

**PROJETO MECÂNICO
TRABALHO DE FORMATURA - 1996**

MOTOR - FOGUETE

(Parte I)

**Estudos da Queima do Propelente
software "APOGEU"**

Orientador : Prof. Dr. Marcos Pimenta

Alunos : Marcio Delchiaro Nieble N° USP 1978564

Ulisses Maximiano

Agradecimentos

Quero aqui agradecer a todos aqueles que me estimularam, apoiaram e tornaram viável a elaboração deste trabalho, o qual venho tentando fazer há muito e somente agora foi concebido.

Agradeço aos amigos Fernando Stancato e José Miraglia Jr. pela motivação e apoio durante minha participação no Grupo de Foguetes Experimentais, que já não mais existe, tendo sido criado com o intuito de divulgar o conhecimento técnico na área.

Agradeço ao meu professor e orientador Marcos M. Pimenta, pela atenção e pelo incentivo que representa não só a mim mas a todos os alunos da opção de Energia e Fluidos desde o curso de Termodinâmica dos Escoamentos Compressíveis.

Sou muito grato aos amigos da empresa GESPI que apoiaram, motivaram, participaram e ajudaram-nos em nosso trabalho. Fica aqui o agradecimento especial aos colegas Scarparo, Picolini e Antônio Nogueira Candido que pessoalmente motivaram-me neste trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas de curso que também se interessaram pelo tema e tanto discutimos o ponto.

Marcio Delchiaro Nieble

ÍNDICE

I-) Introdução,1

II-) Objetivos,2

III-) Escoamento Através do Bocal,3

IV-) Dinâmica Interna da Câmara de Combustão,7

IV.I-) Introdução,7

IV.II-) Desenvolvimento Teórico,7

V-) Software Desenvolvido,15

V.I-) Planilha Explicativa,17

V.II-) O Software “APOGEU”,22

VI-) Alguns Resultados,34

VII-) Conclusão,38

VIII-) Apêndices

IX-) Bibliografia

I-) Introdução:

A motivação para este trabalho foi a idéia de se estudar e fazer um pequeno foguete para agricultura. O estudo de características do escoamento compressível é feito através de um ponto de vista diferente, onde a pressão interna (de estagnação) não permanece constante, e isto é o suficiente para se ter variações de parâmetros de tal forma a ser preciso um software para tal estudo. Este foguete levaria um sal que seria espalhado nas nuvens com fins de evitar chuvas de granizo e outras condições de intempérie que prejudicariam a lavoura.

O combustível do foguete daqui para frente será mencionado como o grão-propelente ou simplesmente propelente.

Dois tipos de geometria de queima serão estudadas, a primeira é a cilíndrica e a segunda a estrelada. A primeira, por sua maior simplicidade geométrica permite uma análise mais profunda, já a segunda, mais complexa, nos levará a estudar um caso específico. A execução deste tipo de cálculo em calculadoras científicas é praticamente impossível pois exige um número muito grande de iterações, demandando assim um tempo impraticável na execução de um projeto.

Inicialmente o software foi feito em EXCEL e depois feito em Turbo Pascal, com algumas modificações e aperfeiçoamentos.

II-) Objetivos:

Este trabalho visa a elaboração de um software que simula numericamente a evolução no tempo da pressão interna de um foguete combustível sólido dados os parâmetros da queima deste combustível.

Para ser realizado este trabalho, há a necessidade de se ressaltar alguns pontos, antes de ter-se iniciado a parte técnica. O estudo detalhado da combustão em si não é o objetivo deste relatório, e sim a dinâmica interna da câmara de combustão, apesar de se fazer necessário alguns comentários sobre a queima do propelente. Esta queima é uma reação de combustão bastante particular, pois trata-se de uma reação onde o combustível e o comburente já estão pré-misturados e encontram-se no estado sólido.

Nos livros que existem atualmente sobre foguetes e sobre combustão tratam o assunto como sendo em regime permanente sempre. Não se cita nada sobre transitórios ou alterações na pressão de combustão ou na velocidade de queima e não são mostrados métodos de cálculo para estas condições. Foi daí que nasceu a idéia de se fazer este trabalho que pudesse, através daquilo que pode-se aprender na literatura existente, caminhar um pouco a mais e tentar extrapolar conhecimentos.

III)- Parte A - Escoamento Através do Bocal

III.I)- Hipóteses Iniciais

A análise de foguetes ideais considera a hipótese de escoamento unidimensional. A utilidade deste conceito é indicada pelo fato de que a performance medida é usualmente dentro de uma faixa de erro de 10% quanto à performance ideal calculada.

Uma unidade propulsora ideal é aquela na qual as seguintes proposições são válidas:

- 1 - O gás de trabalho (propelente) é homogêneo e invariante em composição e em fase através do bocal.
- 2 - O gás de trabalho obedece as leis de gases perfeitos.
- 3 - Não há atrito.
- 4 - O fluxo é adiabático.
- 5 - O escoamento ocorre em regime permanente.
- 6 - O perfil de velocidades do gás é uniforme em qualquer seção normal ao escoamento.
- 7 - O equilíbrio químico está estabelecido ao longo da câmara propulsora e não muda no bocal.

Para um foguete de propelente líquido a teoria idealizada postula um sistema de injeção no qual o combustível e o comburente estão misturados perfeitamente, assim resulta uma substância homogênea.

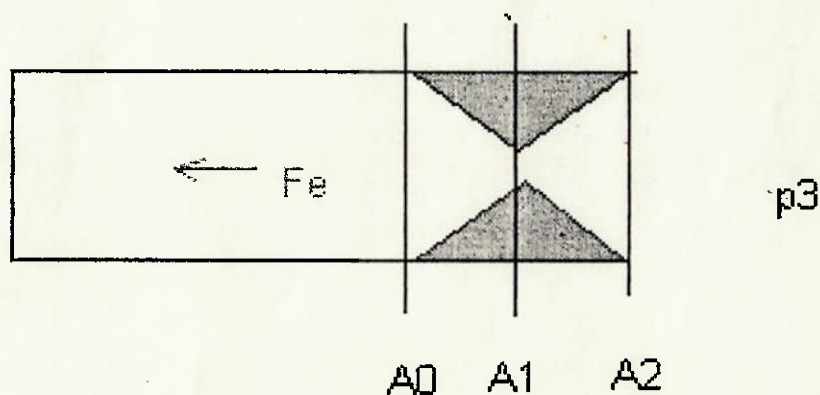
No caso de um foguete de propelente sólido, um propelente homogêneo e um regime de queima uniforme são postulados.

Desde que as temperaturas de combustão sejam altas (2.500 K até 3.600 K) os gases produzidos estarão bem acima de sua respectiva condição de saturação e seguem as leis dos gases perfeitos de maneira bem próxima.

Postulando ausência de atrito, troca de calor nula e regime de escoamento permanente, permite-se o uso das relações de expansão isentrópica no bocal do foguete, assim permitindo a hipótese de máxima conversão de energia térmica em energia cinética. As perdas por atrito são muito difíceis de medir, no entanto são muito pequenas. A energia transferida como calor para as paredes do bocal é normalmente menos do que 2% do total de energia e pode ser desconsiderada.

Embora flutuações na taxa de escoamento de um bocal de foguete existam, sua magnitude é tão pequena que pode-se assumir escoamento em regime permanente.

modelo físico:



Nesse modelo temos as seguintes considerações:

- p_0 é a pressão dentro da câmara de combustão, que é a pressão de projeto p_{proj}
- p_3 é a pressão atmosférica
- F_e é a força de empuxo

- M_0 é o número de Mach na entrada do bocal ; $M_0 = 0$
- o bocal trabalha bloqueado (em regime) e os valores p_1 , M_1 , A_1 , ρ_1 , etc , referem-se à seção crítica e são tratados como p^* , M^* , A^* , ρ^* , etc. $M_1=1$.
- p_2 deve ser maior que p_3 para que não ocorram choques na saída do bocal .

III.II)- Desenvolvimento Teórico

A relação para o cálculo do empuxo é montada com a simples observação da figura acima:

$$F = V_2 \cdot \dot{m} + (p_2 - p_3) \cdot A_2 \quad (1)$$

donde se observa mais um motivo pelo qual p_2 deve ser maior que p_3 .

Com as hipóteses adotadas e através das relações dos gases perfeitos, 1ª lei da Termodinâmica e equação da continuidade, obtemos as relações seguintes :

$$\frac{A_2}{A_0} = \frac{M_0}{M_2} \times \phi^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (2) ,$$

$$\text{onde } \phi = \frac{1 + ((k-1)/2)M_2^2}{1 + ((k-1)/2)M_0^2} \quad (3)$$

$$\frac{p_0}{p_2} = \phi^{k/(k-1)} \quad (4)$$

$$\frac{T_0}{T_2} = \phi \quad (5)$$

$$\dot{m} = A^* \cdot p_0 \cdot \left[\frac{k \sqrt{(2/k+1)^{k/(k-1)}}}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_0}} \right] \quad (6)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2kRT_0}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{k-1/k} \right]} + V_0^2 \quad (7)$$

$$F_c = A^* \cdot p_1 \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k+1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} + (p_2 - p_3) A_2 \quad (8)$$

k é a razão entre calor específico a pressão constante e calor específico a volume constante, $k=c_p/c_v$.

Devemos lembrar que p_3 não é constante, variando ao longo da atmosfera e em função das condições meteorológicas.

Podemos criar um coeficiente C_F , tal que

$$C_F = \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k+1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} + \frac{p_2 - p_3}{p_0} \cdot \frac{A_2}{A^*} \quad (9)$$

e $F = C_F \cdot A^* \cdot p_0 \quad (10)$

Um gráfico do comportamento do bocal em função da variação de pressão ao longo do bocal pode ser visto no apêndice, sob o título "Figure 3-6".

Também no apêndice existe um diagrama de variação de pressão ao longo do bocal para diferentes tipos de regime.

Para a segunda parte do projeto faremos o estudo bi-dimensional do bocal, que entre outras coisas vai analisar o comportamento das linhas de Mach ao longo de um plano perpendicular ao bocal (admitimos apenas uma variável y num sistema de coordenadas cilíndrico). Neste estudo as linhas de Mach não são mais perpendiculares ao longo de x . Isso pode ser observado na "figura 15.10 do apêndice". Ressaltamos que a própria natureza do estudo considera o escoamento como planar e irrotacional.

