

DIEGO FERNANDO MORO

**ANÁLISE DOS MOTORES NETUNO-R DO TE DE
24/10/2015**

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

**CURITIBA
29 OUT 2015**

SUMÁRIO

1 Dados relevantes dos Netuno-R e do TE.....	4
1.1 Forma proposta para cálculo dos limites da curva de empuxo.....	4
2 Análise com o aplicativo Curva_Empuxo 3.0.....	5
2.1 NR-1 (X).....	6
2.1.1 Curva de empuxo.....	6
2.1.2 Pressão de estagnação.....	7
2.1.3 Coeficiente de empuxo.....	7
2.1.4 Velocidade de ejeção efetiva.....	8
2.1.5 Fluxo de massa.....	8
2.2 NR-2 (&).....	9
2.2.1 Curva de empuxo.....	9
2.2.2 Pressão de estagnação.....	9
2.2.3 Coeficiente de empuxo.....	10
2.2.4 Velocidade de ejeção efetiva.....	10
2.2.5 Fluxo de massa.....	11
2.3 NR-3 (G).....	11
2.3.1 Curva de empuxo.....	11
2.3.2 Pressão de estagnação.....	12
2.3.3 Coeficiente de empuxo.....	12
2.3.4 Velocidade de ejeção efetiva.....	13
2.3.5 Fluxo de massa.....	13
3 Análise com o aplicativo Empuxo 1.4.....	14
3.1 NR-1 (X) – Grão Tubular.....	15
3.1.1 Curva de empuxo.....	15
3.1.2 Pressão de estagnação.....	15
3.1.3 Velocidade de ejeção efetiva.....	16
3.1.4 Fluxo de massa.....	16
3.2 NR-1 (X) – Grão totalmente desinibido.....	17
3.2.1 Curva de empuxo.....	17
3.2.2 Pressão de estagnação.....	17
3.2.3 Velocidade de ejeção efetiva.....	18
3.2.4 Fluxo de massa.....	18

3.3 NR-2 (&)– Grão Tubular	19
3.3.1 Curva de empuxo	19
3.3.2 Pressão de estagnação	19
3.3.3 Velocidade de ejeção efetiva	20
3.3.4 Fluxo de massa	20
3.4 NR-2 (&)– Grão totalmente desinibido	21
3.4.1 Curva de empuxo	21
3.4.2 Pressão de estagnação	21
3.4.3 Velocidade de ejeção efetiva	22
3.4.4 Fluxo de massa	22
3.5 NR-3 (G)– Grão Tubular	23
3.5.1 Curva de empuxo	23
3.5.2 Pressão de estagnação	23
3.5.3 Velocidade de ejeção efetiva	24
3.5.4 Fluxo de massa	24
3.6 NR-3 (G)– Grão totalmente desinibido	25
3.6.1 Curva de empuxo	25
3.6.2 Pressão de estagnação	25
3.6.3 Velocidade de ejeção efetiva	26
3.6.4 Fluxo de massa	26
4 Comparações teórico (Empuxo 1p4) – Experimental (Curva_Empuxo 3p0).....	27
4.1 Tabelas comparativas	27
4.1.1 Impulso total	27
4.1.2 Força de empuxo máxima.....	27
4.1.3 Tempo de queima do propelente.....	27
4.1.4 Força de empuxo média.....	28
4.1.5 Pressão de estagnação máxima.....	28
4.1.6 Pressão de estagnação média.....	28
4.2 Discussão e conclusões.....	28

1 DADOS RELEVANTES DOS NETUNO-R E DO TE

Os dados mais relevantes do TE dos Netuno-R no dia 24/10/2015 estão presentes na tabela abaixo.

Tabela 1 Dados relevantes sobre o TE dos Netuno-R de 24/10/2015

Envólucro	X	&	G
OBS	Prensado	Prensado	Acetona
Tubeira	Al-G	CL	CC
hora	15:22	15:35	15:57
Tatm (°C)	20,1	20,1	20,1
patm (kPa)	91,16	91,14	91,13
Dg (mm)	12,35	11,62	14,27
Ds (mm)	39,57	N/A	N/A
mr (g)	9,5	7,7	5,3
mp(g)	69,41	89,67	120,19
mej(g)	59,91	81,97	114,89
Di (mm)	38,1	38,1	38,1
Da (mm)	25,45	25,45	19,24
Lg (mm)	100	114	112

1.1 FORMA PROPOSTA PARA CÁLCULO DOS LIMITES DA CURVA DE EMPUXO

A nova forma proposta é a seguinte:

- 1) Com base na metade da força máxima de toda a curva de empuxo
- 2) Busca-se os limites temporais entre o início e o fim desta força
- 3) Calcula-se o Impulso Total gerado por essa definição temporal
- 4) Com base na metade da força calculada anteriormente
- 5) Busca-se os limites temporais entre o início e o fim desta força
- 6) Calcula-se o Impulso Total gerado por essa definição temporal
- 7) Calcula-se a diferença percentual entre o Impulso Total calculado no passo 3) com o do passo 6), se esta diferença for menor que uma certa tolerância, os limites da curva de empuxo estão definidos, senão volta-se ao passo 4)

Uma tolerância utilizada que gerou bons resultados para todos os casos testados é 5%, a figura abaixo representa as áreas e forças que são utilizadas no algoritmo:

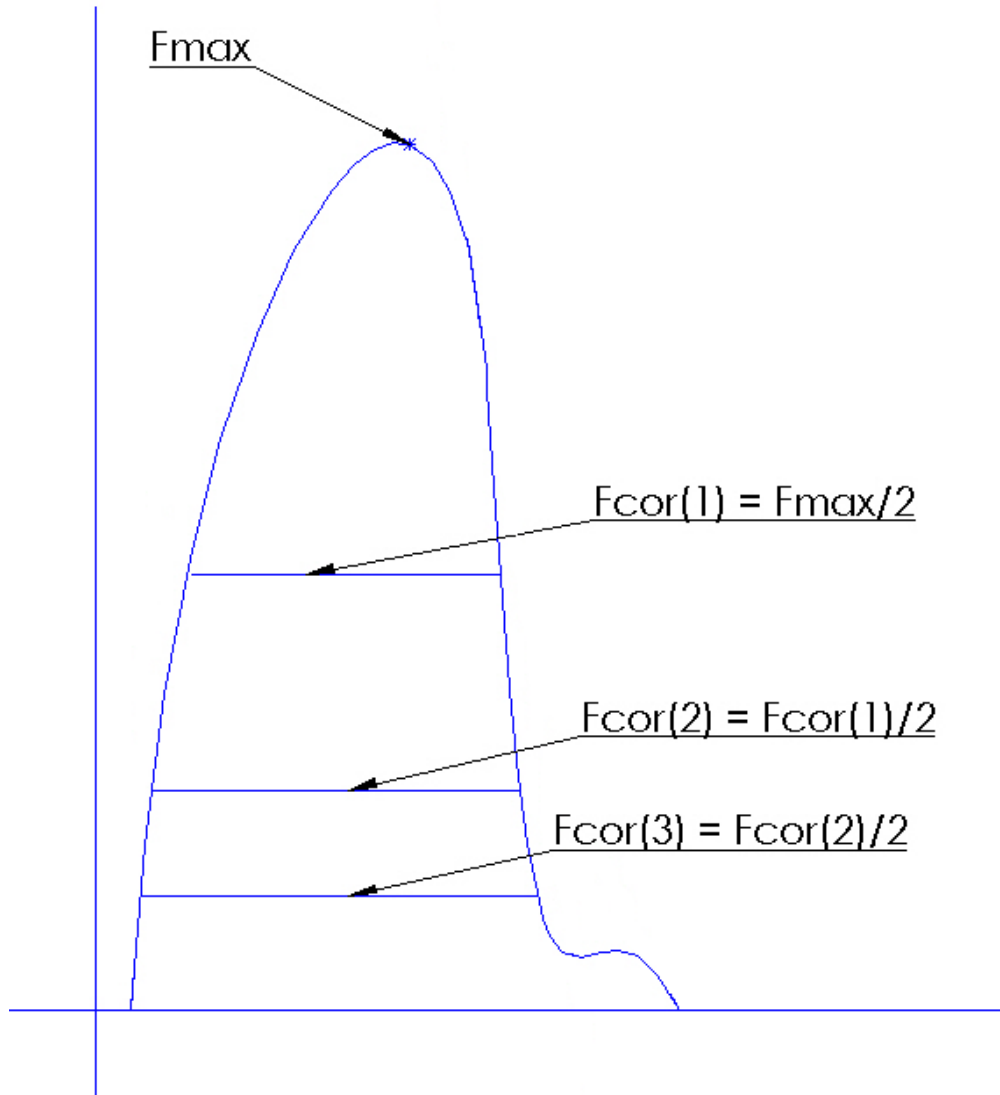


Figura 1 Subdivisões que são utilizadas no algoritmo para definir os limites da curva de empuxo

2 ANÁLISE COM O APLICATIVO CURVA_EMPUXO 3.0

Neste item são mostrados os resultados da curva de empuxo dos motores Netuno-R com o aplicativo Curva_Empuxo 3.0 aplicando a hipótese de expansão até a garganta. A definição da curva de empuxo é aquela definida no item 1 deste documento.

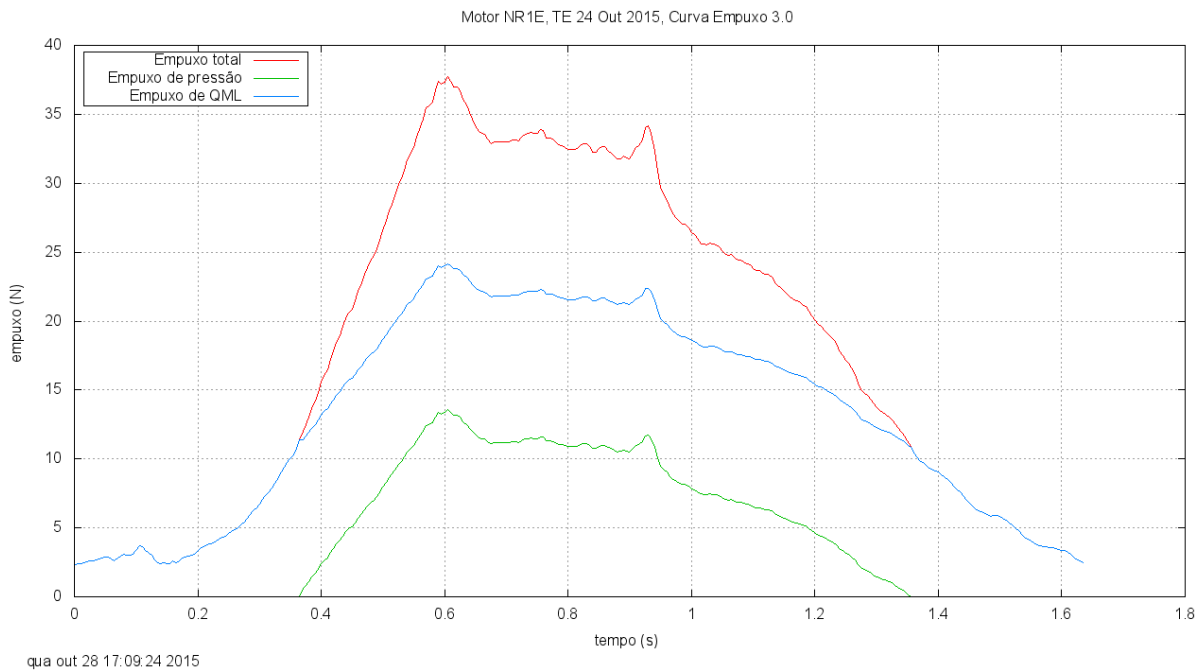
A tabela resumindo os resultados dos motores está mostrada abaixo.

Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
It (Ns)	29,32	54,15	29,76
E _{max} (N)	37,74	66,5	159,19
t _{qp} (s)	1,64	1,17	1,13
p _{max} (bar)	3,44	6,09	9,21
p _{med} (bar)	2,05	4,47	2,18

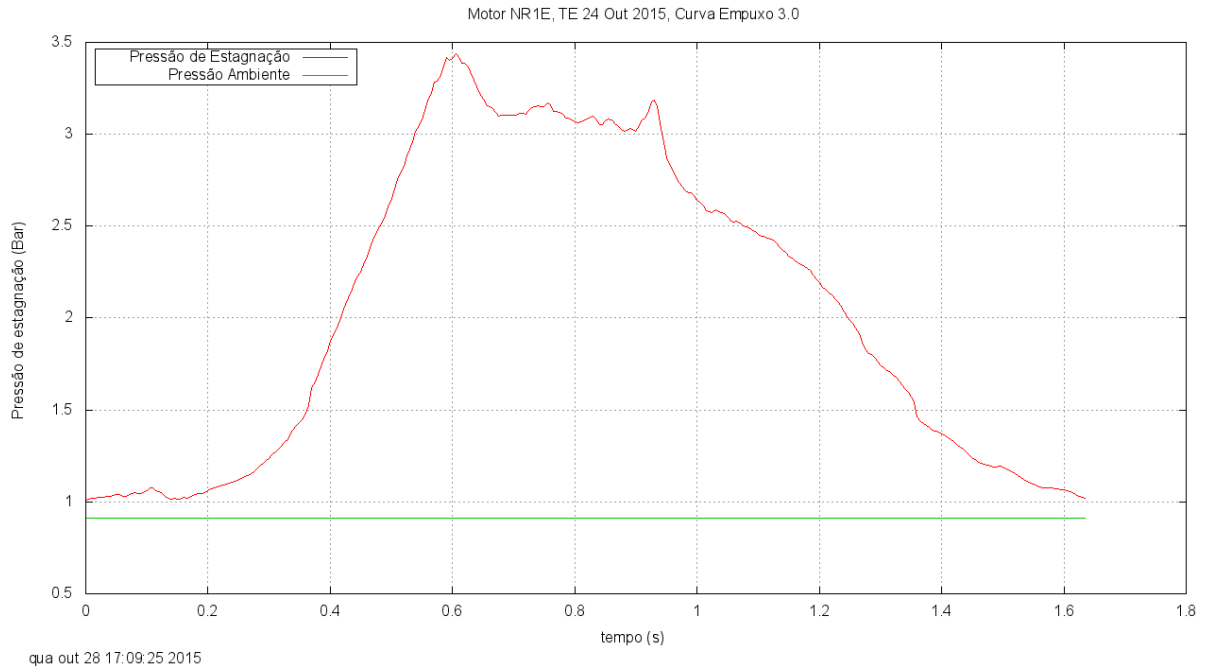
A seguir serão mostrados os principais campos obtidos pelo aplicativo Curva_Empuxo 3.0 para cada um dos três motores testados.

