

DIEGO FERNANDO MORO

TEORIA DO APLICATIVO EMPUXO 1.7

Relatório do grupo de pesquisa CFD,
propulsão e aerodinâmica de foguetes , Setor
de Tecnologia da Universidade Federal do
Paraná.

CURITIBA

14 ABR 2016

SUMÁRIO

1 Introdução.....	2
2 Teoria das versões anteriores do código, forma igual ao apresentado pelo Nakka	3
3 Relato sobre o uso da versão anterior para duplicar os resultados dos MOTORES TA com tubeira de alumínio e os PVCs	5
4 Teoria aprimorada implementada no código Empuxo 1.7	5
5 Comparações	7
5.1 Resultados para o TE do dia 2015/07/09 com os TAs 157 a 164	7
5.2 Resultados para o TE do dia 2015/07/09 com os PVCs 1 a 9.....	7
5.3 Discussão e conclusões sobre a nova teoria proposta.....	7
6 Observações sobre a implementação e o uso do código.....	8
6.1 Arquivos do código Empuxo 1.7	8
6.2 Execução e análise dos resultados	11
6.3 análise do arquivo de saída principal.....	14
7 Referências	15

1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal do aplicativo Empuxo 1.7 é realizar a análise teórica de motores-foguete operando com diferentes configurações de grão-propelente, tubeiras e dimensões externas, basicamente é um aplicativo para projeto teórico de motores-foguete. Sua primeira versão foi programada pelo prof. Carlos Henrique Marchi em 30 Mai. 2005.

Com o decorrer dos anos o aplicativo foi sendo aprimorado e hoje contém muitos tipos de grão propelente que podem ser simulados e três hipóteses de expansão na tubeira, da mesma forma que o aplicativo Curva Empuxo 3.2 (MORO, 2017).

A teoria por trás deste código pode ser observada no site do Nakka (2016), mas basicamente é a aplicação da conservação da massa em cada instante de tempo no interior do motor-foguete como será apresentado no Cap. 2.

2 TEORIA DAS VERSÕES ANTERIORES DO CÓDIGO, FORMA IGUAL AO APRESENTADO PELO NAKKA

Nas versões anteriores do programa Empuxo_1p7 a dedução da equação do empuxo era a seguinte. Aplica-se a conservação da massa no interior do motor-foguete, na forma da Eq. (2.1):

$$\dot{m}_g = \frac{d}{dt}(M_s) + \dot{m}_{sai} \quad (2.1)$$

onde:

\dot{m}_g : Massa gerada de gases do propelente

\dot{m}_{sai} : Massa de gases que sai pela tubeira

$d(M_s)/dt$: Variação da massa com o tempo no interior do motor-foguete

A parcela gerada de gases é dada pela Eq. (2.2):

$$\dot{m}_g = A_b \rho_p r \quad (2.2)$$

A parcela de gases que deixa a tubeira é dada pelo escoamento bloqueado 1D (SUTTON, 1992), Eq. (2.3):

$$\dot{m}_{sai} = P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{-\gamma+1/\gamma-1}} \quad (2.3)$$

A variação da massa com o tempo é dada pela Eq. (2.4):

$$\frac{d}{dt}(M_s) = \frac{d}{dt}(\rho_0 v_0) = \rho_0 \frac{d}{dt}(v_0) + v_0 \frac{d}{dt}(\rho_0) \quad (2.4)$$

O volume da câmara (v_0) varia conforme o propelente é queimado na forma da Eq. (2.5):

$$\frac{d}{dt}(v_0) = A_b r \quad (2.5)$$

Segundo a lei dos gases perfeitos, a massa específica de estagnação fica na forma da Eq. (2.6) ao considerar a constante do gás e a temperatura de estagnação independentes do tempo:

$$\frac{d}{dt}(\rho_0) = \frac{d}{dt}\left(\frac{P_0}{RT_0}\right) = \frac{1}{RT_0} \frac{d}{dt}(P_0) \quad (2.6)$$