IV-) Dinâmica Interna da Câmara de Combustão:

IV.I) Introdução

Nesta parte serão apresentados temas fundamentais como: o propelente, configurações de grão-propelente, velocidade de queima e conservação da massa no volume de controle. Posteriormente, será realizado o desenvolvimento teórico que será utilizado no software.

IV.II-) Desenvolvimento Teórico

- Propelentes Sólidos

O propelente sólido é largamente utilizado por sua relativa simplicidade de operação, pouca manutenção e poucas peças auxiliares. Um motor foguete de propelente sólido é basicamente constituído de:

- Propelente (combustível);
- Hardware (câmara de combustão);
- Bocal;
- Ignitor (pequeno gerador de gases que dá o início à combustão).

Propelentes sólidos geralmente tem aparência plástica e queimam quando expostos a gases a alta temperatura. Há a possibilidade de haver mais de um grão na câmara de combustão.

O grão propelente sólido é um conglomerado de compostos químicos que permitem que ele se sustente por si só a combustão a ser realizada, ou seja, há nele o combustível e o comburente.

Assim que se dá a ignição as partes do grão expostas aos gases quentes começam a queimar sem a ocorrência de detonações ou surtos severos. A combustão consome o propelente em uma direção normal à superfície de queima.

O tamanho do grão, área de queima, e a sua forma geométrica influenciam as características de queima e determinam a pressão de operação, empuxo e tempo de queima.

- Configurações do Grão

A geometria inicial do grão propelente define a área inicialmente exposta aos gases quentes, que corresponde à área de queima inicial. Geometricamente pode-se obter a evolução desta configuração conforme se dá a reação, porém sem a influência do tempo.

Na Fig.1 apresentamos algumas configurações. Neste trabalho não se tratará de configurações de queima tipo end-burning.

O empuxo de um foguete é o produto do fluxo mássico pela velocidade de exaustão dos gases. Se for necessário um grande empuxo, note-se que se faz necessária uma grande vazão mássica. Isto pode ser conseguido através de uma grande área de queima, uma velocidade de queima alta, ou ambos.

Um pequeno empuxo, por um período de tempo maior é também conseguido através de alterações na área de queima do propelente e de sua velocidade de queima.

Além da variação existente na área de queima do grão-propelente, é possível limitar a área de queima através de inibidores. Estes são substâncias plásticas que revestem as áreas que não se deseja inicialmente que participem da reação.

- Velocidade de Queima

A velocidade de queima se dá na direção normal a superfície de queima. Esta velocidade é chamada de taxa de queima (burning rate). Na formula que será aqui apresentada a taxa de queima (r_b) é expressa em polegadas por segundo, a pressão (p_c) expressa em psi, a e n são parâmetros.

$$r_b = c \cdot p_c^n \quad (11)$$

A constante c varia de acordo com a temperatura inicial do propelente antes da combustão. Seu valor situa-se no intervalo entre 0,05 e 0,002. A constante n assume valores entre 0,4 e 0,85 dependendo do grau de confinamento da combustão.

A pressão de combustão p_c é muito sensível ao parâmetro n . Quando n é alto, pequena variação de pressão causa grandes variações de velocidade de queima.

Na prática a velocidade de queima, bem como os parâmetros aqui citados são determinados experimentalmente.

- Equação da Conservação da Massa

Aqui é apresentada a equação básica sobre a qual esta parte do trabalho irá se desenvolver. É o princípio da continuidade e diz que a massa de gás produzida pelo propelente no interior do foguete ($\dot{m}_{prop}$) menos a massa de gás que sai pelo bocal ($\dot{m}_{boc}$) é igual a massa de gás que se acumula do interior do foguete ($\dot{m}_{ac}$), para o dado volume de controle. O V.C. está definido na Fig. 2.

$$\dot{m}_{prop} - \dot{m}_{boc} = \dot{m}_{ac} \quad (12)$$

Mas a massa produzida pelo propelente é:

$$\dot{m}_{prop} = \rho_{prop} \cdot r_b \cdot S_b \quad (13)$$

Onde:

ρ_{prop} : densidade do propelente;

S_b : Área de queima.

A massa que deixa o volume de controle é dada pela expressão já desenvolvida anteriormente neste trabalho (depende da geometria do bocal, da temperatura de combustão, da pressão de combustão, da área da garganta do bocal e do k do gás).

$$\dot{m}_{boc} = A^* \cdot P_o \cdot \left[\frac{k \sqrt{(2/k + 1)^{\frac{k+1}{k-1}}}}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_o}} \right] \quad (14)$$

Através do desenvolvimento dos termos desta equação será obtida a relação entre todos os parâmetros importantes de projeto do foguete.

Pode-se assumir que o regime seja permanente desde que a área de queima não varie, a taxa de produção de propelente seja constante, a temperatura e pressão internas sejam constantes.

Note-se que se a área de queima variar, teremos uma variação em $\dot{m}_{prop}$, desde que o bocal esteja trabalhando bloqueado a vazão através deste continua constante, assim haverá variação em $\dot{m}_{ac}$ causando aumento de pressão que por sua vez causa aumento na velocidade de queima e começam a aparecer variações muito grandes na dinâmica da queima. O software calcula estas variações.

- Desenvolvimento das Relações Termodinâmicas do Escoamento Compressível

Direcionadas para a Elaboração do Software

O estado inicial de todas as variáveis e parâmetros do processo é conhecido, o que não se sabe é a sua evolução no tempo. Portanto este software, sendo carregado com as informações do “estado zero”, calcula sempre o próximo instante e assim sucessivamente.

Os dados necessários para se começar algum cálculo são:

- Diâmetro da garganta do bocal;
- Comprimento do grão-propelente;
- Pressão de Combustão de Projeto:

É a pressão para a qual foi projetado o foguete e sua estrutura. Neste projeto a pressão interna (pressão de Combustão de projeto) é simplesmente estimada pelo autor do projeto;

- Parâmetro de queima c ;
- Parâmetro de queima n ;
- Mol do Propelente;
- Densidade do propelente;
- Relação C_p/C_v (k) do propelente;
- Temperatura de queima;
- Incremento de tempo (para fins de cálculo no software);
- Raio interno e externo do propelente, no caso de grão cilíndrico;
- Dimensões do propelente, no caso de grão estrelado.

Tendo estes dados, Parte-se para o cálculo das propriedades iniciais do escoamento:

$$R = \frac{8314}{Mol} \quad (15)$$

$$FI = \frac{\left[1 + \frac{(k-1)}{2}\right] \cdot M_1^2}{\left[1 + \frac{(k-1)}{2}\right] \cdot M_2^2} \quad (16) \quad , \text{ FI é uma variável para simplificar os}$$

cálculos.

$t = 0$, tempo recebe valor zero.

Em seguida vai-se calcular o volume interno da câmara de combustão, e a área de queima do propelente, que são parâmetros que dependem da geometria deste e da

sua forma de queimar-se ao longo do tempo. Portanto tem-se para o grão estrelado e para o grão cilíndrico formas diferentes de cálculo.

A pressão de combustão inicial é assumida como sendo a pressão imposta pelos gases de ignição preenchendo o volume interno da câmara. Este valor de pressão tem que coincidir com a pressão de combustão de projeto.

O que é chamado de pressão de combustão acumulada é a pressão devida especificamente aos gases produzidos pelo propelente. Este valor é zero pois no instante inicial o propelente não está queimando-se. Portanto a pressão de combustão total é somente devida à parcela dos gases de ignição.

A pressão no estado crítico (assumido sendo na garganta do bocal), é dada por:

$$P_C = P_{CTOTAL} \cdot (FI)^{\frac{k}{k-1}} \quad (17)$$

A densidade dos gases de combustão na câmara é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{v} = \frac{P}{R \cdot T} \quad (18)$$

Calcula-se então a densidade dos gases na seção crítica do bocal:

$$\frac{1}{v} = \frac{P_{CRIT}}{R \cdot T \cdot FI} \quad (19)$$

Há um parâmetro, η , que é um auxiliar para o cálculo da vazão mássica através do bocal. Sua expressão é:

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_{CRIT}}{P_{ESTAG}} \right)^{\left(\frac{k-1}{k} \right)} \quad (20)$$

A velocidade dos gases na garganta d bocal é assumida zero.

Como o propelente ainda não está queimando, tem-se velocidade de queima, $\dot{m}_{PROP}$, e $\dot{m}_{BOCAL}$ iguais a zero.

Assim, tem-se no estado inicial todas as propriedades do escoamento e da queima. A partir daí pode-se proceder o incremento de tempo e começar a recalcular todos os parâmetros. O artifício que o programa usa é o seguinte: a velocidade de queima é calculada baseando-se na pressão de combustão total do instante anterior e não do instante atual. Assim, se a variação de pressão não for muito grande em um delta t, pode-se através deste cálculo chegar a valores muito próximos do real. Isto é feito com um delta t muito pequeno, da ordem de milésimos de segundo.

Com a nova velocidade de queima e sabendo a geometria do propelente, calcula-se a taxa de produção de gás naquele instante pela equação 13. A vazão mássica através do bocal é dada pela expressão:

$$\dot{m}_{BOC} = \rho_{CRIT} \cdot \pi \cdot A_T^2 \cdot v_{SEC.CRIT} \quad (21)$$

Onde a velocidade na seção crítica é:

$$v_{SEC.CRIT} = \sqrt{\frac{(2 \cdot k \cdot T_0 \cdot \eta)}{(k - 1)}} \quad (22)$$

A massa de gás interna à câmara de combustão é dada pela expressão 12.

A pressão interna é então recalculada através da massa de gás no interior do foguete e do volume interno. Todos os outros parâmetros são calculados através das expressões já citadas para calcular as condições iniciais de queima.

V -) Software Desenvolvido:

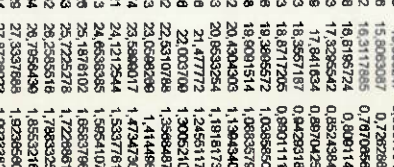
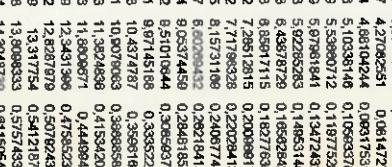
O software foi inicialmente feito em EXCEL , pois era um meio mais fácil e claro de se ver o mecanismo de cálculo. Este software calcula apenas os casos de geometria cilíndrica de grão-propelente. Posteriormente foi feita uma programação em Turbo Pascal e esta sim permite o estudo de casos como o grão estrelado, pois o cálculo da área de queima deste tipo de geometria pode ser aproximada por uma função e isto é o que foi feito. Desta maneira obteve-se um software que calcula praticamente qualquer configuração cilíndrica e uma particular configuração estrelada, devido à maior complexidade geométrica desta última.