2.1 NR-1 (X)

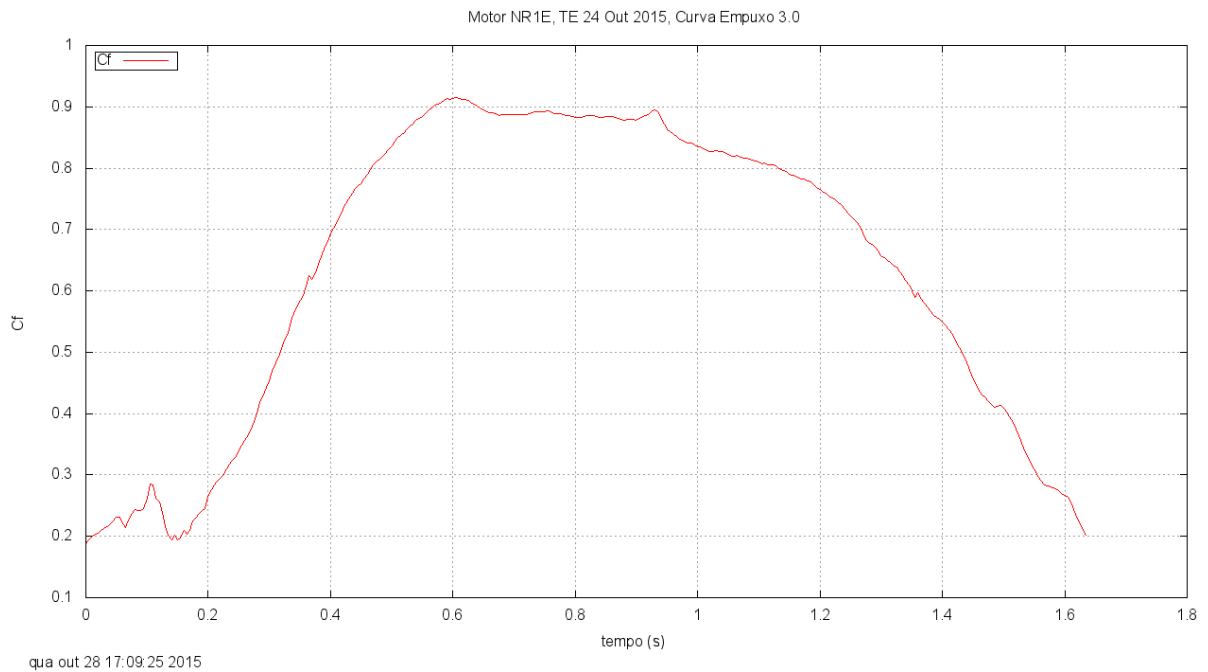
2.1.1 Curva de empuxo



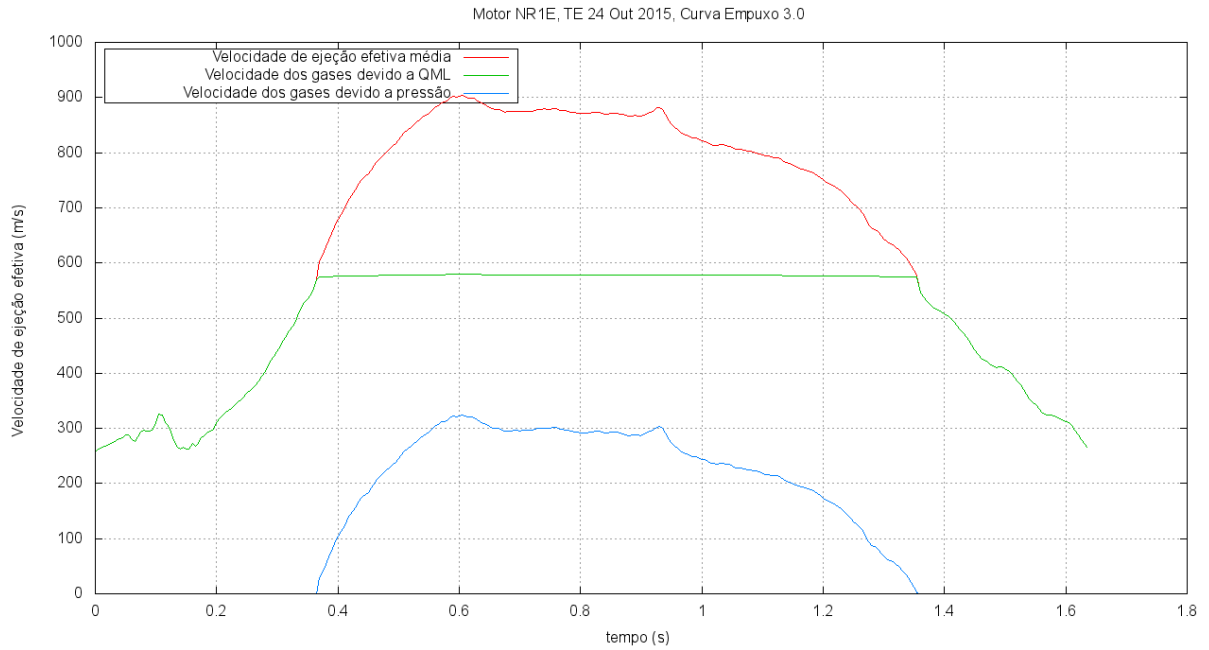
2.1.2 Pressão de estagnação



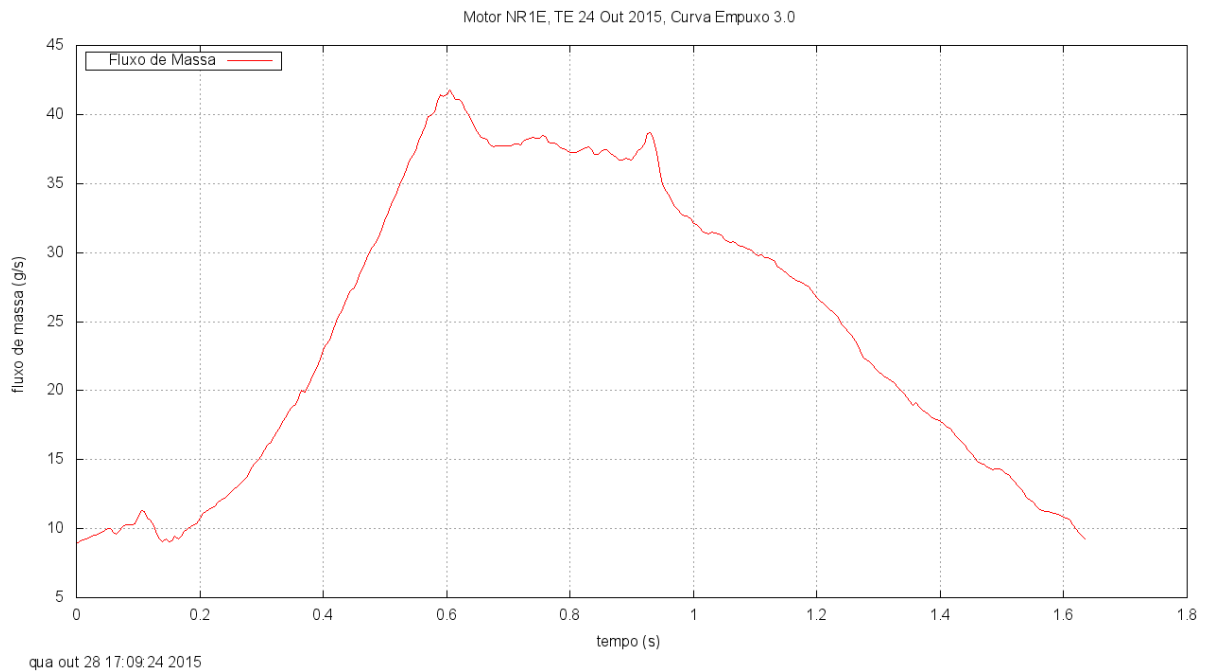
2.1.3 Coeficiente de empuxo



2.1.4 Velocidade de ejeção efetiva

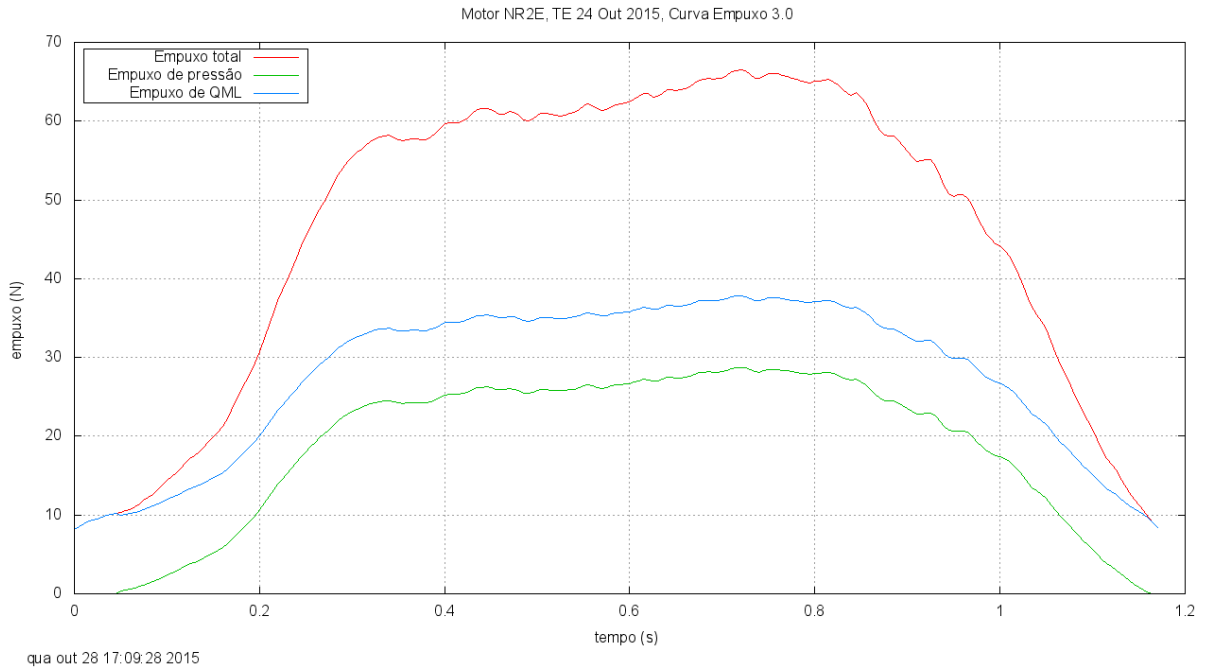


2.1.5 Fluxo de massa

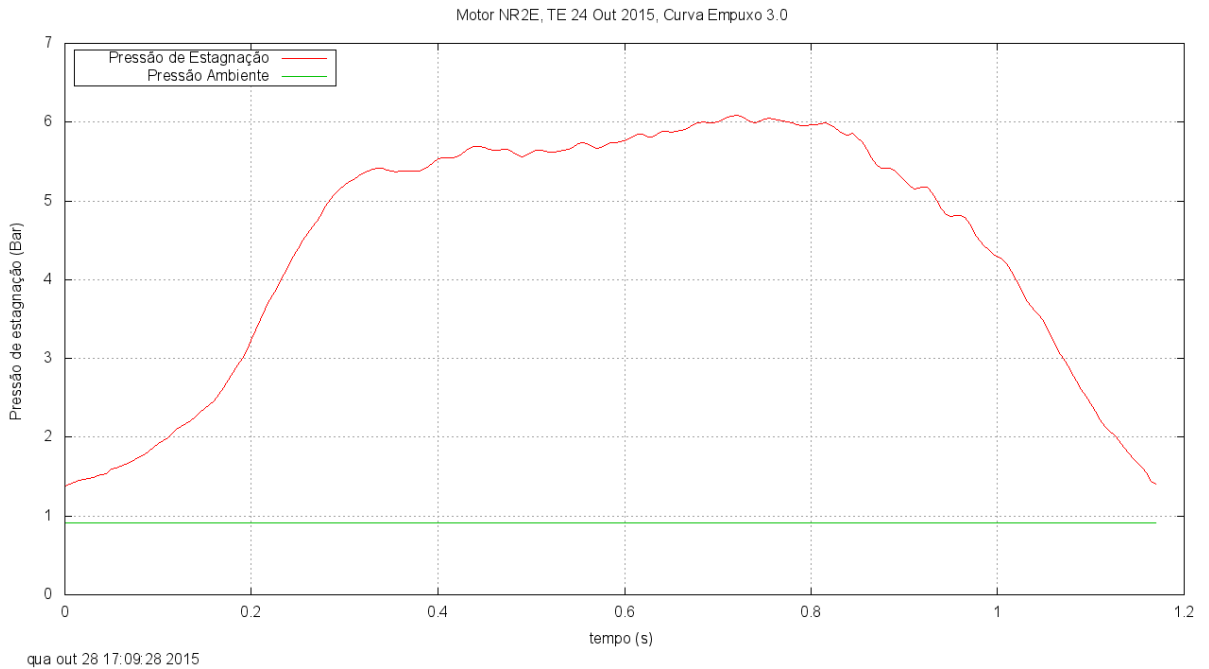


2.2 NR-2 (&)

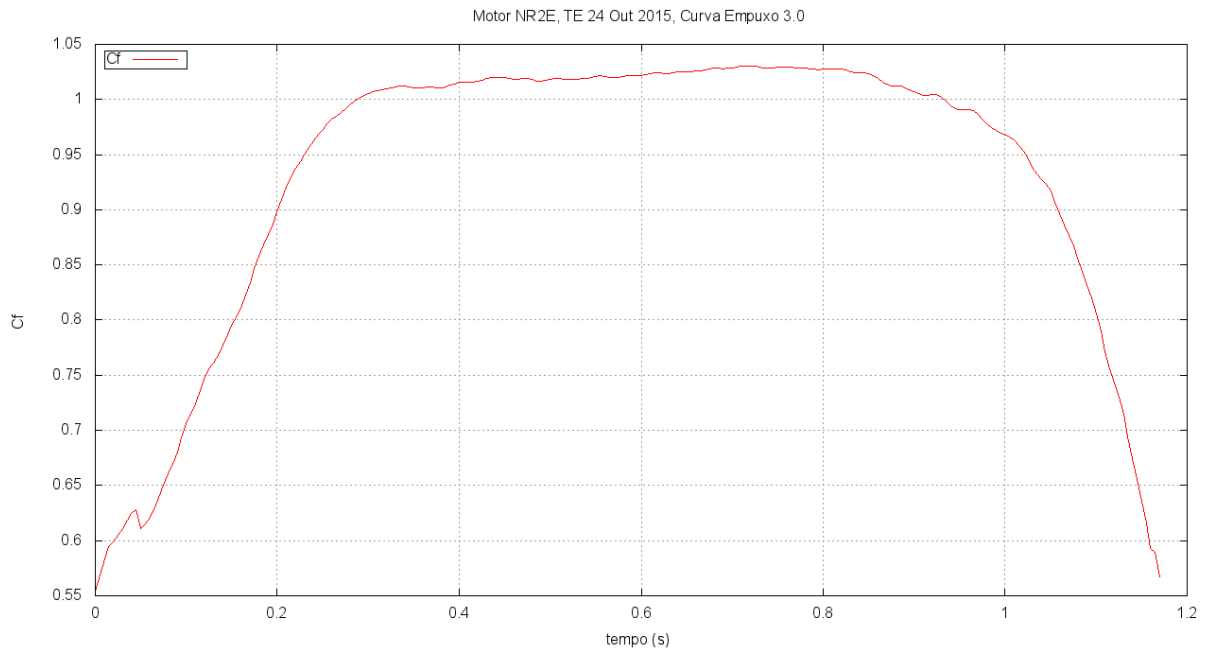
2.2.1 Curva de empuxo



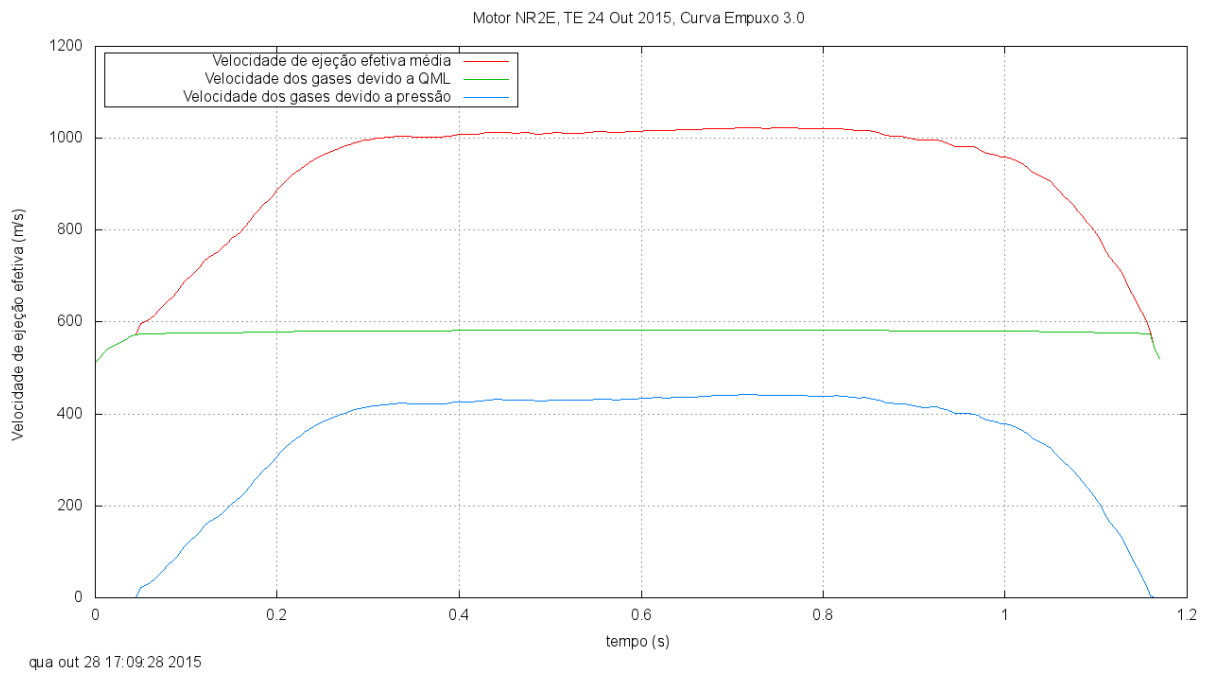
2.2.2 Pressão de estagnação



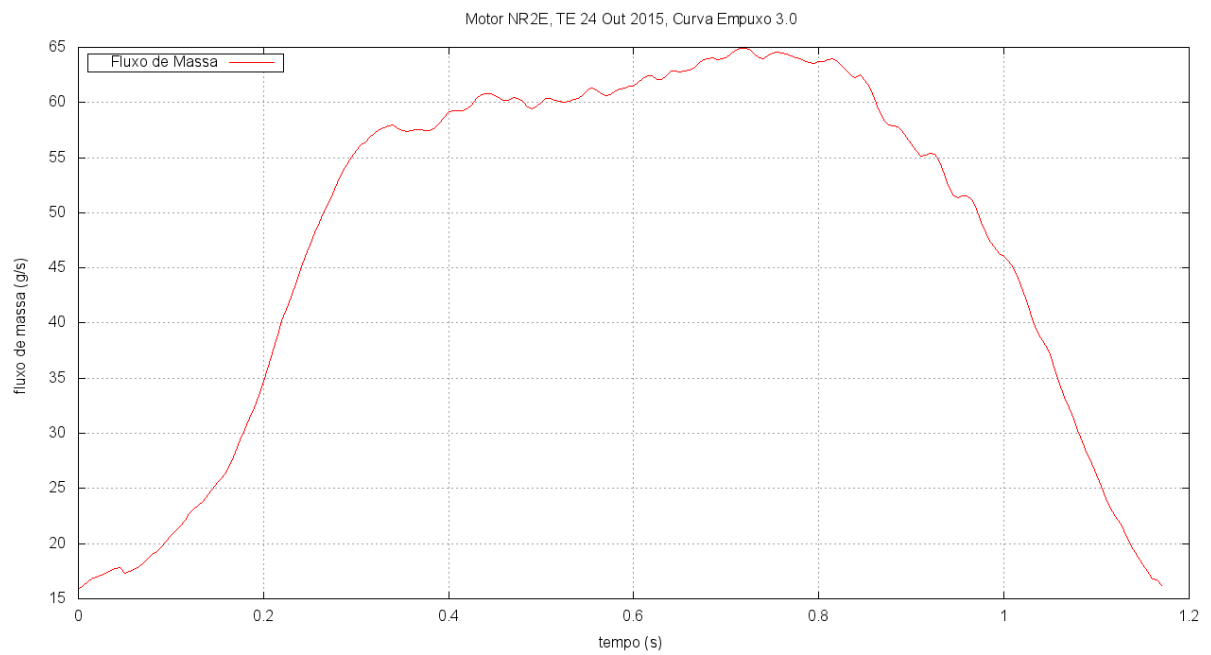
2.2.3 Coeficiente de empuxo



2.2.4 Velocidade de ejeção efetiva

