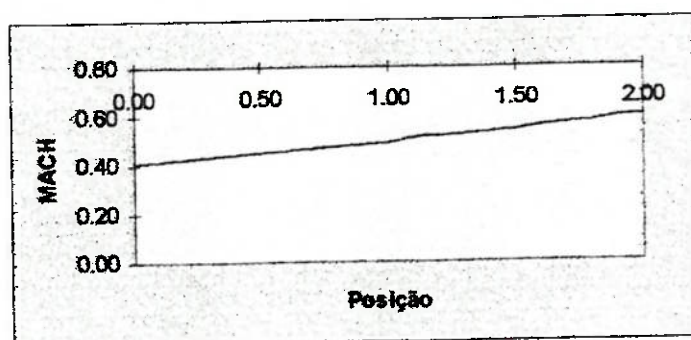


Figura 23 - Resultados obtidos pelo escoamento generalizado

Resultados Obtidos pela tela de resolução de equações :

Fixado : Mach = 0,605

Pressão = 56321 Pa

Temperatura = 322,9 K

5.2 SEGUNDA PARTE :

_ Problema com variação de área (bocal divergente) e fator de atrito constante :

Dados na Entrada :

$k = 1,4$

$R = 287 \text{ N.m/Kg.K}$

Fator de Atrito $f = 0,001$

Área Inicial = $0,0314 \text{ m}^2$

Área Final = $0,1257 \text{ m}^2$ (Área varia linearmente com comprimento do tubo)

Comprimento do Duto = 2 m

$P_o = 0,1 \text{ MPa}$

$T_o = 300 \text{ K}$

Resolução para Mach na entrada subsônico $M = 0,5$

Resolução para Mach na entrada subsônico $M=2,0$

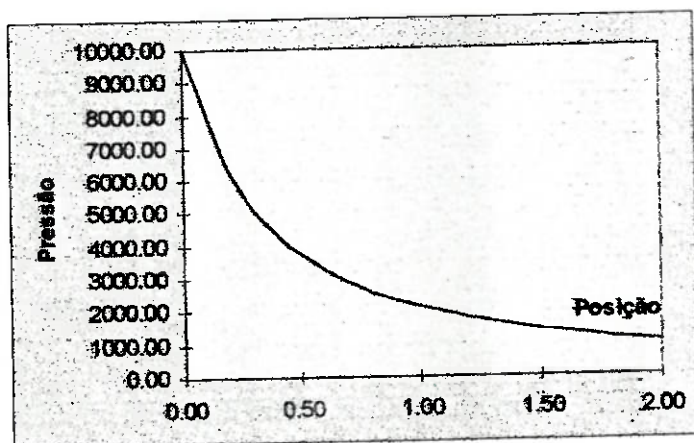
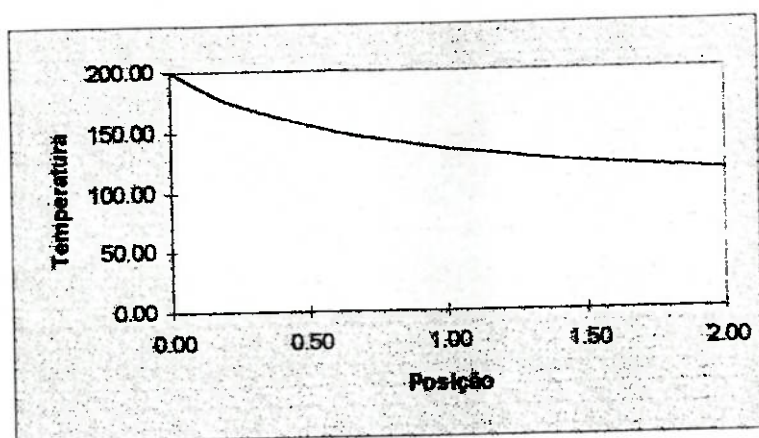
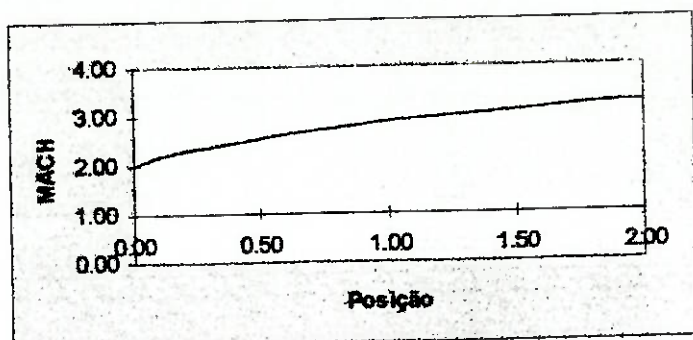


Figura 25 - Solução obtida para um escoamento supersônico

Comentários: Observa-se que para ambos os regimes seja subsônico ou supersônico, observa-se um afastamento do regime sônico.

