

JOSÉ LUIS FRANCO FERNANDEZ

MODELAGEM DO FLUXO DE HALON-1301 EM SISTEMAS DE  
EXTINÇÃO DE FOGO DAS UNIDADES AUXILIARES DE POTÊNCIA  
INSTALADAS EM AERONAVES

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia

São Paulo

2005

OK

**JOSÉ LUIS FRANCO FERNANDEZ**

**MODELAGEM DO FLUXO DE HALON-1301 EM SISTEMAS DE  
EXTINÇÃO DE FOGO DAS UNIDADES AUXILIARES DE POTÊNCIA  
INSTALADAS EM AERONAVES**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia**

**Área de Concentração:  
Energia e Fluido**

**Orientador:  
Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz**

**São Paulo**

**2005**

## DEDICATÓRIA

À minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Ademais este trabalho não foi feito somente na frente de livros e computadores, mas também em horas em que era preciso relaxar e se recuperar para poder continuar, horas também que foi preciso uma dica e, felizmente, havia alguém que desejava ajudar ....

Sendo assim, listo abaixo essas pessoas, em ordem alfabética, que me ajudaram e que sem elas tenho certeza que este trabalho não poderia ter sido melhor:

Alexandre de Pol Fernandes

Antonio Batista de Jesus

Guilherme Lara de Oliveira

Jayme Pinto Ortiz

Juliana Klas

Kleiber Lima de Bessa

Otavio de Mattos Silvares

Paulo Henrique Hasmann

Vanderaldo Palma

Vilma Ramos Franco Fernandez

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>I</b>
<b>SIMBOLOGIA GREGA</b>	<b>X</b>
<b>SÍMBOLO</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMO</b>	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>4</b>
<b>3. JUSTIFICATIVA</b>	<b>6</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS</b>	<b>17</b>
<b>5.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES</b>	<b>17</b>
5.1.1. A EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE	17
5.1.2. A EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO	17
5.1.3. A EQUAÇÃO DA ENERGIA	18
<b>5.2. DEFINIÇÕES</b>	<b>21</b>
5.2.1. O NÚMERO DE REYNOLDS E O FATOR DE ATRITO	21
5.2.2. A VELOCIDADE DO SOM E O NÚMERO DE MACH	22
5.2.3. RELAÇÕES COMPRESSÍVEIS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE MACH	24
5.2.3.1. Pressão	24

5.2.3.2.	Temperatura	24
5.2.3.3.	O escoamento sônico	25
5.2.3.4.	A onda de choque	25
5.2.3.5.	A onda de expansão de Prandtl-Meyer	26
5.2.4.	A CURVA DE FANNO	27
5.2.5.	A VISCOSIDADE	28
5.2.6.	A EQUAÇÃO DE HUGONIOT	29
5.2.7.	VAZÃO MÁSSICA	29
<b>6.</b>	<b><u>METODOLOGIA DO MODELO GARRAFA-TUBO</u></b>	<b>30</b>
<b>6.1.</b>	<b>DADOS DE ENTRADA</b>	<b>31</b>
<b>6.2.</b>	<b>CONSTANTES AMBIENTAIS E FÍSICAS</b>	<b>32</b>
<b>6.3.</b>	<b>DENSIDADE ATMOSFÉRICA LOCAL</b>	<b>32</b>
<b>6.4.</b>	<b>COEFICIENTES DE DESCARGA DE FLUXO</b>	<b>32</b>
<b>6.5.</b>	<b>CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS</b>	<b>34</b>
6.5.1.	SUPOSIÇÕES	34
6.5.2.	GARRAFA	35
6.5.3.	TUBULAÇÃO	37
<b>6.6.</b>	<b>DETERMINAÇÃO DA TUBULAÇÃO EQUIVALENTE</b>	<b>37</b>
<b>6.7.</b>	<b>MODELAGEM DO ESCOAMENTO DA GARRAFA</b>	<b>39</b>
<b>6.8.</b>	<b>MODELAGEM DO ESCOAMENTO DA TUBULAÇÃO</b>	<b>43</b>
<b>7.</b>	<b><u>VALIDAÇÃO DO MODELO GARRAFA-TUBO</u></b>	<b>46</b>
<b>7.1.</b>	<b>OS TESTES EXPERIMENTAIS</b>	<b>46</b>
<b>7.2.</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>46</b>
7.2.1.	TESTE 102	47
7.2.2.	TESTE 146	48
7.2.3.	TESTE 174	49
7.2.4.	TESTE 175	51
7.2.5.	TESTE 293	52
<b>8.</b>	<b><u>DIAGRAMA DE BLOCOS-MODELO GARRAFA-TUBO</u></b>	<b>57</b>

<b>8.1. DEFINIÇÃO DO ESTADO INICIAL DA GARRAFA</b>	<b>57</b>
<b>8.2. CÁLCULO DA VAZÃO DA GARRAFA</b>	<b>58</b>
<b>8.3. LOOP DE CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO E DE FANNO</b>	<b>59</b>
<b>8.4. CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DA TUBULAÇÃO</b>	<b>60</b>
<b><u>9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS GARRAFA-TUBO</u></b>	<b><u>61</u></b>
<b><u>10. ESTUDO DE CASO</u></b>	<b><u>70</u></b>
<b>10.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO</b>	<b>70</b>
<b>10.2. MALHA COMPUTACIONAL</b>	<b>73</b>
10.2.1. TIPOS DE MALHA	73
10.2.2. A MALHA PARA O ESTUDO DE CASO	74
10.2.3. QUALIDADE DA MALHA NO ICEM	77
<b>10.3. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)</b>	<b>80</b>
10.3.1. EQUAÇÃO DE TRANSPORTE	80
10.3.2. O MVF PARA O ESTUDO DE CASO	81
10.3.2.1. Método de solução	82
10.3.2.2. Modelo de turbulência	85
10.3.2.3. Acoplamento pressão-velocidade	87
10.3.3. CONFIGURAÇÕES	88
<b>10.4. RESULTADOS DO FLUXO DE HALON GARRAFA-TUBO</b>	<b>89</b>
<b>10.5. RESULTADOS DO COMPARTIMENTO DA UAP</b>	<b>91</b>
10.5.1. RESULTADOS DO FLUXO DE AR	92
10.5.2. RESULTADOS DA CONVECÇÃO DO HALON-1301	95
<b><u>11. CONCLUSÕES</u></b>	<b><u>99</u></b>

<b><u>ANEXO A – RESULTADOS ADICIONAIS DO CÁP. 7</u></b>	<b><u>102</u></b>
<b><u>ANEXO B – CÁLCULO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS</u></b>	<b><u>133</u></b>
<b><u>ANEXO C – EQUAÇÃO DE ESTADO</u></b>	<b><u>134</u></b>
<b><u>ANEXO D – CÁLCULO DA VISCOSIDADE</u></b>	<b><u>141</u></b>
<b><u>ANEXO E – CÁLCULO DA DENSIDADE DE LÍQUIDOS</u></b>	<b><u>146</u></b>
<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b><u>147</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

	PG
Figura 4.1: Esquema padrão do sistema garrafa-tubo conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	10
Figura 4.2: Experimento de Cleary <i>et al.</i> (1995).	11
Figura 4.3 Experimento de Yang <i>et al.</i> (1996).	13
Figura 4.4: Localização da unidade auxiliar de potência na aeronave	14
Figura 4.5: Detalhe da cauda da aeronave	15
Figura 4.6: Perspectiva do compartimento da UAP	15
Figura 4.7: Isométrico da UAP montado	16
Figura 4.8: Vista frontal da UAP	16
Figura 5.1: Leque de expansão de Prandtl-Meyer	26
Figura 6.1: Representação da garrafa descarregando para a atmosfera	30
Figura 6.2: Representação da garrafa descarregando para uma tubulação	31
Figura 6.3: Fases de expansão da garrafa conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	35
Figura 6.4: Fator de correção de área para o bocal conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	38
Figura 6.5: Teste 102 utilizando-se a densidade do Halon-1301 líquido para escoamento chocado	40
Figura 7.1: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 102	47
Figura 7.2: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 146	48
Figura 7.3: Comparação do modelo com os resultados experimentais da temperatura da garrafa do teste 146	49
Figura 7.4: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na garrafa do teste 174	50
Figura 7.5: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na tubulação do teste 174	50
Figura 7.6: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na garrafa do teste 175	51

Figura 7.7: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na tubulação do teste 175	52
Figura 7.8: Esquemático do teste 293 conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	53
Figura 7.9: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão da garrafa do teste 293.	54
Figura 7.10: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão da tubulação do teste 293.	55
Figura 7.11: Comparação do modelo com os resultados matemáticos de Elliot da Massa de Halon descarregada no ramo 1.	55
Figura 7.12: Comparação do modelo com os resultados matemáticos de Elliot da Massa de Halon descarregada no ramo 2.	56
Figura 8.1: Algoritmo 1/4	57
Figura 8.2: Algoritmo 2/4	58
Figura 8.3: Algoritmo 3/4	59
Figura 8.4: Algoritmo 4/4	60
Figura 9.1: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175 no início do escoamento, Fluent <sup>®</sup>	62
Figura 9.2: Mach na frente de Halon-1301 para o teste 175, Fluent <sup>®</sup> .	63
Figura 9.3: Mach calculado na frente de Halon-1301 para o teste 175.	63
Figura 9.4: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175, Fluent <sup>®</sup> .	64
Figura 9.5: Mach calculado na saída garrafa-tubo para o teste 175.	64
Figura 9.6: Mach na tubulação para o teste 175, Fluent <sup>®</sup> .	65
Figura 9.7: Mach na saída da tubulação para o teste 175, Fluent <sup>®</sup> .	65
Figura 9.8: Pressão na garrafa versus tubulação calculada para o teste 175	66
Figura 9.9: Perda de carga da tubulação calculada no Teste 175	67
Figura 10.1: Representação da montagem da garrafa da UAP	70
Figura 10.2: Representação da montagem da garrafa no compartimento da UAP	71
Figura 10.3: Condições de contorno da UAP em vôo	72
Figura 10.4: Exemplo de malha estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).	73

Figura 10.5: Exemplo de malha não-estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).	74
Figura 10.6: Exemplo de malha 3D estruturada, ICEM <sup>®</sup>	74
Figura 10.7: UAP original	75
Figura 10.8: UAP modificado para estudo de CFD	76
Figura 10.9: Malha da UAP gerada no ICEM <sup>®</sup>	76
Figura 10.10: Raio inscrito e circunscrito de um triângulo equilátero.	77
Figura 10.11: Histograma e malha sem tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.	78
Figura 10.12: Histograma e malha com tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.	78
Figura 10.13: Histograma de qualidade da malha do compartimento do UAP	79
Figura 10.14: Modelo de célula centrada, Fluent <sup>®</sup> User’s Guide (2003)	81
Figura 10.15: Método de resolução SEGREGATED, Fluent <sup>®</sup> User’s Guide (2003)	82
Figura 10.16: Método de resolução COUPLED, Fluent <sup>®</sup> User’s Guide (2003)	83
Figura 10.17: Menu DEFINE, Fluent <sup>®</sup>	83
Figura 10.18: Menu SOLVER, Fluent <sup>®</sup>	84
Figura 10.19: Menu ENERGY, Fluent <sup>®</sup>	84
Figura 10.20: Menu VISCOUS, Fluent <sup>®</sup>	85
Figura 10.21: Menu SOLUTION CONTROL, Fluent <sup>®</sup>	87
Figura 10.22: Menu SPECIES, Fluent <sup>®</sup>	88
Figura 10.23: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 1	90
Figura 10.24: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 2	90
Figura 10.25: Pressão estática na tubulação equivalente	91
Figura 10.26: Distribuição da velocidade na entrada de ar da UAP	93
Figura 10.27: Distribuição da velocidade na saída de ar da UAP	93
Figura 10.28: Distribuição de velocidades no plano $y = 0$	94
Figura 10.29: Distribuição de velocidades no plano $x = 27,55$	94

Figura 10.30: Relatório de resíduos do calculo do ar	95
Figura 10.31: Resultados experimentais da convecção do Halon-1301	98
Figura 10.32: Resultados teóricos da convecção do Halon-1301	98
Figura A.1: Resultados teóricos de temperatura do teste 102	103
Figura A.2: Relação de calores específicos calculados do teste 102	103
Figura A.3: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 102	104
Figura A.4: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 102	104
Figura A.5: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 102	105
Figura A.6: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 102	105
Figura A.7: Fluxo de massa calculado do teste 102	106
Figura A.8: Relação de calores específicos calculados do teste 146	106
Figura A.9: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 146	107
Figura A.10: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 146	107
Figura A.11: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 146	108
Figura A.12: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 146	108
Figura A.13: Fluxo de massa calculado do teste 146	109
Figura A.14: Temperatura da garrafa calculada do teste 174	109
Figura A.15: Temperatura da tubulação calculada do teste 174	110
Figura A.16: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 174	110
Figura A.17: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 174	111
Figura A.18: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 174	111
Figura A.19: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 174	112
Figura A.20: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 174	112
Figura A.21: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 174	113
Figura A.22: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 174	113
Figura A.23: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 174	114
Figura A.24: Fluxo de massa do Halon-1301 calculado do teste 174	114
Figura A.25: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 174	115

Figura A.26: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 174	115
Figura A.27: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 174	116
Figura A.28: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 174	116
Figura A.29: Temperatura da garrafa calculada do teste 175	117
Figura A.30: Temperatura da tubulação calculada do teste 175	117
Figura A.31: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 175	118
Figura A.32: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 175	118
Figura A.33: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 175	119
Figura A.34: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 175	119
Figura A.35: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 175	120
Figura A.36: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 175	120
Figura A.37: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 175	121
Figura A.38: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 175	121
Figura A.39: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa calculada do teste 175	122
Figura A.40: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 175	122
Figura A.41: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 175	123
Figura A.42: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 175	123
Figura A.43: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 175	124
Figura A.43: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 175	124
Figura A.45: Pressão na tubulação do estudo de caso	125
Figura A.46: Temperatura da garrafa do estudo de caso	125
Figura A.47: Temperatura da tubulação do estudo de caso	126
Figura A.48: Número de Mach na saída da tubulação do estudo de caso	126
Figura A.49: Número de Mach na saída da garrafa do estudo de caso	127
Figura A.50: Massa acumulada na tubulação do estudo de caso	127

Figura A.51: Densidade dos gases na tubulação do estudo de caso	128
Figura A.52: Densidade do Halon-1301 na garrafa do estudo de caso	128
Figura A.53: Volume de nitrogênio na garrafa do estudo de caso	129
Figura A.54: Densidade do nitrogênio na garrafa do estudo de caso	129
Figura A.55: Velocidade de saída dos gases da garrafa do estudo de caso	130
Figura A.56: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa do estudo de caso	130
Figura A.57: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa do estudo de caso	131
Figura A.58: Número de Reynolds na tubulação do estudo de caso	131
Figura A.59: Velocidade dos gases na saída da tubulação do estudo de caso	132
Figura C1: Pressão na tubulação calculada com a equação de Peng-Robinson	138
Figura C2: Pressão na tubulação calculada com a equação de Soave	139
Figura C3: Pressão na tubulação calculada com a equação de Lee-Kesler	139
Figura D.1: Viscosidade calculada na tubulação do teste 175	145

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
$\vec{n}$	Vetor normal à área de escoamento.	-
$\forall$	Volume.	$m^3$
A	Área.	$m^2$
a, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	Velocidade do som no meio;	m/s
	Constante da equação cúbica de estado;	-
	Parâmetros para o método de Lucas.	-
B	Constante da equação de Lee-Kesler.	-
b, b <sub>1</sub> ... b <sub>4</sub>	Constante da equação cúbica de estado;	-
	Constante da equação de Lee-Kesler;	-
	Parâmetro para o método de Lucas.	-
C	Concentração de Halon requerida; Constante da equação de Lee-Kesler.	% por volume
c, c <sub>1</sub> .... c <sub>4</sub>	Constante da equação de Lee-Kesler;	-
	Parâmetro para o método de Lucas.	-
C <sub>d</sub>	Coefficiente de descarga.	-
C <sub>p</sub>	Calor específico isobárico.	J/kg.K
C <sub>pa</sub>	Constante para o cálculo de C <sub>p</sub> .	-
C <sub>pb</sub>	Constante para o cálculo de C <sub>p</sub> .	-
C <sub>pc</sub>	Constante para o cálculo de C <sub>p</sub> .	-
C <sub>pd</sub>	Constante para o cálculo de C <sub>p</sub> .	-
D	Diâmetro;	m
	Constante da equação de Lee-Kesler.	-
d, d <sub>1</sub> , d <sub>2</sub>	Constante da equação de Lee-Kesler;	-
	Parâmetro para o método de Lucas.	-
E	Energia interna.	J
e	Rugosidade relativa;	-
	Energia interna por unidade de massa;	J/kg
	Parâmetro para o método de Lucas.	-

$f, f_1, f_2$	Fator de atrito; Parâmetro para o método de Lucas.	-
$f_{D.W.}$	Fator de atrito de Darcy-Weisbach.	-
$f_f$	Fator de atrito de Fanning.	-
$F_P$	Fator de correção polar para altas pressões.	-
$F_P^0$	Fator de correção polar para baixas pressões.	-
$F_Q$	Fator de correção polar para altas pressões.	-
$F_Q^0$	Fator de correção polar para baixas pressões.	-
$f_w$	Constante da equação cúbica de estado.	-
$g$	Aceleração da gravidade.	$m/s^2$
$h$	Entalpia.	J/kg
$L$	Comprimento da tubulação.	m
$L^*$	Comprimento necessário da tubulação para escoamento chocado.	m
$m$	Massa.	kg
$M$	Número de Mach; Massa molecular.	- g/mol
$M_H$	Massa de Halon 1301.	kg
$n$	Fator da equação de Haaland.	-
$P$	Pressão estática.	Pa
$P_{atm}$	Pressão atmosférica.	Pa
$P_c$	Pressão crítica.	bar
$P_g$	Pressão da garrafa.	atm
$P_o$	Pressão total.	Pa
$P_r$	Pressão reduzida; Pressão de referencia para o n-octano.	bar bar
$P_t$	Pressão da tubulação.	Pa
$q$	Calor absorvido ou emitido por unidade de massa.	J/kg
$Q$	Calor absorvido ou emitido.	J
$R$	Constante Universal dos gases.	J/kmol.K
$\forall_r$	Volume de referencia para o n-octano.	$m^3$