A configuração cilíndrica estudada foi a seguinte:

- Raio externo: 15 mm;
- Estrela de sete pontas;
- Raio virtual menor: 5 mm;
- Raio virtual maior: 9 mm.

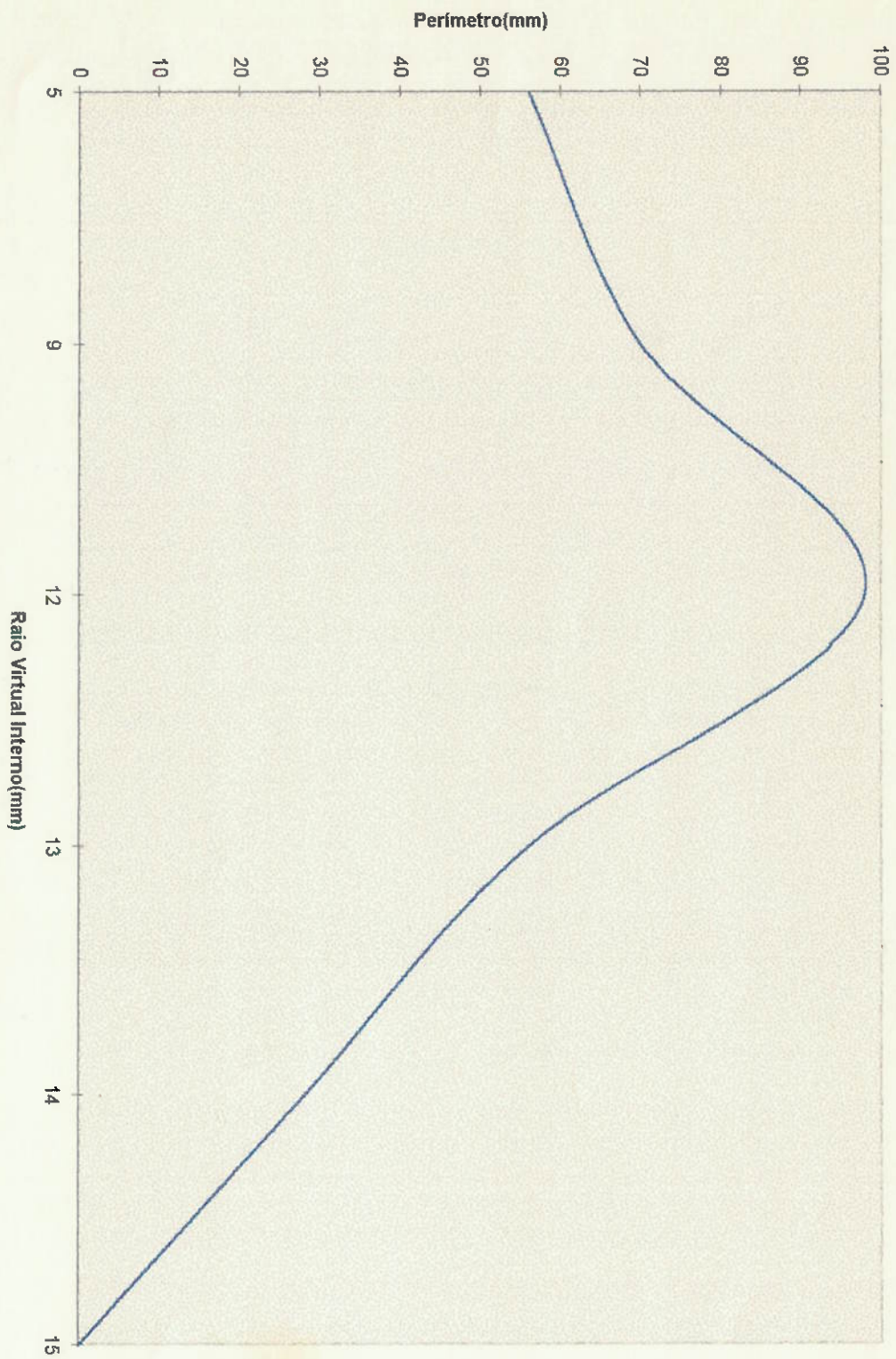
Pode-se ver a geometria adotada na Fig. 3, onde aparecem os conceitos de raio virtual menor e maior que correspondem respectivamente aos raios das circunferências inscrita e circunscrita à estrela. Pode-se notar que conforme a queima acontece a área de queima aumenta enquanto o raio virtual maior não atinge o raio externo limitado pela câmara de combustão. Quando isto acontece, a área de queima começa a diminuir bruscamente, até chegar a zero com o raio virtual menor igualar-se ao raio externo já fixado.

Dos dois gráficos obtidos (perímetro de queima em função do raio virtual menor e área livre em função do raio virtual interno) podemos aproximar funções com o objetivo de interpolar valores aos já observados. Observa-se neste ponto que os parâmetros ficam em função do raio virtual menor pois não podem depender simplesmente do tempo, já que não se sabe a velocidade de queima. Estas funções são utilizadas no software desenvolvido.