_ Problema com variação de área (bocal convergente) e fator de atrito constante :

Dados na Entrada :

$$k = 1,4$$

$$R = 287 \text{ N.m/Kg.K}$$

$$\text{Fator de Atrito } f = 0,001$$

$$\text{Área Inicial} = 0,1257 \text{ m}^2$$

$$\text{Área Final} = 0,0314 \text{ m}^2 \quad (\text{Área varia linearmente com comprimento do tubo})$$

$$\text{Comprimento do Duto} = 2 \text{ m}$$

$$P_o = 0.1 \text{ MPa}$$

$$T_o = 300 \text{ K}$$

Resolução para Mach na entrada subsônico $M = 0,1$

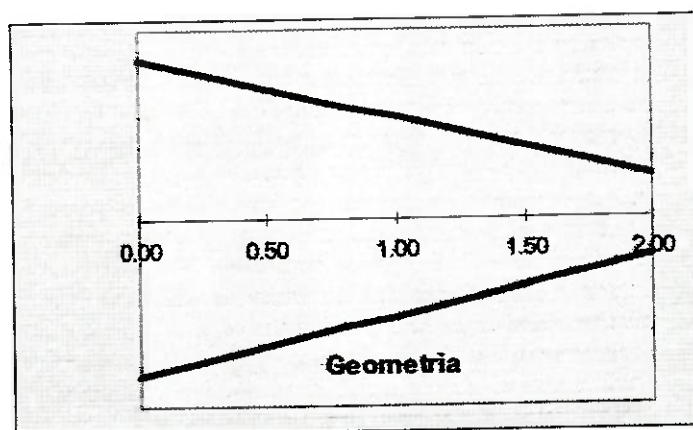


Figura 26 - Geometria do duto

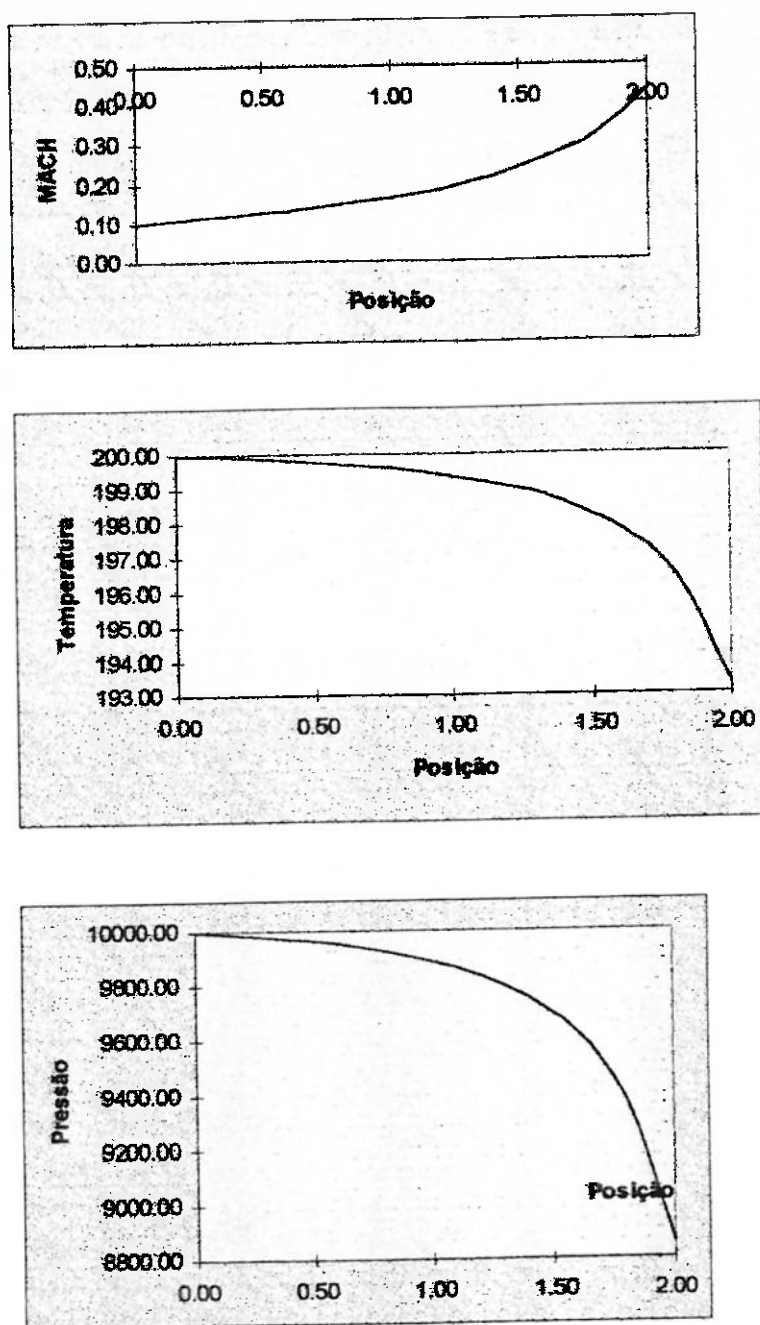


Figura 27 - Resultados obtidos para o escoamento subsônico

Resolução para Mach na entrada subsônico $M = 5.0$

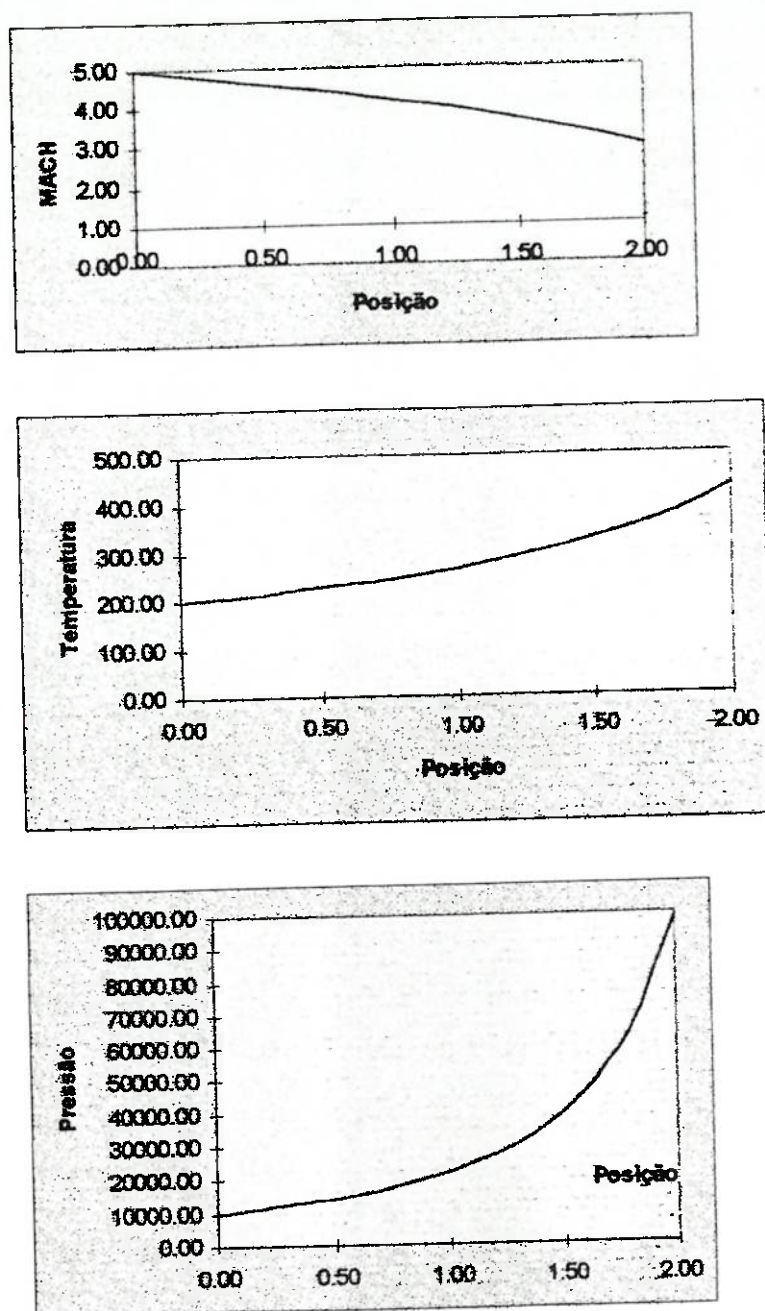


Figura 28 - Resultados obtidos para o escoamento supersônico