Re	Número de Reynolds.	-
t	Tempo.	s
T	Temperatura estática.	K
T <sub>atm</sub>	Temperatura ambiente.	°C
T <sub>c</sub>	Temperatura crítica.	K
T <sub>g</sub>	Temperatura da garrafa.	°C
T <sub>o</sub>	Temperatura total.	K
T <sub>r</sub>	Temperatura reduzida;	K
	Temperatura de referencia para o n-octano.	K
u	Velocidade na direção x;	m/s
	Constante da equação cúbica de estado.	-
V	Velocidade.	m/s
w	Trabalho por unidade de massa;	J/kg
	Constante da equação cúbica de estado;	-
	Fator acêntrico de Pitzer.	-
W	Trabalho.	J
Y	Parâmetro para o método de Lucas.	-
Z <sub>1</sub> , Z <sub>2</sub>	Parâmetros para o método de Lucas.	-
Z <sub>c</sub>	Fator de compressibilidade crítico.	-
Z <sub>RA</sub>	Fator de compressibilidade de Rackett.	-

## SIMBOLOGIA GREGA

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
$\varepsilon$	Energia interna específica,	J/kg
	Rugosidade da tubulação;	m
	Parâmetro para o método de Lucas.	-
$\alpha$	Parâmetros para o método de Lucas.	-
$\beta$	Constante da equação de Lee-Kesler;	-
	Parâmetro para o método de Lucas.	-
$\gamma$	Relação de calores específicos;	-
	Constante da equação de Lee-Kesler;	-
	Parâmetro para o método de Lucas.	-
$\mu$	Momento do dipolo da molécula.	debyes
$\mu_r$	Momento adimensional do dipolo da molécula.	-
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta.	N.s/m <sup>2</sup>
$\rho$	Densidade.	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{atm}$	Densidade atmosférica local.	kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	Viscosidade cinemática;	m <sup>2</sup> /s
	Volume específico;	m <sup>3</sup> /kg
	Função de Prandtl-Meyer.	-
$\xi$	Viscosidade inversa.	m <sup>2</sup> /N.s
$\delta$	Parâmetro para o método de Lucas.	-
$\tau$	Tensão de cisalhamento.	N/m <sup>2</sup>
$\eta$	Viscosidade dinâmica (ou absoluta).	N.s/m <sup>2</sup>
$\eta^0$	Viscosidade dinâmica a baixa pressão (~1 bar).	microPoise (poise=g/cm.s)
$\Gamma$	Coefficiente de difusão.	m <sup>2</sup> /s
$\zeta$	Parâmetro para o método de Lucas.	-

INDICES	DESCRIÇÃO
1	Montante.
2	Jusante.
t	Variável no instante atual.
t+ $\Delta$ t	Variável no próximo instante.
S	Processo isentrópico.

LISTA DE TABELAS	PG
Tabela 4.1: Concentrações especificadas para projetos de sistemas de extinção e inertização de fogo	8
Tabela 4.2: Tempo máximo de exposição humana ao Halon 1301	9
Tabela 6.1: Dados de entrada	31
Tabela 6.2: Constantes ambientais e físicas	32
Tabela 6.3: Coeficientes de descarga	33
Tabela 6.4: Relação temperatura-pressão para a garrafa do estudo de caso	36
Tabela 10.1: Configurações de cálculo para o Fluent <sup>®</sup>	88
Tabela 10.2: Configurações para o calculo do ar	92
Tabela 10.3: Configurações para o calculo da convecção do Halon-1301	96
Tabela B.1: Constantes termodinâmicas	133
Tabela C.1: Constantes para as equações cúbicas de estado	134
Tabela C.2: Constantes para as equações de Lee-Kesler	135
Tabela D.1: Constantes para o método de Lucas	144

## RESUMO

A unidade auxiliar de potência (UAP) extrai energia da queima de combustível existente nos tanques da aeronave e fornece energia elétrica e ar comprimido para os seus diversos sistemas. Embora a UAP seja desenvolvida de forma a minimizar a existência de fogo externo à câmara de combustão, este pode acidentalmente ocorrer e neste caso, após o sistema de detecção e aviso terem informado a tripulação da existência de fogo, o sistema de extinção é disparado e o apagamento é realizado pela concentração volumétrica do Halon-1301.

A análise do escoamento foi realizada em duas partes: a primeira, através de um código desenvolvido em MatLab<sup>®</sup>, que simula o fluxo do Halon-1301 da garrafa pela tubulação utilizando as relações termodinâmicas e equações de compressibilidade dos gases; a segunda parte descreve a convecção deste gás no compartimento da UAP através do método dos volumes finitos.

## ABSTRACT

The auxiliary power unit (APU), which uses fuel from one of the aircraft's tanks, provides electrical energy and bleed air to the many systems which comprise the airplane. Although the APU has been designed in order to minimize the probability of fire outside the combustion chamber, fire may happens and the the crew shall be warned in order to trigger the fire extinguish system based on Halon-1301 gas volumetric concentration.

The flow was studied in two parts: the first one was developed in MatLab<sup>®</sup> and uses the thermodynamics relations and compressible equations to describe the flow from the bottle through the pipe; the second part describes the Halon-1301 convection from the nozzles into the APU compartment employing the finite volumes method.

# 1. INTRODUÇÃO

Fogo, segundo Michaelis, é “toda combustão acompanhada de desenvolvimento de luz, calor e, geralmente, de chamas”. O fogo está presente no nosso cotidiano através de inúmeros produtos: nos motores de combustão interna, na fusão do aço para os mais diversos fins, nos fogões a gás, somente para citar alguns exemplos.

A história do fogo é muito mais antiga e pertence aos nossos antepassados que, provavelmente, tiveram seu primeiro contato com o fogo quando os raios atingiram as árvores e as incendiaram. Quando os nossos ancestrais começaram a utilizá-lo para defenderem-se dos predadores e preparar os alimentos, estavam iniciando novas conquistas que trouxeram inúmeros benefícios à humanidade; a história da utilização do fogo mostra também o seu lado destruidor através de inúmeros acidentes como incêndios em edifícios, (como o Joelma em São Paulo), que podem custar várias vidas humanas.

Na indústria aeroespacial o fogo é utilizado nos motores, que na queima do combustível obtêm energia para movimentar o compressor e impulsionar a aeronave. Por condições adversas este mesmo fogo pode causar a perda do motor, sem prejuízos à operação da aeronave conforme determina o Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica, parte 25 – RBHA: a perda de um motor não pode impactar a continuidade segura do voo.

O Halon 1301, cuja fórmula química é  $CF_3Br$ , extingue o fogo a partir da concentração volumétrica local.

Como meio de minimizar as conseqüências deste fogo nos motores e unidades auxiliares de potência das aeronaves, o RBHA estabelece que toda aeronave tenha um sistema de extinção de fogo baseado na descarga do Halon-1301. Este é o único gás atualmente homologado que pode ser utilizado em aeronaves certificadas conforme o RBHA 25.

Conforme Grosshandler *et al.* (1995) o Halon-1301, quando comparado com outros agentes extintores, é o gás que necessita da menor quantidade em massa para extinguir o fogo.

Conforme o boletim Dupont<sup>®</sup> 1301 (1980), o Halon elimina o fogo através de uma reação química baseada nos produtos transientes da reação de combustão.

Existem duas maneiras de estudarmos um fenômeno: a investigação experimental e a computacional. As vantagens da investigação computacional, são o baixo custo, a velocidade de obterem-se inúmeros resultados para várias configurações num período muito curto e a disponibilidade da informação completa de todas as variáveis relevantes do domínio de interesse; já as desvantagens resumem-se aos resultados finais que dependem da correta modelagem matemática do fenômeno, que muitas vezes é complexa e depende de muito esforço computacional além da validação do código que, necessariamente, depende de experimentos reais que, muitas vezes, possuem variáveis difíceis de controlar.

Há dois códigos computacionais desenvolvidos no mercado aplicados especificamente para a descarga de Halon-1301, o “SOLA-LOOP” desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos e um outro código desenvolvido por Elliot *et al.* (1984), os quais não foram utilizados neste trabalho porque não estão disponíveis gratuitamente.

O “SOLA-LOOP” divide a tubulação em vários segmentos e resolve a equação da continuidade, quantidade de movimento e energia para cada trecho a cada passo no tempo. Este código foi inicialmente desenvolvido para vapor d’água e água líquida, mas ele pode ser utilizado para o cálculo da descarga do Halon-1301 pressurizado por nitrogênio desde que as suas propriedades sejam inseridas no lugar da do vapor e da água líquida; já o código de Elliot trata a tubulação como um único elemento e o escoamento é considerado adiabático e isoentálpico.

Este trabalho trata de extinção de fogo nas unidades auxiliares de potência instaladas em aeronaves e pretende dispor o leitor de conhecimentos básicos da tratativa computacional que pode ser utilizada no dimensionamento destes sistemas, indo um pouco mais além dos trabalhos de Elliot *et al* (1984) e do “SOLA-LOOP” através de uma proposta de

metodologia para prever o fluxo de Halon-1301 no sistema garrafa-tubo e a sua convecção no compartimento da UAP.

## 2. OBJETIVO

Propor uma metodologia, baseada na utilização de ferramentas computacionais, para simular o escoamento do Halon-1301 bem como a sua distribuição espacial e temporal no compartimento de fogo, de modo que possa ser utilizada para o desenvolvimento de novos sistemas de extinção de fogo e suporte dos antigos.

Este trabalho pode ser dividido nas seguintes partes:

1°. Desenvolvimento de um código em MatLab<sup>®</sup> capaz de fornecer a evolução temporal do fluxo de massa e pressão de Halon-1301 em sistemas de extinção de fogo de aeronaves composto por componentes tais como: garrafa de Halon-1301, tubos, válvulas e bocais.

2°. Utilizar os experimentos de Elliot *et al.* (1984) e comparar com os resultados fornecidos pelo modelo proposto do item 1.

3°. Dadas as condições de pressão e temperatura no interior da garrafa e atmosfera, aplicar a ferramenta do item 1 para a obtenção da vazão de Halon-1301 em função do tempo do sistema de extinção de fogo utilizado no compartimento da UAP (estudo de caso) em uma determinada condição de voo.

4°. Simular o escoamento transiente de Halon-1301 e ar no interior do compartimento da UAP com o auxílio de uma ferramenta de mecânica dos fluidos computacional (CFD), impondo-se nos bocais extintores a evolução temporal da vazão em massa do Halon-1301 obtida no item 3. Esta ferramenta de CFD também será utilizada para algumas checagens do escoamento do sistema garrafa-tubo.

5°. Comparar a concentração de Halon-1301 obtida numericamente em alguns pontos no interior do compartimento com os dados experimentais disponíveis.

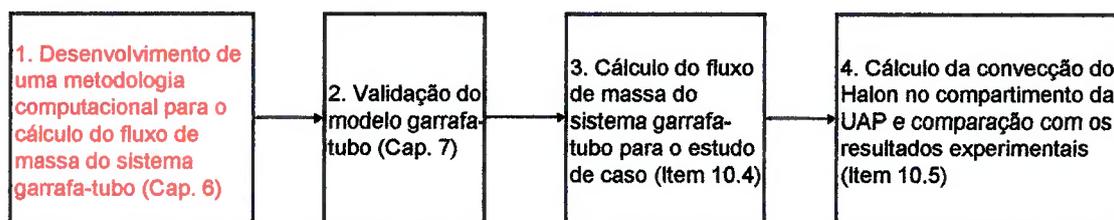
A seguir no capítulo 3 está descrito a importância deste trabalho para as empresas fabricantes de aeronaves regulamentadas conforme RBHA 25. A revisão da literatura disponível, sobre a descarga da garrafa de Halon-1301 pressurizada por nitrogênio, encontra-se no capítulo 4, as considerações teóricas utilizadas no modelo proposto estão descritas no capítulo 5.

A metodologia de cálculo utilizada é descrita no capítulo 6, seguida pela sua validação no capítulo 7, no capítulo 8 é apresentado um diagrama de blocos do modelo/código proposto. Os resultados deste código, quando comparados aos dados experimentais, estão discutidos no capítulo 9 juntamente com algumas checagens utilizando a ferramenta de DFC (Dinâmica dos Flúidos Computacional ou CFD em inglês).

O capítulo 10 descreve os resultados do estudo de caso, i.e. dos resultados da descarga do sistema garrafa-tubo e os dados de concentração de Halon-1301, ambos comparados com dados experimentais, além de discorrer brevemente sobre malhas computacionais e o método dos volumes finitos.

Seguem-se, no final do trabalho, cinco apêndices descrevendo assuntos relevantes do código: no apêndice A estão apresentados alguns resultados adicionais da descarga do Halon-1301 no sistema garrafa-tubo não disponibilizados no capítulo 9; no Apêndice B é apresentado o método de cálculo dos calores específicos para o Halon-1301 e o Nitrogênio; no apêndice C encontra-se uma breve discussão sobre as equações de estado utilizadas; no apêndice D discute-se o método de cálculo da viscosidade e no apêndice E o método de cálculo da densidade de líquidos.

Assim, temos de uma maneira prática a seguinte divisão do trabalho:



### **3. JUSTIFICATIVA**

O entendimento do escoamento do Halon-1301 do recipiente de estocagem, passando pela tubulação, até a convecção e distribuição no compartimento incendiado possibilita a redução dos custos do desenvolvimento dos sistemas de extinção de fogo em aeronaves, bem como dos custos de suporte devido às possíveis modificações que a aeronave e o sistema possam sofrer durante a sua vida útil.

O domínio de tecnologias de simulação que permite este entendimento é estratégico para as empresas fabricantes de aeronaves uma vez que quaisquer mudanças que se façam necessárias na geometria das tubulações, garrafa, válvulas, compartimento ou na UAP, implica, muitas vezes, na necessidade de ensaios que são caros e demandam tempo e mão-de-obra qualificada. A partir da disponibilidade de um código que possa gerar as curvas de vazão em massa de Halon-1301 em função do tempo através de bocais extintores, as empresas podem então homologar as modificações por similaridade, dispensando, ou ao menos reduzindo, a quantidade de ensaios necessários.

Para tanto, a ferramenta de cálculo deve ser primeiramente validada com o auxílio de resultados experimentais. Se as diferenças forem aceitáveis, a utilização do método de cálculo pode ser autorizada pelo Centro Técnico Aeroespacial para novas situações dispensando-se assim os ensaios que são custosos devido principalmente ao fato de que eles devem ser efetuados em condições reais de temperatura, pressão e escala (aeronave disponível: protótipo).

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Halon-1301, quimicamente conhecido como monobromotrifluorometano,  $\text{CF}_3\text{Br}$  ou FE-1301, é capaz de extinguir o fogo quando sua concentração em volume atinge um limite mínimo; além do mais este composto, conforme a Environmental Protection Agency ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)), é supressor da camada de ozônio devido a presença do fluor, mas principalmente do bromo.

Os números “1301”, conforme Elliot *et al.* (1984) significam um átomo de carbono, três de flúor, nenhum de cloro e um de bromo. As características físicas do Halon 1301 estão descritas no Apêndice B.

Conforme o boletim Dupont® (1980) o  $\text{CF}_3\text{Br}$  é usado atualmente em vários sistemas de extinção de fogo, a citar: computadores e equipamentos de processamento de dados, equipamentos elétricos e eletrônicos, sala de arquivos, livrarias, museus, prédios históricos, laboratórios físicos e químicos, veículos militares como tanques e caminhões, plantas de geração de energia, sala de máquinas, navios, carros de corrida, compartimentos de carga e naceles que são as estruturas que envolvem o compressor, o combustor e a turbina de aeronaves civis e militares.

Particularmente para as aeronaves, ou mais precisamente nas naceles, o Halon-1301 tem demonstrado com grande sucesso a sua capacidade de extinção de fogo quando sua concentração é de seis por cento em volume, Grosshandler *et al.* (1995).

O fogo, originário da queima de combustíveis gasosos ou líquidos, quando envolto em uma concentração adequada de Halon-1301 é extinto facilmente.

A quantidade de Halon 1301 necessária para a extinção ou inertização do fogo  $M_H$  [kg] é baseada no tamanho do compartimento de fogo  $V$  [ $\text{m}^3$ ] e na concentração necessária  $C$  [% volume]. Industrialmente, conforme o boletim Dupont® (1980) esta quantidade é dada por:

$$M_H = \rho \times \left[ \frac{C}{(100 - C)} \right] \times V, \text{ onde } \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ é a densidade do Halon.} \quad (4.1)$$

Dois níveis de concentração devem ser considerados conforme descrito neste boletim: a extinção da chama e a inertização do ambiente.

A concentração adequada para extinguir a chama não deve ser usada para misturas explosivas de ar-combustível. A atmosfera explosiva deve ser improvável, ou seja, a quantidade de combustível deve ser pequena ou a volatilidade do líquido insignificante nas temperaturas envolvidas antes ou depois do fogo.

Para a inertização do ambiente as concentrações são maiores e devem ser usadas quando existe a possibilidade de haver atmosferas explosivas, antes ou depois do surgimento do fogo.