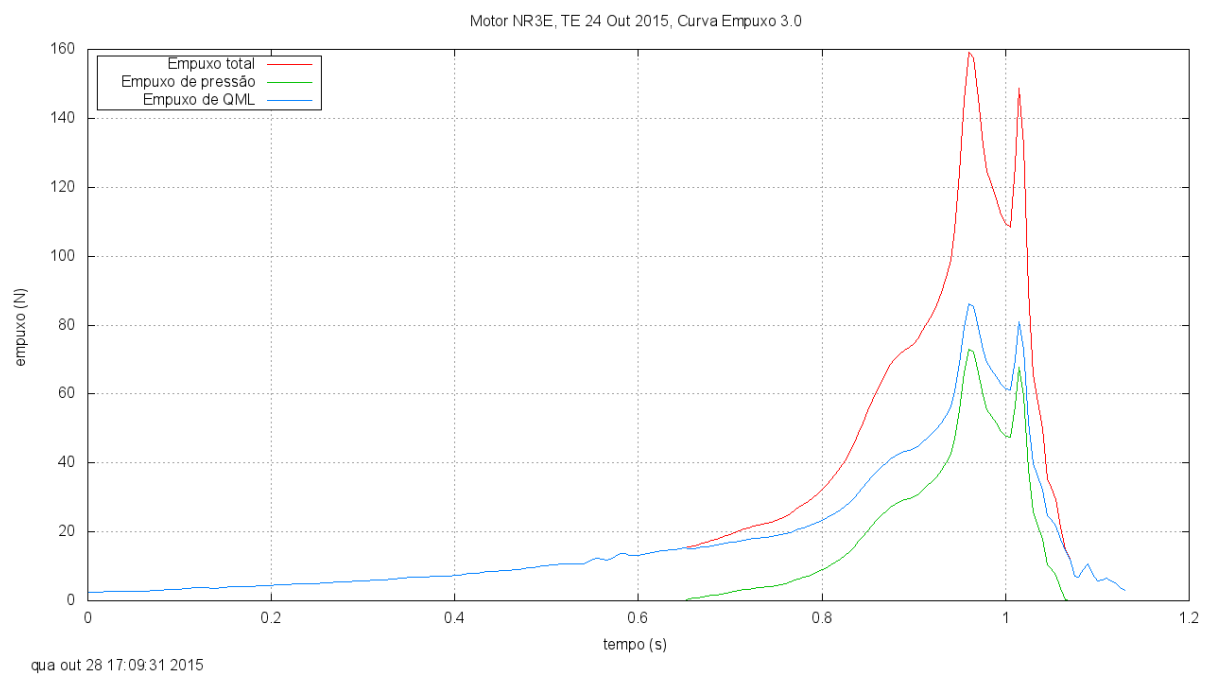


2.2.5 Fluxo de massa

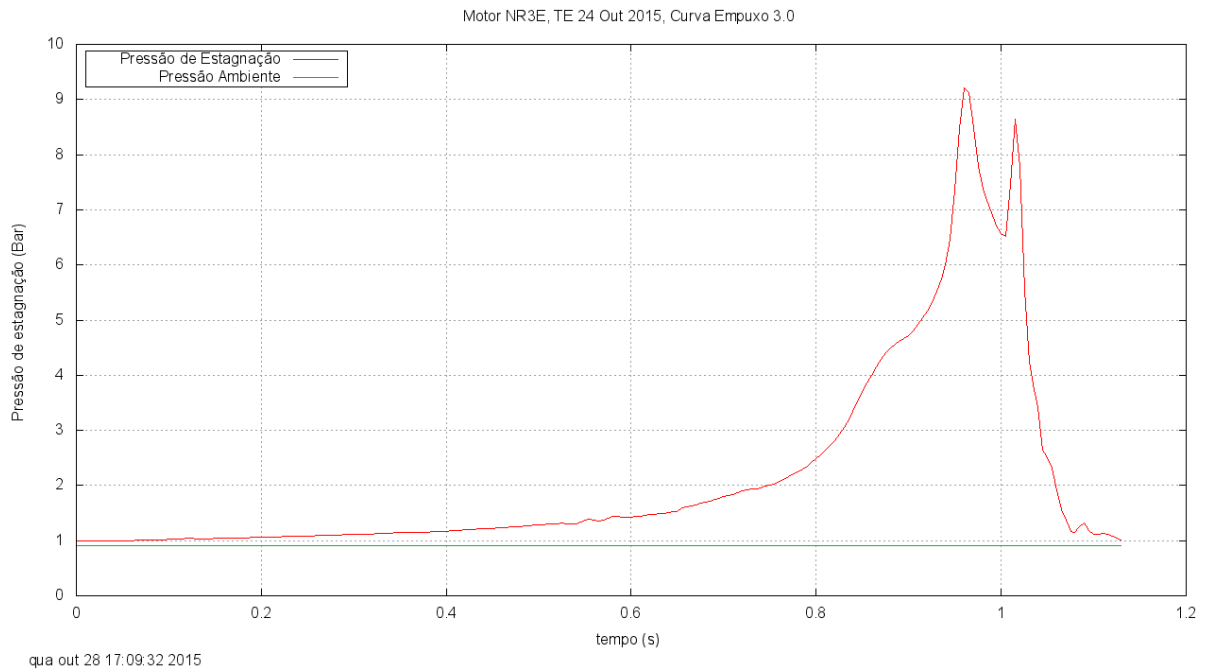


2.3 NR-3 (G)

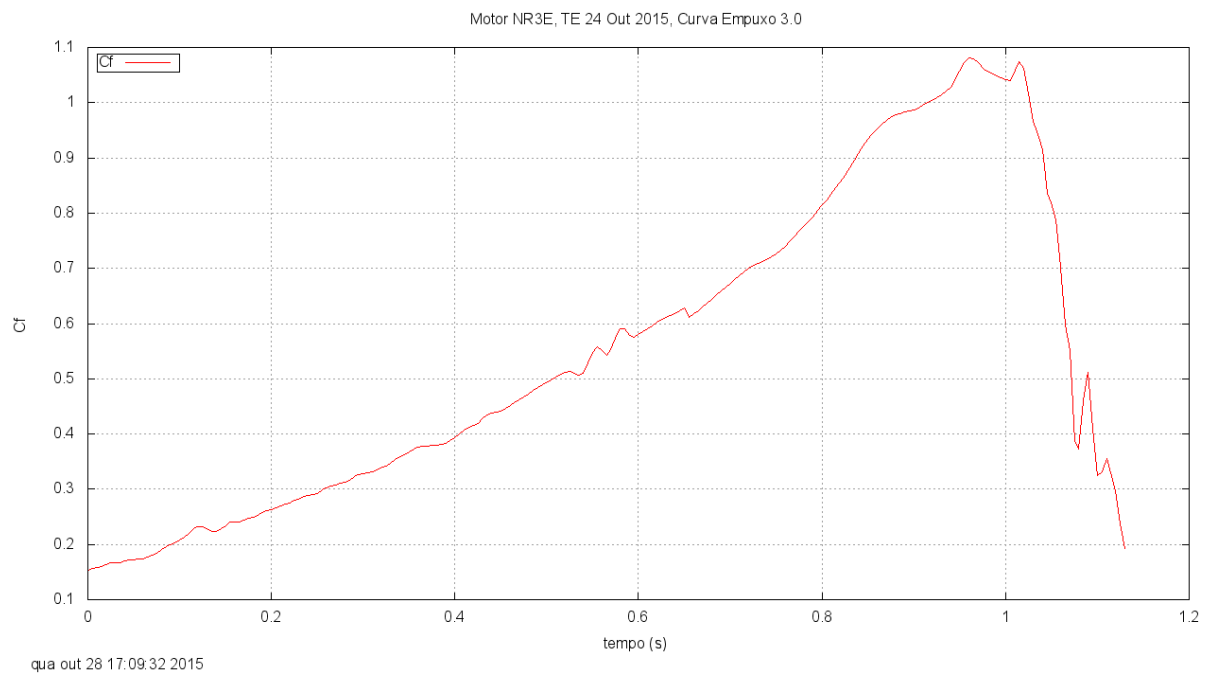
2.3.1 Curva de empuxo



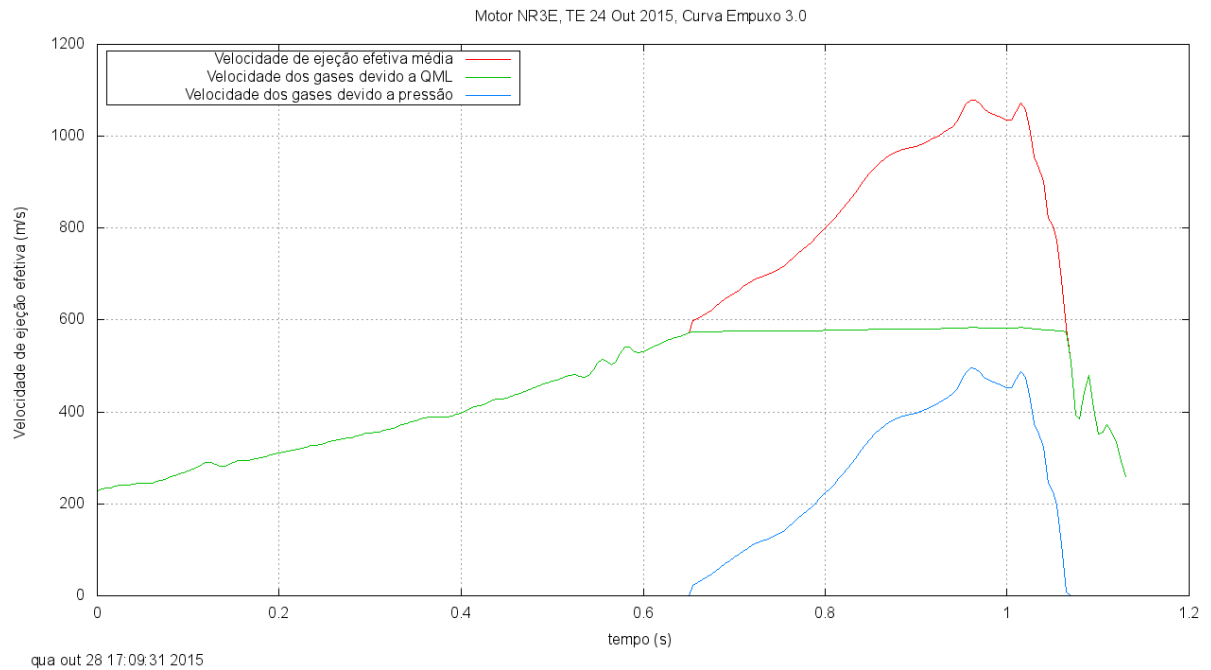
2.3.2 Pressão de estagnação



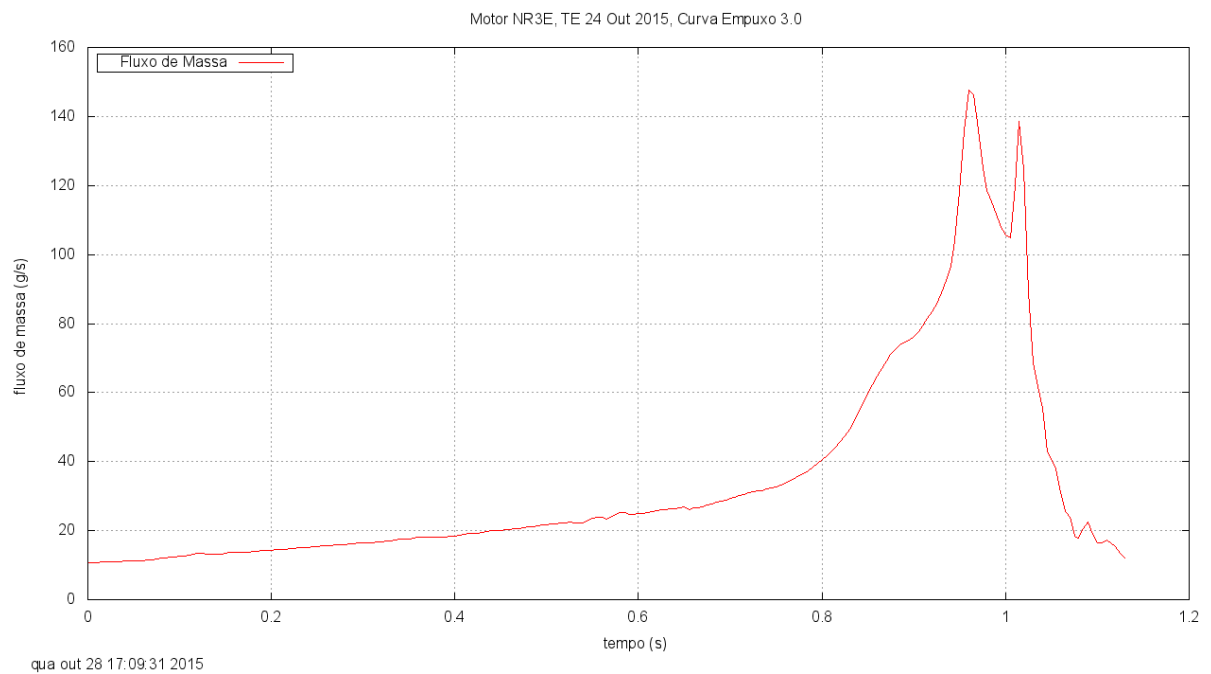
2.3.3 Coeficiente de empuxo



2.3.4 Velocidade de ejeção efetiva



2.3.5 Fluxo de massa



3 ANÁLISE COM O APLICATIVO EMPUXO 1.4

Neste item são mostrados os resultados da curva de empuxo dos motores Netuno-R com o aplicativo Empuxo 1.4.

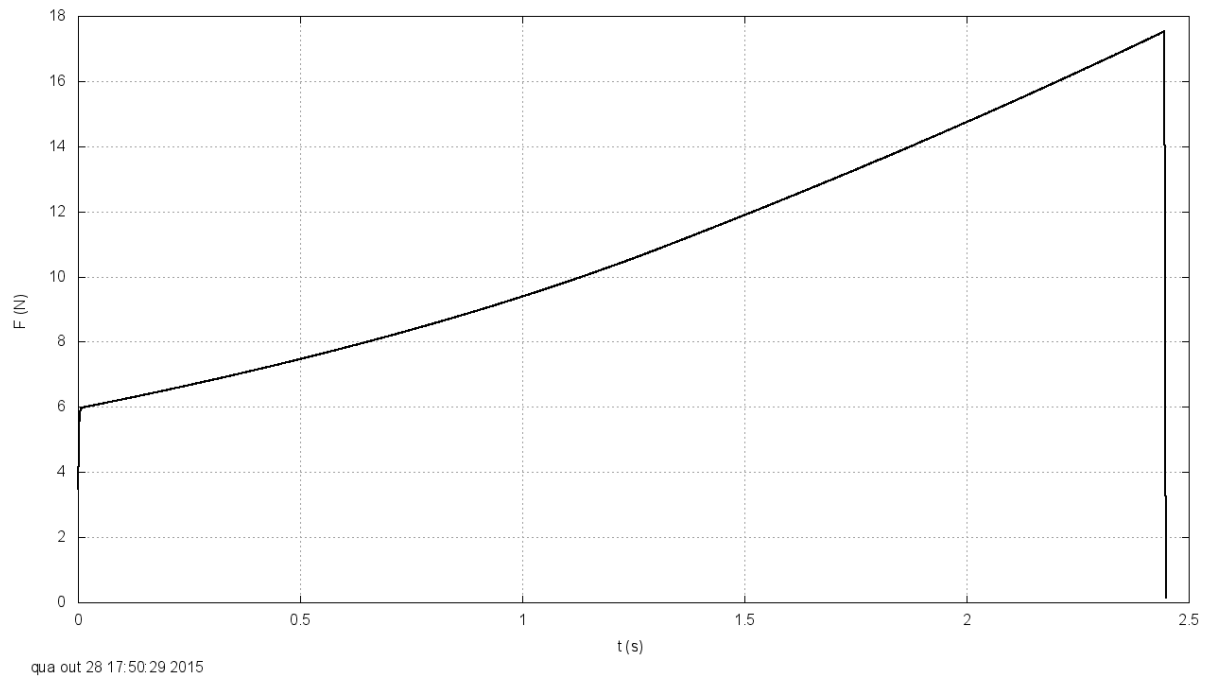
A tabela resumindo os resultados dos motores está mostrada abaixo.

	Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Grao = 2, Tubular	It (Ns)	26,66	48,12	40,26
	Emax (N)	17,52	36,02	21,36
	tqp (s)	2,449	1,982	3,851
	c (m/s)	384,2	536,6	335,0
	pmax (bar)	2,022	3,604	1,913
	pmed (bar)	1,547	2,703	1,348
Grao = 3, Desinibido	It (Ns)	43,49	63,71	70,95
	Emax (N)	59,65	106,2	62,45
	tqp (s)	0,827	0,672	1,327
	c (m/s)	626,5	710,4	590,3
	pmax (bar)	4,819	8,441	4,000
	pmed (bar)	4,351	7,624	3,553

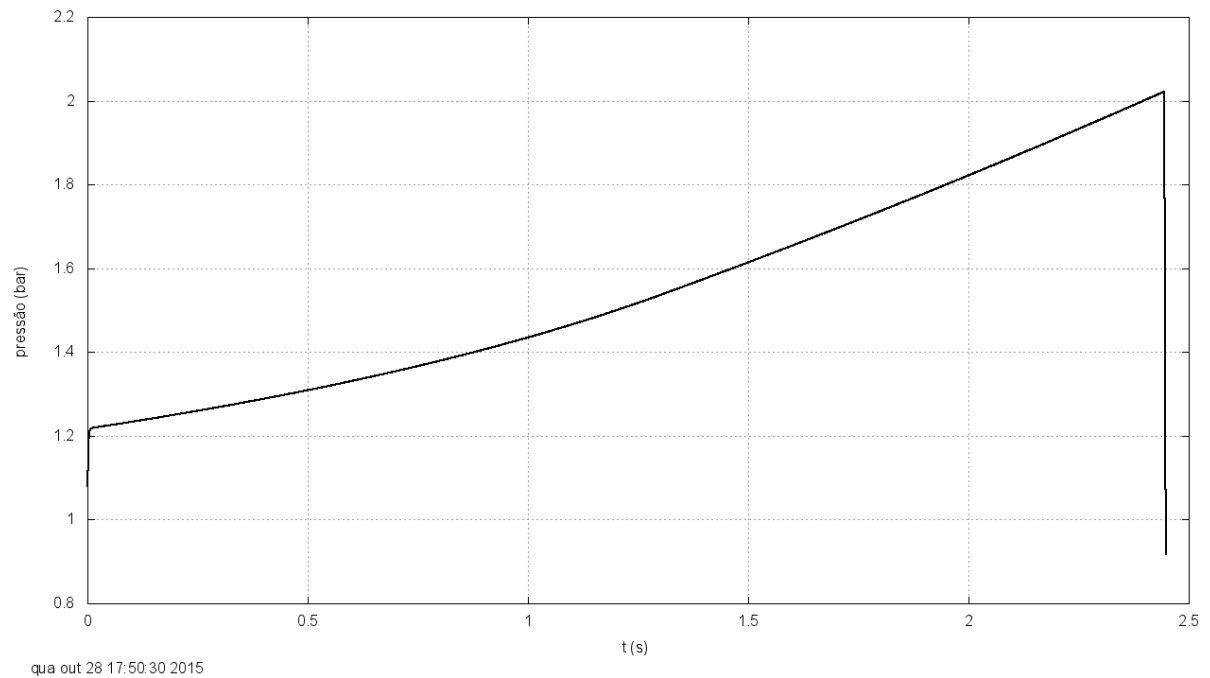
A seguir serão mostrados os principais campos obtidos pelo aplicativo Empuxo 1.4 para cada um dos três motores testados.