Comentários: Verifica-se para ambos os regimes que o escoamento tende ao regime sônico, ao contrário do ocorrido no bocal divergente.

_ Problema de escoamento de Fanno. Verificação da variação de Mach na saída do duto com a variação de "f". ("f" constante no trecho de duto estudado) :

Dados de Entrada :

$$k = 1.4$$

$$R = 287 \text{ N.m/Kg.K}$$

$$\text{Área do duto} = 0.0314 \text{ m}^2$$

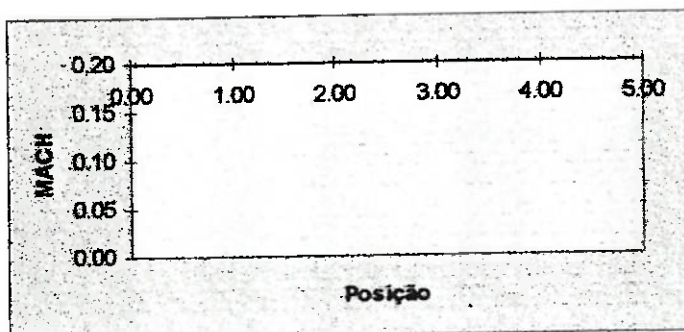
$$\text{Comprimento do duto} = 5.0 \text{ m}$$

$$\text{Condições na entrada do duto : } M = 0.2$$

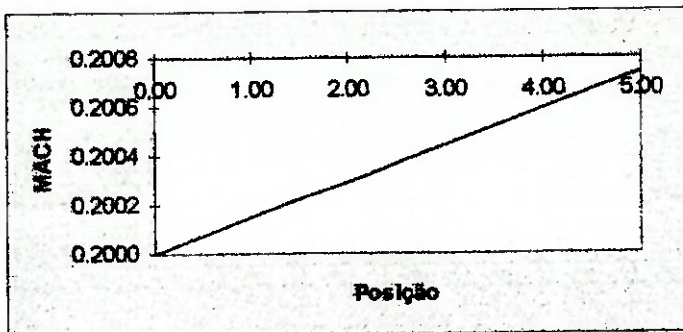
$$P = .1 \text{ MPa}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

a) $f = 0$



b) $f = 0,00125$



c) $f = 0,125$

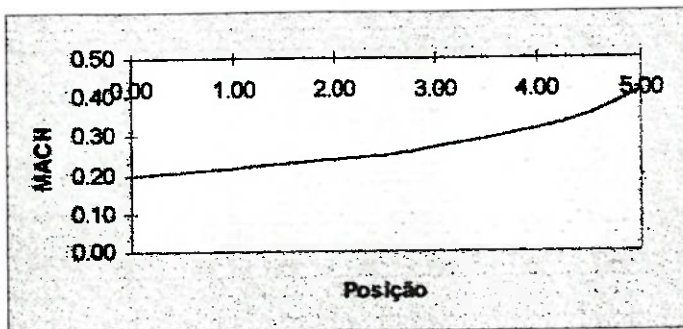


Figura 29 - Gráficos de Mach ao longo do duto variando-se o fator de atrito

Comentário: Pode-se observar que o número de Mach ao longo do conduto aumenta conforme o acréscimo no fator de atrito.