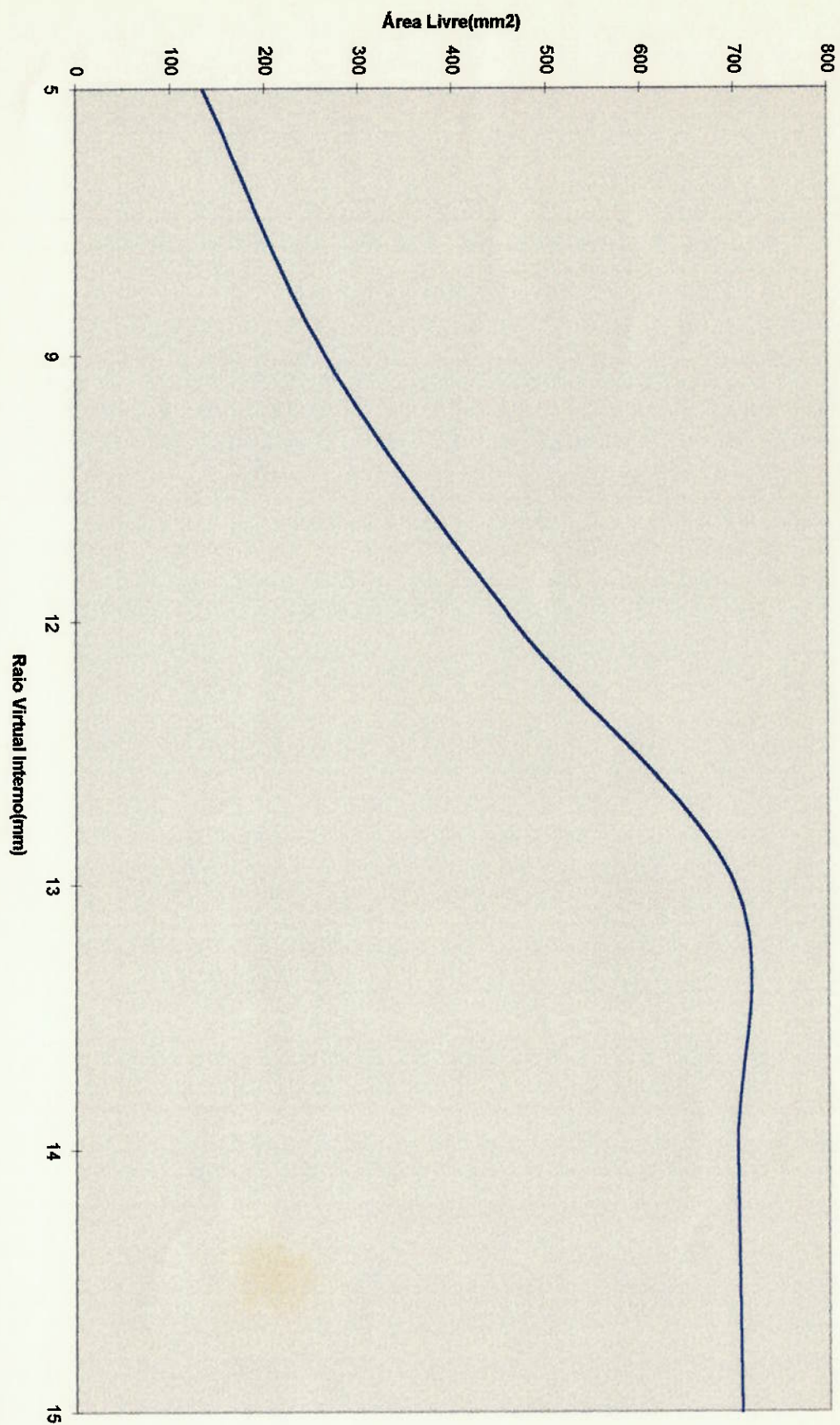


0.05974165	0.4325	0.01436284	0.35651815	0.5082572	0	8635596.0	12817.362	12817.362	86372800	51740719.1	7532.40427	1250.51437	788.68732	0.0475	271.751818	0	5.470479	0.13865017	91.447878	1.47618586	89.9718631	18.1408807
0.05706903	0.4335	0.01453633	0.35870178	0.50835853	0	86418410.8	12820.3765	12820.3765	86393405.3	51752900.3	7534.17054	1250.98877	788.68445	0.0475	271.751818	0	5.4715063	0.13867634	92.0253563	1.47683775	90.5465185	18.417032
0.05746347	0.4375	0.01471864	0.36038482	0.51245445	0	86439670.5	12823.3815	12823.3815	8641565.2	51764837.7	7535.81587	1251.06671	788.027315	0.0475	271.751818	0	5.4725736	0.13867775	92.807344	1.47728887	91.1254581	18.644456
0.05778397	0.44	0.01486546	0.36208827	0.51555584	0	8645728.0	12826.3085	12826.3085	8643246	51776834.1	7537.64004	1251.38723	788.204048	0.0475	271.751818	0	5.4735335	0.13867775	93.1787342	1.47772888	91.7254014	18.8747019
0.05813154	0.4425	0.01507532	0.36352572	0.51868501	0	86477301.3	12829.2211	12829.2211	86454255	51788591.7	7539.3435	1251.67714	788.378722	0.0475	271.751818	0	5.47452785	0.13867801	94.334517	1.47818837	92.278674	18.1048011
0.05842957	0.445	0.01524378	0.36473636	0.52175884	0	86497241.3	12832.1	12832.1	86474215	51800213	7541.03068	1251.95227	788.551396	0.0475	271.751818	0	5.47551059	0.13867801	94.8125659	1.47865354	92.8594478	18.3528383
0.05862867	0.4475	0.01543769	0.366281	0.52488182	0	86518988.7	12834.9457	12834.9457	86493635.1	51811700.4	7542.88655	1252.22881	788.720207	0.0475	271.751818	0	5.47648196	0.13867801	95.334517	1.47912836	93.4343004	18.5055888
0.05887465	0.45	0.01562105	0.36781082	0.52796455	0	86539400.2	12837.7587	12837.7587	8651320.6	51823058	7544.34012	1252.50498	788.880729	0.0475	271.751818	0	5.47744218	0.13867801	95.8083042	1.47960342	94.0182004	18.6555888
0.05917632	0.4525	0.01580523	0.36936812	0.53108185	0	86559400.2	12840.2892	12840.2892	86533461.8	51834282.2	7545.97083	1252.77438	788.980736	0.0475	271.751818	0	5.47839412	0.13867801	96.2803042	1.48007836	94.6034259	18.8055888
0.05942828	0.455	0.01600001	0.37187722	0.53417185	0	86579400.2	12842.9077	12842.9077	86553461.8	51845381.2	7547.58028	1253.04458	789.080736	0.0475	271.751818	0	5.47934284	0.13867801	96.75224478	1.48055342	95.1907181	18.9555888
0.059681628	0.458	0.01619791	0.37436335	0.53727185	0	86599400.2	12845.9677	12845.9677	86573461.8	51856355.1	7549.17149	1253.30818	789.180736	0.0475	271.751818	0	5.48025785	0.13867801	97.224478	1.48102836	95.7748233	19.1055888
0.060021828	0.46	0.01639401	0.37685087	0.54036087	0	86619400.2	12848.9677	12848.9677	86593461.8	51867205.9	7550.74468	1253.57141	789.280736	0.0475	271.751818	0	5.48117502	0.13867801	97.696867	1.48150342	96.3582831	19.2555888
0.060281431	0.4625	0.01659305	0.37933681	0.54345087	0	86639400.2	12851.9537	12851.9537	86613461.8	51877925.8	7552.30089	1253.83074	789.380736	0.0475	271.751818	0	5.48208212	0.13867801	98.169867	1.48197836	96.940404	19.4055888
0.06054131	0.465	0.01679278	0.38181186	0.54654087	0	86659400.2	12854.9677	12854.9677	86633461.8	51888401.3	7553.85077	1254.09467	789.480736	0.0475	271.751818	0	5.48299112	0.13867801	98.640867	1.48245342	97.521119	19.5555888
0.060810569	0.4675	0.01699393	0.38427368	0.54963087	0	86679400.2	12857.9677	12857.9677	86653461.8	51898840.7	7555.39697	1254.35467	789.580736	0.0475	271.751818	0	5.48389602	0.13867801	99.111867	1.48292836	98.093467	19.7055888
0.061081898	0.47	0.01719559	0.38673961	0.55272087	0	86699400.2	12860.9677	12860.9677	86673461.8	51909240.7	7556.9429	1254.61467	789.680736	0.0475	271.751818	0	5.48479351	0.13867801	99.582867	1.48340342	98.664667	19.8555888
0.061352971	0.4725	0.01731889	0.38920684	0.55581087	0	86719400.2	12863.9677	12863.9677	86693461.8	51919640.7	7558.48864	1254.87467	789.780736	0.0475	271.751818	0	5.48569122	0.13867801	100.053867	1.48387836	99.235867	19.9555888
0.061626544	0.475	0.01751285	0.39168787	0.55890087	0	86739400.2	12866.9677	12866.9677	86713461.8	51929988.8	7559.93429	1255.13467	789.880736	0.0475	271.751818	0	5.48658874	0.13867801	100.524867	1.48435342	99.806867	20.0555888
0.06189333	0.4775	0.01770945	0.39416885	0.56199087	0	86759400.2	12869.9677	12869.9677	86733461.8	51940388.8	7561.38048	1255.39467	789.980736	0.0475	271.751818	0	5.48748194	0.13867801	100.995867	1.48482836	100.377867	20.1555888
0.06216077	0.48	0.01790658	0.39664985	0.56508087	0	86779400.2	12872.9677	12872.9677	86753461.8	51950788.8	7562.82668	1255.65467	790.080736	0.0475	271.751818	0	5.48837885	0.13867801	101.466867	1.48530342	100.948867	20.2555888
0.06242822	0.4825	0.01810328	0.40002468	0.56817087	0	86799400.2	12875.9677	12875.9677	86773461.8	51961188.8	7564.27288	1255.91467	790.180736	0.0475	271.751818	0	5.48927576	0.13867801	101.937867	1.48577836	101.519867	20.3555888
0.06269568	0.485	0.01830046	0.40242568	0.57126087	0	86819400.2	12878.9677	12878.9677	86793461.8	51971588.8	7565.71908	1256.17467	790.280736	0.0475	271.751818	0	5.49017267	0.13867801	102.408867	1.48625342	102.090867	20.4555888
0.06296312	0.4875	0.01850072	0.40482668	0.57435087	0	86839400.2	12881.9677	12881.9677	86813461.8	51981988.8	7567.16528	1256.43467	790.380736	0.0475	271.751818	0	5.49106958	0.13867801	102.879867	1.48672836	102.661867	20.5555888
0.06323056	0.49	0.01870135	0.40722768	0.57744087	0	86859400.2	12884.9677	12884.9677	86833461.8	51992388.8	7568.61148	1256.69467	790.480736	0.0475	271.751818	0	5.49196649	0.13867801	103.350867	1.48720342	103.232867	20.6555888
0.06349802	0.4925	0.01890363	0.40962868	0.58053087	0	86879400.2	12887.9677	12887.9677	86853461.8	52002788.8	7570.05768	1256.95467	790.580736	0.0475	271.751818	0	5.49286340	0.13867801	103.821867	1.48767836	103.803867	20.7555888
0.06376548	0.495	0.01910594	0.41202968	0.58362087	0	86899400.2	12890.9677	12890.9677	86873461.8	52013188.8	7571.50388	1257.21467	790.680736	0.0475	271.751818	0	5.49376031	0.13867801	104.292867	1.48815342	104.374867	20.8555888
0.06403294	0.4975	0.01930822	0.41443068	0.58671087	0	86919400.2	12893.9677	12893.9677	86893461.8	52023588.8	7572.95008	1257.47467	790.780736	0.0475	271.751818	0	5.49465722	0.13867801	104.763867	1.48862836	104.945867	20.9555888
0.06430040	0.5	0.01951050	0.41683168	0.58980087	0	86939400.2	12896.9677	12896.9677	86913461.8	52033988.8	7574.39628	1257.73467	790.880736	0.0475	271.751818	0	5.49555413	0.13867801	105.234867	1.48910342	105.516867	21.0555888
0.06456786	0.5025	0.01971278	0.41923268	0.59289087	0	86959400.2	12899.9677	12899.9677	86933461.8	52044388.8	7575.84248	1257.99467	790.980736	0.0475	271.751818	0	5.49645104	0.13867801	105.705867	1.48957836	106.087867	21.1555888
0.06483532	0	0.01991506	0.42163368	0.59598087	0	86979400.2	12902.9677	12902.9677	86953461.8	52054788.8	7577.28868	1258.25467	791.080736	0.0475	271.751818	0	5.49734795	0.13867801	106.176867	1.49005342	106.658867	21.2555888
0.06510278	0	0.02011734	0.42403468	0.59907087	0	86999400.2	12905.9677	12905.9677	86973461.8	52065188.8	7578.73488	1258.51467	791.180736	0.0475	271.751818	0	5.49824486	0.13867801	106.647867	1.49052836	107.229867	21.3555888
0.06537024	0	0.02031962	0.42643568	0.60216087	0	87019400.2	12908.9677	12908.9677	86993461.8	52075588.8	7580.18108	1258.77467	791.280736	0.0475	271.751818	0	5.49914177	0.13867801	107.118867	1.49100342	107.800867	21.4555888
0.06563770	0	0.02052190	0.42883668	0.60525087	0	87039400.2	12911.9677	12911.9677	87013461.8	52085988.8	7581.62728	1259.03467	791.380736	0.0475	271.751818	0	5.49999868	0.13867801	107.589867	1.49147836	108.371867	21.5555888
0.06590516	0	0.02072418	0.43123768	0.60834087	0	87059400.2	12914.9677	12914.9677	87033461.8	52096388.8	7583.07348	1259.29467	791.480736	0.0475	271.751818	0	5.50089559	0.13867801	108.060867	1.49195342	108.942867	21.6555888
0.06617262	0	0.02092646	0.43363868	0.61143087	0	87079400.2	12917.9677	12917.9677	87053461.8	52106788.8	7584.51968	1259.55467	791.580736	0.0475	271.751818	0	5.50179250	0.13867801	108.531867	1.49242836	109.513867	21.7555888
0.06644008	0	0.02112874	0.43603968	0.61452087	0	87099400.2	12920.9677	12920.9677	87073461.8	52117188.8	7585.96588	1259.81467	791.680736	0.0475	271.751818	0	5.50268941	0.13867801	109.002867	1.49290342	110.084867	21.8555888
0.06670754	0	0.02133102	0.43844068	0.61761087	0	87119400.2	12923.9677	12923.9677	87093461.8	52127588.8	7587.41208	1260.07467	791.780736	0.0475	271.751818	0	5.50358632	0.13867801	109.473867	1.49337836	110.655867	21.9555888
0.06697500	0	0.02153330	0.44084168	0.62070087	0	87139400.2	12926.9677	12926.9677	87113461.8	52137988.8	7588.85828	1260.33467	791.880736	0.0475	271.751818	0	5.50448323	0.13867801	109.944867	1.49385342	111.226867	22.0555888
0.06724246	0	0.02173558	0.44324268	0.62379087	0	87159400.2	12929.9677	12929.9677	87133461.8	52148388.8	7590.30448	1260.59467	791.980736	0.								