Algumas concentrações recomendadas para projetos de sistemas extintores, retiradas do boletim Dupont® (1980), estão indicadas na tabela abaixo:

Combustível	Extinção da chama [% em volume]	Inertização do ambiente [% em volume]
Acetona	5,0	7,6
Etanol	5,0	11,1
Etileno	8,2	13,2
Metano	5,0	7,7
Propano	5,2	6,7
Jet A	6,0	ND

Tabela 4.1: Concentrações especificadas para projetos de sistemas de extinção e inertização de fogo

O Halon-1301 não é recomendado, conforme o boletim Dupont® (1980), para as aplicações que envolvem componentes químicos capazes de oxidar sem a presença do ar como a

pólvora de revólver, metais reativos como o sódio e metais híbridos capazes de se decomporem termicamente.

A extinção do fogo pelo Halon-1301, conforme descrito no boletim Dupont® (1980), se dá pela reação dos produtos transientes da reação de combustão. O CF<sub>3</sub>Br inicialmente se decompõe:



O radical do bromo reage com o hidrogênio proveniente do combustível e forma ácido bromídrico:



O ácido bromídrico então reage com a hidroxila e forma água:



O bromo agora pode reagir com mais combustível para repetir o processo (4.3) e retirar mais hidrogênio das moléculas de combustível e conseqüentemente formar mais água e íons de bromo.

A toxicidade do Halon-1301 também deve ser considerada no projeto de sistemas de extinção de fogo. A Associação Nacional de Proteção de Fogo (NFPA, em inglês) dos Estados Unidos, impõe os seguintes limites para a exposição humana:

Concentração por volume	Tempo de exposição humana
7% ou menos	5 minutos
7 – 10%	1 minuto

Tabela 4.2: Tempo máximo de exposição humana ao Halon 1301

O esquema padrão da descarga de Halon-1301, segundo Elliot et al. (1984), em sistemas de extinção de fogo de aeronaves está descrito na figura abaixo:

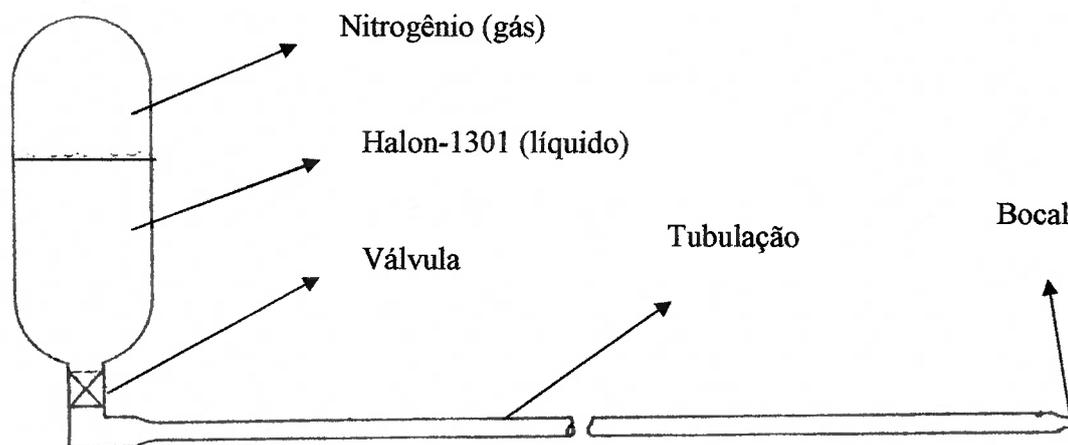


Figura 4.1: Esquema padrão do sistema garrafa-tubo conforme Elliot *et al.* (1984).

Há quatro métodos para o cálculo do fluxo de Halon-1301 em tubulações, sendo os três primeiros descritos por Clearly *et al.* (1995):

- O primeiro método é o proposto pela NFPA “Halon 1301 Fire Extinguishing Systems” a qual fornece cálculos simplificados para o projeto de sistemas que devem cumprir critérios de desempenho de descarga em compartimentos fechados. A equação da tubulação é uma aplicação da equação da energia com a equação da conservação de massa; o coeficiente de atrito e os valores termodinâmicos do Halon-1301 são invariantes para todo o cálculo; o equilíbrio entre as fases é homogêneo; o fluxo é considerado adiabático e isoentálpico; a garrafa utiliza um valor médio de pressão durante todo o escoamento.
- O segundo método descrito é o de Elliot *et al.* (1984), onde o escoamento das fases é homogêneo; está em equilíbrio termoquímico e é desenvolvido para regime transiente, ou seja, o cálculo é feito considerando-se que a garrafa, em um pequeno intervalo de tempo, possui pressão constante e a partir desta condição o fluxo de

massa é calculado. O escoamento na tubulação é considerado adiabático, isoentálpico e a mudança de entropia é atribuída ao atrito interno.

- O terceiro método é baseado no código “SOLA-LOOP”, desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos, EUA, e foi elaborado inicialmente para escoamento bifásico da água/vapor d’água. Os dados físicos da água/vapor foram substituídos pelos do Halon-1301 e Nitrogênio.
- Cleary *et al.* (1995) propõem uma nova metodologia, baseada no primeiro método proposto pelo NFPA e no segundo de Elliot *et al.* (1984), incluindo-se a formação de bolhas de nitrogênio na tubulação uma vez que elas foram verificadas em seus experimentos. A expansão do gás dentro da garrafa é feita de forma isentrópica, como gás ideal e o escoamento do Halon-1301 é considerado bifásico e homogêneo (as fases estão bem misturadas e escoam na mesma velocidade), estão em equilíbrio térmico, são considerados os efeitos de compressibilidade e a relação de calores específicos é invariante durante todo o escoamento.

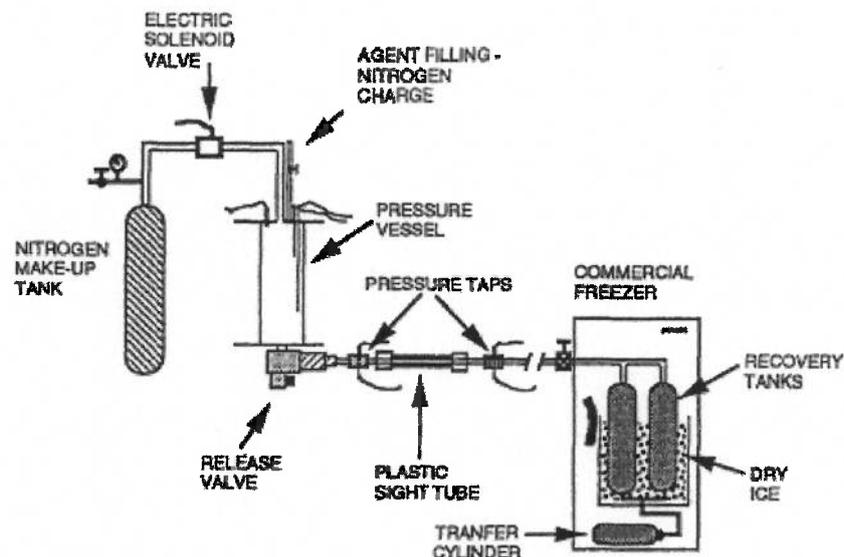


Figura 4.2: Experimento de Cleary *et al.* (1995).

O experimento de Cleary *et al.* (1995), ilustrado na figura 4.2, era composto de uma garrafa com o agente extintor pressurizado com nitrogênio, uma válvula para iniciar a descarga,

uma tubulação plástica transparente e tanques coletores. A montante da garrafa havia um tanque de nitrogênio para pressurizar a garrafa e também para fornecer um pequeno fluxo de nitrogênio, provavelmente para limpar o sistema, durante a descarga. A influência do fluxo de nitrogênio é clara nos resultados experimentais fazendo com que a pressão da garrafa se recupere rapidamente após a abertura da válvula solenóide. Os tanques coletores também influenciam o resultado do experimento, já que aumentam a pressão na saída da tubulação e, portanto diminuem o tempo que o escoamento permanece chocado.

Experimentalmente Cleary *et al.* (1995), tentaram medir a temperatura durante o processo de descarga do Halon-1301 de duas maneiras, a primeira através de um transdutor instalado na superfície da garrafa, mas o atraso no tempo de resposta do transdutor era maior que o tempo de descarga, o que invalidava o seu experimento. A segunda maneira foi utilizar um transdutor de fio quente de 13  $\mu\text{m}$ , todavia o fio se rompia durante a descarga, impossibilitando assim a obtenção de valores confiáveis.

Cleary *et al.* (1995), adicionaram no início da tubulação, logo após a garrafa, um tubo transparente para fotografar o fluxo, e observaram que o escoamento é bifásico já na entrada da tubulação o que indica que as bolhas se formam na garrafa antes da entrada do Halon-1301 na tubulação.

Elliot *et al.* (1984) observaram que a pressão na tubulação alcança o seu máximo quando ela é preenchida pelo Halon-1301, a seguir inicia-se a diminuição da pressão da tubulação e na garrafa. O nitrogênio dissolvido na fase líquida quando passa para a fase gasosa promove um súbito aumento da pressão interna da garrafa.

Yang *et al.* (1996) desenvolveram um modelo matemático para a descarga do  $\text{C}_3\text{F}_8$ , comercialmente conhecido como FC-218, um outro composto utilizado para a extinção de fogo, da garrafa diretamente para a atmosfera; neste modelo o comportamento da pressão interna é tratado conforme a relação isentrópica de pressão e volume. A fase de vapor do nitrogênio é considerada ideal com uma relação de calores específicos constante durante todo o processo. Os resultados foram ajustados com a utilização de coeficientes de descarga

entre 0.60 a 0.72, mesmo sem considerarem os efeitos da dissolução do nitrogênio no FC-218.

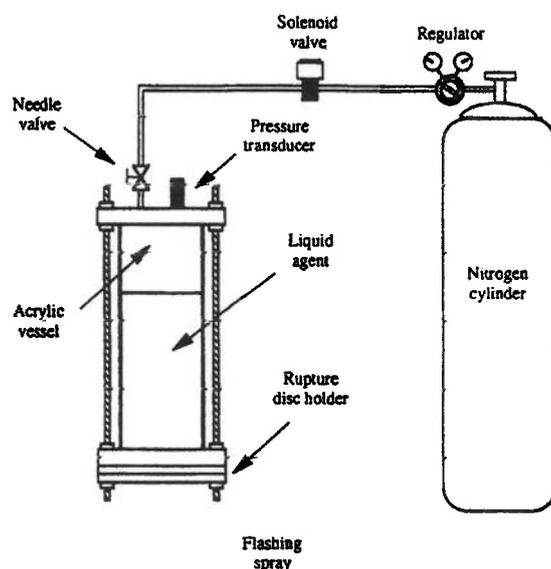


Figura 4.3 Experimento de Yang *et al.* (1996).

O experimento de Yang *et al.* (1996), ilustrado na figura 4.3, era composto de uma garrafa acrílica com o agente extintor FC-218 pressurizado com nitrogênio. Uma válvula agulha foi utilizada para aumentar gradativamente a pressão dentro da garrafa até que a pressão fosse suficiente para romper o disco de ruptura causando assim uma rápida descarga dos compostos para atmosfera. Neste experimento a válvula agulha mantinha-se aberta e, portanto promovia um fluxo de nitrogênio durante a descarga da garrafa, todavia, neste caso, o autor concluiu que este pequeno fluxo não perturbava sensivelmente os resultados finais.

Na parte experimental, Yang *et al.* (1996), fotografaram a garrafa – acrylic vessel - e observaram que a descarga do FC-218 é inicialmente líquida e depois gasosa; além do mais não se verificou a formação de bolhas dentro da garrafa. A tentativa de medição da temperatura também não foi possível, devido à utilização de um fio de 12  $\mu\text{m}$ , o qual se rompeu com a descarga do agente extintor.

A literatura, apesar de restrita, é valiosa porque fornece inúmeros parâmetros para o desenvolvimento de um novo modelo matemático. Apesar de Elliot *et al.* (1984) terem desenvolvido um modelo de formação de bolhas de 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro para explicar o pico de pressão do início do escoamento, Yang *et al.* (1996) não observaram a formação destas bolhas dentro da garrafa; já Cleary *et al.* (1995) as observaram na tubulação.

O modelo proposto neste trabalho utiliza a formulação isentrópica para o escoamento da garrafa e somente adiabática para a tubulação; a formação de bolhas, devido à evaporação do nitrogênio, e a solubilidade dos componentes não são equacionados; a viscosidade, o número de Reynolds, os calores específicos, a pressão e a temperatura são continuamente atualizados.

Este trabalho foca o escoamento do Halon-1301 no compartimento das unidades auxiliares de potência que se localizam na parte traseira da aeronave, como mostrado nas figuras abaixo.