_ Problema de Escoamento de Rayleigh. Verificação da variação do número de Mach na saída do duto variando-se as taxas de troca de calor. (área constante)

Dados de Entrada :

$$k = 1,4$$

$$R = 287 \text{ N.m/Kg.K}$$

$$\text{Área do duto} = 0,0314 \text{ m}^2$$

Comprimento do duto = 5,0 m

Condições na entrada do duto : $M = 0.5$

$P = 0.5 \text{ MPa}$

$T = 286 \text{ K}$ (estática)

1° caso : $q = 0$ (escoamento adiabático)

2° caso : $q = 50225 \text{ J/Kg}$

3° caso : $q = 100450 \text{ J/Kg}$

4° caso : $q = 125562 \text{ J/Kg}$

5° caso : $q = 125562 \text{ J/Kg}$

Resultados :

Caso	Mach na saída	Temperatura na Saída (Estática)
1°	0,50	286 K
2°	0,58	327 K
3°	0,72	363 K
4°	0,84	373 K
5°	0,98	365 K

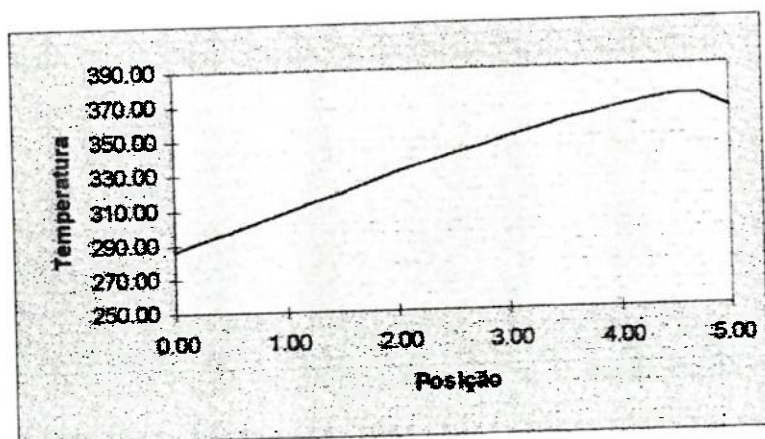


Figura 30 - Resolução do caso 5

Resultados

Caso	Mach	Temp. (estag.)	Press. (estag.)
1°	0.95	523,7 K	0,275 MPa
2°	0.83	527,6 K	0,316 MPa
3°	0.75	516,8 K	0,345 MPa
4°	0.52	403,5 K	0,440 MPa
5°	0.14	50.7 K	0,573 MPa

_ Problema de Escoamento com troca de calor e Atrito. Área constante.

Dados na Entrada :

$$k = 1,4$$

$$R = 287 \text{ N.m/Kg.K}$$

$$f = 0,00125$$

$$\text{Comprimento do duto} = 6,0 \text{ m}$$

$$\text{Área do duto} = 0,1257 \text{ m}^2$$

$$\text{Condições na entrada do duto : } M = 0,5$$

$$P = 0.42 \text{ MPa (estática)}$$

$$T = 572 \text{ K (estática)}$$

1° caso : $q =$	0	(escoamento adiabático)
2° caso : $q =$	120540 J/Kg	(adição de calor ao duto)
3° caso : $q =$	210945 J / Kg	(adição de calor ao duto)
4° caso : $q =$	-5022,5 J /Kg	(retirada de calor do duto)
5° caso : $q =$	-60270 J /Kg	(retirada de calor do duto)