Perímetro de Queima



Área Livre p/ Cálculo do Volume Interno da Câmara de Combustão



Series1

```

*****
*****Programa Apogeu 1*****
*****Versao 2.1*****
*****Ultima atualizacao em 11/11/96*****
*****Programador:Marcio Delchiaro Nieble*****
*****Orientador : Prof. M. Pimenta*****
*****}

```

```

program Apogeu1;

```

```

uses crt, printer;

```

```

type texto=string[15];

```

```

var projeto,data,resposta,imp,nomfdados,nomfresult,
    respos2,nomfprinc,respos3,CEtext,nomf : texto;
    respond,resp2:char;
    auxcontas1,auxcontas2,auxcontas3,respnum,teste,compr,timecont,
    numprin,tempo,dt,FI,rconst,R,rextr,rvirtmen,rvirtmai:real;
    timer,CE,numintervalos,i,j,l,formasaida,auxil,auxi2,
    colunas,cols,numintdat,numintres,contlinhas,
    restlinhas,contal,sa,sb,sc,sd,contral,contra2,
    auxlin,numlin : integer;
    dadosnum:array[1..12] of real;
    {buff:array[1..2,1..22] of real;}
    result:array[1..23,1..2] of real;
    propinic:array[1..23] of real;
    tr,partint,aux3,aux4,aux5,partdec1,aux2:longint;
    fdados:file of real;
    fresult:text;
    fprinc:file of texto;

```

```

function Tru (x:real):longint;
begin
    tru:=trunc(x);
end;

```

```

function elevar(a,b:real):real;
begin
    elevar:=exp(b*ln(a));
end;

```

```

procedure preliminares;
begin
    clrscr;
    writeln;writeln;
    write('Entre com o nome do projeto:');
    readln(projeto);
    writeln;
    write('Entre com a data:');
    readln(data);writeln;writeln;writeln;

```

```

repeat
begin
  writeln ( 'Entre uma opção:');
  writeln;
  writeln( '      1-Grão Propelente Cilíndrico');
  writeln( '      2-Grão Propelente Tipo Estrela(sete pontas)');
  write ( 'Opção: ');
  readln(CE);
end
until (CE=1) or (CE=2);
  if CE=1 then CEText:= 'Cilindrico';
  if CE=2 then CEText:= 'Estrela';
end;

```

```

procedure gerafiledados; {Somente com as propriedades iniciais}
begin
  rewrite(fdados);
  for i:=1 to 23 do
    write(fdados,propinic[i]);
  close(fdados);
end;

```

```

procedure gerafileresult;
begin
  rewrite(fresult);
  for i:=1 to numintervalos do
  begin
    for cols:=1 to 3 do
    begin
      write(fresult,result[i,1]);
    end;
  end;
  close(fresult);
end;

```

```

procedure gerafileprinc;
begin
  rewrite(fprinc);
  write(fprinc,projeto);
  write(fprinc,data);
  write(fprinc,CEText);
  close(fprinc);
end;

```

```

procedure formcriarquivo;
begin
  clrscr;
  writeln;
  writeln( '      Motor-Foguete ');
  writeln( '      ----- ');
  writeln;writeln;
  writeln( 'Entre com o nome do arquivo a ser criado');

```

```

writeln( 'Exemplo: DADOS1' );
write( 'Nome: ' );
readln(nomf);
nomfprinc:=(nomf+ '.pri');
nomfdados:=(nomf+ '.dat');
nomfresult:=(nomf+ '.res');
assign(fprinc,nomfprinc);
assign(fdados,nomfdados);
assign(fresult,nomfresult);
gerafileprinc;
end;

```

```

procedure lefileprinc;
begin
  {$I-}
  reset(fprinc);
  {$I+}
  if IoResult=0 then
  begin
    read(fprinc,projeto);
    read(fprinc,data);
    read(fprinc,CEtext);
    close(fprinc);
  end;
end;

```

```

procedure lefiledados;
begin
  {$I-}
  reset(fdados);
  {$I+}
  if IoResult=0 then
  begin
    i:=0;
    while not Eof(fdados) do
    begin
      i:=i+1;
      read(fdados,dadosnum[i]);
    end;
    close(fdados);
  end;
end;

```

```

procedure lefileresult;
begin
  {$I-}
  reset(fresult);
  {$I+}
  if IoResult=0 then
  begin
    i:=0;

```

```

while not Eof(fresult) do
  begin
    i:=i+1;
    for cols:=1 to 3 do
      read(fresult,result[i,cols]);
    end;
    numintres:=i;
    close(fresult);
  end;
end;

procedure menuprinc;
begin
  clrscr;
  writeln;
  writeln( '                Motor-Foguete ');
  writeln( '                ----- ');
  writeln;writeln;
  writeln( '                Menu Principal');
  writeln( '                ----- ');
  writeln;writeln;
  writeln( '      Opções: ');writeln;writeln;
  writeln( '          1 - Entrada de Dados');
  writeln( '          2 - Efetuar Cálculos');
  writeln( '          3 - Ler Dados de Arquivo');
  writeln( '          4 - Sair');
  writeln;
  write( 'Opção: ');
  repeat
    readln(resposta)
  until (resposta='1') or (resposta='2') or (resposta='3') or (resposta='4');
end;

procedure primatela;
begin
  clrscr;
  writeln;
  writeln;
  writeln( '                ----- ');
  writeln( '                - Motor-Foguete - ');
  writeln( '                ----- ');
  writeln( '                Versão 2.1 ');writeln;
  writeln;writeln;writeln;writeln;
  writeln( '                PMC - 582');
  writeln;
  writeln( '                Trabalho de Formatura - Energia e Fluidos');
  writeln;
  writeln;
  writeln( '                Prof. Orientador : Marcos M. Pimenta');
  writeln;

```

```
writeln;
writeln( '                               Programaço : Marcio Delchiaro Nieble');
writeln;writeln;
writeln;writeln;
end;
```

```
procedure entradados;
begin
  clrscr;
  writeln;writeln;
  writeln( 'Entre com os dados a seguir:');
  write( '      Diâmetro da garganta do bocal(m):');
  readln(dadosnum[1]);
  write( '      Comprimento do grfo-propelente(m):');
  readln(dadosnum[2]);
  write( '      Pressão de combustão de projeto(Psi):');
  readln(dadosnum[3]);
  write( '      Parâmetro de queima c:');
  readln(dadosnum[4]);
  write( '      Parâmetro de queima n:');
  readln(dadosnum[5]);
  write( '      Mol do propelente:');
  readln(dadosnum[6]);
  write( '      Densidade do propelente(kg/m3):');
  readln(dadosnum[7]);
  write( '      Constante k do propelente:');
  readln(dadosnum[8]);
  write( '      Temperatura de queima(K):');
  readln(dadosnum[9]);
  write( '      Intervalo de tempo "delta t"(seg):');
  readln(dadosnum[10]);
  dt:=dadosnum[10];
  clrscr;
  writeln;writeln;
  if CE=1 then
  begin
    write( '      Raio interno do Grfo-Propelente(m):');
    readln(propinic[1]);
    write( '      Raio externo do Grfo-Propelente(m):');
    readln(rext);
  end;
end;
```

```
end;
```

```
procedure calcSb;
begin
  if (CE=1) then
  begin
    if result[2,1]=0 then
    begin
      propinic[3]:=3.1416*elevar(propinic[1],2)*dadosnum[2];
      propinic[4]:=6.2832*propinic[1];
      propinic[5]:=propinic[4]*dadosnum[2];
    end
  end
end;
```

```

else
begin
    result[3,1]:=3.1416*elevar(result[1,1],2)*dadosnum[2];
    result[4,1]:=6.2832*result[1,1];
    result[5,1]:=result[4,1]*dadosnum[2];
end;

end;

if (CE=2) then
begin
    if result[2,1]=0 then
    begin
        rvirtmen:=5e-3;
        rvirtmai:=9e-3;
        propinic[3]:=55.022*exp(0.885)*dadosnum[2]/1e6;
        propinic[4]:=36.7718*exp(0.393195)*1e-3;
        propinic[5]:=propinic[4]*dadosnum[2];
    end
    else
    begin
        if rvirtmai<=rext then
        begin
            result[3,1]:=dadosnum[2]*55.022*exp(0.177*rvirtmen)*1e-6;
            result[4,1]:=36.7718*exp(0.078639*rvirtmen)*1e-3;
            result[5,1]:=result[4,1]*dadosnum[2];
        end;
        if rvirtmai>=rext then
        begin
            result[3,1]:=dadosnum[2]*(-1951.022+998.339*ln(rvirtmen))*1e-6;
            result[4,1]:=(480.2-32.2*rvirtmen)*1e-3;
            result[5,1]:=result[4,1]*dadosnum[2];
        end;
    end;
end;

end;

end;

procedure calcpropinic;
begin
    R:=rconst/dadosnum[6];
    FI:=(1+((dadosnum[8]-1)/2)*(0.05*0.05))/(1+((dadosnum[8]-1)/2));
    propinic[2]:=0;
    result[2,1]:=0;
    calcSb;
    propinic[6]:=dadosnum[3];
    propinic[7]:=0;
    propinic[8]:=0;
    propinic[9]:=propinic[6]+propinic[8];
    propinic[10]:=propinic[9]*6894.75729;
    propinic[11]:=propinic[10]*elevar(FI,dadosnum[8]/(dadosnum[8]-1));
    propinic[12]:=propinic[11]*0.000145;
    propinic[13]:=propinic[10]/(R*dadosnum[9]);

```

```

propinic[14]:=propinic[11]/(R*dadosnum[9]*FI);
propinic[15]:=1-(elevar((propinic[11]/propinic[10]),((dadosnum[8]-1)/
dadosnum[8])));
propinic[16]:=0;
propinic[17]:= dadosnum[3]*6894.7572*propinic[3]/(R*dadosnum[9]);
propinic[18]:=0;
propinic[19]:=0;
propinic[20]:=0;
propinic[21]:=0;
propinic[22]:=0;
propinic[23]:=propinic[17];