Figura 4.4: Localização da unidade auxiliar de potência na aeronave

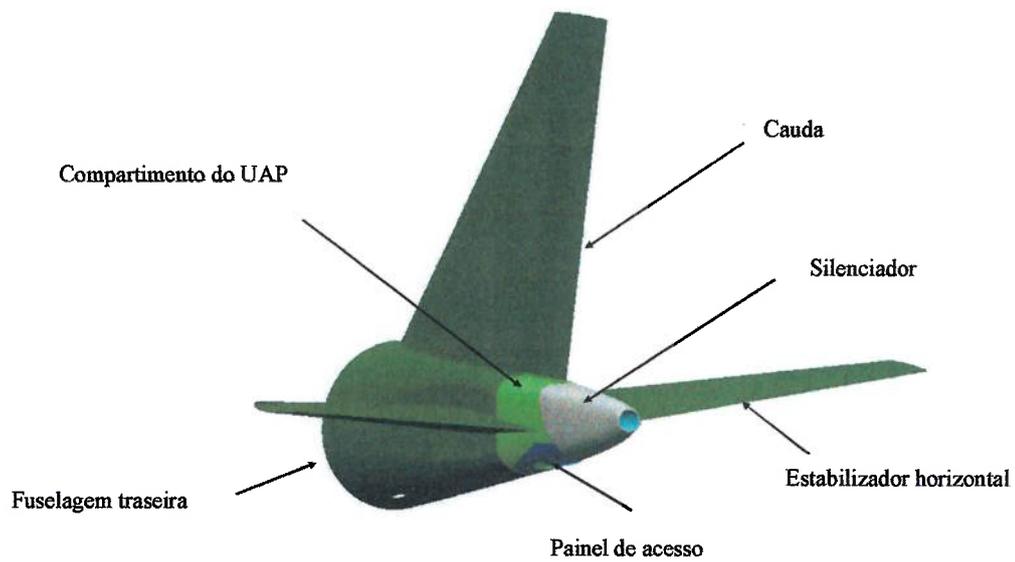


Figura 4.5: Detalhe da cauda da aeronave

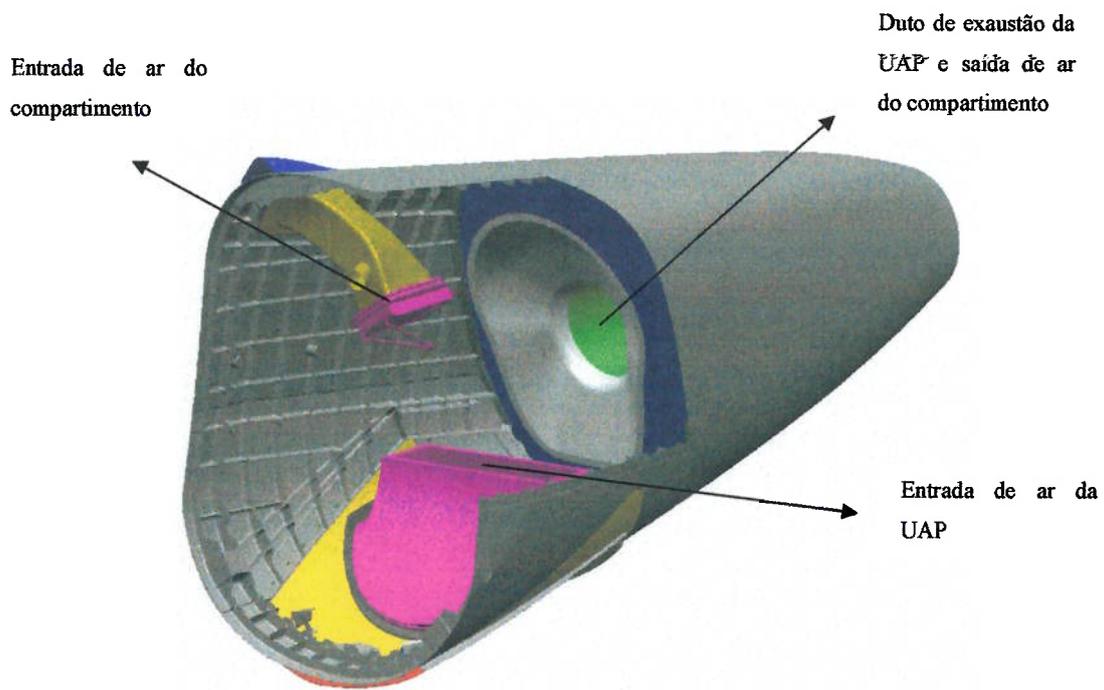


Figura 4.6: Perspectiva do compartimento da UAP

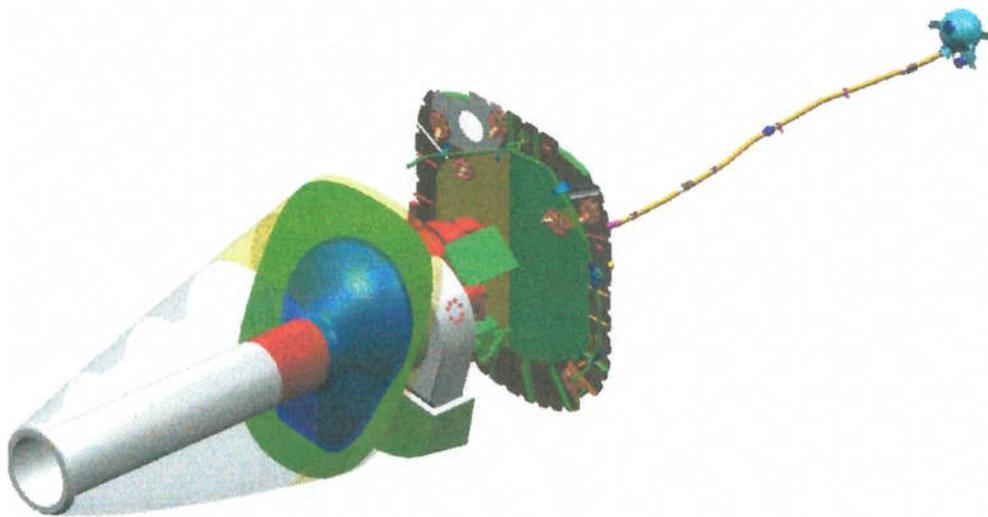


Figura 4.7: Isométrico da UAP montado

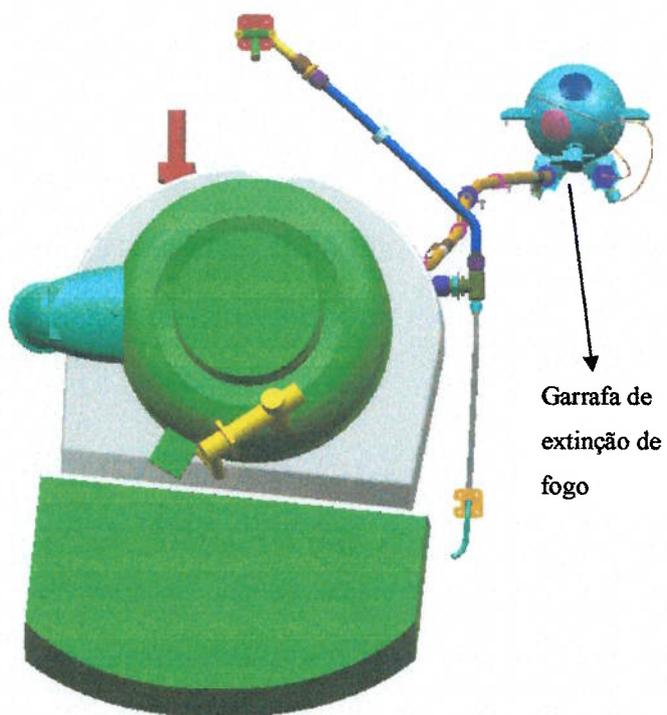


Figura 4.8: Vista frontal da UAP

## 5. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

### 5.1. Equações Governantes

As equações governantes de um escoamento compressível, retiradas do livro do Anderson (1990), podem ser escritas segundo as equações 5.1, 5.2 e 5.3.

#### 5.1.1. A equação da continuidade

$$-\iint_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \quad (5.1)$$

A equação (5.1) é a equação da continuidade ou da conservação da massa, e é derivada a partir do princípio de que a massa não pode ser criada e nem destruída.

O primeiro termo desta equação, com sinal negativo, fornece o fluxo de massa que atravessa as superfícies do volume de controle considerado; já o segundo termo fornece a taxa de variação da massa no tempo dentro deste volume.

#### 5.1.2. A equação da quantidade de movimento

$$\iint_S (\rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA) \vec{v} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{Vol} \rho \vec{v} dV = \iiint_{Vol} \rho \vec{g} dV - \iint_S P \vec{n} dA + \iint_S \vec{\tau} \cdot \vec{n} dA \quad (5.2)$$

A equação (5.2) é a equação de conservação da quantidade de movimento, e é derivada a partir da segunda lei de Newton: a taxa de variação da quantidade de movimento aplicada sobre um corpo é igual à soma das forças externas que atuam no mesmo.

O primeiro e o segundo termo da equação representam a quantidade de movimento que atravessa e a taxa de variação dentro do volume de controle respectivamente, devido à massa que atravessa a superfície para regime permanente e transiente respectivamente. O terceiro, quarto e quinto termos representam as forças atuantes no volume e superfície de controle, a saber: forças de campo, de pressão e viscosas devido ao atrito.

### 5.1.3. A equação da energia

$$\iiint_{Vol} \dot{q} \rho dV - \iint_S P \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \iiint_{Vol} \rho (\vec{g} \cdot \vec{V}) dV = \iiint_{Vol} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( \varepsilon + \frac{V^2}{2} \right) \right] dV + \iint_S \rho \left( \varepsilon + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5.3)$$

A equação (5.3) é a equação de conservação da energia, escrita para volume de controle, e é derivada a partir do princípio de que a energia não pode ser criada e nem destruída, mas somente mudar de forma.

O primeiro termo da equação trata do calor que é absorvido ou retirado pelo fluido dentro do volume de controle; o segundo termo trata do trabalho realizado pelas forças de pressão que atravessam a superfície de controle; o terceiro termo representa o trabalho realizado pelas forças de campo que atuam no fluido dentro do volume de controle; o quarto representa a taxa de variação de energia dentro do volume e o quinto termo representa o fluxo de energia que atravessa as superfícies do volume de controle.

Para o estudo do escoamento do Halon-1301 através da tubulação, podemos simplificar as equações acima, pois podemos tratar o problema de forma unidimensional e não considerar as forças de campo além do fato da tubulação manter a sua área invariável durante todo o escoamento.

Pelo fato do escoamento em questão ter a pressão da garrafa variando em função da descarga do Halon-1301, estamos lidando com um problema tipicamente transiente. Neste trabalho adota-se uma abordagem quase-permanente, onde o cálculo das pressões e

temperaturas são feitas na marcha do tempo considerando-se que a cada instante as condições a montante e a jusante, seja da garrafa ou da tubulação, estão em regime permanente.

A partir da equação (5.1) considerando-se o escoamento unidimensional, permanente, num determinado passo no tempo obtemos:

$$-\iint_S \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (5.4)$$

Resolvendo a integral para área invariável obtemos:

$$\rho_2 u_2 - \rho_1 u_1 = 0 \quad (5.5)$$

A partir da equação (5.2) considerando-se escoamento unidimensional, permanente, num determinado passo no tempo, invíscido (o atrito será considerado posteriormente), de área constante e assumindo-se que os efeitos da gravidade são nulos teremos:

$$\iint_S (\rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA) \vec{V} = -\iint_S P \vec{n} dA \quad (5.6)$$

Resolvendo a integral obtemos:

$$\rho_2 u_2^2 - \rho_1 u_1^2 = -P_2 + P_1 \quad (5.7)$$

A partir da equação (5.3) considerando-se escoamento unidimensional, permanente, invíscido, adiabático, de área constante e assumindo-se que os efeitos da gravidade são nulos teremos:

$$-\iint_S P \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \iint_S \rho \left( \varepsilon + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (5.8)$$

Resolvendo a integral obtemos:

$$-P_2 u_2 + P_1 u_1 = \rho_2 \left( \varepsilon_2 + \frac{u_2^2}{2} \right) u_2 - \rho_1 \left( \varepsilon_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) u_1 \quad (5.9)$$

Da definição de entalpia:

$$h = \varepsilon + PV \quad (5.10)$$

Rearranjando a equação (5.9), obtemos:

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (5.11)$$

As equações (5.5), (5.7) e (5.11) podem ser utilizadas para cálculos de escoamentos em tubulações e também para cálculos das propriedades através de ondas de choque, a menos dos efeitos da força de atrito que ainda serão incorporados, antes ou depois do choque.

A equação (5.3), reescrevendo-a para um regime permanente obtém-se:

$$de = dq - dw + \sum h_e dm_e - \sum h_s dm_s \quad (5.12)$$

A equação (5.12) é conhecida como primeira lei da termodinâmica na forma diferencial.

## 5.2. Definições

### 5.2.1. O número de Reynolds e o fator de atrito

O número de Reynolds é um adimensional que relaciona a força de inércia (efeitos convectivos) e a força viscosa (efeitos difusivos) em um escoamento de gás ou de líquido.

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (5.13)$$

A força de atrito nas paredes internas da tubulação é fortemente influenciada pela natureza da camada limite do escoamento. Uma camada limite turbulenta subdivide-se em três regiões: (i) uma região adjacente à parede onde as flutuações de velocidade são suprimidas pela própria parede e pela viscosidade molecular, (ii) uma região externa totalmente dominada por tensões turbulentas, e (iii) uma região intermediária entre as regiões adjacente e externa.

É usual admitir em cálculos computacionais de perda de carga em dutos que o escoamento é laminar quando o número de Reynolds é menor ou igual a 2300 e turbulento acima deste valor.

Para cálculos de escoamento de gases com rugosidade relativa muito pequena, calculada conforme a equação (Eq. 5.14), como as consideradas na aplicação objeto deste trabalho, Hodge e Koenig (1995) propõe a utilização da relação de Fanning (Eq. 5.15) e de Haaland (Eq. 5.16) para o cálculo do fator de atrito laminar e turbulento respectivamente.

O fator de atrito expressa a imposição ao escoamento feita pela tubulação e depende de sua condição geométrica (secção transversal); física (rugosidade, diâmetro e envelhecimento do tubo); do fluido (viscosidade) e do regime (velocidade de escoamento).

$$e = \frac{\varepsilon}{D} \quad (5.14)$$

$$f_f = \frac{16}{\text{Re}} \quad (5.15)$$

$$f_f = \frac{0,3086n^2/4}{\left\{ \log \left[ \left( \frac{7,7}{\text{Re}} \right)^n + \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11n} \right] \right\}^2} \quad (5.16)$$

Onde  $n \sim 3$ ; no código utilizou-se  $n=3$ .

Há dois fatores de atrito, o de Fanning  $f_f$  e o de Darcy-Weisbach  $f_{D.W.}$ , que se relacionam conforme a equação (5.17). Nas relações (5.15) e (5.16), determina-se o fator de atrito de Fanning.

$$4f_f = f_{D.W.} \quad (5.17)$$

## 5.2.2. A velocidade do som e o número de Mach

O escoamento compressível é definido como o escoamento de gases com densidade variável, ou seja, neste caso não é mais possível utilizar a equação de Bernoulli. O número de Mach é o parâmetro utilizado para a distinção de um escoamento incompressível ( $\text{Mach} \leq 0,3$ ) de um escoamento compressível ( $\text{Mach} > 0,3$ ).

A velocidade do som é a velocidade com que uma onda fraca, como por exemplo a onda sonora emitida por um rádio, viaja no meio; e é definida como:

$$a^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \quad (5.18)$$

Sendo o índice  $s$  a indicação de que esta relação é válida para processos isentrópicos.

Lembrando-se que

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (5.19)$$

E que para um gás perfeito a relação isentrópica é dada por

$$Pv^\gamma = c \quad (5.20)$$

onde  $c$  é uma constante, tem-se que para um processo isentrópico:

$$a = \sqrt{\gamma RT}, \text{ onde } \gamma \text{ é a relação de calores específicos} \quad (5.21)$$

O número de Mach é definido como a relação entre a velocidade do escoamento pela velocidade do som do meio, ou seja:

$$M = \frac{V}{a} \quad (5.22)$$

O escoamento compressível classifica-se em subsônico, onde o número de Mach é menor que 1; sônico, onde o número de Mach é igual a 1; supersônico, onde o número de Mach é maior ou igual a 1 e hipersônico onde o número de Mach é tipicamente maior do que 5. Um escoamento é dito transônico quando apresenta características subsônicas e supersônicas concomitantemente.

### 5.2.3. Relações compressíveis em função do número de Mach

#### 5.2.3.1. Pressão

As relações isentrópicas abaixo fornecem o número de Mach em função da pressão a montante, que no caso é a pressão total  $P_o$  (ou de estagnação), da pressão a jusante  $P$  (estática) e da relação de calores específicos  $\gamma$ .

$$\frac{P_o}{P} = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma/\gamma - 1} \quad (5.23)$$

Deixando-se o número de Mach em evidência obtemos:

$$M = \left\{ \frac{\left[ \left( \frac{P_o}{P} \right)^{\gamma - 1/\gamma} - 1 \right]}{\frac{\gamma - 1}{2}} \right\}^{0,5} \quad (5.24)$$

A equação (5.24), desenvolvida para gás perfeito, é utilizada para o cálculo do número de Mach a partir da garrafa para a tubulação e da tubulação para a atmosfera.

#### 5.2.3.2. Temperatura

Há também uma relação desenvolvida para gás perfeito, conforme Anderson (1990), para a temperatura total  $T_o$  e temperatura estática  $T$  em função do número de Mach  $M$  e da relação de calores específicos  $\gamma$ :

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (5.25)$$

A equação (5.25) é utilizada para o cálculo da temperatura estática a partir da garrafa para a tubulação; este dado é utilizado para o cálculo da velocidade do som no início e no final da tubulação.

### 5.2.3.3. O escoamento sônico

Conforme Shapiro (2000) diz-se que o escoamento é chocado quando a relação de pressões, para Mach igual a 1, determinada pela equação (5.23) é atingida; neste caso o fluxo de massa torna-se insensível à pressão a jusante.

Nota-se que o fluxo de massa num escoamento subsônico depende da pressão e temperatura total a montante, pressão estática a jusante e da área; já para o caso de escoamento chocado o fluxo de massa depende da pressão e temperatura total a montante e da área.

### 5.2.3.4. A onda de choque

Em um escoamento supersônico há formação de onda de choque. Uma onda de choque é caracterizada por uma descontinuidade de pressão em uma região que, conforme Anderson (1990) é muito fina, aproximadamente da ordem de  $10^{-5}$  cm para o ar nas condições normais de temperatura e pressão – CNTP.

O escoamento é supersônico a montante da onda de choque e subsônico a jusante. Através de uma onda de choque a velocidade diminui enquanto a pressão estática, temperatura e densidade aumentam, conforme as seguintes relações:

$$M_2^2 = \frac{1 + [(\gamma - 1)/2] \cdot M_1^2}{\gamma \cdot M_1^2 - (\gamma - 1)/2} \quad (5.26)$$

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{(\gamma + 1) \cdot M_1^2}{2 + (\gamma - 1) \cdot M_1^2} \quad (5.27)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \left[ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \cdot (M_1^2 - 1) \right] \quad (5.28)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \cdot \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (5.29)$$

Os índices 1 e 2 indicam jusante e montante respectivamente.

### 5.2.3.5. A onda de expansão de Prandtl-Meyer

O leque de expansão é a antítese da onda de choque, isto é o número de Mach a jusante aumenta enquanto a pressão, densidade e temperatura diminuem; além do mais a expansão é isentrópica.

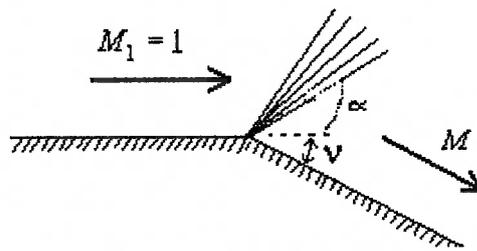


Figura 5.1: Leque de expansão de Prandtl-Meyer

As seguintes relações são aplicáveis:

$$\text{sen} \alpha_1 = \frac{1}{M_1} \quad (5.30)$$

$$\text{sen} \alpha_2 = \frac{1}{M_2} \quad (5.31)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \cdot (M^2 - 1)} - \tan^{-1} \sqrt{M^2 - 1} \quad (5.32)$$

$$\theta_2 = \nu_2 - \nu_1 \quad (5.33)$$

As relações (5.30) e (5.31) fornecem os ângulos do “leque” de expansão, sendo o primeiro dado por (5.30) e o segundo por (5.31). A equação (5.32) é chamada de função de Prandtl-Meyer e lhe é atribuída o símbolo  $\nu$ ; este ângulo, conforme Hodge e Koenig (1995) representa o ângulo físico no qual o escoamento a montante com  $Mach = 1$  deve ser expandido para alcançar um Mach supersônico a jusante. O ângulo  $\theta$  representa a mudança no vetor velocidade do fluxo após atravessar a onda de expansão.

#### 5.2.4. A Curva de Fanno

Todos os fluidos são viscosos e o atrito entre o fluido e a parede da tubulação faz com que as suas propriedades termodinâmicas sejam modificadas durante o escoamento.

A partir da equação da quantidade de movimento (5.2), aplicada para uma tubulação de diâmetro  $D$ , comprimento  $L$  e fator de atrito  $f$ , obtém-se:

$$-\rho_1 u_1^2 A + \rho_2 u_2^2 A = P_1 A - P_2 A - \int_0^L \pi D \tau dl \quad (5.34)$$

Uma vez que:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.35)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \rho u^2 f \quad (5.36)$$

Das equações (5.34), (5.35) e (5.36), conforme Anderson (1990), é possível demonstrar que:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{4f dx}{D} = \left[ -\frac{1}{\gamma M^2} - \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left( \frac{M^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \right) \right]_{M_1}^{M_2} \quad (5.37)$$

Para uma tubulação com escoamento chocado, ou seja, com  $M_2 = 1$ , e considerando-se que o local de choque seja  $L^*$  a partir da origem, Anderson (1990) mostra que:

$$\frac{4fL^*}{D} = \frac{1-M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[ \frac{(\gamma+1)M^2}{2 + (\gamma-1)M^2} \right] \quad (5.38)$$

### 5.2.5. A viscosidade

A viscosidade está associada à capacidade de um gás ou líquido escoar ou, como definido por White (1991), a viscosidade é uma propriedade inerente a cada fluido que estabelece uma relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa resultante de deformação; quando esta variação é linear, tem-se que o fluido é newtoniano, caso contrário é não-newtoniano. Esta consideração foi primeiramente feita por Stokes, o qual formulou três postulados para a definição da viscosidade:

- O fluido é contínuo, isto é o menor volume do fluido considerado é muito maior que a sua estrutura molecular;
- O fluido é isotrópico, isto é as suas propriedades são independentes da direção e do eixo de coordenadas adotado;
- Quando a taxa de deformação do fluido é zero então a tensão de cisalhamento aplicada no fluido deve ser igual à pressão hidrostática.