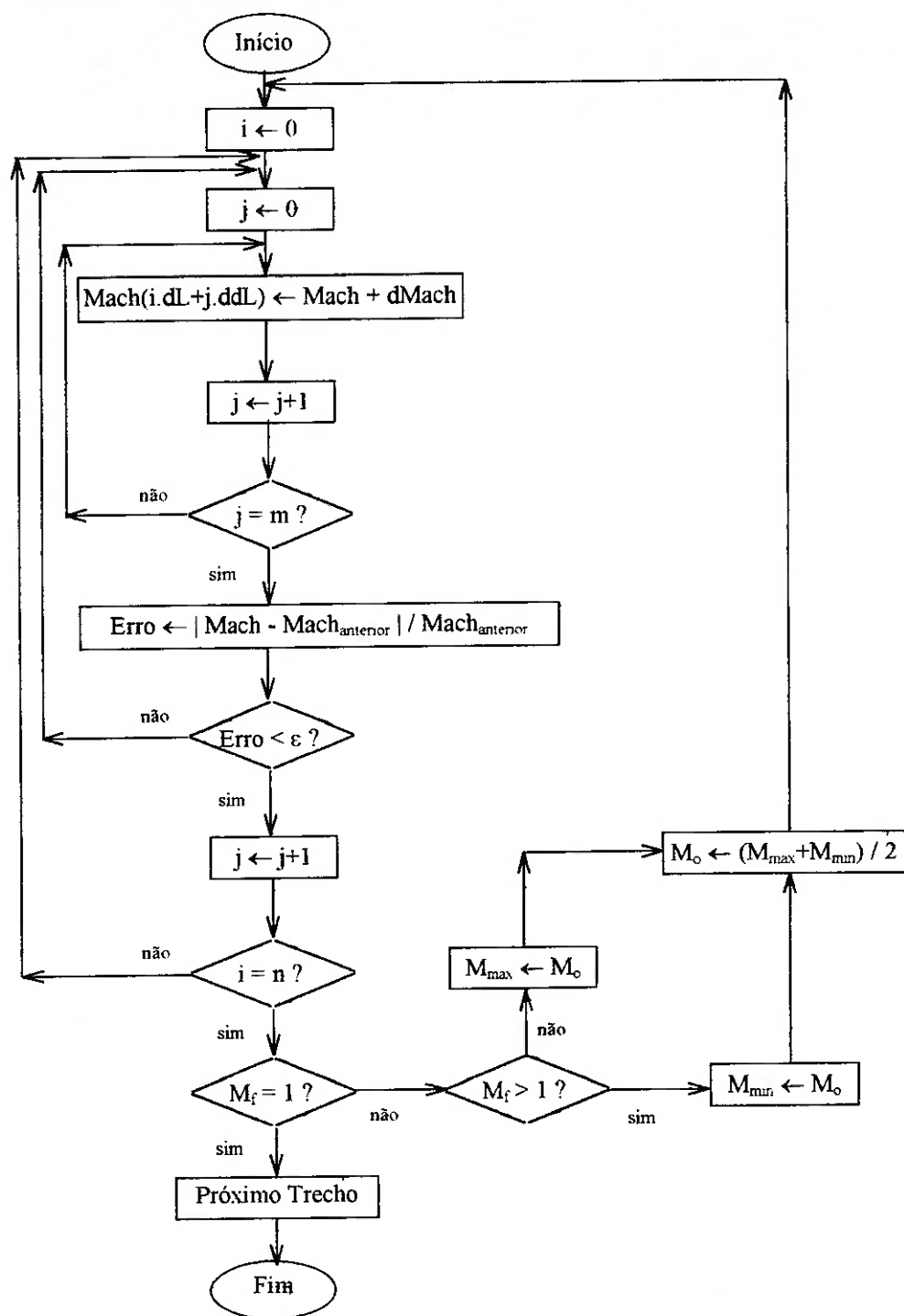
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Após realizados alguns ensaios com o programa na resolução dos problemas verificamos boa fidelidade em termos de resultados comparados aos mesmos quando obtidos analiticamente. Confirma-se, portanto, a validação dos métodos numéricos de cálculo de integração das equações diferenciais para o escoamento generalizado. Os casos particulares resumem-se a resolver equações simples utilizando os pacotes de cálculo já implementados no Microsoft Excel (comando "Atingir Meta" que resolve equações pelo método de "Newton - Raphson"). Recomenda-se resolver os exercícios pelo método do escoamento generalizado pois seu horizonte de resolução é amplo, utilizando-se os casos particulares apenas para checagem definitiva dos resultados.

A estrutura do software permite que alterações sejam implementadas. Necessita-se, portanto, que o usuário tenha conhecimentos básicos referentes a programação estruturada. Para os casos particulares, deve-se retirar os panos de fundo das telas para poder visualizar as células auxiliares de cálculo. (deve-se destravar a planilha - Menu "Utilitários" - "Proteção" - e pressionar "Enter" . Não há senha.). Cada botão da planilha está associado a uma macro e esta encontra-se listada em anexo D. Basta então editar a macro e implementar as modificações que julgar necessárias. Para o escoamento generalizado, recomenda-se a implementação de uma rotina que, dependendo das condições de saída do fluxo, localize o trecho do duto onde ocorre uma onda de choque. Deve-se lembrar que o software possui limitações devido as hipóteses simplificadoras assumidas e, portanto, um refinamento exagerado no programa pode não trazer resultados esperados.

Finalizando, na resolução de alguns problemas, recomenda-se a observação detalhada das iterações, sub-iterações e precisões envolvidas pois estas influenciam diretamente na velocidade de execução do programa. Não convém, portanto, exigir uma precisão muito grande nem um número elevado de iterações pois os resultados não serão tão satisfatórios e a execução do programa pelo computador tornar-se-á muito lenta.