Substituindo as Eqs. (2.5) e (2.6) na Eq. (2.4) teremos a Eq. (2.7):

$$\frac{d}{dt}(M_s) = \rho_0 A_b r + v_0 \frac{1}{RT_0} \frac{d}{dt}(P_0) \quad (2.7)$$

Substituindo as Eqs. (2.2), (2.3) e (2.7) e a Lei de Saint Robert para a taxa de queima ($r = aP_0^n$) na Eq. (2.1), teremos a Eq. (2.8):

$$A_b \rho_p a P_0^n = \rho_0 A_b a P_0^n + v_0 \frac{1}{RT_0} \frac{d}{dt}(P_0) + P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.8)$$

Isolando na Eq. (2.8) a derivada temporal, aplicando a lei dos gases perfeitos na massa específica de estagnação e reorganizando os termos, teremos a Eq. (2.9):

$$\frac{1}{RT_0} \frac{d}{dt}(v_0 P_0) = A_b a \left(P_0^n \rho_p - \frac{P_0^{n+1}}{RT_0} \right) - P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.9)$$

Integrando a Eq. (2.9) entre o tempo t e o delta t de forma totalmente implícita teremos a Eq. (2.10):

$$\begin{aligned} (v_0 P_0)_t^{t+\Delta t} &= \left(A_b a \left(RT_0 P_0^n \rho_p - P_0^{n+1} \right) - RT_0 P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right) \Delta t \\ v_0 P_0 - v_0^{t_0} P_0^{t_0} &= \left(A_b a \left(RT_0 P_0^n \rho_p - P_0^{n+1} \right) - RT_0 P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right) \Delta t \end{aligned} \quad (2.10)$$

Onde o sufixo t_0 é a propriedade no instante anterior.

O aplicativo Empuxo1p2 e versões anteriores resolvem a Eq. (2.10) numericamente usando o método Newton-Raphson.

3 RELATO SOBRE O USO DA VERSÃO ANTERIOR PARA DUPLICAR OS RESULTADOS DOS MOTORES TA COM TUBEIRA DE ALUMÍNIO E OS PVCS

Utilizando no programa Empuxo 1p2 os parâmetros de taxa de queima médios obtidos pelos testes do grupo de pesquisa com o MTP (Motor de Teste de Propelente), não foi possível duplicar os resultados dos motores TA (motor com Tubo de Acrílico) com tubeira de alumínio e os motores com tubo de PVC.

Foi cogitado após estas análises que o programa não está considerando uma parcela da realidade: a fração de condensado, parcela que não é gasosa, mas também é gerada pela combustão.

A fração de condensado não contribui em nada para a pressurização no motor e, portanto não faz sentido dizer que todo o propelente que é consumido pela taxa de queima gera gases, apenas uma parcela de gás é gerada, a outra se torna condensado.

4 TEORIA APRIMORADA IMPLEMENTADA NO CÓDIGO EMPUXO

1.7

Propôs-se então a seguinte alteração na Eq. (2.2), a massa gerada de gases real, Eq. (3.1):

$$\dot{m}_g = A_b \rho_p r (1 - \chi) \quad (3.1)$$

Onde:

χ : Fração de condensado do propelente (adimensional)

Foi considerado um fluxo de massa dependente do número de Mach, o qual torna o cálculo mais genérico para as fases de pressurização do motor, na forma da Eq. (3.2):

$$\dot{m}_{sai} = M^* P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^{*2} \right)^{-\gamma+1/\gamma-1}} \quad (3.2)$$

Desta, forma substituindo as Eq. (3.1), (3.2) e (2.7) na Eq. (2.1), teremos a Eq. (3.3):

$$A_b \rho_p r (1 - \chi) = \rho_0 A_b r + v_0 \frac{1}{RT_0} \frac{d}{dt} (P_0) + M^* P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^{*2} \right)^{-\gamma+1/\gamma-1}} \quad (3.3)$$

Reorganizando e substituindo os termos da Eq. (3.3) e isolando a derivada temporal, teremos a Eq. (3.4):

$$\frac{d}{dt} (v_0 P_0) = A_b a \left(\rho_p P_0^n (1 - \chi) RT_0 - P_0^{n+1} \right) - M^* P_0 RT_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^{*2} \right)^{-\gamma+1/\gamma-1}} \quad (3.4)$$