No modelo proposto a viscosidade foi calculada conforme o método de Lucas descrito no livro do Reid *et al.* (1987). Este método está descrito no Apêndice D.

### 5.2.6. A Equação de Hugoniot

A equação de Hugoniot relaciona a variação das propriedades termodinâmicas do fluido através da onda de choque.

A partir da equação da continuidade (5.1), da quantidade de movimento (5.2), energia (5.3) e (5.11), é possível demonstrar que:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \frac{P_1 + P_2}{2} (\nu_1 - \nu_2) \quad (5.39)$$

Aonde  $\varepsilon$  é a energia interna específica,  $\nu$  o volume específico e  $P$  a pressão estática; os índices 1 e 2 representam montante e jusante respectivamente.

A equação acima é chamada equação de Hugoniot; a sua vantagem está no fato de que ela pode ser usada para qualquer tipo de gás, inclusive gases reais.

Hodge e Koenig (1995) demonstram a partir de (5.39) que:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) \rho_2 - 1}{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) - \frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (5.40)$$

A equação (5.40) fornece a razão entre os volumes específicos a montante e a jusante de uma onda de choque.

### 5.2.7. Vazão mássica

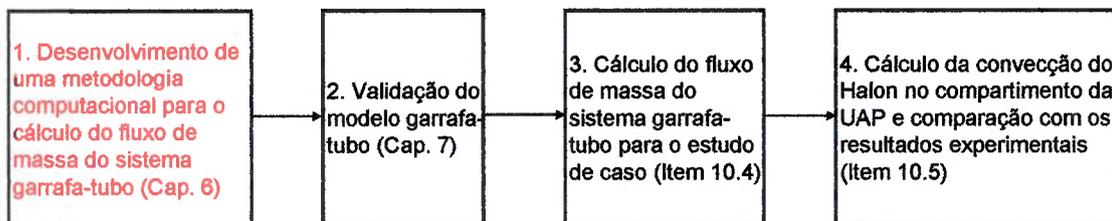
A vazão em massa é dada por:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (5.41)$$

## 6. METODOLOGIA DO MODELO GARRAFA-TUBO

A metodologia de trabalho consistiu no desenvolvimento de um código em MatLab® para o cálculo da descarga do Halon-1301 quando pressurizado por Nitrogênio. Este código foi baseado nos resultados teóricos e experimentais obtidos por Elliot *et al.* (1984), utilizando-se a metodologia descrita neste capítulo juntamente com os Apêndices B, C, D e E.

O diagrama de blocos relativo ao código computacional desenvolvido está apresentado no capítulo 8.



Foram abordados dois métodos de estudo, o primeiro consiste na modelagem da descarga da garrafa diretamente para a atmosfera e o segundo na descarga da garrafa para uma tubulação.

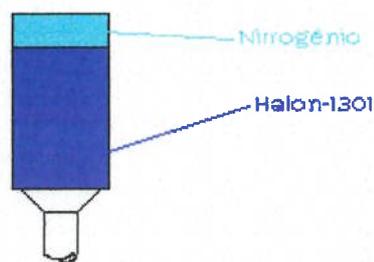


Figura 6.1: Representação da garrafa descarregando para a atmosfera

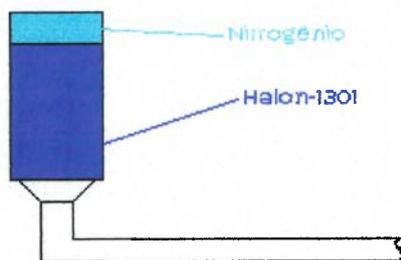


Figura 6.2: Representação da garrafa descarregando para uma tubulação

### 6.1. Dados de entrada

Os seguintes dados são necessários para a inicialização do código:

VARIÁVEL	UNIDADE
Diâmetro do bocal de saída da garrafa	metro
Diâmetro equivalente da tubulação	metro
Diâmetro equivalente do bocal	metro
Pressão atmosférica (absoluta)	Pascal
Pressão da garrafa (manométrica)	Pascal
Temperatura da garrafa	Celsius
Temperatura ambiente	Celsius
Massa inicial do Halon 1301 dentro da garrafa	kilograma
Volume da garrafa	metro <sup>3</sup>
Comprimento equivalente da tubulação	metro

Tabela 6.1: Dados de entrada

O comprimento equivalente da tubulação foi calculado conforme o método descrito pelo NFPA. Este método será detalhado no item 6.6.

## 6.2. Constantes ambientais e físicas

As seguintes constantes ambientais e físicas são adotadas na utilização do código:

CONSTANTE	VALOR
Constante universal dos gases (R)	8314.40 J/kmol.K
Massa molecular do Halon	148.91 kg/mol
Massa molecular do Nitrogênio	28.02 kg/mol
Constante R para o Halon ( $\bar{R}$ )	55,84 J/kg.K
Constante R para o Nitrogênio ( $\bar{R}$ )	296,73 J/kg.K
Rugosidade relativa	$1 \times 10^{-6}$

Tabela 6.2: Constantes ambientais e físicas

## 6.3. Densidade atmosférica local

A densidade atmosférica do ar é calculada conforme Pratt & Whitney (1996), que adaptando-se para o Sistema Internacional resulta em:

$$\rho_{atm} = 6,27 \times 10^{-3} \cdot \frac{P_{atm}}{1,8 \cdot T_{atm} + 517} \quad (6.1)$$

Sendo a pressão atmosférica  $P_{atm}$  em Pascal, a temperatura ambiente  $T_{atm}$  em °C e a densidade atmosférica  $\rho_{atm}$  em kg/m<sup>3</sup>.

## 6.4. Coeficientes de descarga de fluxo

Verificou-se que as curvas teóricas das pressões internas na garrafa e na tubulação não coincidiam com os dados experimentais, sendo assim o modelo foi calibrado através do emprego de coeficientes de descarga, sendo um para o fluxo de massa da garrafa para a tubulação e outro para o fluxo de massa da tubulação para a atmosfera.

Estes coeficientes foram empregados na formulação matemática para a correção das vazões em massa a fim de que as curvas do modelo teórico pudessem coincidir com os valores experimentais.

Nota-se que estes coeficientes possuem valores distintos para a garrafa e a tubulação. A tabela 6.3 compara os valores utilizados neste trabalho com os usados por outros autores.

MÉTODO	DIREÇÃO DA DESCARGA		
	GARRAFA ⇨ ATMOSFERA	GARRAFA ⇨ TUBULAÇÃO	TUBULAÇÃO ⇨ ATMOSFERA
YANG	0,60	-	-
NETTO	0,61	0,61	0,82
MODELO	0,60*	0,61	0,82

\* Valor calculado para a pressão da garrafa a 4,57 MPa, conforme o experimento de Yang (1996)

Tabela 6.3: Coeficientes de descarga

Os valores dos coeficientes de descarga de Yang *et al.* (1996) e Netto (1966) são próximos para a descarga da garrafa para a atmosfera, principalmente porque ambos relacionam a descarga de líquidos; e quando comparados ao modelo proposto a concordância continua sendo boa apesar:

- das diferenças dos experimentos de Yang com o de Elliot *et al.* (1984) no qual o primeiro mantém um pequeno fluxo de nitrogênio para a garrafa, o que poderia reduzir o coeficiente de descarga,
- do fluido extintor ser o FC-218 que sai na forma líquida no experimento de Yang *et al.* (1996),
- do modelo proposto utilizar somente a formulação gasosa.

É possível assumir, com base nos coeficientes descritos por Netto (1996), que os coeficientes adotados no modelo são aplicáveis.

O modelo proposto, da descarga da garrafa para a atmosfera, prevê uma relação parabólica entre o coeficiente de descarga  $C_d$  e a pressão da garrafa  $P_g$ , conforme a equação (6.2).

$$C_a = (4,08 \cdot P_g^2 - 54,67 \cdot P_g) \cdot 10^{-4}, \text{ sendo } P_g \text{ a pressão em atm} \quad (6.2).$$

Sendo o intervalo atualmente testado:  $51,8 < P_g < 54,6$ ;  $P_g$  [atm].

## 6.5. Cálculo das condições iniciais

### 6.5.1. Suposições

A garrafa está inicialmente pressurizada, a uma temperatura inicial conhecida, com o Halon-1301 e o nitrogênio coexistindo no mesmo volume e ambos encontram-se em equilíbrio térmico.

Considera-se que o nitrogênio está na fase gasosa e o Halon-1301 na fase líquida dentro da garrafa; esta condição, no interior da garrafa, permanece até o final do escoamento, ou seja, não há consideração de mudança de fase no modelo teórico adotado para a garrafa.

No momento em que o Halon-1301 sai diretamente para a atmosfera, ou escoar para a tubulação, considera-se que ele está na fase gasosa e, portanto sujeito às peculiaridades deste tipo de escoamento.

Elliot *et al.* (1984) assumiram que logo no início do escoamento o nitrogênio, dissolvido no Halon-1301, evapora, isto faz com que a fase líquida, momentaneamente, aumente seu volume dentro da garrafa, portanto comprimindo o nitrogênio e fazendo com que a pressão da garrafa neste instante tenha um pico (figura 6.3). Pelo fato do modelo proposto não considerar a dissolução dos componentes constituintes da mistura, este pico não é encontrado nos resultados.

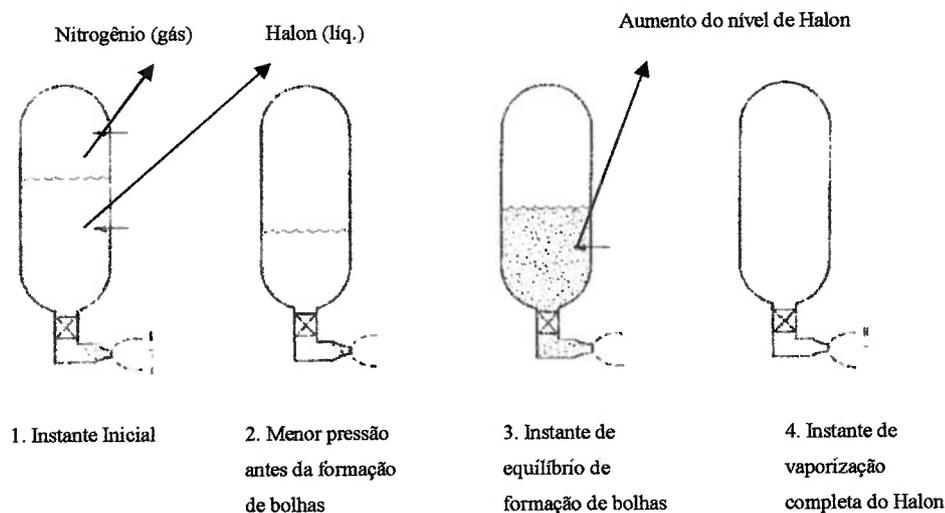


Figura 6.3: Fases de expansão da garrafa conforme Elliot *et al.* (1984).

A inexistência no modelo teórico proposto da dissolução dos componentes não compromete os resultados finais, pois as curvas da pressão da garrafa, da pressão da tubulação e de fluxo de massa continuam adequadas à prática.

O passo no tempo adotado foi de  $10^{-5}$  segundos, mas com  $10^{-4}$  o modelo já produz resultados satisfatórios; acima deste valor o método se mostra instável com oscilações elevadas de pressão.

### 6.5.2. Garrafa

A condição inicial da garrafa pode variar enormemente, pois com a aeronave em solo ela estará a uma temperatura e pressão diferente daquelas em vôo.

Considera-se que a pressão é determinada somente pelo gás nitrogênio, o qual comprime o líquido Halon-1301. As condições de fase iniciais não mudam em função da temperatura ambiente, conforme descrito no item 6.5.1.

A temperatura da garrafa em vôo é determinada pela condição atmosférica e a pressão é obtida a partir de uma tabela fornecida pelo fabricante. A relação temperatura-pressão é de difícil cálculo visto que há dissolução dos componentes em ambas as fases, portanto o uso da tabela facilita a determinação da pressão inicial.

Temperatura [°C]	Min. Pressão da garrafa [psig]	Max. Pressão da garrafa [psig]
-53,9	451,6	475,3
-51,1	441,5	466,5
-40,0	476,5	501,5
-28,9	517,8	542,8
-17,8	566,2	591,2
6,7	622,1	647,1
4,4	686,4	711,4
15,6	759,7	784,7
21,1	800,0	825,0
26,7	842,5	868,1
37,8	937,1	964,5
48,9	1053,2	1085,1
60,0	1287,6	1301,7
71,1	1449,5	1482,3
82,2	1611,4	1662,8
85,0	1651,9	1707,9
93,3	1773,5	1843,3

Tabela 6.4: Relação temperatura-pressão para a garrafa do estudo de caso

Para cada temperatura há duas possíveis pressões porque durante o processo de fabricação da garrafa é possível haver uma variação das massas dos componentes. O Halon-1301, por ser o principal extintor do fogo, tem a sua massa controlada durante a fabricação ficando, portanto para a massa de nitrogênio a variação necessária para que a pressão esteja entre os valores especificados na tabela; Yang *et al.* (1996).

Nos experimentos de Elliot *et al.* (1984), nem sempre a temperatura inicial da garrafa era igual à atmosférica.

A densidade do Halon-1301 líquido, para a condição inicial da garrafa, é calculada através do método modificado de Rackett, conforme descrito por Reid *et al.* (1987). Este método está descrito no Apêndice E.

### **6.5.3. Tubulação**

Considera-se que a tubulação, inicialmente, está preenchida com ar; esta massa é calculada a partir das condições iniciais ambientais, ou seja, a densidade do ar dentro da tubulação é dada através da equação (6.1), seja em solo ou em vôo; a partir do volume conhecido da tubulação é possível determinar a sua massa inicial.

Considera-se que a tubulação esteja em equilíbrio térmico com a garrafa para a determinação da temperatura inicial (condição atmosférica local).

### **6.6. Determinação da tubulação equivalente**

A maioria dos sistemas de extinção de fogo de aeronaves tem mais de um ponto de descarga do agente extintor, devido principalmente à complexa geometria dos sistemas que envolvem a UAP ou o motor.

Elliot *et al.* (1984) utiliza o método descrito no NFPA 12a para a determinação de tubulações equivalentes em sistemas com múltiplos pontos de descarga.

O método baseia-se em duas premissas:

- A tubulação equivalente deve possuir o mesmo volume do sistema original;
- O bocal equivalente deve ter a mesma área que a soma de todos os outros bocais.

A área dos bocais são efetivas, i.e. são reduzidas por fatores que consideram a perda de carga na tubulação.

Os passos para a determinação da tubulação equivalente são:

- a) Divide-se o sistema em vários ramos;
- b) Calcula-se a razão entre as áreas do tubo e do bocal para cada ramo;
- c) Calcula-se a razão entre o comprimento da tubulação e o seu diâmetro para todos os ramos;
- d) A partir da figura 6.4, determina-se o fator de redução de área para cada bocal;
- e) Calcula-se a área efetiva para cada bocal;
- f) Calcula-se o volume total das tubulações do sistema;
- g) O diâmetro da tubulação equivalente é igual ao maior diâmetro de todos os ramos (geralmente é o ramo em que a garrafa está conectada);
- h) O comprimento da tubulação equivalente é tal que o volume calculado no item (f) seja obedecido;
- i) A área equivalente do bocal é dada pela soma de todas as áreas efetivas dos bocais calculados no item (e).

Elliot *et al.* (1984) demonstra que o fluxo de massa em cada ramo da tubulação é obtido multiplicando-se o fluxo total pela razão da área efetiva do bocal desejado pela área equivalente de todos os bocais.

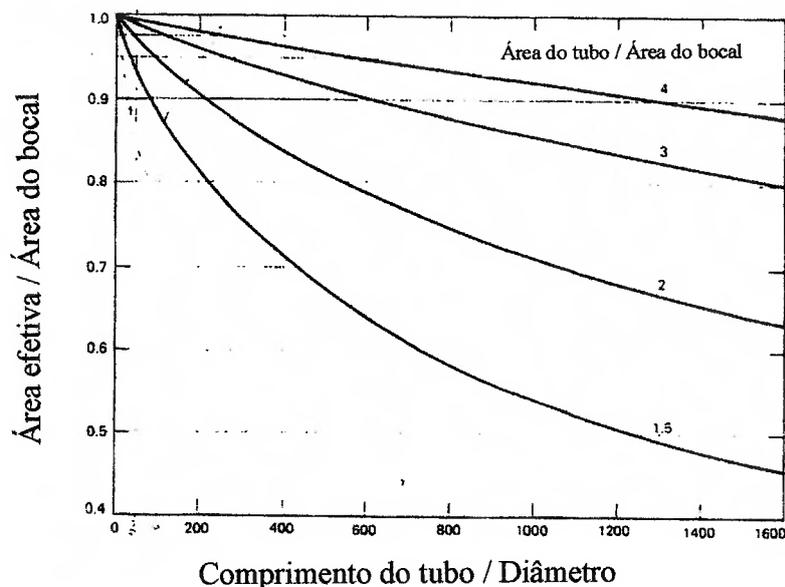


Figura 6.4: Fator de correção de área para o bocal conforme Elliot *et al.* (1984).