ANEXO A - Fluxograma e Diagrama



Ler Mo
Enquanto Mf <> 1 Faça
Com i <- 0 .. n Faça
Enquanto ERRO < E Faça
Com j <- 0 .. m Faça
Mach (i.dL+j.ddL) <- Mach + d Mach
ERRO <- $\frac{Mach - Mach_{anterior}}{Mach_{anterior}}$
m <- 2.m
Se Mf <> 1 Então
Se Mf < 1
Então Mmin <- Mo
Senão Mmax <- Mo
Mo <- $\frac{M_{max} + M_{min}}{2}$
Próximo trecho ...

```
Intervalo("l23").Selecionar
Spill = CélulaAtiva
Intervalo("g21").Selecionar
LOOP2 = CélulaAtiva
```

Gen_Iterações

```
' Solucao
'Primeiro LOOP
```

```
is = 0
Mmin = 0
Mmax = 1
Mach(n) = Mo
LOOP1 = 1
Enquanto (LOOP1 = 1)
```

```
Intervalo("h5:q120").Limpar
Intervalo("n4").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mach(0)
Intervalo("j5").Selecionar
```

```
pv = 1
dL = L1 / n
i = 1
m = dn
conv = 1
```

```
Enquanto ((i <= n) E (conv = 1))
  Se m >= 8 Então
    m = m / 8
  Senão
    m = 1
  Fim Se
  er = 1
  conv = 1
```

```
Enquanto ((er > err) E (conv = 1))
  Mpo = Mach(i - 1)
  Tpo = Temp(i - 1)
  Ppo = Pres(i - 1)
  Dpo = Dens(i - 1)
  ddL = dL / m
```

```
A = Ao + (Ai - Ao) / n * (i - 1)
D = Do + (Di - Do) / n * (i - 1)
j = 1
```

```
Enquanto j <= m
  x = (i - 1) * dL + (j - 1) * ddL
  xp = (i - 1) * dL + (j) * ddL
  dA = (Ai - Ao) / n / m
  dD = (Di - Do) / n / m
  A = A + dA
  D = D + dD
```

```
FM = (1 + (k - 1) / 2 * Mpo ^ 2) / (1 - Mpo ^ 2)
cAM = -2 * FM * dA / A
cFM = (k * Mpo ^ 2 * FM * (4 * f * ddL / D))
dQ = Q / n / m / 2
```

```

cQM = (1 + k * Mpo ^ 2) / (1 - Mpo ^ 2) * dQ / (Cp * Tpo)
dM2 = Mpo ^ 2 * (cAM + cFM + cQM)
dM = dM2 / (2 * Mpo)
Mpf = Mpo + dM

```

```

FT = (k - 1) * Mpo ^ 2 / (1 - Mpo ^ 2)
cAT = FT * dA / A
cFT = -k * FT * Mpo ^ 2 / 2 * (4 * f * ddL / D)
cQT = (1 - k * Mpo ^ 2) / (1 - Mpo ^ 2) * dQ / (Cp * Tpo)
dT = Tpo * (cAT + cFT + cQT)
Tpf = Tpo + dT

```

```

FP = k * Mpo ^ 2 / (1 - Mpo ^ 2)
cAP = FP * dA / A
cFP = -FP / 2 * (1 + (k - 1) * Mpo ^ 2) * (4 * f * ddL / D)
cQP = -FP * dQ / (Cp * Tpo)
dP = Ppo * (cAP + cFP + cQP)
Ppf = Ppo + dP

```

```

FD = 1 / (1 - Mpo ^ 2)
cADe = Mpo ^ 2 * FD * dA / A
cFD = -k * Mpo ^ 2 * FD / 2 * (4 * f * ddL / D)
cQD = -FD * dQ / (Cp * Tpo)
dD = Dpo * (cADe + cFD + cQD)
Dpf = Dpo + dD

```

```

Mpo = Mpf
Tpo = Tpf
Ppo = Ppf
Dpo = Dpf

```

```

j = j + 1
FimEnquanto 'j

```

```

Se pv = 1 Então
    er = 1
    pv = 0
    Senão
        erm = Abs((Mpf - Mpfa) / Mpfa)
        erp = 0 'Abs((Ppf - Ppfa) / Ppfa)
        Se erm > erp Então er = erm Senão er = erp
        Se (((er - ERANT) * 100) > 20) Ou (m > dnmax))

```

```

Então conv = 0
Fim Se

```

```

ERANT = er

```

```

Mpfa = Mpf
Ppfa = Ppf

```

```

m = m * 2
CélulaAtiva.FórmulaLlC1 = m
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaLlC1 = er * 100
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 3).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaLlC1 = Mpf
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 4).Selecionar
'CélulaAtiva.FórmulaLlC1 = dQ

```

```

CélulaAtiva.Deslocamento(0; -8).Selecionar

FimEnquanto 'SubLoop de solução para satisfazer erro

Mach(i) = Mpf
Temp(i) = Tpf
Pres(i) = Ppf
Dens(i) = Dpf
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; -1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = i
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = j - 1
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = er * 100
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = xp
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = A
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mpf
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Tpf
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Ppf
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Dpf
    CélulaAtiva.Deslocamento(1; -7).Selecionar

i = i + 1
FimEnquanto 'i

Mspillmin(is) = Mmin
Mspillmax(is) = Mmax
Mspill(is) = Mach(0)
is = is + 1

Se conv = 1 Então
    Mmin = Mach(0)
    Senão
        Mmax = Mach(0)
Fim Se

Se Abs(Mach(n) - 1) < 0,035 Então
    Mach(n) = 1,001
    Senão
        Mach(0) = (Mmax + Mmin) / 2
    Fim Se

Se ((Mach(n) = 1,001) Ou (Spill = Falso)) Então LOOP1 = 0

FimEnquanto 'Spill

'Segundo LOOP

pv = 1
dL = L2 / n
'm = dn
conv = 1