A Eq. (2.9) foi inserida de forma reorganizada aqui para conveniência de comparação:

$$\frac{d}{dt} (v_0 P_0) = A_b a \left(\rho_p P_0^n RT_0 - P_0^{n+1} \right) - RT_0 P_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{-\gamma+1/\gamma-1}} \quad (2.9)$$

Podemos portanto integrar a Eq. (3.4) no tempo de forma totalmente implícita, gerando a Eq. (3.5):

$$v_0 P_0 - v_0^{t_0} P_0^{t_0} = \left[A_b a \left(\rho_p P_0^n (1 - \chi) RT_0 - P_0^{n+1} \right) - M^* P_0 RT_0 A_t \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^{*2} \right)^{-\gamma+1/\gamma-1}} \right] \Delta t \quad (3.5)$$

Onde o sufixo t_0 é a propriedade no instante anterior.

Basta, portanto resolver numericamente a Eq. (3.5) com algum método numérico. Foi implementado o método da secante modificado para resolver a Eq. (3.5) no código Empuxo 1.7.

5 COMPARAÇÕES

5.1 RESULTADOS PARA O TE DO DIA 2015/07/09 COM OS TAS 157 A 164

Para os testes estáticos (TE) dos motores TA 157 a 165 são mostradas na Tab. 5.1 a comparação entre o impulso total experimental, o teórico usando a dedução antiga e o teórico utilizando a dedução atual juntamente com seus erros

Tabela 5.1 Comparação entre o impulso total experimental e via deduções do código Empuxo_1p7

TA	Experimental	Ded. Antiga	Erro Ded. Antiga	Nova Ded.	Erro Nova Ded.
157	0,933	2,032	54,07%	1,03	9,54%
158	1,016	2,036	50,10%	1,04	1,83%
159	0,952	2,032	53,17%	1,04	8,05%
160	0,819	2,072	60,47%	1,06	22,69%
161	2,579	4,928	47,67%	2,65	2,61%
162	2,501	5,026	50,23%	2,70	7,51%
163	2,578	5,097	49,42%	2,75	6,12%
164	2,580	4,996	48,35%	2,69	3,96%

5.2 RESULTADOS PARA O TE DO DIA 2015/07/09 COM OS PVCS 1 A 9

É replicado o TE dos PVCs 2 a 9, com a dedução anterior e na nova dedução do Empuxo 1p7. Está mostrado a comparação na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 Comparação entre o impulso total experimental e via deduções do código Empuxo_1p7

PVC	Experimental	Ded. Antiga	Erro Ded. Antiga	Nova Ded.	Erro Nova Ded.
2	6,727	12,008	43,98%	9,54	29,51%
3	8,344	12,025	30,61%	9,53	12,46%
5	5,049	7,530	32,95%	6,41	21,17%
6	5,341	7,519	28,97%	6,41	16,67%
8	1,534	3,870	60,36%	3,40	54,88%
9	2,518	3,870	34,93%	3,40	25,93%

5.3 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES SOBRE A NOVA TEORIA PROPOSTA

A **dedução anterior** não apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais, no caso dos **TAs**, o **maior erro** do **Impulso Total** estimado em relação ao real

é de **60,5% no TA 160** e o **menor erro** é de **47,7% no TA 161**. E no caso dos PVCs o **maior erro** foi de **60,4% no PVC 8** e o **menor erro** é de **29,0% no PVC6**.

A **nova dedução** apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais, no caso dos TAs, o **maior erro do Impulso Total** estimado em relação ao real é de **22,7% no TA 160** e o **menor erro** é de **1,8% no TA 158**. E no caso dos PVCs o **maior erro** foi de **54,9% no PVC 8** e o **menor erro** é de **12,5% no PVC 3**. O maior erro no impulso total dos PVC pode ser explicado pela erosão da garganta de durepóxi.

A nova dedução aproxima-se mais do resultado experimental do que a dedução anterior e pode ser utilizada para o projeto de novos motores.