3.1 NR-1 (X) – GRÃO TUBULAR

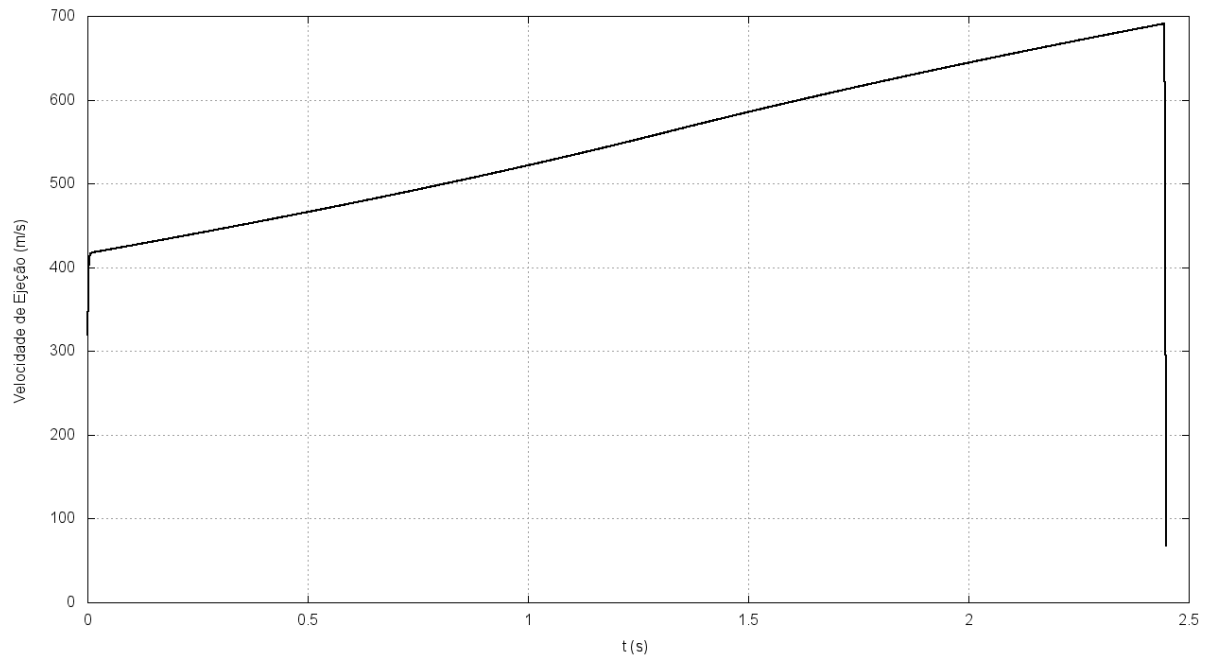
3.1.1 Curva de empuxo



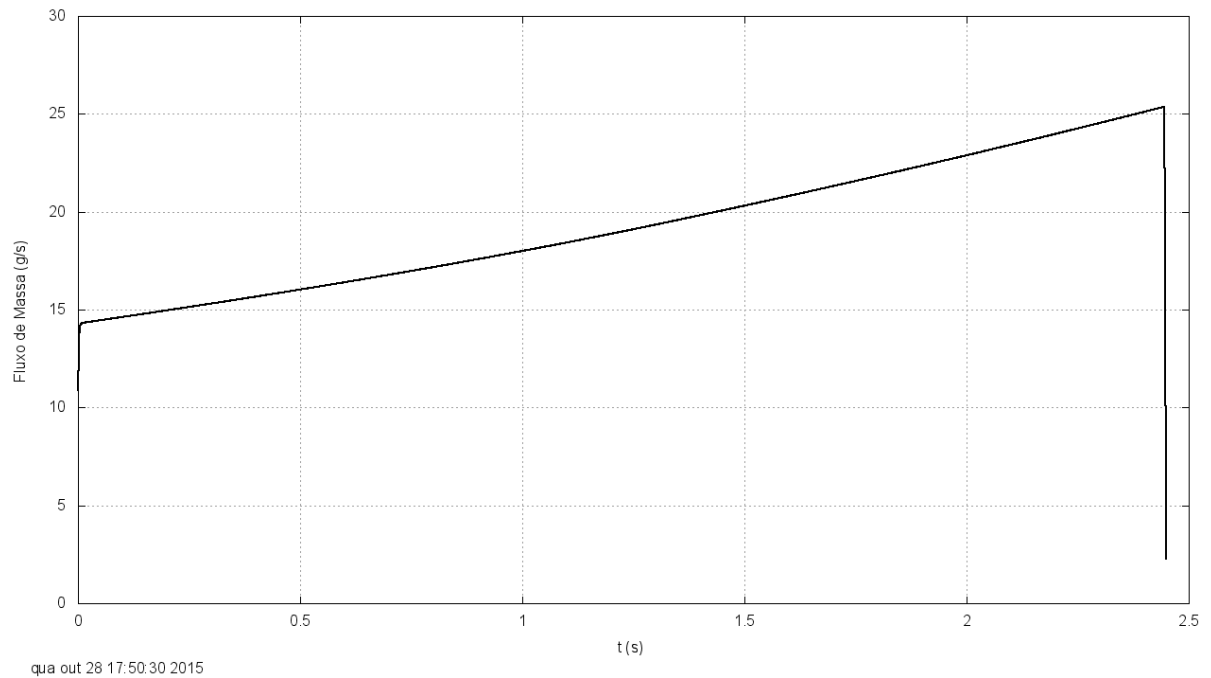
3.1.2 Pressão de estagnação



3.1.3 Velocidade de ejeção efetiva

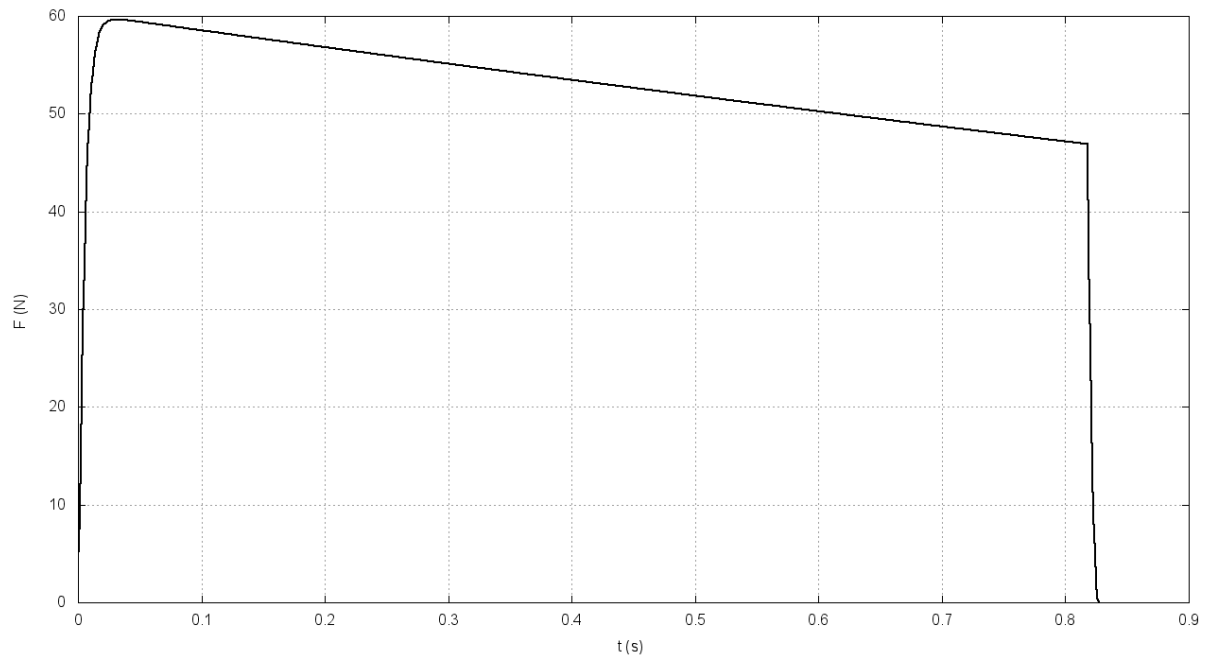


3.1.4 Fluxo de massa

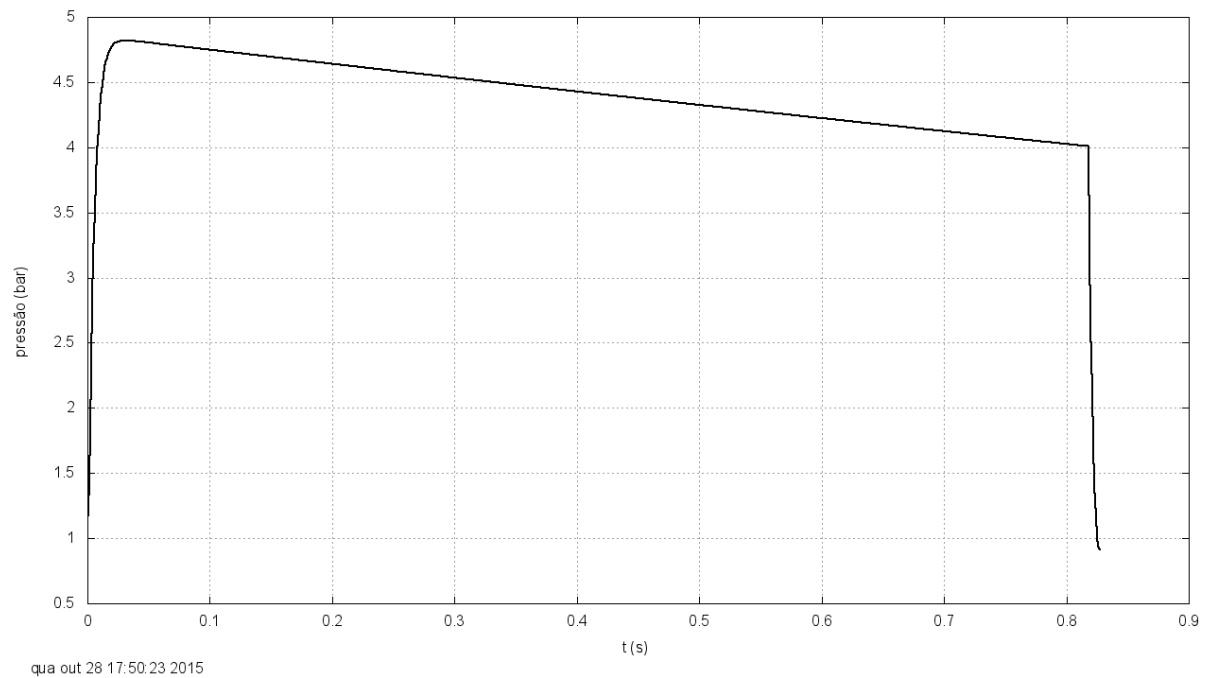


3.2 NR-1 (X) – GRÃO TOTALMENTE DESINIBIDO

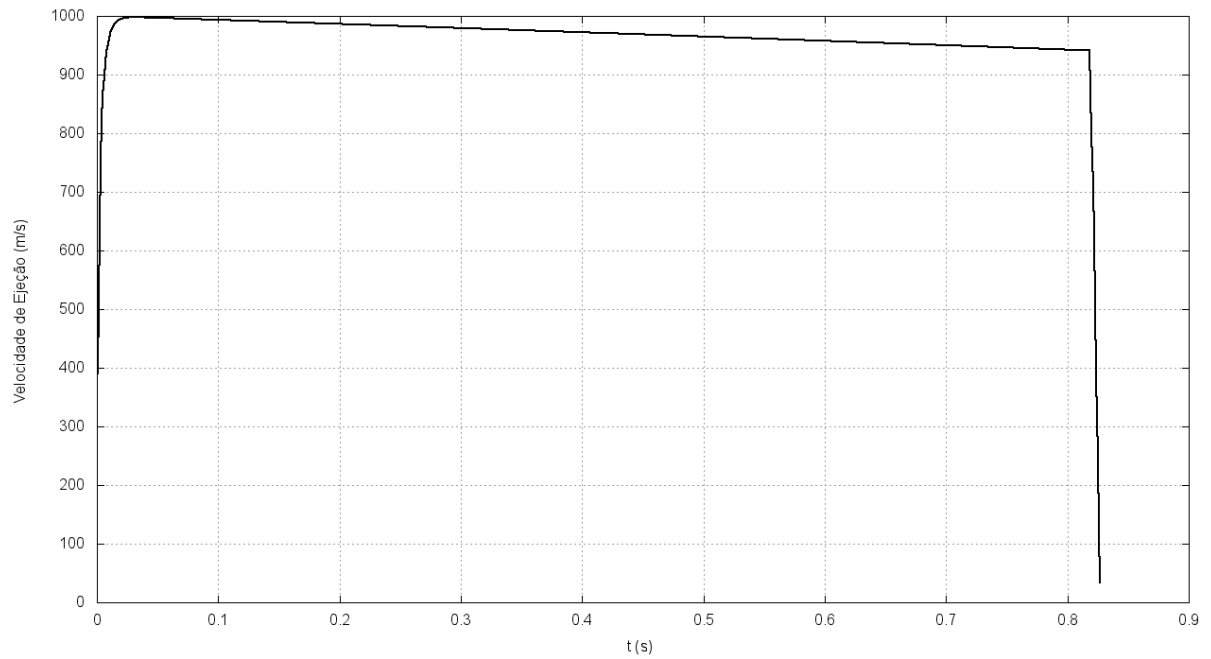
3.2.1 Curva de empuxo



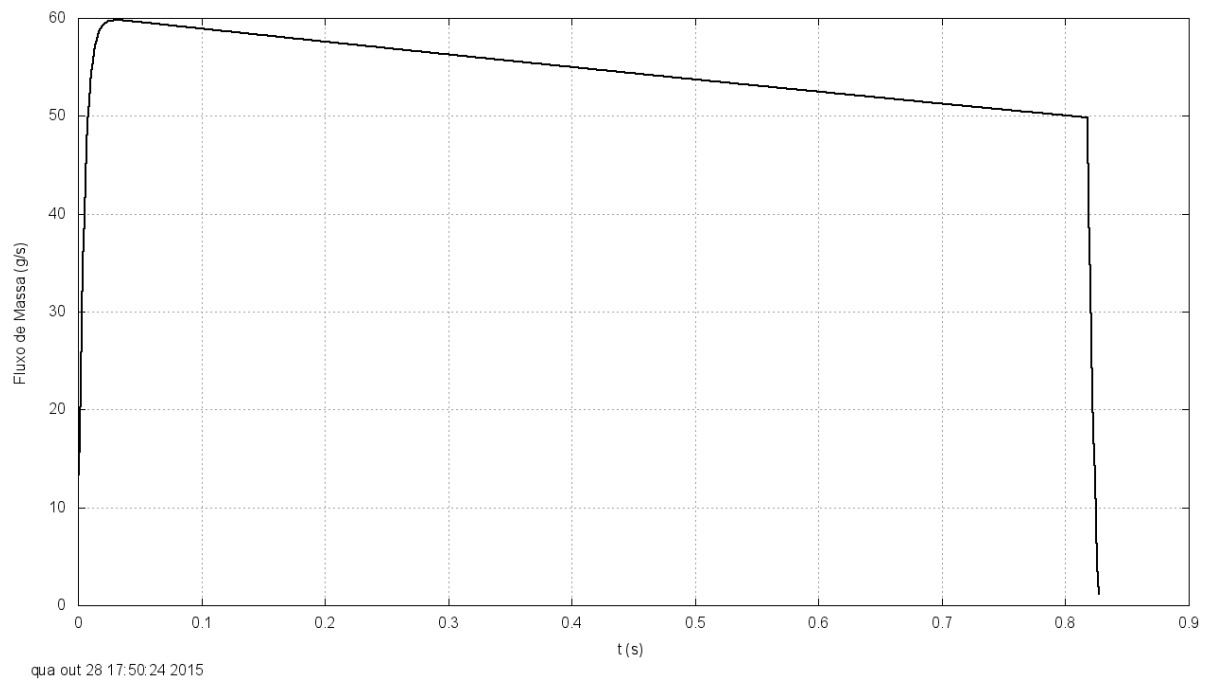
3.2.2 Pressão de estagnação



3.2.3 Velocidade de ejeção efetiva

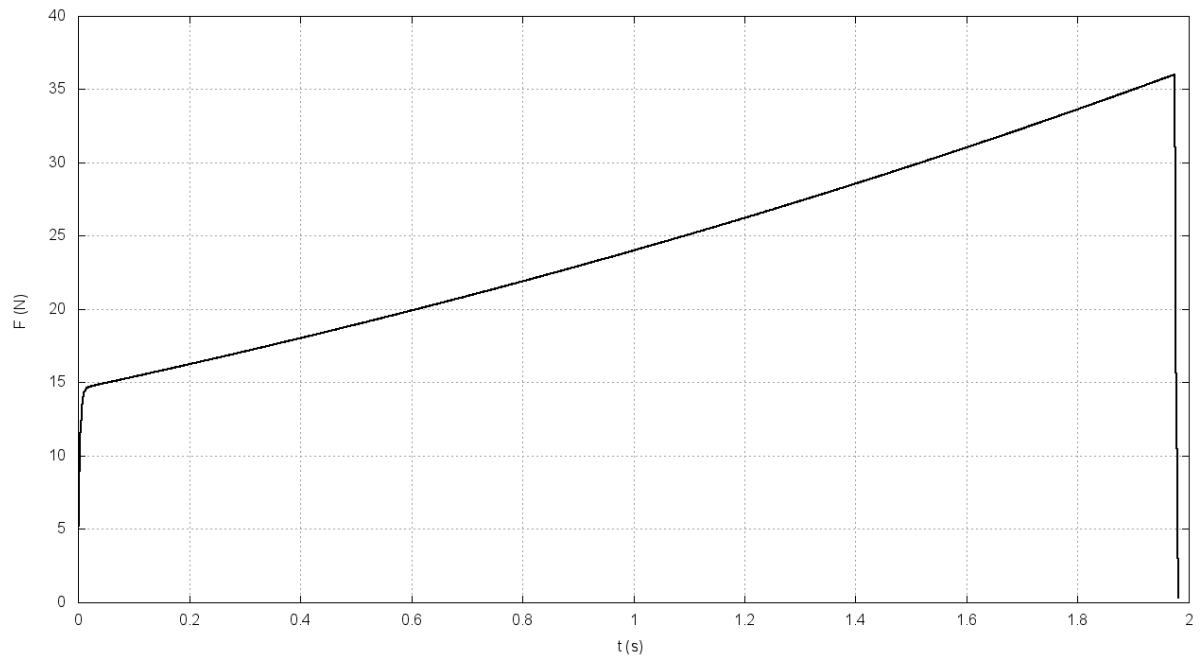


3.2.4 Fluxo de massa

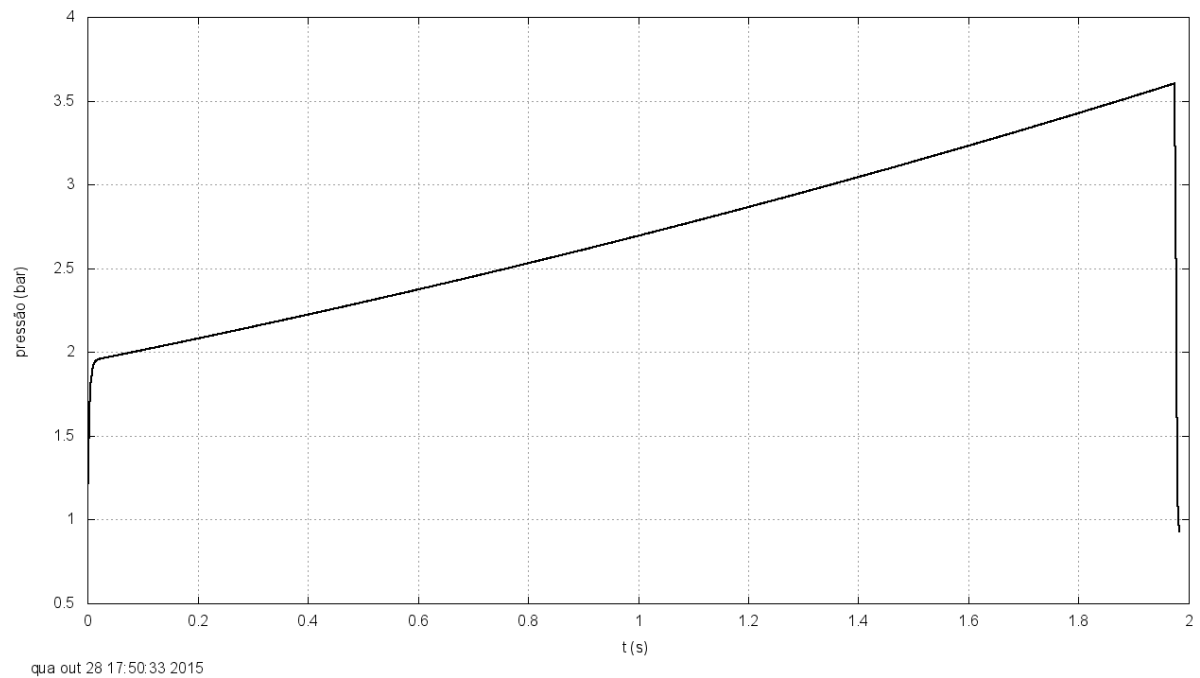


3.3 NR-2 (&)- GRÃO TUBULAR

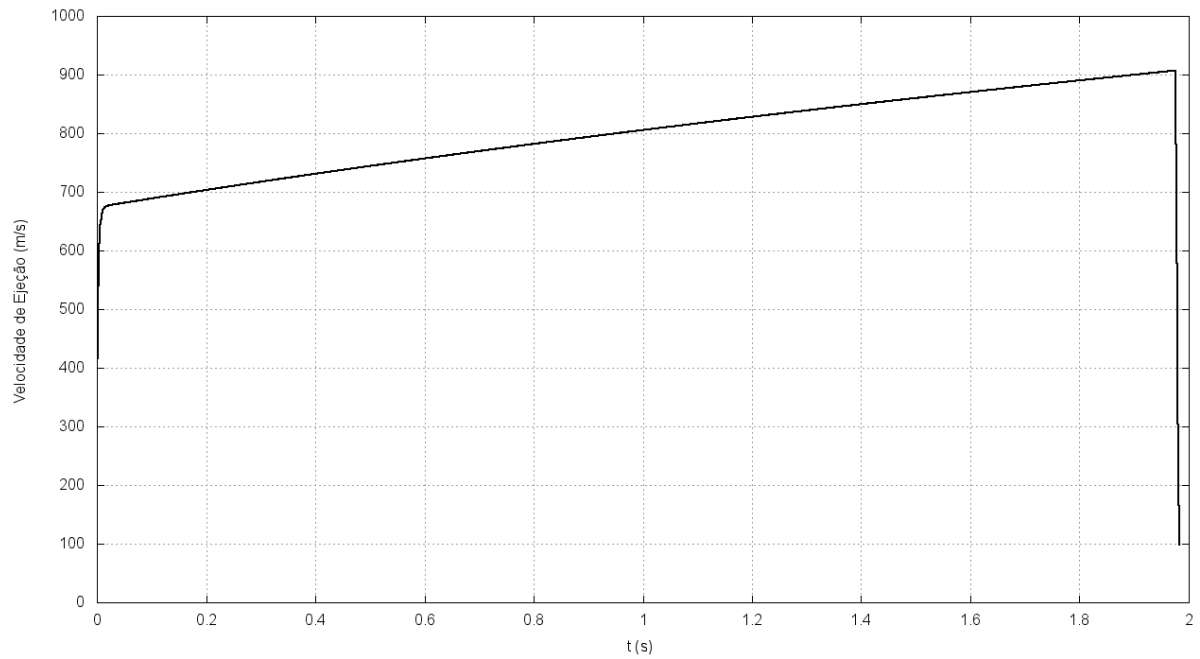
3.3.1 Curva de empuxo



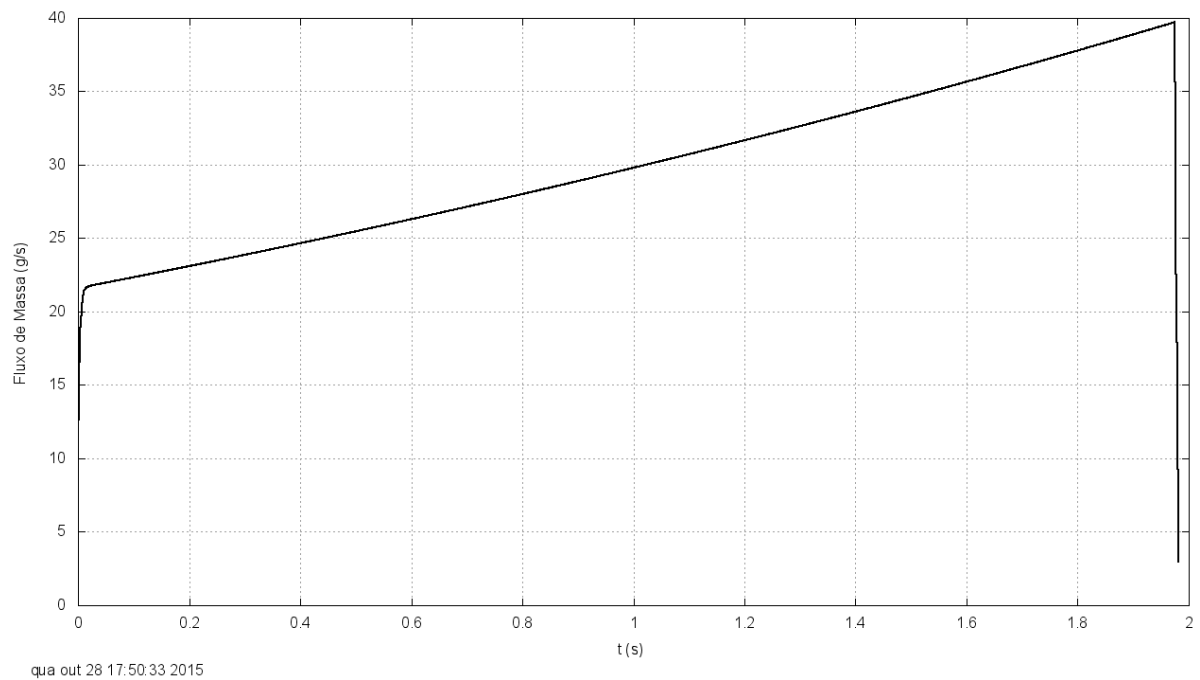
3.3.2 Pressão de estagnação



3.3.3 Velocidade de ejeção efetiva

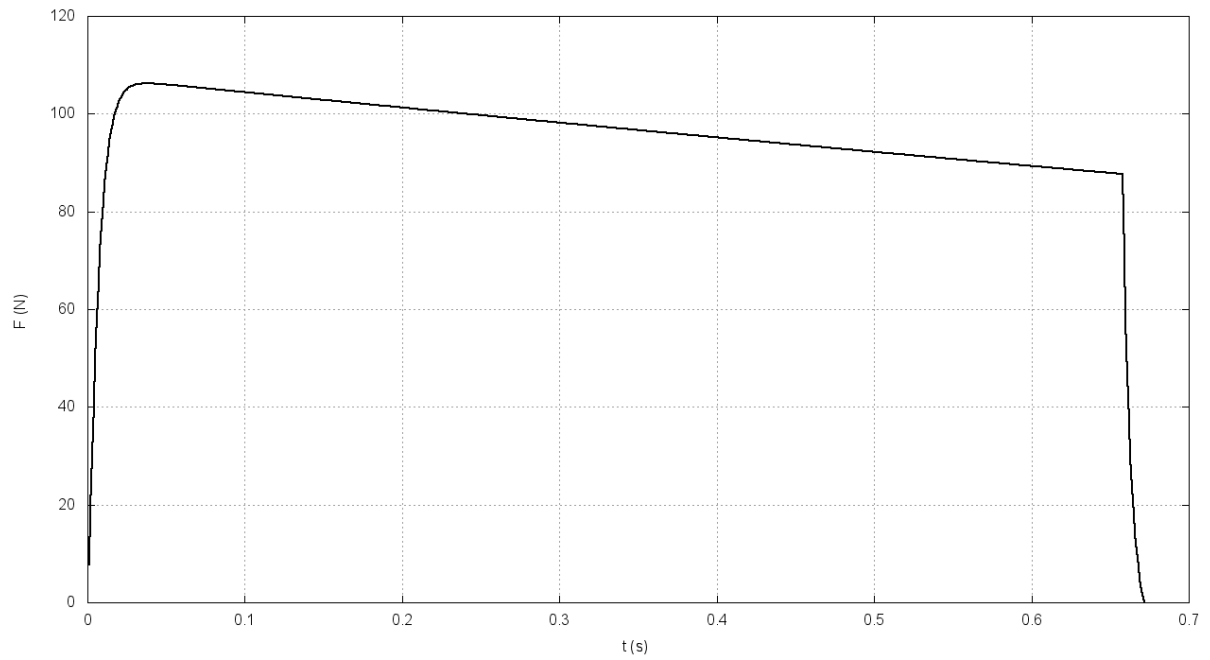


3.3.4 Fluxo de massa

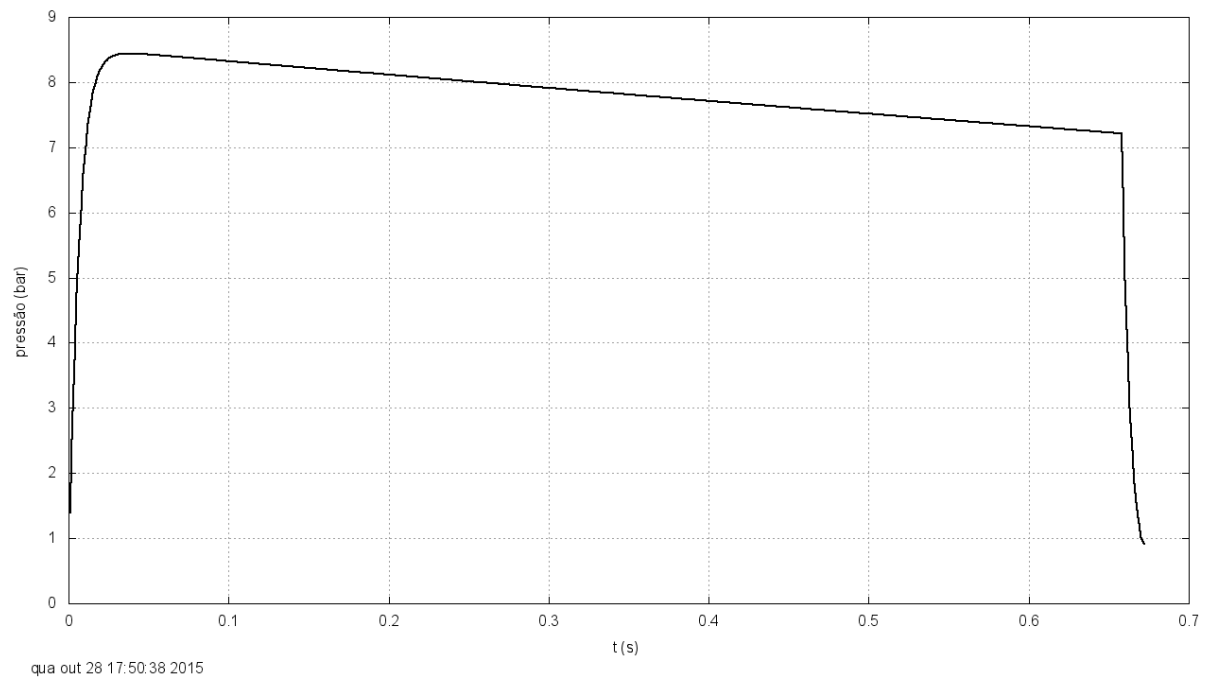


3.4 NR-2 (&)- GRÃO TOTALMENTE DESINIBIDO

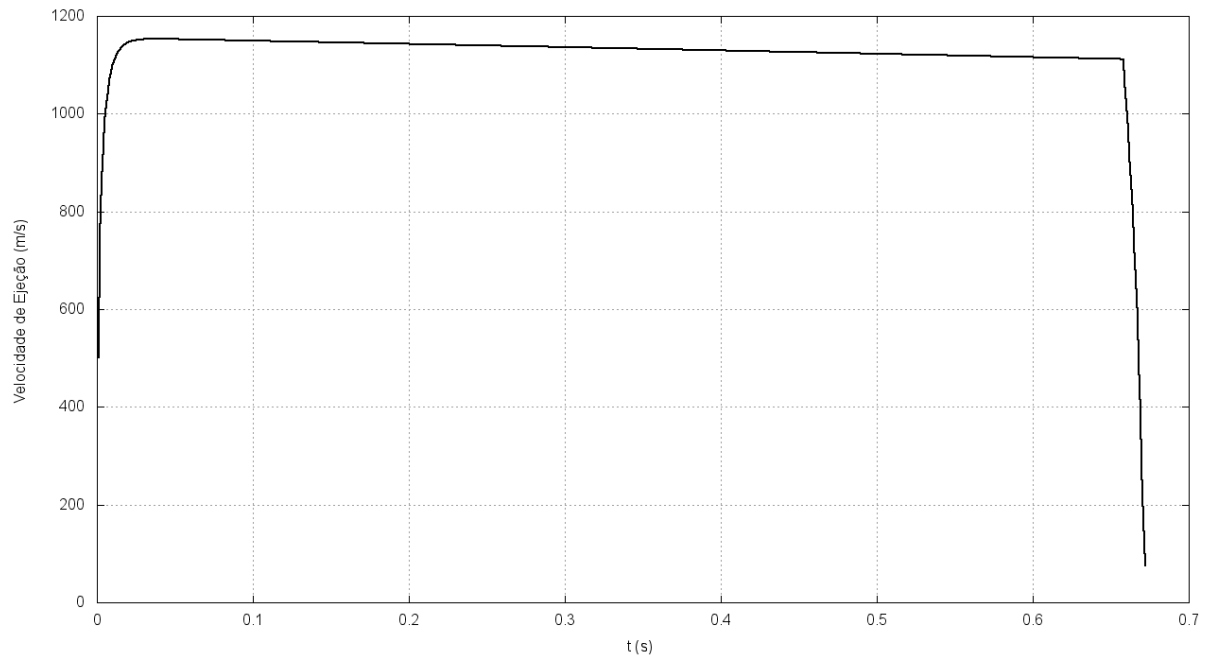
3.4.1 Curva de empuxo



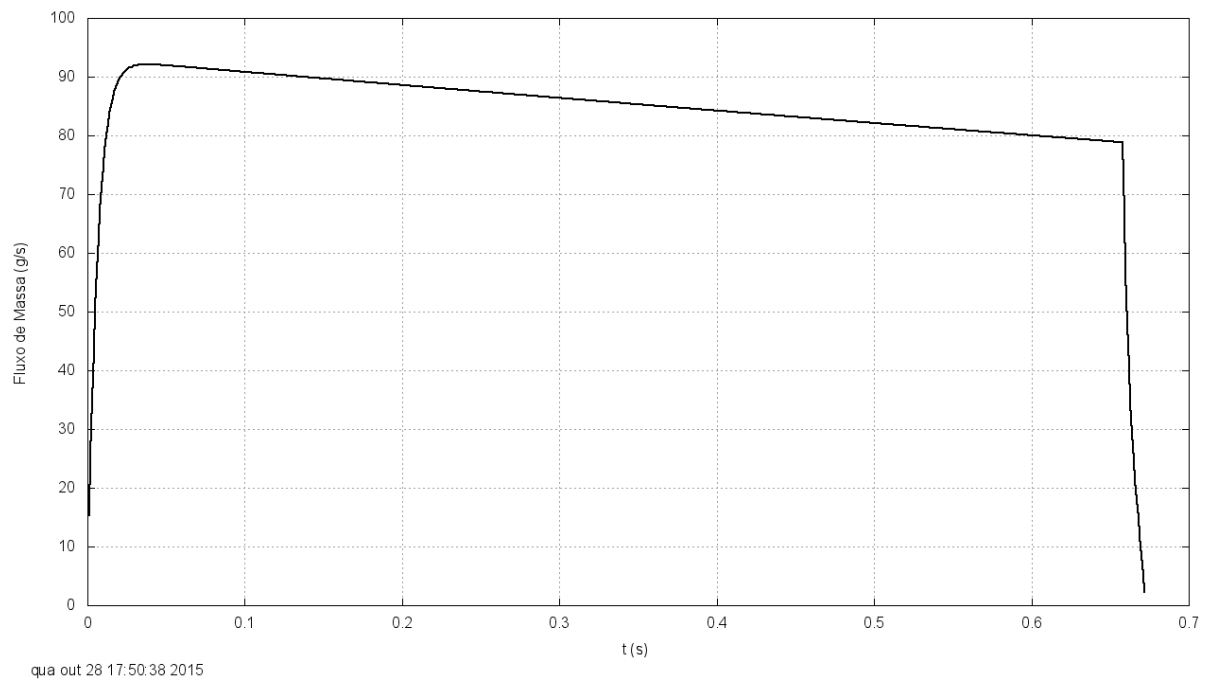