```

```

i = 1
Enquanto ((i <= n) E (conv = 1) E (LOOP2 = Verdadeiro))
  Se m >= 8 Então
    m = m / 8
  Senão
    m = 1
Fim Se
er = 1

conv = 1

Enquanto ((er > err) E (conv = 1))
  Mpo = Mach(n + i - 1)
  Tpo = Temp(n + i - 1)
  Ppo = Pres(n + i - 1)
  Dpo = Dens(n + i - 1)
  ddL = dL / m

  A = Ai + (Af - Ai) / n * (i - 1)
  D = Di + (Df - Di) / n * (i - 1)
  j = 1
  Enquanto j <= m
    x = L1 + (i - 1) * dL + (j - 1) * ddL
    xp = L1 + (i - 1) * dL + (j) * ddL
    dA = (Af - Ai) / n / m
    dD = (Df - Di) / n / m
    A = A + dA
    D = D + dD
    FM = (1 + (k - 1) / 2 * Mpo ^ 2) / (1 - Mpo ^ 2)
    cAM = -2 * FM * dA / A
    cFM = (k * Mpo ^ 2 * FM * (4 * f * ddL / D))
    dQ = Q / n / m / 2
    cQM = (1 + k * Mpo ^ 2) / (1 - Mpo ^ 2) * dQ / (Cp * Tpo)
    dM2 = Mpo ^ 2 * (cAM + cFM + cQM)
    dM = dM2 / (2 * Mpo)
    Mpf = Mpo + dM

    FT = (k - 1) * Mpo ^ 2 / (1 - Mpo ^ 2)
    cAT = FT * dA / A
    cFT = -k * FT * Mpo ^ 2 / 2 * (4 * f * ddL / D)
    cQT = (1 - k * Mpo ^ 2) / (1 - Mpo ^ 2) * dQ / (Cp * Tpo)
    dT = Tpo * (cAT + cFT + cQT)
    Tpf = Tpo + dT

    FP = k * Mpo ^ 2 / (1 - Mpo ^ 2)
    cAP = FP * dA / A
    cFP = -FP / 2 * (1 + (k - 1) * Mpo ^ 2) * (4 * f * ddL / D)
    cQP = -FP * dQ / (Cp * Tpo)
    dP = Ppo * (cAP + cFP + cQP)
    Ppf = Ppo + dP

    FD = 1 / (1 - Mpo ^ 2)
    cADe = Mpo ^ 2 * FD * dA / A
    cFD = -k * Mpo ^ 2 * FD / 2 * (4 * f * ddL / D)
    cQD = -FD * dQ / (Cp * Tpo)
    dD = Dpo * (cADe + cFD + cQD)
    Dpf = Dpo + dD

  Mpo = Mpf
  Tpo = Tpf

```

```
Ppo = Ppf
Dpo = Dpf
```

```
j = j + 1
FimEnquanto 'j
```

```
Se pv = 1 Então
    er = 1
    pv = 0
Senão
    erm = Abs((Mpf - Mpfa) / Mpfa)
    erp = 0 'Abs((Ppf - Ppfa) / Ppfa)
    Se erm > erp Então
        er = erm
    Senão er = erp
Fim Se
Se Abs((er - ERANT) * 100) > 100 Então
    conv = 0
Fim Se
Fim Se
```

```
ERANT = er
```

```
Mpfa = Mpf
Ppfa = Ppf
m = m * 2
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = m
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = er * 100
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 3).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mpf
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 4).Selecionar
'CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = dQ
CélulaAtiva.Deslocamento(0; -8).Selecionar
```

```
FimEnquanto 'SubLoop de solução para satisfazer erro
```

```
Mach(n + i) = Mpf
Temp(n + i) = Tpf
Pres(n + i) = Ppf
Dens(n + i) = Dpf
```

```
CélulaAtiva.Deslocamento(0; -1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = n + i
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = j - 1
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = er * 100
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = xp
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = A
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mpf
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Tpf
CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Ppf
```

```

        CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
        CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Dpf
        CélulaAtiva.Deslocamento(1; -7).Selecionar

    i = i + 1
    FimEnquanto 'i
'FIM do Segundo LOOP

Se conv = 1 Então      'Verifica convergência

' Ajustes de Pós-Processamento
Intervalo("i2:j120").Selecionar
Seleção.FormatosNúmero = "0"
Intervalo("k2:k120").Selecionar
Seleção.FormatosNúmero = "0,000"
Intervalo("l2: q120 ").Selecionar
Seleção.FormatosNúmero = "0,00"
Intervalo("i2:q120").Selecionar
Seleção.AlinhamentoHorizontal = xlCentralizado

Intervalo("u4:z120").Limpar

Intervalo("u4").Selecionar
isa = 0
Enquanto isa < is
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = isa
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mspill(isa)
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mspillmax(isa)
    CélulaAtiva.Deslocamento(0; 1).Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mspillmin(isa)
    CélulaAtiva.Deslocamento(1; -3).Selecionar
    isa = isa + 1
FimEnquanto

' Escreve Dados
Generalizado

Se Spill = Verdadeiro Então
    Intervalo("l9").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mach(0)
Senão
    Intervalo("l9").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "_"
Fim Se

Se LOOP2 = Verdadeiro Então
    Intervalo("o13").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Mach(n + i - 1)
    Intervalo("o15").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Temp(n + i - 1)
    Intervalo("o17").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Pres(n + i - 1)
    Intervalo("o19").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = Dens(n + i - 1)
Senão
    Intervalo("o13").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "_"
    Intervalo("o15").Selecionar