6 OBSERVAÇÕES SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO E O USO DO CÓDIGO

O aplicativo Empuxo 1.7 foi programado em linguagem Fortran 95 e o método para resolver a equação transiente do Cap. 4 é o método da secante modificado.

6.1 ARQUIVOS DO CÓDIGO EMPUXO 1.7

O código é composto de uma pasta principal e três pastas, como mostrado na Fig. 6.1. Para executar o código basta rodar o arquivo “Empuxo_1p7.exe”, o código fonte em Fortran 95 é o arquivo “empuxo_main.f90”.

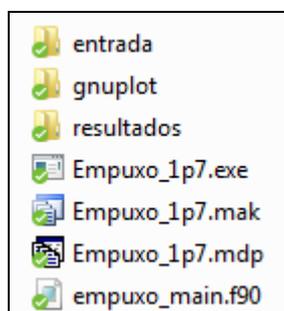


Figura 6.1 Arquivos e pastas na raiz do código Curva Empuxo 3.1

A pasta “entrada” é composta de alguns exemplos de utilização do código, mas basicamente o arquivo de entrada primário é o “empuxo.in”. Neste arquivo há apenas o nome do arquivo de entrada da simulação atual contendo a sua extensão. Neste exemplo o nome do arquivo de entrada da simulação atual é o "entrada_Ex1.txt".

O conteúdo do arquivo "entrada_Ex1.txt" está mostrado na Fig. 6.2.

```

'Bandeirante_A60'      :: Título (Até 128 caracteres)
3.00e-3               :: Diâmetro da garganta (m)
12.7e-3              :: Diâmetro externo do grão (m)
3.00e-3              :: Diâmetro da alma do grão (m)
23.0e-3              :: Comprimento do grão (m)
2                    :: grao (1 = cilíndrico (queima cigarro), 2 = tubular (queima interna), 3 = tubular (queima em toda superfície), 4
100                  :: P/ grao tipo 4: Frequência para criação da animação gif (freq = 0 para desabilitar)
50d-3                :: P/ grao tipo 4: Taxa de ativação do grão-propelente (m/s)
25.00d-3             :: P/ grao tipo 8 a 10: Diâmetro 1 do tronco de cone
15.00d-3             :: P/ grao tipo 8 a 10: Diâmetro 2 do tronco de cone
10.00d-3             :: P/ grao tipo 10: Comprimento do parte cilíndrica após o diâmetro menor do tronco de cone
1500d0               :: Massa específica do propelente antes da queima(kg/m3)
4.E-05               :: a = m/s/Pa, Parâmetros da taxa de queima do propelente r=a*p^n
4E-01                :: n = adim, Parâmetros da taxa de queima do propelente r=a*p^n
90.36d3              :: Pressão atmosférica (Pa)
2d-4                 :: Passo de tempo (s)
10000000             :: Numero máximo de passos no tempo
10000                :: Numero máximo de iterações para o ponto do calculado
1.0d-5               :: Tolerância para cada ponto calculado
4.0d-2               :: relax = Fator de relaxamento do metodo da secante modif.
1.0d-1               :: ho = Passo inicial do chute
1.000d0              :: Cd = Coeficiente de Descarga
1.000d0              :: Et = Eficiência da temperatura adiabática de chama
0                    :: tab_pq = 0: Não usa tabela dos parâmetros da taxa de queima, 1: usa
1                    :: prop: 0=KNSu 65/35, 1=Polvora Bandeirante (150/50/20), 2=KNSu 60/40, 3=KNSu 70/30
0                    :: expansion: 0: Até à garganta, 1: Ótima, 2: Até diâmetro conhecido (colocar ao lado direito separado por expacos)

```

Figura 6.2 Conteúdo do arquivo "entrada_Ex1.txt"

A **primeira linha** deste arquivo deve conter o sufixo para os arquivos de saída da simulação. Todos os arquivos gerados por esta simulação conterão este sufixo na pasta “resultados”.

Na **segunda linha**, é colocado o diâmetro da garganta da tubeira do motor-foguete, isto será utilizado para cálculo da área da garganta (A_t).