```

ad;

procedure leoarquivo;

begin

```

  clrscr;
  writeln;
  writeln( '
  writeln( '
  writeln( '
  writeln;writeln;
  writeln( 'Entre com o nome do arquivo a ser lido');
  writeln( 'Exemplo: DADOS1');
  write( 'Nome: ');
  readln(nomf);
  nomfprinc:=(nomf+ '.pri');
  nomfdados:=(nomf+ '.dat');
  { nomfresult:=(nomf+ '.res'); }
  assign(fprinc,nomfprinc);
  assign(fdados,nomfdados);
  { assign(fresult,nomfresult); }
  lefileprinc;
  lefiledados;
  { lefileresult; }

```

ad;

procedure calcul;

begin

```

  result[2,1]:=result[2,1]+dt;
  if (CE=1) then
  result[1,1]:=dt*result[19,2]+result[1,2]
  else
    begin
      rvirtmen:=dt*result[19,2]+rvirtmen;
      rvirtmai:=dt*result[19,2]+rvirtmai;
      result[1,1]:=rvirtmen;
    end;
  calcSb;
  result[6,1]:=0;
  result[17,1]:=0;
  result[18,1]:=dadosnum[4]*elevar(result[9,2],dadosnum[5]);
  result[19,1]:=result[18,1]*0.0254;
  result[20,1]:=result[5,1]*result[19,1]*dadosnum[7];
  result[21,1]:=result[14,2]*3.1416*elevar(dadosnum[1],2)*result[16,2]/4;

```

```

result[22,1]:=result[20,1]-result[21,1];
result[23,1]:=result[22,1]*dt+result[23,2];
result[7,1]:=result[23,1]*R*dadosnum[9]/result[3,1];
result[8,1]:=result[7,1]*1.45/10000;
result[9,1]:=result[6,1]+result[8,1];
result[10,1]:=result[9,1]*6894.75729;
result[11,1]:=result[10,1]*elevar(FI,(dadosnum[8]/(dadosnum[8]-1)));
result[12,1]:=0.000145*result[11,1];
result[13,1]:=result[10,1]/(R*dadosnum[9]);
result[14,1]:=result[11,1]/(R*dadosnum[9]*FI);
auxcontas1:=(result[11,1]/result[10,1]);
auxcontas2:=((dadosnum[8]-1)/dadosnum[8]);
auxcontas3:=elevar(auxcontas1,auxcontas2);
result[15,1]:=1-auxcontas3;
result[16,1]:=sqrt((2*dadosnum[8]*R*dadosnum[9]*result[15,1])/(dadosnum[8]-1)

```

nd;

procedure fimdaqueima;

begin

```

result[2,1]:=result[2,1]+dt;
result[1,1]:=rvirtmen;
result[3,1]:=3.1416*elevar(result[1,1],2)*dadosnum[2];
result[4,1]:=6.2832*result[1,1];
result[5,1]:=0;
result[6,1]:=0;
result[17,1]:=0;
result[18,1]:=0;
result[19,1]:=0;
result[20,1]:=0;
result[21,1]:=result[14,2]*3.1416*elevar(dadosnum[1],2)*result[16,2]/4;
result[22,1]:=result[20,1]-result[21,1];
result[23,1]:=result[22,1]*dt+result[23,2];
result[7,1]:=result[23,1]*R*dadosnum[9]/result[3,1];
result[8,1]:=result[7,1]*1.45/10000;
result[9,1]:=result[6,1]+result[8,1];
result[10,1]:=result[9,1]*6894.75729;
result[11,1]:=result[10,1]*elevar(FI,(dadosnum[8]/(dadosnum[8]-1)));
result[12,1]:=0.000145*result[11,1];
result[13,1]:=result[10,1]/(R*dadosnum[9]);
result[14,1]:=result[11,1]/(R*dadosnum[9]*FI);
auxcontas1:=(result[11,1]/result[10,1]);
auxcontas2:=((dadosnum[8]-1)/dadosnum[8]);
auxcontas3:=elevar(auxcontas1,auxcontas2);
result[15,1]:=1-auxcontas3;
result[16,1]:=sqrt((2*dadosnum[8]*R*dadosnum[9]*result[15,1])/(dadosnum[8]-1)

```

nd;

***** INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL *****}

begin

```

const:=8314.75;
if CE=2 then rext:=15e-3;
primatela;
repeat until keypressed;
repeat
timer:=timer+1
until timer=1000;
repeat
begin
menuprinc;

if (resposta='1')or (resposta=' 1') then
begin
preliminares;
formcriarquivo;
entradados;
end;

if (resposta='2') then {Efetuar Calculos}
begin
calcpropinic;
for i:=1 to 23 do
result[i,1]:=propinic[i];
for i:=1 to 23 do
result[i,2]:=result[i,1]; {Monta o Buffer de Dados }
gerafiledados;
rewrite(fresult);
repeat
begin
for i:=1 to 23 do
result[i,2]:=result[i,1];
{ calcul;}
result[2,1]:=result[2,1]*(1e-10);
result[10,1]:=result[10,1]*(1e-10);
result[9,1]:=result[9,1]*(1e-10);
writeln(fresult,result[2,1],result[9,1],result[10,1]);
result[2,1]:=result[2,1]*1e10;
result[10,1]:=result[10,1]*1e10;
result[9,1]:=result[9,1]*(1e10);
calcul;
end
until result[1,1]>=rext;
repeat
begin
for i:=1 to 23 do
result[i,2]:=result[i,1];
result[2,1]:=result[2,1]*(1e-10);
result[10,1]:=result[10,1]*(1e-10);
result[9,1]:=result[9,1]*(1e-10);
writeln(fresult,result[2,1],result[9,1],result[10,1]);
result[2,1]:=result[2,1]*1e10;
result[10,1]:=result[10,1]*1e10;
result[9,1]:=result[9,1]*(1e10);
fimdaqueima;

```

```
end  
until result[9,1]<dadosnum[3];  
close(fresult);  
end;
```

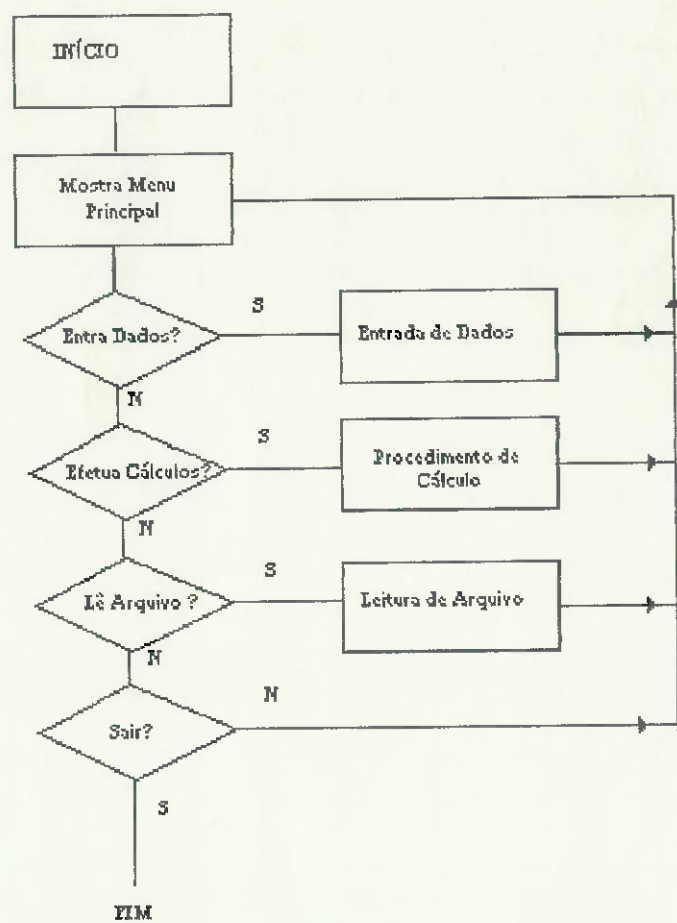
```
if (resposta= '3') then           {Le arquivo}  
begin  
    leoarquivo;  
end;
```

```
if (resposta= '4') then           {Sair}  
begin  
  
end;
```

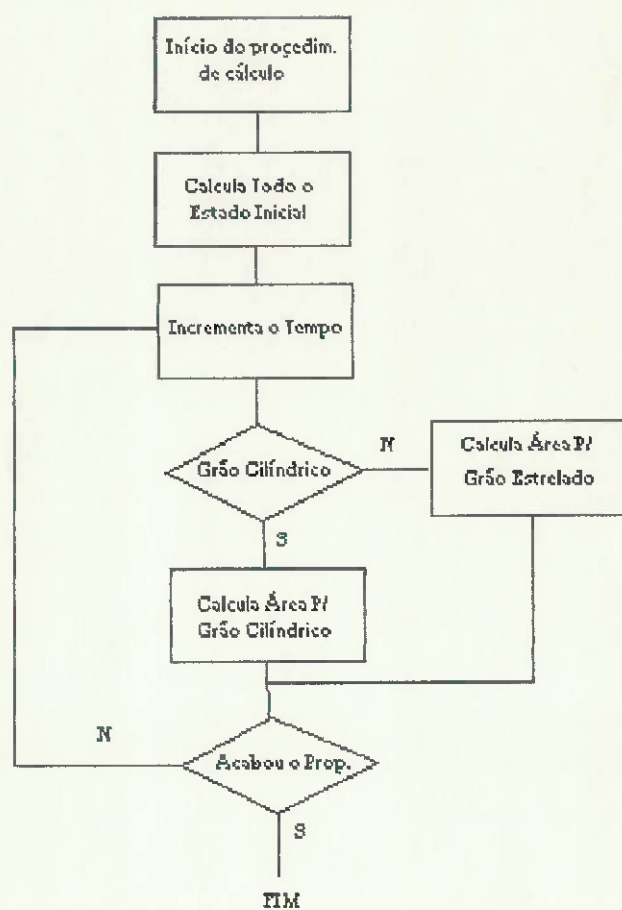
```
end  
until (resposta= '4');
```

ed.