## 6.7. Modelagem do escoamento da garrafa

À medida que o Halon-1301 escoo a partir da saída da garrafa a pressão interna nela começa a diminuir até que se iguale à atmosférica.

O escoamento do Halon-1301 na saída da garrafa é considerado gasoso e compressível, ou seja, a partir deste instante é considerado vapor. Embora esta mudança de fase não ocorra de maneira imediata os resultados mostram que é possível assumir esta consideração sem grandes prejuízos ao resultado final, pois os coeficientes de descarga calibram o modelo teórico para chegar nos resultados experimentais através de  $C_d$ .

A partir da densidade do Halon-1301 e da sua massa inicial calcula-se o volume ocupado pelo líquido dentro da garrafa e conseqüentemente, através do volume da garrafa, o volume ocupado pelo nitrogênio.

Como a pressão inicial é conhecida calcula-se então a massa de nitrogênio teórica, através da relação de gás ideal (6.3), que deve existir na garrafa para que sozinha possa atingir a pressão especificada pela tabela do fabricante; sendo então a massa e o volume conhecidos é possível obter a densidade inicial do nitrogênio. Esta simplificação é válida porque a quantidade de nitrogênio dissolvida é ao redor de 2.3%, conforme Elliot *et al.* (1984).

$$P\forall = m \bar{R}T \quad (6.3)$$

O escoamento é transiente, todavia o cálculo a cada passo no tempo é feito utilizando-se as equações de regime permanente, considerando-se que a mistura está em equilíbrio térmico.

Como a pressão inicial da garrafa é conhecida e a pressão atmosférica também, através da equação (5.24) calcula-se o número de Mach do escoamento do Halon-1301 para o primeiro passo no tempo.

O fluxo de massa, para saída sônica ou supersônica, é calculado através da equação (5.41), utilizando-se a equação (5.40) para o cálculo da densidade do Halon-1301 na saída da garrafa considerando-se a densidade a jusante igual à da tubulação; já no caso de saída subsônica a densidade considerada na saída da garrafa é igual à do Halon-1301. A área é conhecida através do desenho do fabricante da garrafa.

Apesar da equação (5.40), proveniente da relação de Hugoniot, relacionar a densidade através de uma onda de choque, esta pode não existir na saída da garrafa, tanto para a atmosfera quanto para a tubulação, todavia esta equação se mostrou aplicável ao Halon-1301, em estado gasoso na garrafa, admitindo-se uma vaporização instantânea e completa na interface garrafa-tubulação.

Foram efetuados cálculos sem a equação de Hugoniot, isto é, utilizando-se a densidade de saída igual à densidade do Halon-1301 líquido dentro da garrafa e os resultados não foram satisfatórios, como mostrado na figura 6.5.

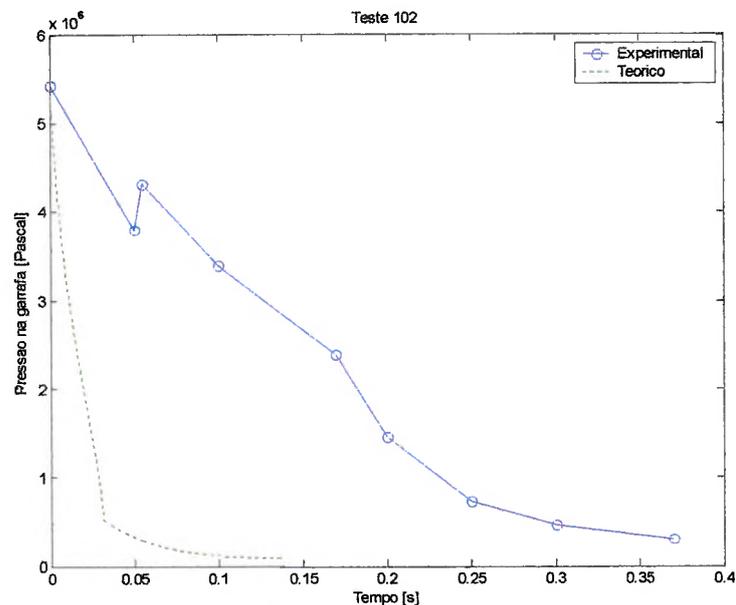


Figura 6.5: Teste 102 utilizando-se a densidade do Halon-1301 líquido para escoamento chocado

Enquanto o Halon-1301 escoar da garrafa a sua massa é atualizada diminuindo-se do fluxo de massa que sai (Equação 5.41); o escoamento do nitrogênio inicia-se quando a massa do Halon-1301 torna-se nula.

O processo de expansão do nitrogênio e exaustão do Halon-1301 dentro da garrafa é considerado isentrópico porque a principal força geradora de entropia, o atrito, está agindo dentro da garrafa em uma região pequena, e pode ser considerado adiabático porque a exaustão do Halon-1301 e do nitrogênio são fenômenos rápidos que geralmente levam poucos segundos.

O nitrogênio dentro da garrafa é considerado um gás real e segue a equação de Peng-Robinson. Vide Apêndice C para maiores detalhes.

As variações da temperatura dentro da garrafa são calculadas a partir da aplicação da primeira lei da termodinâmica (5.12), considerando-se como volume de controle a própria garrafa:

$$de = dq - dw + \sum h_a dm_a - \sum h_s dm_s \quad (5.12)$$

A partir das considerações de processo isentrópico, lembrando-se também que não há trabalho realizado e que não há injeção, mas somente exaustão de gás, obtém-se:

$$de = -\int h_s dm_s \quad (6.4)$$

Conforme Modell e Reid (1974), a energia interna de um gás perfeito pode ser calculada conforme a equação (6.5):

$$E = mc_v \int dT \quad (6.5)$$

Lembrando-se da relação de calores específicos:

$$\bar{R} = \bar{c}_p - \bar{c}_v \quad (6.6)$$

Substituindo-se as equações (5.10), (6.5) e (6.6) em (6.4) obtemos:

$$m c_v \int dT + T c_v \int \frac{dm}{m} = (e + P \nabla) \int dm \quad (6.7)$$

Simplificando obtemos:

$$\frac{c_v}{R} \int \frac{dT}{T} = \int \frac{dm}{m} \quad (6.8)$$

Calculando-se a integral e simplificando a partir da equação (6.6), tem-se:

$$\frac{T_{t+\Delta t}}{T_t} = \left( \frac{m_{t+\Delta t}}{m_t} \right)^{\gamma-1} \quad (6.9)$$

Assume-se que a temperatura de todo o sistema, i.e. da garrafa, do nitrogênio e do Halon-1301, seja igual à temperatura fornecida pela equação (8.9).

Quando todo o Halon-1301 é expelido da garrafa, o escoamento do nitrogênio inicia-se; respeitando-se as mesmas equações e procedimentos descritos neste item.

Apesar da equação (6.9) ter sido desenvolvida para gás perfeito, ela é utilizada para o cálculo da temperatura do nitrogênio dentro da garrafa; já a pressão é calculada conforme a equação de Peng-Robinson. Futuros estudos devem levar em consideração o cálculo da temperatura como gás real.

## 6.8. Modelagem do escoamento da tubulação

Após o início da descarga da garrafa inicia-se o escoamento dos gases pela tubulação.

Conforme o Halon-1301 é despejado na tubulação o ar é empurrado para fora até que a frente do Halon-1301 atinja o extremo da tubulação. Assim o escoamento permanece por alguns instantes até que todo o Halon-1301 da garrafa seja despejado, iniciando-se assim a descarga do nitrogênio na tubulação.

O nitrogênio empurra o Halon-1301 da tubulação para a atmosfera até que a pressão interna na garrafa atinja o valor da pressão atmosférica.

O escoamento na tubulação considera as perdas de carga e utiliza a formulação de Fanno, conforme descrito no item 5.2.4. A relação entre o fator de atrito e o número de Mach, conforme Anderson (1990), é dada por (5.38), reescrita aqui por conveniência:

$$\frac{4fL^*}{D} = \frac{1-M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[ \frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right] \quad (5.38)$$

Há três variáveis interdependentes nesta equação: o fator de atrito  $f$ , o comprimento  $L^*$  e o número de Mach  $M$  porque, no início do escoamento dos gases na tubulação, não se conhece o quanto a frente de Halon conseguirá caminhar com o fator de atrito que só pode ser avaliado após a determinação do comprimento  $L^*$ , que por sua vez é utilizado para o cálculo do número de Mach.

Esta equação (5.38) é resolvida de forma iterativa a partir do valor inicial do comprimento atingido no passo de tempo (para o instante inicial este valor é zero), baseado na premissa de que a frente de Halon-1301 caminha a Mach=1, e de uma estimativa inicial para o fator de atrito; a iteração termina pela convergência do comprimento  $L^*$ ; o fator de atrito converge fora do loop de convergência do comprimento. Quando a frente de Halon-1301

atinge o final da tubulação não é necessário mais convergir o comprimento, mas somente o fator de atrito. Vide capítulo 8 para maiores detalhes.

Considera-se que o número de Mach dos gases da saída da garrafa é o mesmo número de Mach na entrada da tubulação.

O número de Reynolds é calculado através da média aritmética das velocidades de entrada e saída da tubulação.

A pressão na tubulação é monitorada com relação à pressão da garrafa de modo que caso a pressão da tubulação atinja, ou exceda, a pressão da garrafa o fluxo de massa da garrafa neste instante é forçado a ser zero e as suas condições permanecem inalteradas neste passo no tempo, enquanto a tubulação tem a sua descarga continuada.

A pressão da garrafa é monitorada com relação à pressão atmosférica, de modo que caso a pressão da garrafa seja menor, ou igual, à atmosférica então o cálculo é finalizado.

A massa dentro da tubulação é atualizada constantemente através dos valores da descarga da garrafa e da tubulação, ou seja, caso haja descarga da garrafa esta massa é somada à massa do instante anterior e caso haja descarga da tubulação esta massa é subtraída da massa do instante anterior.

A temperatura da tubulação é calculada a partir da primeira lei da termodinâmica (5.12), considerando-se como volume de controle a própria tubulação. Neste caso, a variação da energia interna é somente função da variação da entalpia; esta equação é resolvida de forma iterativa através de uma estimativa inicial para a temperatura final que é corrigida até que a variação da energia interna satisfaça a variação de entalpia.

A pressão na tubulação é dada pelas pressões parciais do nitrogênio, que segue a relação de Peng-Robinson, e do Halon-1301, que segue a relação de gás ideal. Vide Apêndice C para mais detalhes. A temperatura é calculada considerando-se que ambos os gases são perfeitos.

A relação de calores específicos  $\gamma$  e a viscosidade  $\nu$  na tubulação são calculadas a partir da lei de mistura, i.e. a média ponderada da massa existente na tubulação de Halon-1301 e nitrogênio. Vide Apêndices B e D.

Na saída dos gases da tubulação há duas possibilidades: formação de onda de choque, caso o escoamento seja supersônico e a pressão estática da tubulação seja menor que a atmosférica, ou de um leque de expansão de Prandtl-Meyer quando o escoamento é supersônico e a pressão estática da tubulação maior que a atmosférica.

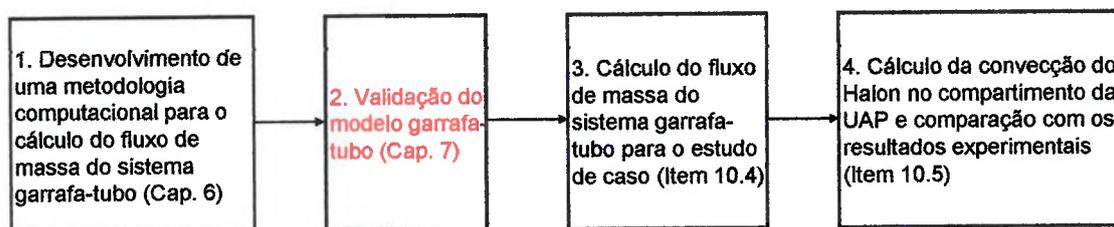
No caso do leque de expansão de Prandtl-Meyer, considera-se que o ângulo de expansão é de  $45^\circ$ , caso este ângulo não resolva a equação (5.32) ele é diminuído gradativamente.

Para maiores detalhes do funcionamento do código, favor referir-se ao capítulo 8.

## 7. VALIDAÇÃO DO MODELO GARRAFA-TUBO

### 7.1. Os testes experimentais

Elliot *et al.* (1984) apresentam resultados de pressão-temperatura da descarga de garrafas, com Halon-1301 pressurizadas com nitrogênio, para a atmosfera e tubulações.



Somente alguns dos testes que foram realizados por Elliot *et al.* (1984) em laboratório estão com as curvas de pressão-temperatura disponíveis na literatura; foram escolhidos cinco testes para comparação com o objetivo de validar o método proposto, a saber: Testes 102, 146, 174, 175 e 293.

Os testes 102 e 146 são compostos por uma garrafa de Halon-1301, pressurizada por nitrogênio, que descarrega diretamente para a atmosfera; já os testes 174, 175 e 293 descarregam para a tubulação e esta para a atmosfera.

### 7.2. Comparação dos resultados

A seguir os resultados do modelo teórico (legenda **Teórico**), descrito anteriormente, são comparados com os dados experimentais (legenda **Experimental**) e teóricos (legenda **Elliot**) de Elliot *et al.* (1984). O modelo proposto fornece inúmeros outros resultados não mostrados neste item, todavia disponíveis no Apêndice A.

### 7.2.1. Teste 102

Para o teste 102, as condições iniciais eram:

- Massa inicial de Halon-1301 = 3,14 kg
- Pressão inicial da garrafa = 5529595 Pa – absoluta.
- Temperatura inicial da garrafa = 291,48 K
- Pressão atmosférica = 94458 Pa (@2200 pés)
- Volume da garrafa = 0,0038 m<sup>3</sup>
- Área de saída da garrafa = 500 mm<sup>2</sup>

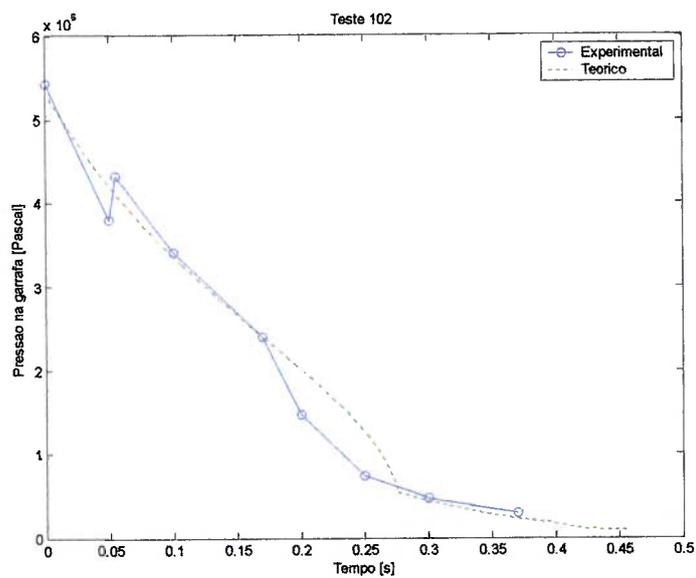


Figura 7.1: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 102

### 7.2.2. Teste 146

Para o teste 146, as condições iniciais eram:

- Massa inicial de Halon-1301 = 2,33 kg
- Pressão inicial da garrafa = 5246910 Pa – absoluta
- Temperatura inicial da garrafa = 294,82 K
- Pressão atmosférica = 94458 Pa (@2200 pés)
- Volume da garrafa = 0,0028 m<sup>3</sup>
- Área de saída da garrafa = 77 mm<sup>2</sup>

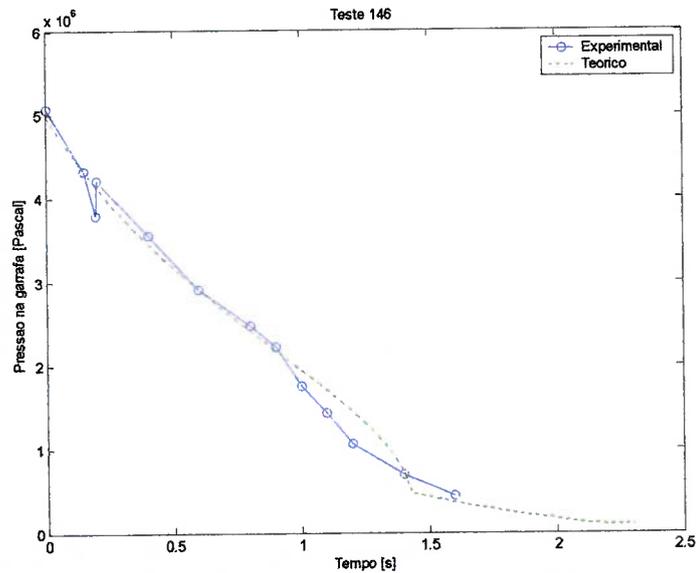


Figura 7.2: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 146

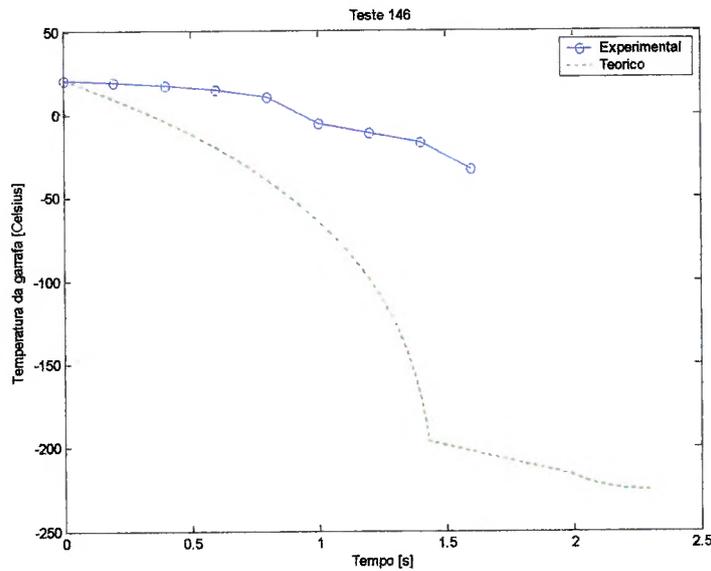


Figura 7.3: Comparação do modelo com os resultados experimentais da temperatura da garrafa do teste 146