3.4.2 Pressão de estagnação



3.4.3 Velocidade de ejeção efetiva

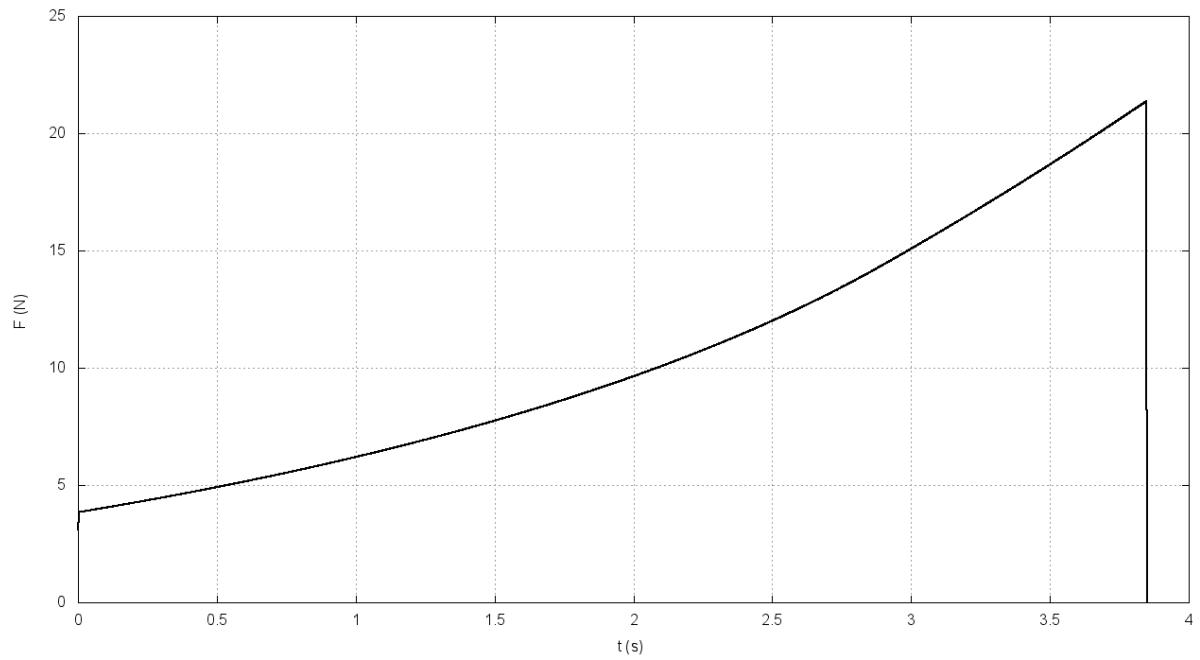


3.4.4 Fluxo de massa

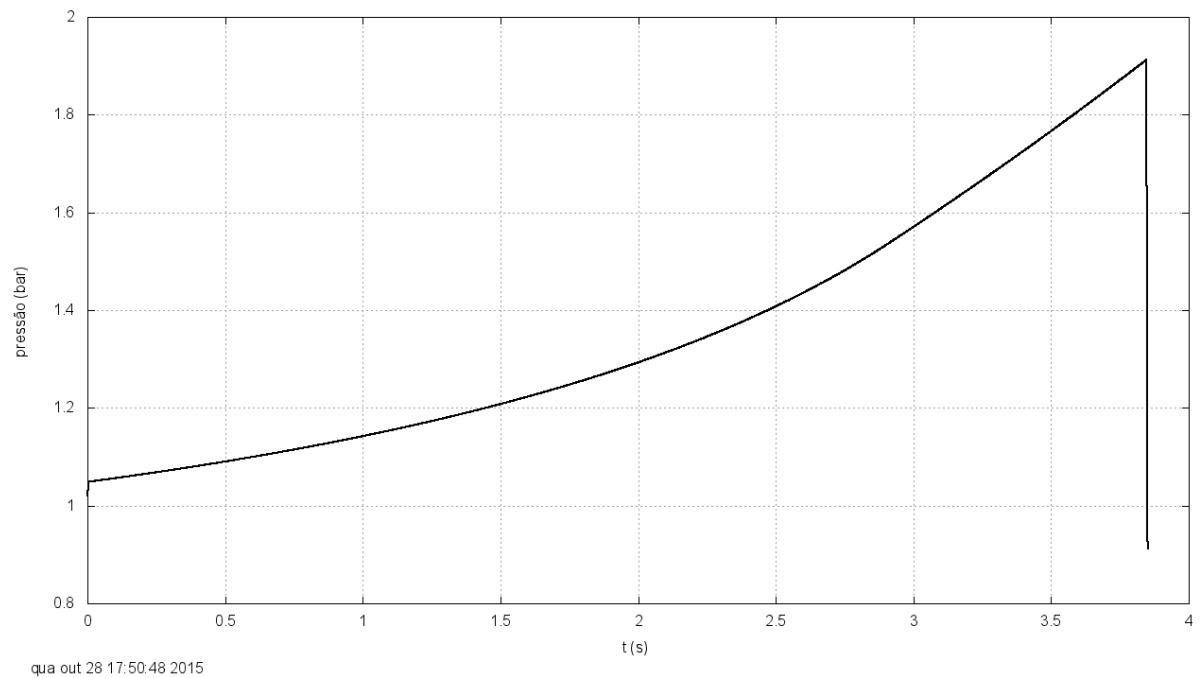


3.5 NR-3 (G)– GRÃO TUBULAR

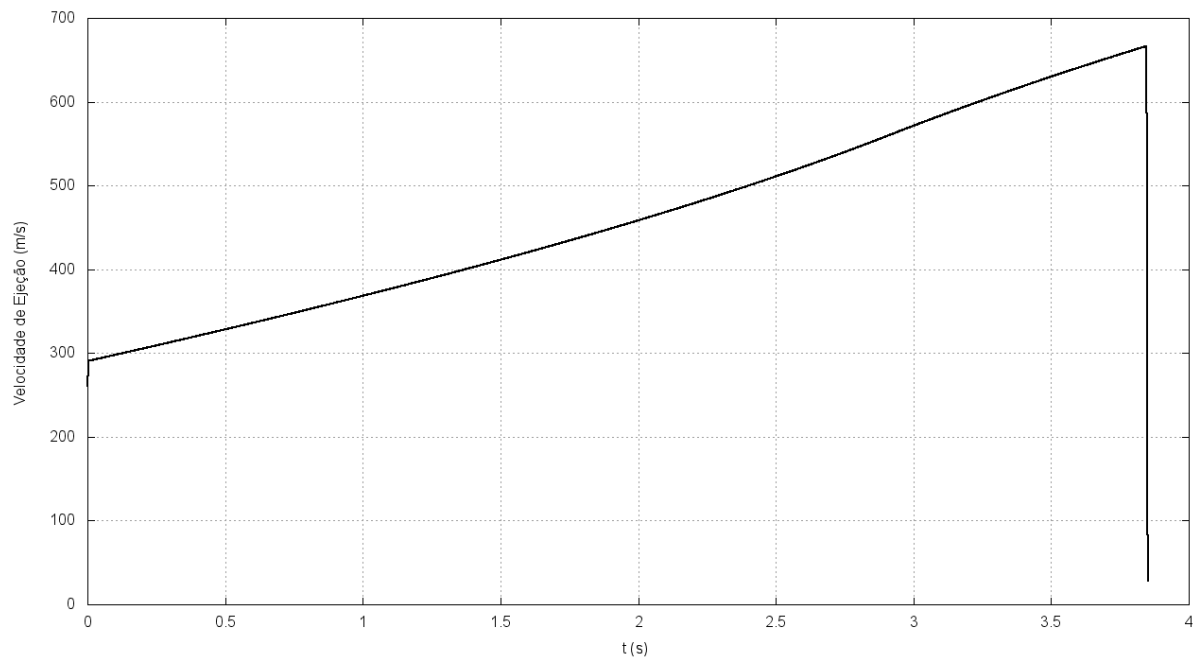
3.5.1 Curva de empuxo



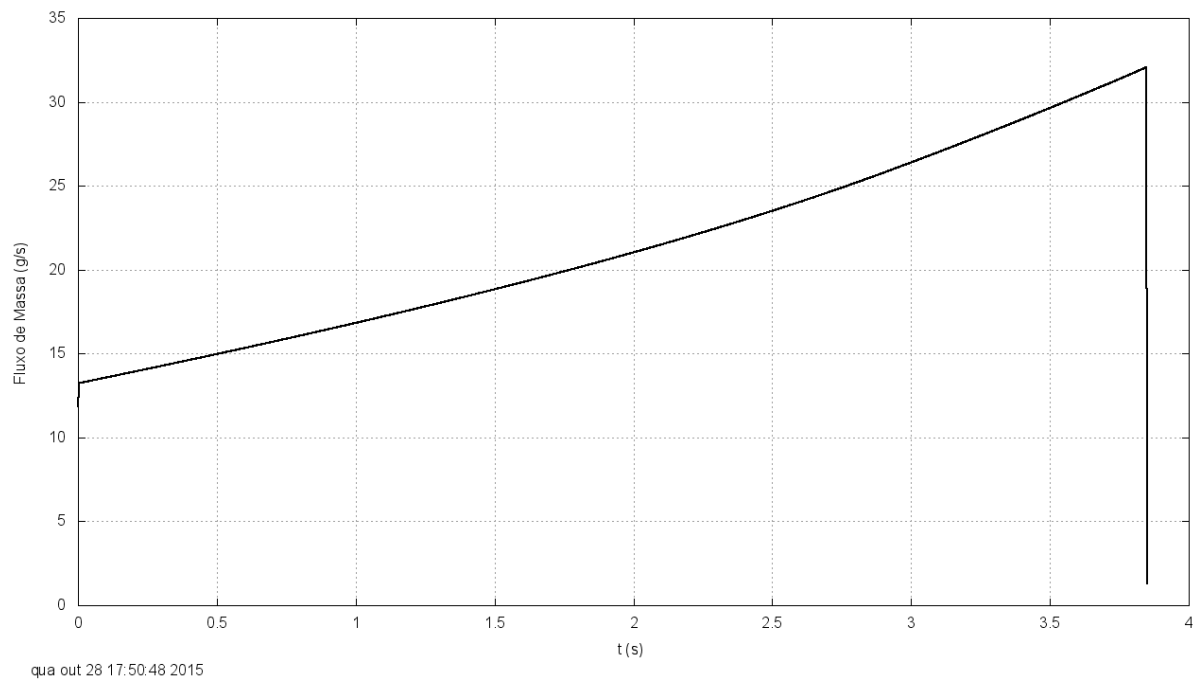
3.5.2 Pressão de estagnação



3.5.3 Velocidade de ejeção efetiva

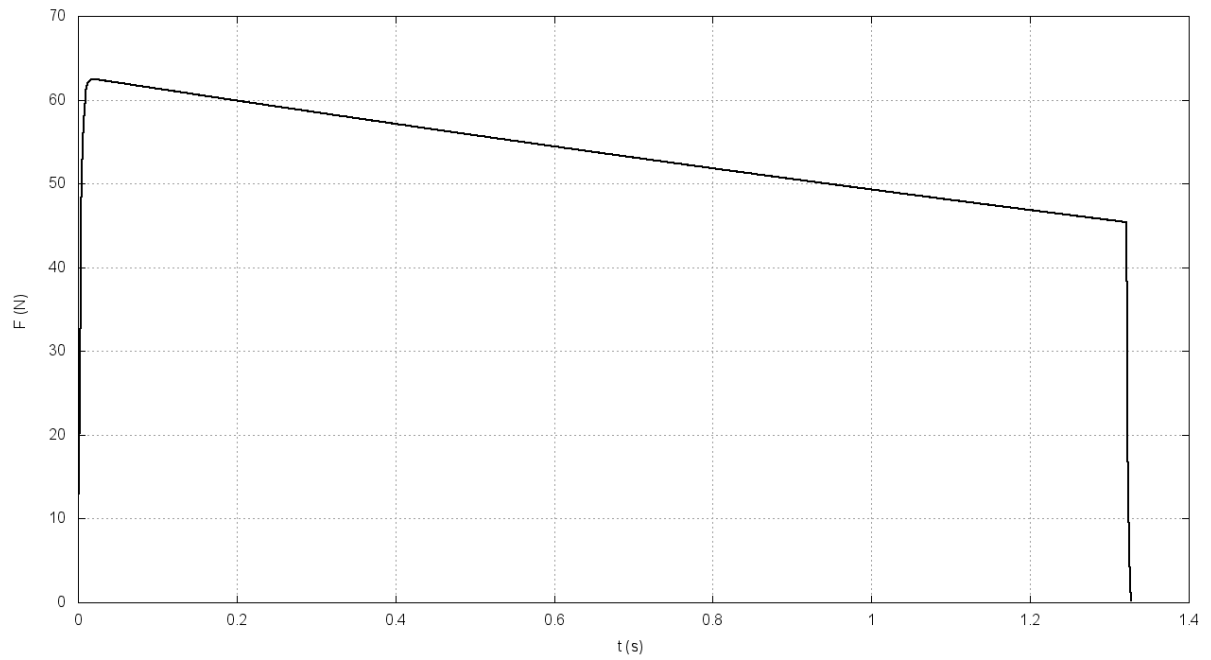


3.5.4 Fluxo de massa

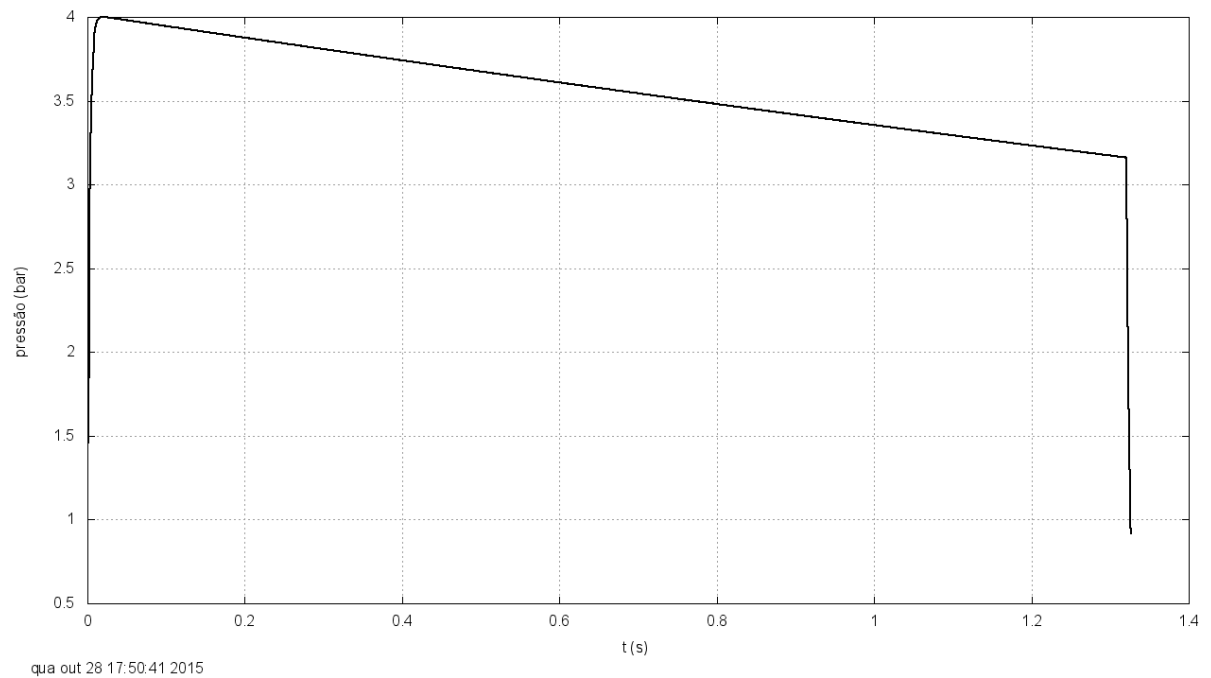


3.6 NR-3 (G)– GRÃO TOTALMENTE DESINIBIDO

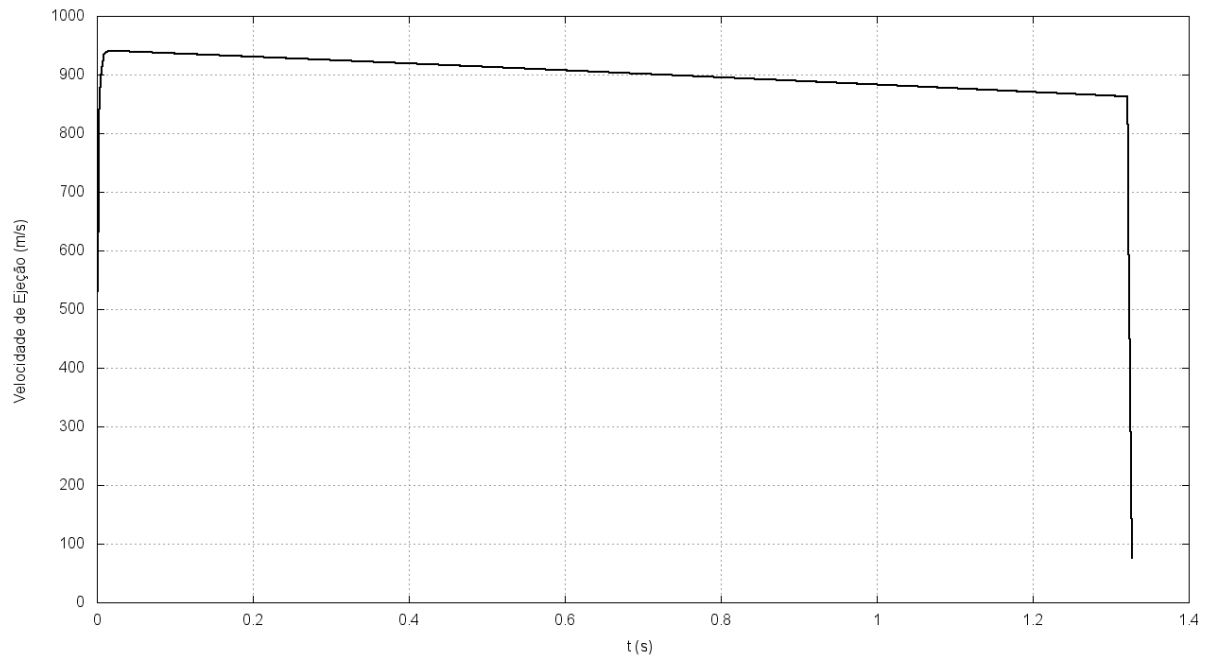
3.6.1 Curva de empuxo



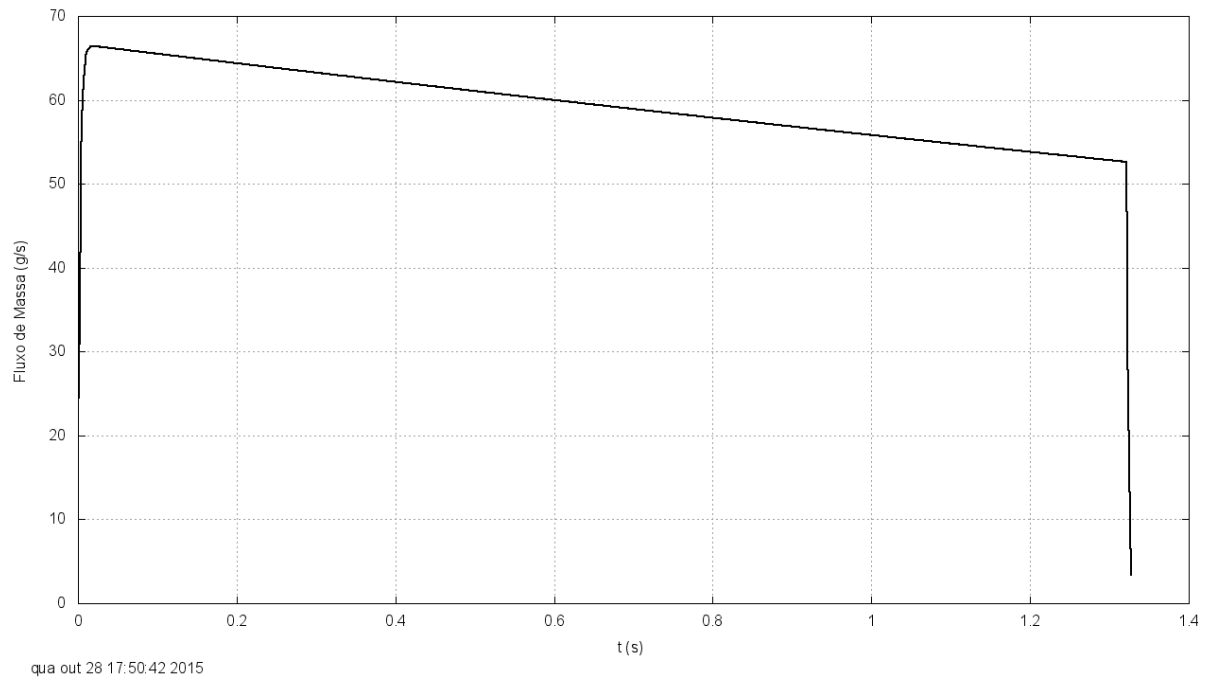
3.6.2 Pressão de estagnação



3.6.3 Velocidade de ejeção efetiva



3.6.4 Fluxo de massa



4 COMPARAÇÕES TEÓRICO (EMPUXO 1P4) – EXPERIMENTAL (CURVA_EMPUXO 3P0)

Foram feitas tabelas de comparações entre os resultados teóricos utilizando o aplicativo Empuxo_1p4 e os resultados experimentais, utilizando o código Curva_Empuxo 3p0.