Na **terceira linha**, é colocado o diâmetro externo do grão-propelente, o qual pode ser dependendo do caso, o diâmetro interno do envólucro, o qual o propelente está envolvido.

Na **quarta linha**, é colocado o diâmetro da alma do grão, considera-se a alma o furo interno de grão-propelente tubular. Se este não existir: for um grão tipo cigarro por exemplo, este dado é desconsiderado.

Na **quinta linha**, é colocado o comprimento do grão-propelente.

Na **sexta linha**, é colocado o tipo de grão simulado. Há ao todo 10 tipos de grão já programados no código (nem foi possível colocar todos na Fig. 6.2), são eles:

1. Grão tipo cilíndrico (queima cigarro), a queima instantânea se dá apenas na área da seção transversal do cilindro.

2. Grão tipo tubular, a queima inicial se dá na área superficial interna da alma e vai crescendo até no limite chegar na área da superfície externa do grão.

3. Grão tipo tubular desinibido, a queima inicial se dá em todas as superfícies do grão-propelente: área interna, área externa e área das coroas do grão tubular e vai se propagando para o interior do grão.

4. Grão taxa de ativação constante, queima tubular que é ativada de dentro para fora do motor-foguete com uma certa taxa. Foi idealizada no caso de um estopim vir ativando o grão de fora para dentro e no limite ativa a parte final encostada na tampa do motor.

5. Grão cilíndrico com superfícies desinibidas, o grão é um cilindro perfeito e a área de queima se dá por todas as superfícies externas: área externa e área das coroas. Este seria um caso onde a inibição do grão cigarro não funcionou.

6. Grão tubular com as duas coroas desinibidas. Neste tipo de grão as áreas de queima são: área interna da alma e área das coroas.

7. Grão tubular com um coroa desinibida. Parecido com o grão tipo 6, só que apenas uma coroa é desinibida.

8. Grão tronco de cone com as coroas inibidas. Este grão é igual ao grão tubular mas com a alma cônica. Neste caso as duas coroas são inibidas, portanto, a única área de queima é a área interna da alma.

9. Grão tronco de cone com as coroas desinibidas. Igual ao grão 8 mas com as duas coroas desinibidas.

10. Grão tronco de cone com a coroa de maior diâmetro desinibida + parte cilíndrica. Neste tipo de grão é intercalado um grão tronco de cone com um grão cilíndrico no seu final.

Mais detalhamento dos cálculos de áreas e volumes de queima estão no próprio código fonte do código.

Na **sétima e oitava linha** estão mostrados duas variáveis no caso do grão tipo 4, a primeira é a frequência de criação do arquivo “.gif” (uma animação para a taxa de ativação do grão) e a outra é a taxa de ativação do grão-propelente.

Na **nona e décima linha** estão mostrados duas variáveis válidas para os grãos 8 a 10 (que possuem tronco de cone), que são respectivamente os dois diâmetros do tronco de cone. Não importa a ordem colocada, o código reconhecerá a maior delas no caso do grão tipo 10.

Na **décima primeira linha** está mostrado o comprimento da parte cilíndrica no caso do grão tipo 10.

Na **décima segunda linha** está mostrado a massa específica do grão-propelente (antes da queima).

Na **décima terceira e décima quarta linha** estão mostrados as duas variáveis da taxa de queima (Lei de Saint Robert) “a” e “n”, onde $r = a P_0^n$.

Na **décima quinta linha** está mostrado a pressão ambiente de trabalho do motor simulado.

Desde a **décima sexta linha** até a **vigésima primeira linha** estão mostrados os parâmetros de convergência do processo iterativo. O passo de tempo é o mesmo Δt presente na Eq. (3.5), quanto menor o seu valor, mais próximo do analítico da Eq. (3.4) estará. O número de passos no tempo é um número elevado para conter todo o tempo da simulação do motor-foguete. O número máximo de iterações para o ponto calculado é o número de iterações para resolver a Eq. (3.5). No entanto se sua variação chegar a tolerância inserida é parado o processo iterativo naquele passo de tempo. A variável relax e h0 são parâmetros do método da secante modificado.