Fluxograma do Programa Principal



Fluxograma do Procedimento de Cálculo



VI -) Alguns Resultados

Agora de posse do software iremos analisar dois casos distintos:

Caso 1:

Foguete combustível sólido, grão cilíndrico, com características:

Diâmetro da garganta do bocal: $3\text{e-}3$ m

Comprimento do grão-propelente: 1.4 m

Pressão de combustão de projeto: 1250 psi

Parâmetro c : $2.83\text{e-}3$

Parâmetro n : 0.65

Mol do propelente: 207

Densidade do propelente: 1300 kg/m^3

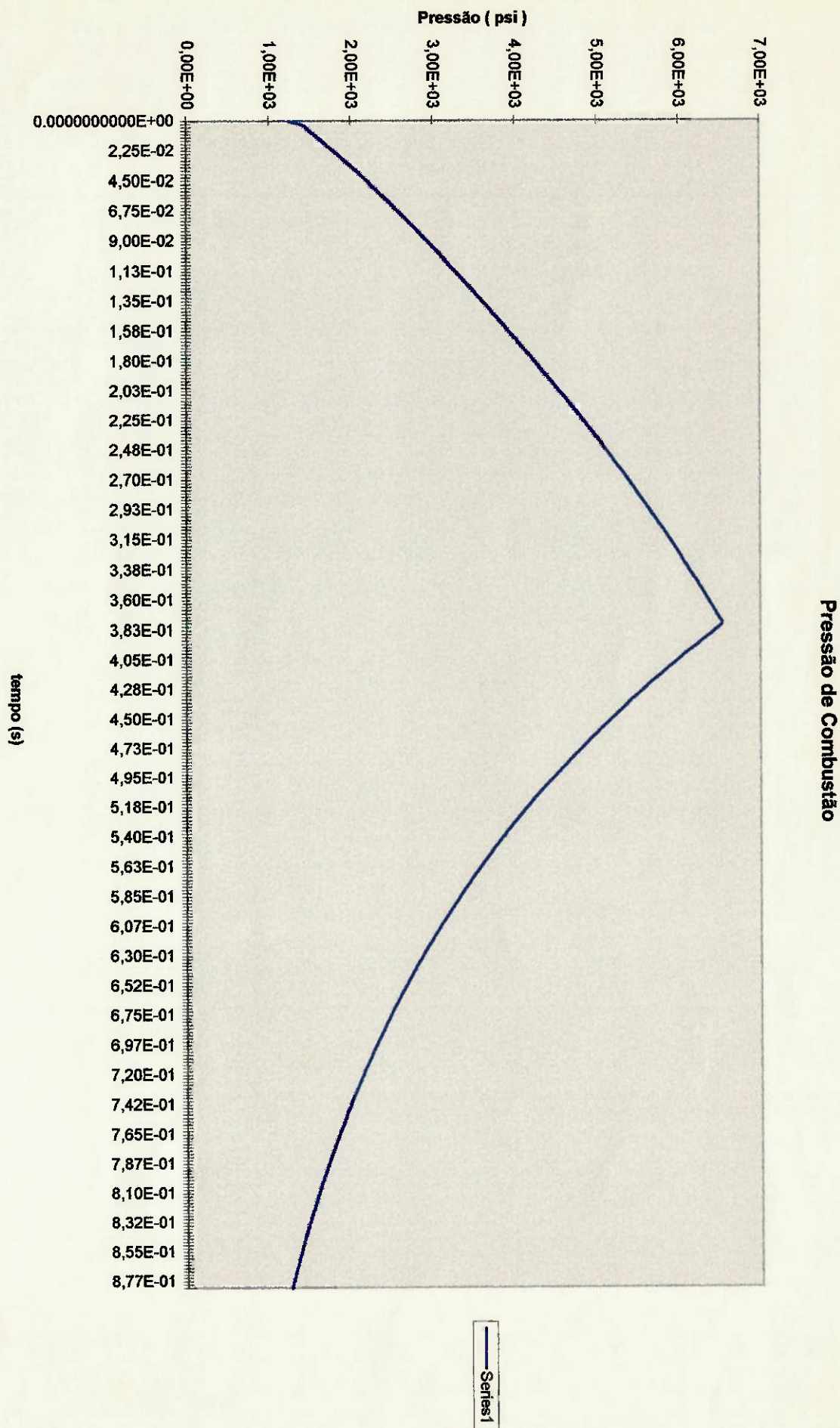
Constante k : 1.1

Temp. de queima : 1700 K

Incremento de tempo : 0.0025 s

Raio interno do propelente : $3\text{e-}3$

Raio externo do propelente : $9\text{e-}3$



Caso 2:

Foguete combustível sólido, grão estrelado, com características:

Diâmetro da garganta do bocal: $3\text{e-}3$ m

Comprimento do grão-propelente: 0.6 m

Pressão de combustão de projeto: 1000 psi

Parâmetro c : $2.83\text{e-}3$

Parâmetro n : 0.65

Mol do propelente: 207

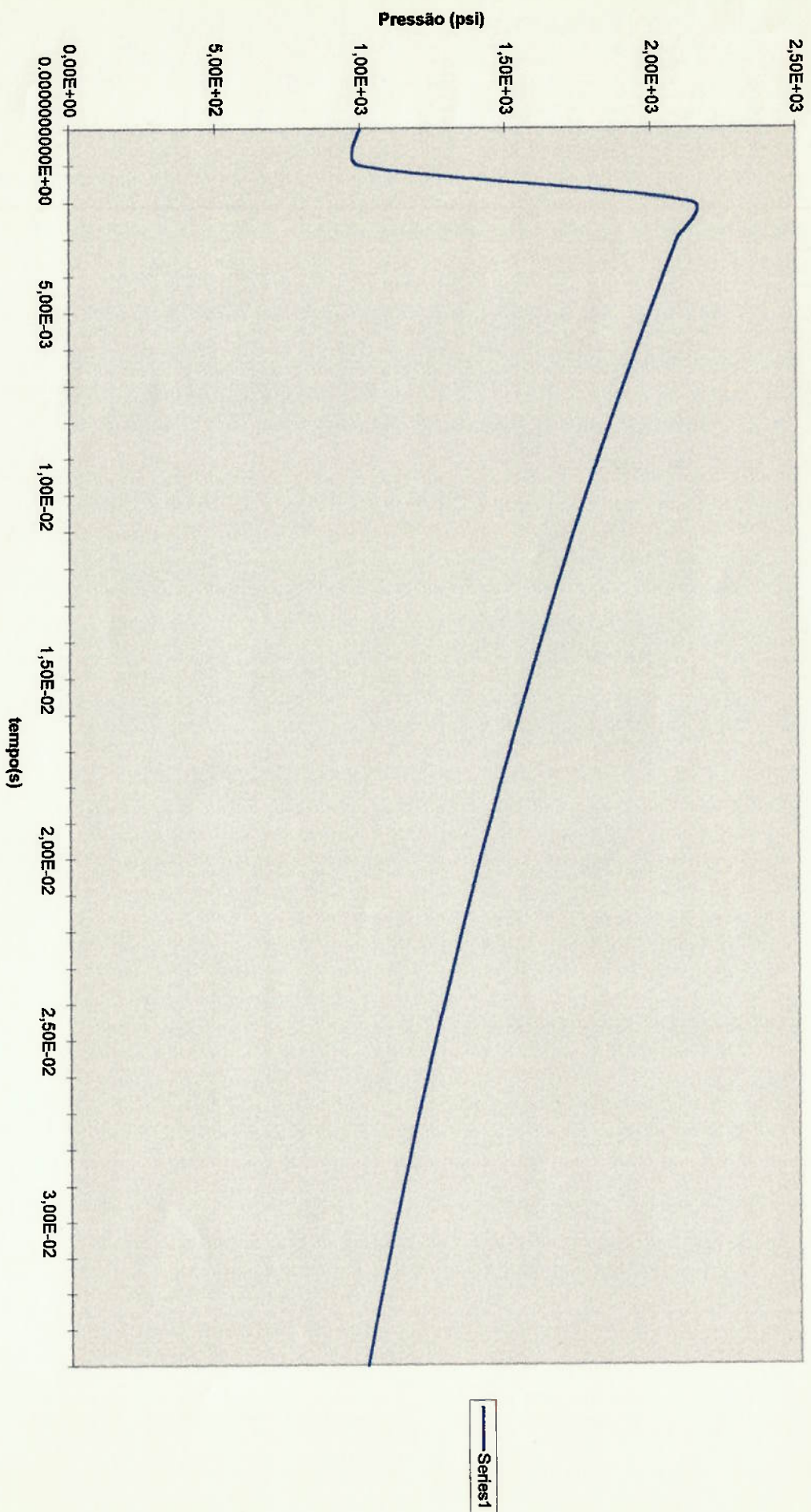
Densidade do propelente: 1300 kg/m^3

Constante k : 1.1

Temp. de queima : 1500 K

Incremento de tempo : 0.001 s

Pressão de Combustão - Grão Estrelado



Caso 3:

Foguete combustível sólido, grão cilíndrico, com características:

Diâmetro da garganta do bocal: $3\text{e-}3\text{ m}$

Comprimento do grão-propelente: 0.6 m

Pressão de combustão de projeto: 1000 psi

Parâmetro c : $2.83\text{e-}3$

Parâmetro n : 0.65

Mol do propelente: 207

Densidade do propelente: 1300 kg/m^3

Constante k : 1.1

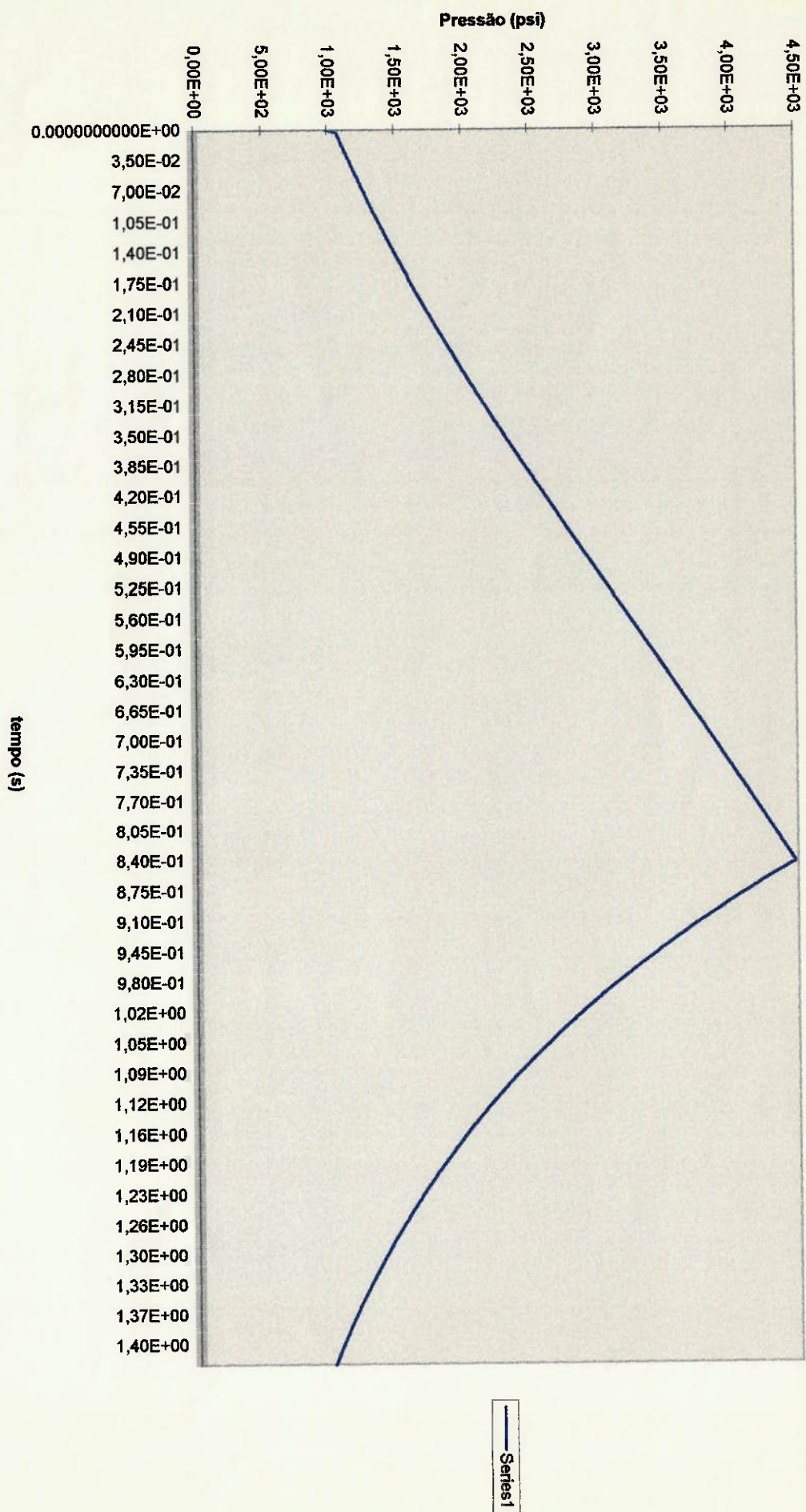
Temp. de queima : 1500 K

Incremento de tempo : 0.001 s

Raio interno do propelente : $5\text{e-}3$

Raio externo do propelente : $15\text{e-}3$

Pressão de Combustão - Caso 3



VII-) Conclusão:

Através da análise dos resultados fornecidos pelo software podemos ver que a configuração estrelada queima-se muito rapidamente para as características geométricas dadas. Isto deve-se ao pequeno raio do foguete e à queima do propelente na direção radial. Já no caso da geometria cilíndrica, onde temos mais liberdade de mudança, podemos escolher um raio maior, fazendo com que a queima dure mais tempo. Sabe-se pela teoria que a geometria cilíndrica apresenta picos de pressão maiores que a geometria estrelada correspondente.

O objetivo que foi proposto foi atingido, tendo-se conseguido um software para o cálculo da variação da pressão no interior de um foguete. Registra-se aqui que um software não é um trabalho estático, ou seja ele pode mudar ao longo do tempo, pode sofrer modificações para melhor durante seu tempo de testes.

Os parâmetros que podem ser modificados influenciam muito na saída do programa. Qualquer pequena variação parece ampliada na saída.

Percebe-se que cada tipo de geometria possui uma curva característica de queima, apesar de os valores serem mudados. Isto leva a crer que cada tipo de queima é adequada para uma aplicação específica. O tipo de queima do grão estrelado é de maior rapidez de queima e menor pico de pressão.

Deixe-se claro que quando se for projetar o tubo-motor, este deve ser dimensionado para a maior pressão apresentada pelo software, por esta razão busca-se permanentemente a geometria de queima que proporcione uma taxa de produção de gases constante.

VIII -) Apêndices:

Figura 1

Solid Rocket Propulsion

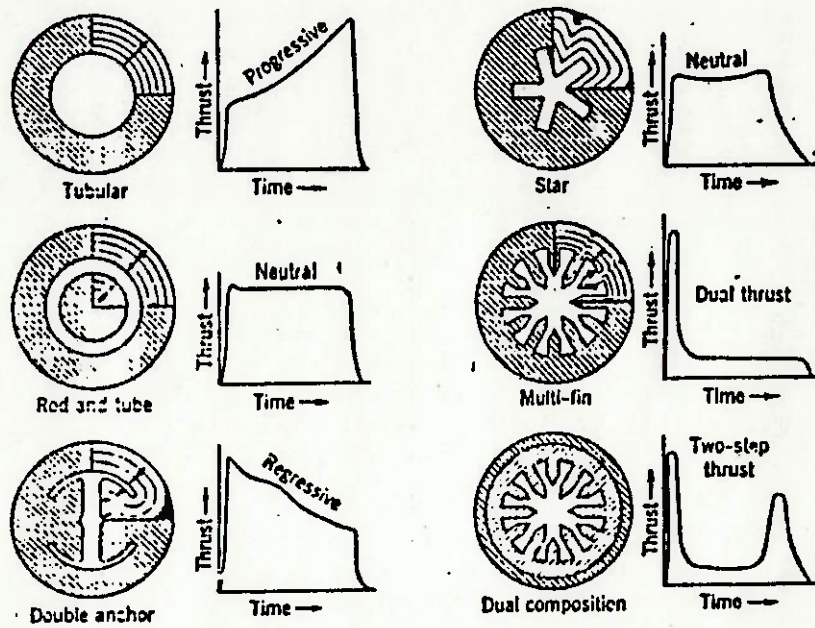
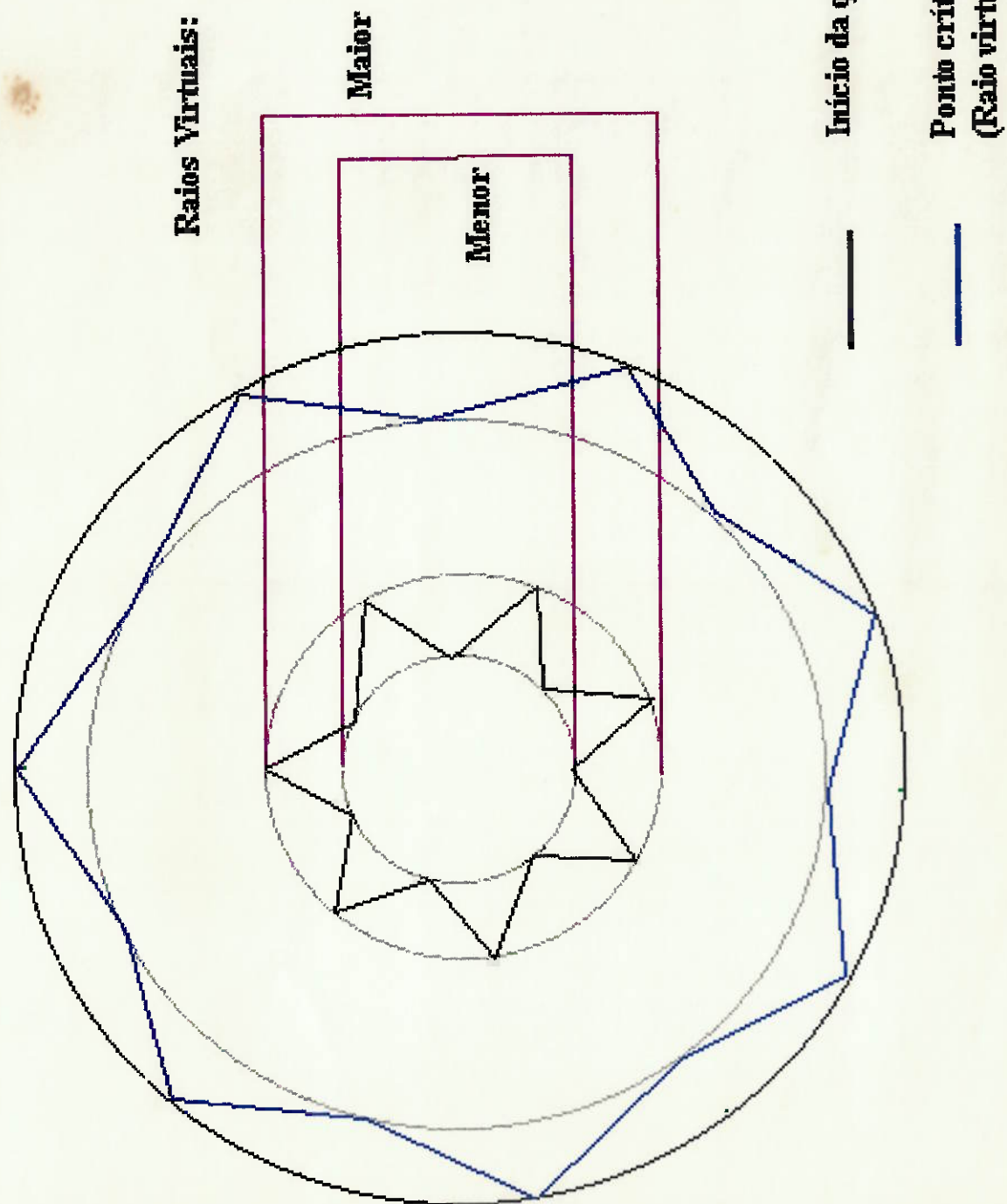


Figura 2



 **Volume de Controle**

Figura 3



IX-) Bibliografia:

- [1] Van Wylen, G. J. e Sonntag, P. E. - "Fundamentos da Termodinâmica Clássica" - Edgar Blucher Ltda - S.P. - 1987
- [2] Perry, Robert H.; Green, Don W. ; Maloney, James O. - "Perry's Chemical Engineer's Handbook" - McGraw Hill - NY - 1984
- [3] Sutton, P. G. - "Rocket Propulsion Elements" - John Wiley & Sons, Inc - N Y - 1958
- [4] Apostila do curso de PMC-480 - "Introdução a Dinâmica dos Gases"
- [5] Sutton, P. G. - "Space Technology" - John Wiley & Sons, INC - N Y - 1953
- [6] Streeter, V. L. - "Mecânica dos Fluidos"- McGraw Hill - São Paulo - 1982