### 7.2.3. Teste 174

Para o teste 174, as condições iniciais eram:

- Massa inicial de Halon-1301 = 2,33 kg
- Pressão inicial da garrafa = 5246910 Pa – absoluta
- Pressão atmosférica = 94458 Pa (@2200 pés)
- Temperatura inicial da garrafa = 294,82 K
- Volume da garrafa = 0,0038 m<sup>3</sup>
- Diâmetro de saída da garrafa = 25,2 mm
- Diâmetro da tubulação = 29,2 mm
- Diâmetro do bocal = 9,9 mm
- Comprimento da tubulação = 3,8 m

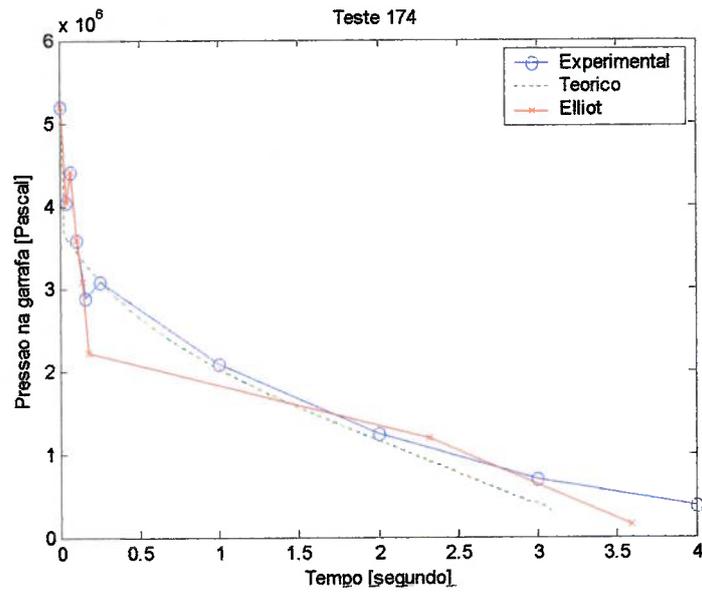


Figura 7.4: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na garrafa do teste 174

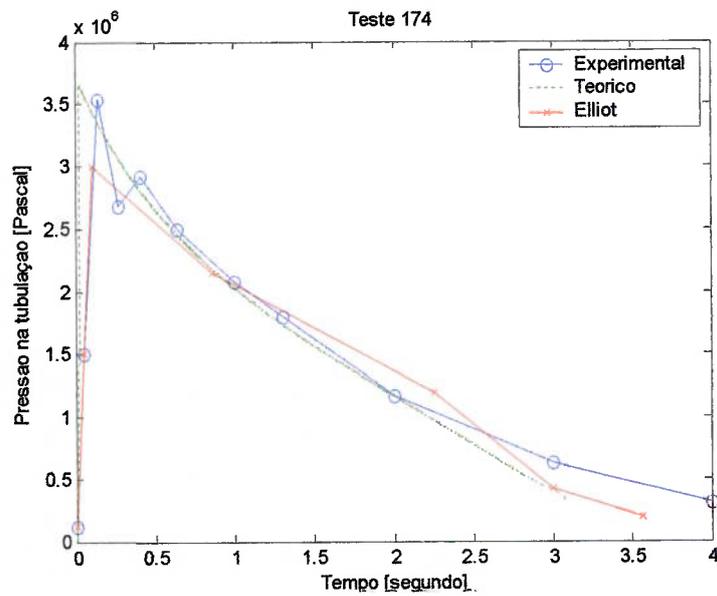


Figura 7.5: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na tubulação do teste 174

#### 7.2.4. Teste 175

Para o teste 175, as condições iniciais eram:

- Massa inicial de Halon-1301 = 3,18 kg
- Pressão inicial da garrafa = 5212436 Pa – absoluta
- Pressão atmosférica = 94458 Pa (@2200 pés)
- Temperatura inicial da garrafa = 299,26 K
- Volume da garrafa = 0,0038 m<sup>3</sup>
- Diâmetro de saída da garrafa = 25,2 mm
- Diâmetro da tubulação = 29,2 mm
- Diâmetro do bocal = 21,4 mm
- Comprimento da tubulação = 3,8 m

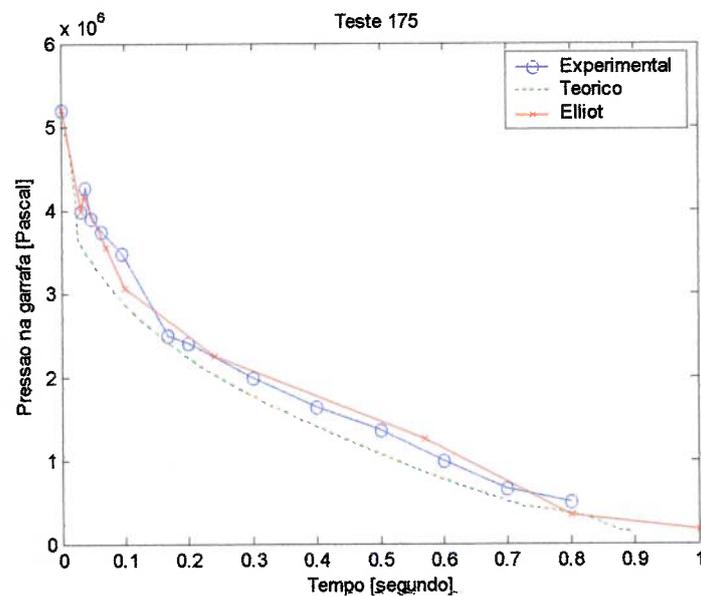


Figura 7.6: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na garrafa do teste 175

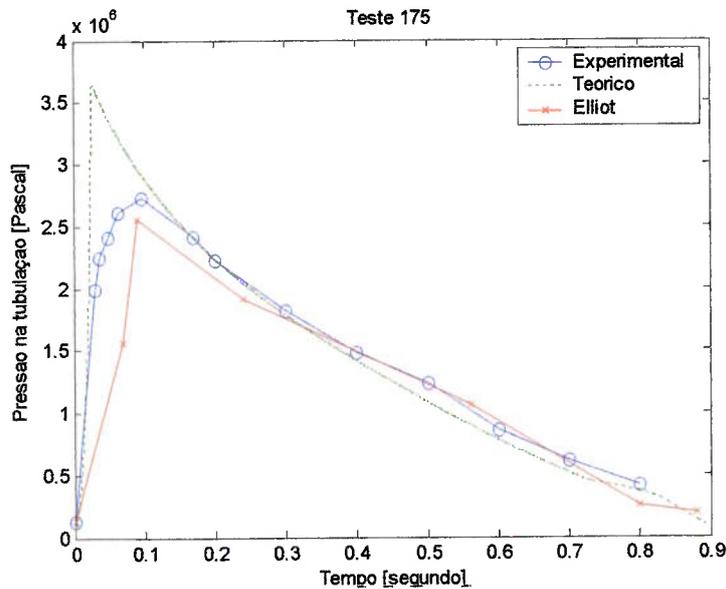


Figura 7.7: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão na tubulação do teste 175

### 7.2.5. Teste 293

Para o teste 293, as condições iniciais eram:

- Massa inicial de Halon-1301 = 3,18 kg
- Pressão inicial da garrafa = 5398595 Pa – absoluta
- Pressão atmosférica = 94458 Pa (@2200 pés)
- Temperatura inicial da garrafa = 297,04 K
- Volume da garrafa = 0,0038 m<sup>3</sup>
- Diâmetro de saída da garrafa = 25,2 mm
- Diâmetro da tubulação = 22,9 mm
- Diâmetro do bocal = 9,5 mm
- Comprimento da tubulação = 5,1 m

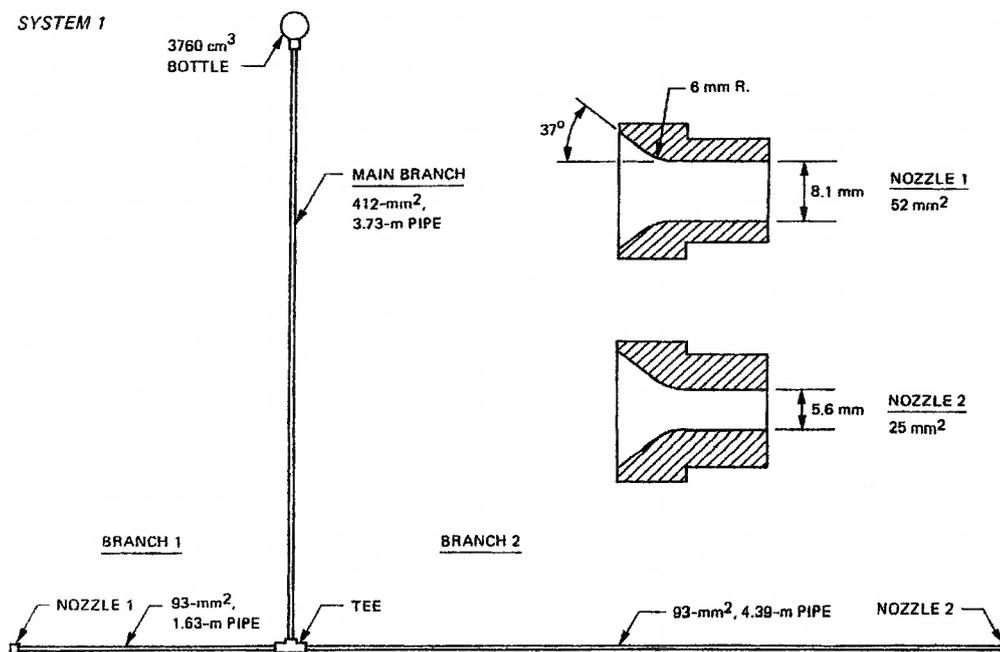


Figura 7.8: Esquemático do teste 293 conforme Elliot *et al.* (1984).

Este teste tem a particularidade de ter sido efetuado com uma tubulação com três ramos de comprimentos diferentes, como mostrado na figura 7.8. O método utilizado para a determinação da tubulação equivalente é o descrito no item 6.6.

Os gráficos das temperaturas, Reynolds, etc não estão impressos, mas possuem o mesmo comportamento dos testes 174 e 175; todavia chama-se a atenção para este teste na comparação do modelo proposto com o calculado por Elliot *et al.* (1984) do fluxo de massa descarregado por cada ramo.

O fluxo de massa é calculado para a tubulação equivalente, a qual possui somente um bocal, e depois para a tubulação real a partir da proporcionalidade das áreas dos bocais, como descrito no item 6.6.

Os resultados da massa de Halon-1301 descarregada por cada ramo, quando comparada ao modelo teórico, apresentam boa concordância o que indica que a utilização do método proposto no item 6.6 para o cálculo da tubulação equivalente é adequada.

Curiosamente, como mostrado nas figuras 7.9 e 7.10, não se observou nos resultados experimentais do teste 293 o pico de pressão devido à evaporação do nitrogênio dissolvido no Halon-1301.

Os valores das pressões calculadas para a garrafa e a tubulação estão um pouco abaixo do real, exceto no início da descarga, o que indica que os resultados de fluxo de massa experimentais, mostrado nas figuras 7.11 e 7.12, são na realidade um pouco mais baixos, o que se aproxima dos valores calculados pelo modelo proposto.

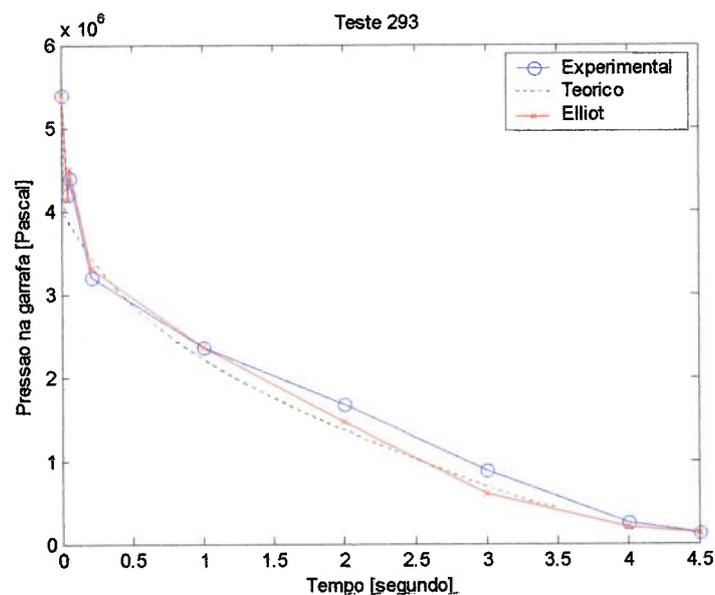


Figura 7.9: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão da garrafa do teste 293.

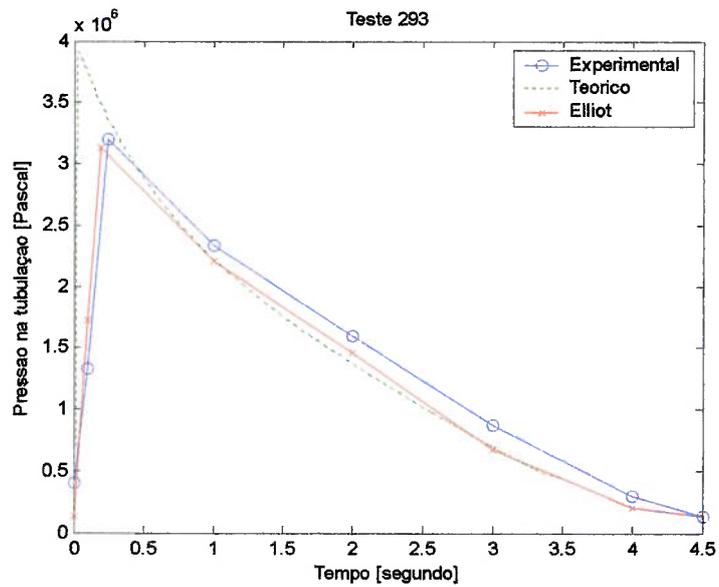


Figura 7.10: Comparação do modelo com os resultados experimentais e matemáticos de Elliot da pressão da tubulação do teste 293.

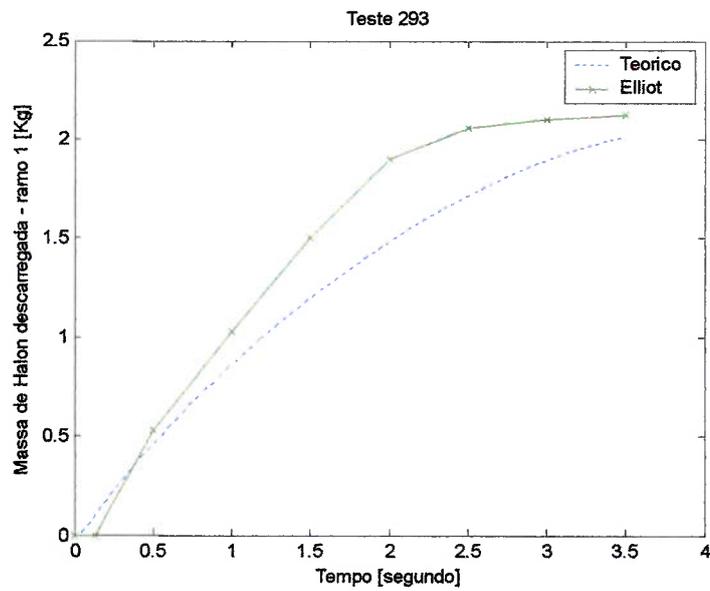


Figura 7.11: Comparação do modelo com os resultados matemáticos de Elliot da Massa de Halon descarregada no ramo 1.

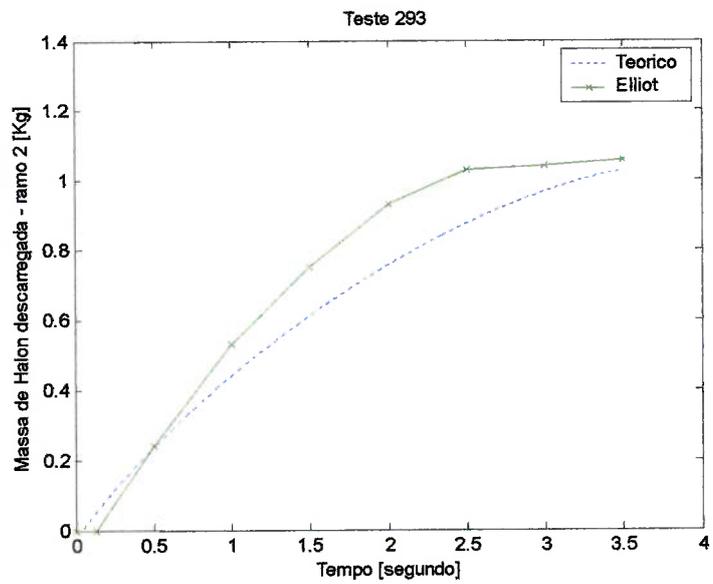


Figura 7.12: Comparação do modelo com os resultados matemáticos de Elliot da Massa de Halon descarregada no ramo 2:

## 8. DIAGRAMA DE BLOCOS-MODELO GARRAFA-TUBO

Neste capítulo está descrito, de forma sucinta, o funcionamento do modelo proposto e programado em MatLab<sup>®</sup> para o cálculo do fluxo de Halon-1301 da garrafa.