OBS: Se houver algum problema de convergência, são apresentados algumas soluções: reduzir “ Δt ”, reduzir “relax” e finalmente aumentar h0, nesta sequencia.

Na **vigésima segunda e vigésima terceira linha** estão mostrado dois parâmetros de eficiência, o primeiro o Coeficiente de Descarga é a eficiência do fluxo de massa que passa na tubeira e o segundo o E_t é a eficiência da temperatura de estagnação (admitido a temperatura da chama adiabática em todos os casos).

Na **vigésima quarta linha** está a opção de utilizar uma tabela para os parâmetros da taxa de queima (“a” e “n”), se $tab_{pq} = 0$ não usa a tabela e usa os valores “a” e “n” do próprio arquivo de entrada e se $tab_{pq} = 1$ utiliza a tabela dos parâmetros da taxa de queima chamada “tabela_pq.txt”

Na **vigésima quinta linha** esta a opção de propelente, da mesma forma que no aplicativo Curva Empuxo 3.1 (MORO, 2017).

Finalmente na **vigésima sexta linha** está a hipótese sobre a expansão da tubeira mostrado extensivamente no relatório de Moro (2017).

6.2 EXECUÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para executar o código basta, portanto: alterar a primeira linha do arquivo “empuxo.in” para o da entrada de dados da simulação atual, no exemplo o arquivo

“entrada_Ex1.txt”. E executar o aplicativo “Empuxo_1p7.exe” na pasta principal do código (Fig. 6.1).

Aparecerá o prompt do MS-DOS, o qual irá executar o código em Fortran. Apenas será apresentada a situação atual da simulação, no final dos cálculos serão criados os gráficos e a janela será fechada automaticamente. No final da simulação a janela deverá estar como mostrado na Fig. 6.3.

```

::: INCIANDO CALCULOS :::
::: DESPRESSURIZOU :::

::: FIM DOS CALCULOS :::

```

Figura 6.3 Situação atual dos cálculos durante a simulação do motor-fogeuete no código Empuxo 1.7

Os resultados da simulação estarão armazenados na pasta “resultados” presente na pasta principal do código. OBS: Se os resultados não estiverem presentes nesta pasta ocorreu algum erro no código, se isto acontecer, revisar todos os dados de entrada e garantir que a cada variável, número ou texto colocado nos arquivos de entrada há pelo menos um espaço a direita antes dos comentários em cada linha.

Serão criados 16 arquivos, sendo 7 gráficos, 2 arquivos de texto e 7 arquivos utilizados para gerenciar a criação dos gráficos, na pasta de resultados para o caso exemplo, como mostrado na Fig. 6.4.

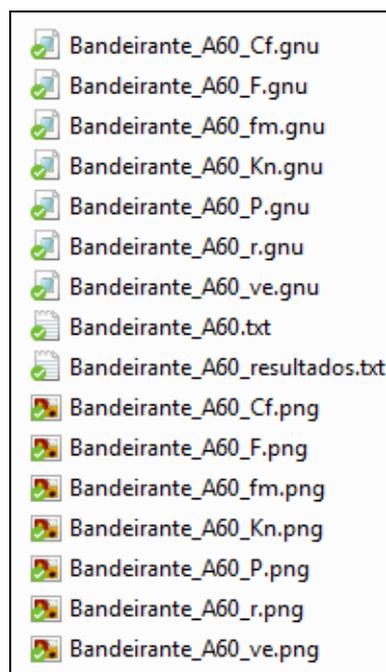


Figura 6.4 Arquivos gerados pela execução do código Empuxo 1.7

Os 7 gráficos presentes na pasta “resultados” mostrarão o comportamento das variáveis de interesse ao longo de toda a queima do motor-foguete. Os resultados apresentados são:

Bandeirante_A60_Cf.png: Curva do coeficiente de empuxo instantâneo, onde o coeficiente de empuxo é definido por: $C_f = \frac{F}{P_0 A_t}$.