As variáveis de interesse experimental foram comparadas entre as duas formas de grão teórico (o grão tubular e o grão totalmente desinibido), estas variáveis de interesse foram: Impulso Total, força de empuxo máxima, Tempo de queima, força de empuxo média, pressão de estagnação máxima e pressão de estagnação média.

4.1 TABELAS COMPARATIVAS

4.1.1 Impulso total

It / Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Tubular	26.66	48.12	40.262
Experimental	29.32	54.15	29.76
Desinibido	43.49	63.71	70.95

4.1.2 Força de empuxo máxima

E _{max} / Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Tubular	17.52	36.02	21.36
Experimental	37.74	66.5	159.19
Desinibido	59.65	106.21	62.4476

4.1.3 Tempo de queima do propelente

t _{qp} / Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Tubular	2.45	1.98	3.85
Experimental	1.64	1.17	1.13
Desinibido	0.83	0.67	1.327

4.1.4 Força de empuxo média

Emed / Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Tubular	10.89	24.28	10.45
Experimental	17.878	46.28205	26.3363
Desinibido	52.59	94.80	53.46

4.1.5 Pressão de estagnação máxima

pmax / Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Tubular	2.02	3.60	1.91
Experimental	3.44	6.09	9.21
Desinibido	4.82	8.44	4.00

4.1.6 Pressão de estagnação média

pmed / Motor	NR-1 (X)	NR-2 (&)	NR-3 (G)
Tubular	1.55	2.70	1.35
Experimental	2.05	4.47	2.18
Desinibido	4.35	7.62	3.55

4.2 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O grão-propelente do Netuno-R se comportou nos motores NR-1 e NR-2 como se fosse um intermediário entre o grão tubular e o grão totalmente desinibido: o NR-2 se comportou mais próximo da média entre os dois tipos de grão e o NR-1 se comportou mais próximo do tubular. Já o grão NR-3 se comportou bem diferente dos demais em quase todos os aspectos, gerando até um impulso total menor do que o grão tubular.

O controle preciso da prensagem e cuidado ao tirar a alma do grão são imprescindíveis para bons resultados do motor-foguete: tanto o NR-1 quanto o NR-2 foram prensados manualmente com martelo na peça de prensagem improvisada, a diferença entre os dois foi que no NR-2 foi retirado a alma com a peça de prensagem em posição, já no NR-1 a alma foi retirada sem a peça de prensagem, quebrando o grão no momento da retirada e perdendo uma certa quantidade de propelente no processo.