```

FANNO

```
Proc OBTER_F()
  Intervalo("k11").Selecionar
  CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "0,02"
  Intervalo("M6").Selecionar
  JanelaAtiva.RolarRapidamente ParaEsquerda:=1
  Intervalo("M8").AtingirMeta Meta:=0;
CélulaVariável:=Intervalo("k11")
  JanelaAtiva.RolarRapidamente ParaEsquerda:=1
Fim Proc

Proc Fanno_Atrito()
'Macro para resolver equações de temperatura e pressão
  Intervalo("h14").Selecionar
  h = CélulaAtiva
```

```
  Intervalo("c15").Selecionar
  m1 = CélulaAtiva
  CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
  m2 = CélulaAtiva
  CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
  m3 = CélulaAtiva
  CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
  m4 = CélulaAtiva
  Intervalo("f15").Selecionar
  m5 = CélulaAtiva
  CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
  m6 = CélulaAtiva
  CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
  m7 = CélulaAtiva

  Se ((m1 <= 0 E h <> 1) Ou (m2 <= 0 E h <> 2) Ou (m4 < 0 E h <> 4) Ou
(m5 < 0 E h <> 5) Ou (m6 < 0 E h <> 6) Ou (m7 < 0 E h <> 7)) Ou (m3 < 1
E h <> 3) Então
    CxMsg ("Dados de entrada incorretos. Checar de valores de
temperatura , Mach , Diâmetro , Dx são maiores que zero e valor de k
maior que um."); 16; " Erro "
    Senão
      Intervalo("D5").Selecionar
      CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "0,1"
      Intervalo("D6").Selecionar
      Intervalo("E10").AtingirMeta Meta:=0;
CélulaVariável:=Intervalo("D5")
```

```
  Intervalo("d5").Selecionar
  resp = CélulaAtiva
```

```
  Selecionar Caso h
  Caso For = 1
    Intervalo("c15").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
  Caso For = 2
    Intervalo("c17").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
  Caso For = 3
    Intervalo("c19").Selecionar
    CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
```

```

Intervalo("c17").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Caso For = 3
Intervalo("c19").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Caso For = 4
Intervalo("c21").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Caso For = 5
Intervalo("c23").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Caso For = 6
Intervalo("c25").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Caso For = 7
Intervalo("c27").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Fim Selecionar
Fim Se
Fim Proc

```

'RAYLEIGH

Proc Rayleigh_Q()

```

Intervalo("F16").Selecionar
h = CélulaAtiva

Intervalo("c15").Selecionar
m1 = CélulaAtiva
CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
m2 = CélulaAtiva
CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
m3 = CélulaAtiva
CélulaAtiva.Deslocamento(2#).Selecionar
m4 = CélulaAtiva

Se ((m2 <= 0 E h <> 2) Ou (m3 < 0 E h <> 3) Ou (m4 < 0 E h <> 4))
Então
  CxMsg ("Dados de entrada incorretos. Checar se valores de
temperatura e calor específicos são positivos."); 16; " Erro "
Senão
  Intervalo("D5").Selecionar
  CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = "0,1"
  Intervalo("D6").Selecionar
  Intervalo("E10").AtingirMeta Meta:=0;
  CélulaVariável:=Intervalo("D5")

```

```

Intervalo("d5").Selecionar
resp = CélulaAtiva

```

```

Selecionar Caso h
Caso For = 1
Intervalo("c15").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp
Caso For = 2
Intervalo("c17").Selecionar
CélulaAtiva.FórmulaL1C1 = resp

```

```

CélulaAtiva.FormulaL1C1 = resp
Fim Selecionar

Bip
CxMsg ("Problema resolvido com sucesso"); 16; " Operação finalizada
"

Fim Se
Fim Proc

' Macros para Transição entre Menus

Proc Fanno()
    Planilhas("Fanno").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc FannoT()
    Planilhas("Fanno_T").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc FannoP()
    Planilhas("Fanno_P").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc FannoF()
    Planilhas("Fanno_F").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc FannoS()
    Planilhas("Fanno_S").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc Rayleigh()
    Planilhas("Rayleigh").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc RayleighT()
    Planilhas("Rayleigh_T").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc RaileighP()
    Planilhas("Rayleigh_P").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc RayleighR()
    Planilhas("Rayleigh_R").Selecionar
    Intervalo("A1").Selecionar
Fim Proc

Proc RayleighTo()

```

```
Planilhas("Rayleigh_To").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc RayleighPo()  
Planilhas("Rayleigh_Po").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc RayleighQ()  
Planilhas("Rayleigh_Q").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc VarÁrea()  
Planilhas("VarÁrea").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc VarÁreaT()  
Planilhas("VarÁrea_T").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc VarÁreaP()  
Planilhas("VarÁrea_P").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc VarÁreaD()  
Planilhas("VarÁrea_D").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc VarÁreaA()  
Planilhas("VarÁrea_A").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc ChoqueN()  
Planilhas("ChoqueN").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc ChoqueNT()  
Planilhas("ChoqueN_T").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc ChoqueNP()  
Planilhas("ChoqueN_P").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc ChoqueND()  
Planilhas("ChoqueN_D").Selecionar  
Intervalo("A1").Selecionar  
Fim Proc
```

```
Proc ChoqueNDS()
```