Bandeirante_A60_F.png: Curva de empuxo instantânea, se expansão = 0 ou 2 será mostrado as parcelas do empuxo devido a quantidade de movimento dos gases, a parcela de empuxo de pressão e a curva de empuxo total.

Bandeirante_A60_fm.png: Curva do fluxo de massa instantâneo dos gases.

Bandeirante_A60_Kn.png: Curva da razão entre a área de queima e a área de saída dos gases instantânea.

Bandeirante_A60_P.png: Curva da pressão de estagnação instantânea do motor.

Bandeirante_A60_r.png: Curva da taxa de queima instantânea do motor (ela depende via Lei de Saint Robert da pressão de estagnação).

Bandeirante_A60_ve.png: Curva da velocidade de ejeção instantânea, se a variável expansão for igual a 0 ou 2, aqui também será apresentado a velocidade de ejeção devido as forças de pressão e quantidade de movimento e a velocidade de ejeção total.

Os dois arquivos de texto presentes na pasta “resultados” mostram o seguinte:

Bandeirante_A60.txt: Tabela principal com os resultados a cada instante de tempo, utilizado para criar os gráficos e analisar a convergência do sistema iterativo, via coluna “it”, se este valor for maior do que o número máximo de iterações para o ponto calculado significa que o problema não convergiu.

Bandeirante_A60_resultados.txt: Arquivo de saída principal do código. Contêm todos os dados de entrada da simulação atual e os seus resultados os quais estão mostrados na Fig. 6.5.

6.3 ANÁLISE DO ARQUIVO DE SAÍDA PRINCIPAL

```

::: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO :::

2.444273373863809E-03 = Massa de gás ejetada
4.126485877481011E-03 = Massa total embarcada de propelente no motor

CLASSE: A - 1.83

Tempo de queima total (s) = .8324
Tempo de despressurização (s) = .0034
Empuxo médio (N) = 1.8318
Empuxo máximo (N) = 5.1223
Impulso total (N.s) = 1.5248
Pressão média (bar) = 2.8500
Pressão máxima (bar) = 6.6376
Impulso específico (s) = 63.6119
velocidade de ejeção efetiva média (m/s) = 623.8195

:: Parâmetros baseados na massa de propelente embarcada (real) ::
Impulso específico (s) = 37.6797
Velocidade de ejeção efetiva média (m/s) = 369.5118

```

Figura 6.5 Resultados apresentados no arquivo de saída "Bandeirante_A60_resultados.txt"

De início é mostrado a massa total de gás ejetada e a massa total embarcada de propelente no motor (considerando, a fração de condensado como parte do propelente), nos cálculos a fração de condensado nada contribui para o desempenho do motor-foguete, na prática reduz a velocidade de ejeção efetiva média e o impulso específico do motor.

Após isto é mostrado a classificação do motor, no caso é um motor A1,83, ou seja, possui entre 1,25 a 2,50 N.s de impulso total e possui um empuxo médio de 1,83 N.

É mostrado a seguir o tempo de queima total e o tempo da despressurização do motor (quando a área de queima acaba), o empuxo médio e máximo exercido pelo motor. O impulso total realizado pelo motor, as pressões média e máxima seguidas pelo impulso específico e velocidade de ejeção efetiva média baseados nos gases que deixaram o motor-foguete.

Mas sabe-se que na realidade não há apenas gases que resultam da queima do propelente no interior do motor-foguete, logo estes valores não representam exatamente a realidade, é necessário corrigir a massa com a fração de condensado teórica. É apresentado no

final dos resultados, os valores de impulso específico e velocidade de ejeção efetiva média considerando a massa total de propelente embarcada no motor.

7 REFERÊNCIAS

MORO D. F., *Teoria do aplicativo Curva Empuxo 3.2*, Relatório do grupo de pesquisa: CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

NAKKA R., *Solid Rocket Motor Theory – Chamber Pressure* Disponível em <http://www.nakka-rocketry.net/th_pres.html>. Acesso em 12 abr 2016.

SUTTON G. P., *Rocket Propulsion Elements*. 6 ed. New York: John Wiley & Sons. Inc., 1992.