### 8.1. Definição do estado inicial da garrafa

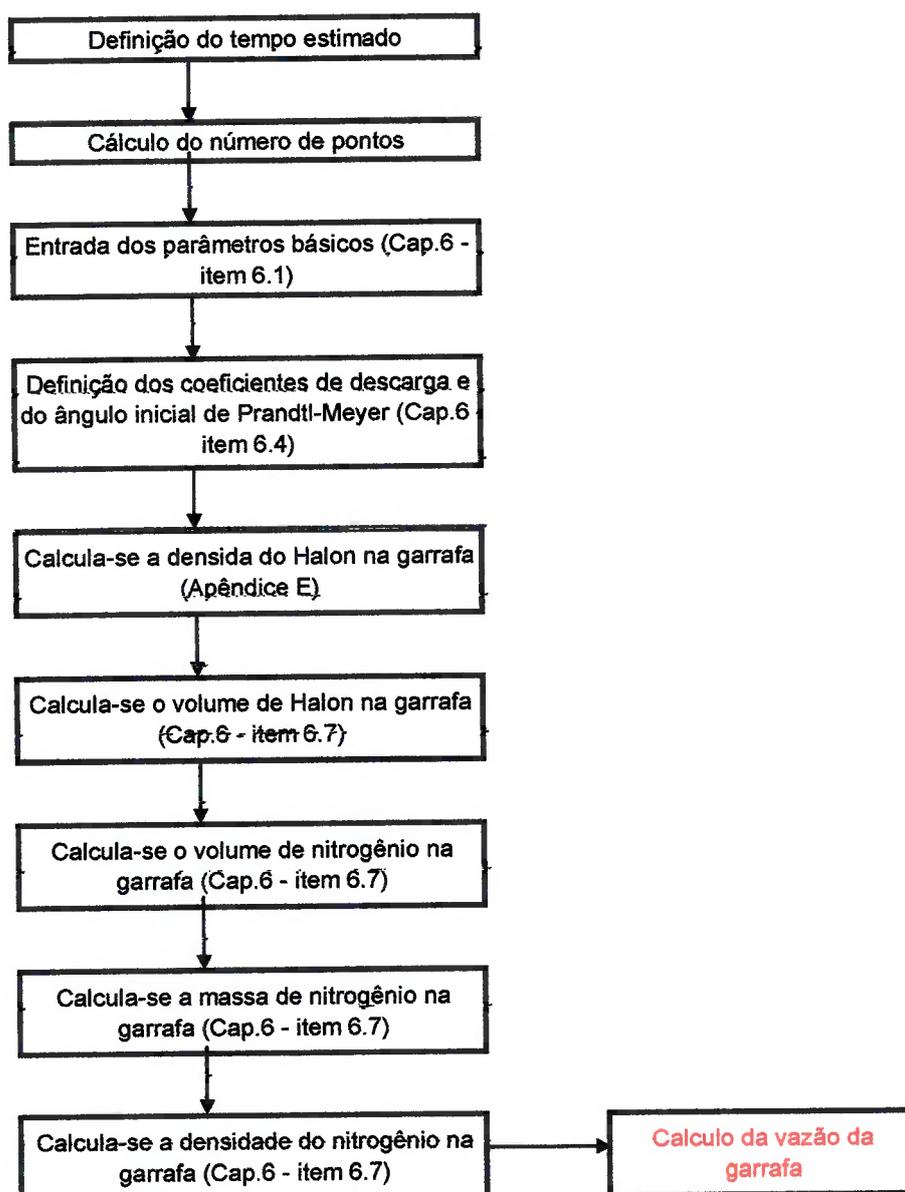


Figura 8.1: Algoritmo 1/4

## 8.2. Cálculo da vazão da garrafa

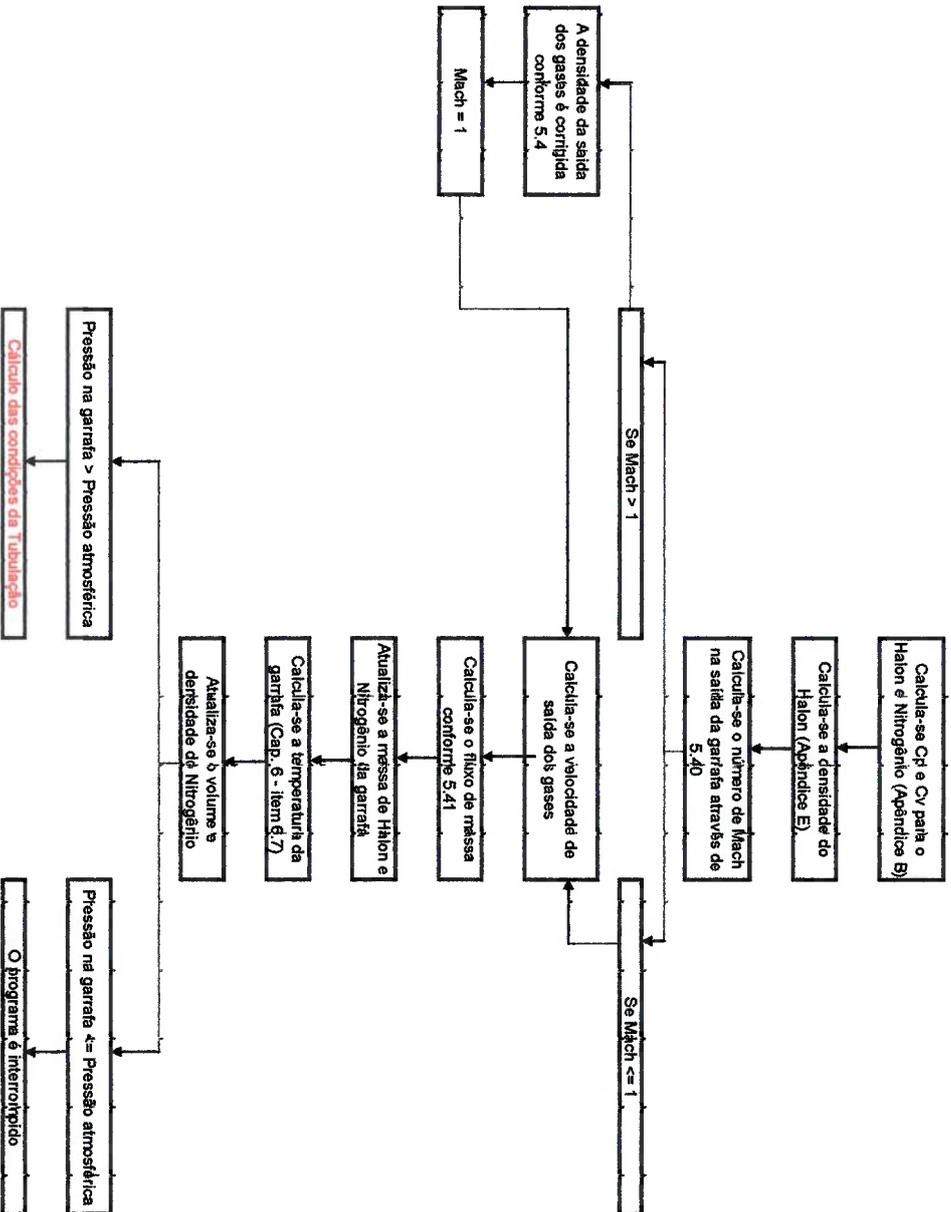


Figura 8.2: Algoritmo 2/4

### 8.3. Loop de cálculo do fator de atrito e de Fanno

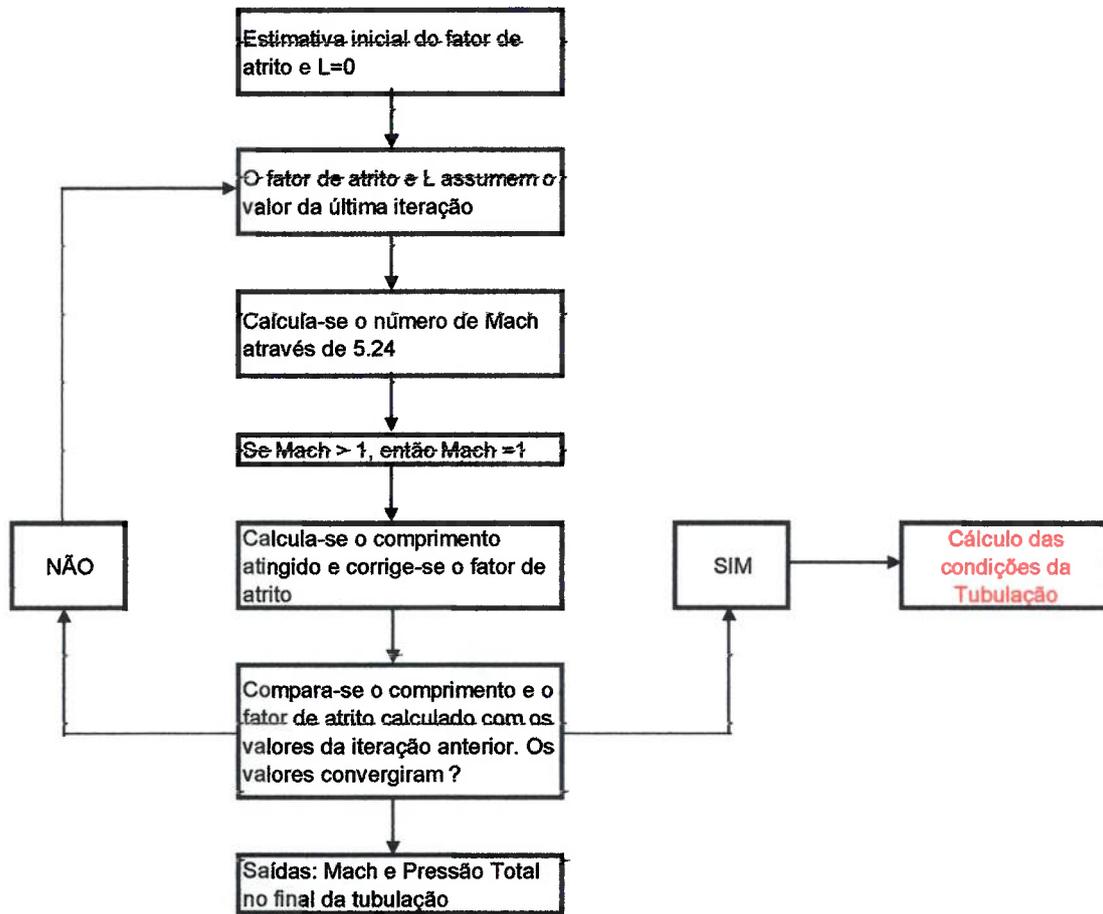


Figura 8.3: Algoritmo 3/4

## 8.4. Cálculo das condições da tubulação

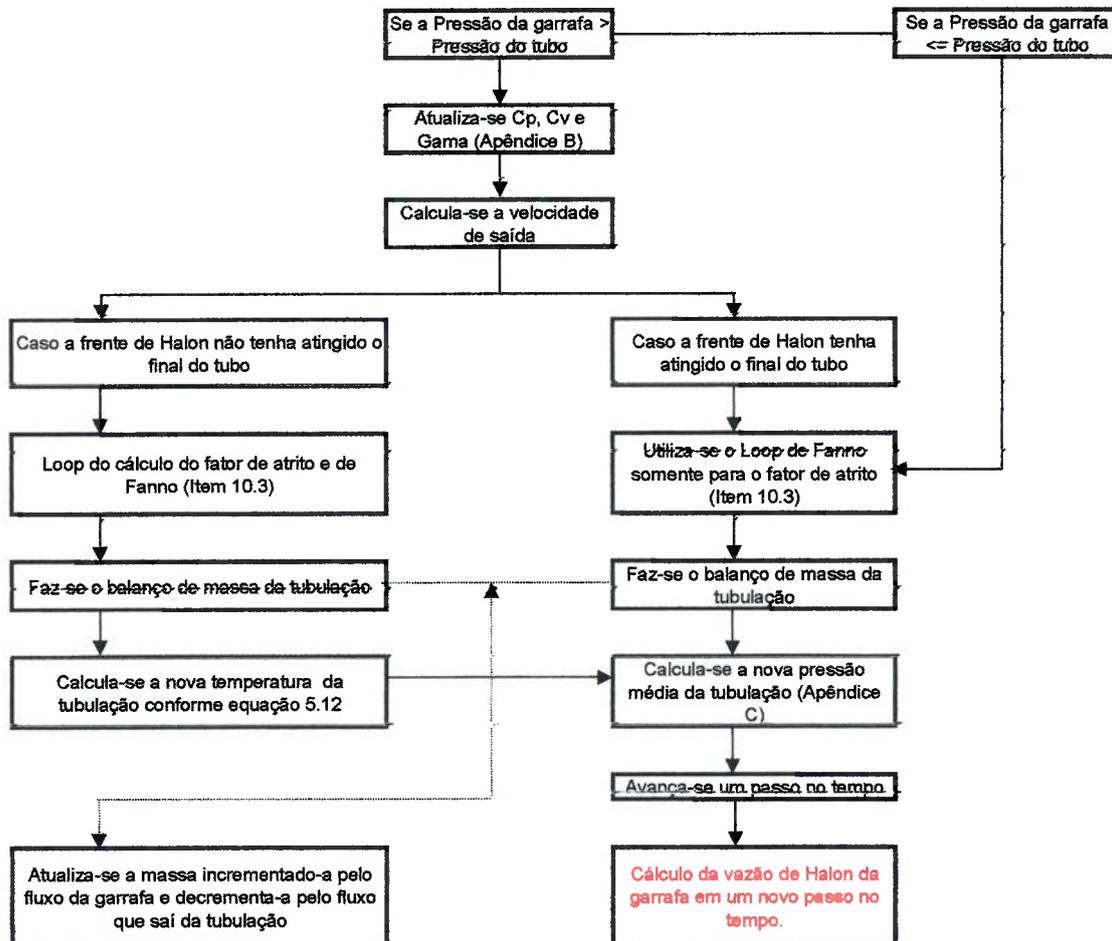


Figura 8.4: Algoritmo 4/4

## **9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS GARRAFA-TUBO**

O modelo proposto calcula muitas variáveis do processo de descarga do Halon-1301 com o nitrogênio no sistema garrafa-tubo, e a análise destes parâmetros fornecem subsídios para o conhecimento deste processo.

Os resultados de pressão da tubulação ou da garrafa se aproximam bem quando os fatores de correção de fluxo descritos no item 6.4 são utilizados.

Conforme descrito no quarto item do objetivo do trabalho, foi feita uma malha para estudar a descarga do Halon-1301 no sistema garrafa-tubo do Teste 175. As condições de temperatura e pressão iniciais foram as mesmas (item 7.2.4), exceto pela ausência de nitrogênio e de que o Halon-1301 foi tratado como gás dentro da garrafa. Devido a estas premissas a comparação dos resultados de pressão e temperatura não será realizada, serão feitas somente comparações do número de Mach.

Quando a garrafa dispara, a frente de Halon-1301 caminha a Mach=1 (Figuras 9.1, 9.2 e 9.3) até atingir o final da tubulação, durante este percurso a pressão na tubulação aumenta gradativamente fazendo com que o Mach na saída garrafa-tubo (Figuras 9.3 e 9.5) decresça e torne-se subsônico.

Quando a frente de Halon-1301 atinge o final da tubulação o número de Mach na saída do tubo passa a ser 1 (Figuras 9.3 e 9.7) e o escoamento na tubulação permanece supersônico (Figura 9.6) tornando-se subsônico posteriormente; o fluxo permanece chocado até que não haja pressão suficiente a montante do bocal para manter esta condição. Nota-se (Figura 9.5) que quando o nitrogênio começa a sair pela tubulação, o número de Mach volta a aumentar, podendo voltar a ser 1.

Após o disparo a pressão da garrafa começa a diminuir e a pressão média da tubulação a aumentar até o instante em que a pressão da tubulação atinge o seu máximo, a partir de então a pressão da tubulação começa a diminuir gradativamente com a pressão da garrafa.

No final do escoamento nota-se o descolamento das duas pressões, sendo a da garrafa sempre superior a da tubulação (Figura 9.8).

O modelo proposto trabalha com uma pressão média para a tubulação e, portanto o diferencial de pressão entre a garrafa e a tubulação é maior do que na realidade fazendo com que o número de Mach na saída da garrafa seja 1 por um tempo maior, todavia isto não alterou consideravelmente os resultados de fluxo de massa e pressão (item 7.2.5). Isto poderia ter sido amenizado caso a tubulação fosse dividida em pequenos segmentos de forma que cada um tivesse a sua própria temperatura e pressão.

No instante em que a frente de Halon-1301 atinge o final da tubulação o número de Mach da garrafa para a tubulação cai abruptamente para valores muito baixos e na saída da tubulação o Mach permanece 1. O Halon-1301 é expandido conforme as ondas de Prandtl-Meyer; enquanto a garrafa contiver massa e pressão para manter a tubulação nesta condição as linhas de pressão decaem praticamente juntas, após isso as linhas se separam e caso o escoamento seja supersônico na tubulação e a pressão estática menor que a atmosférica haverá formação de ondas de choque no final do tubo.

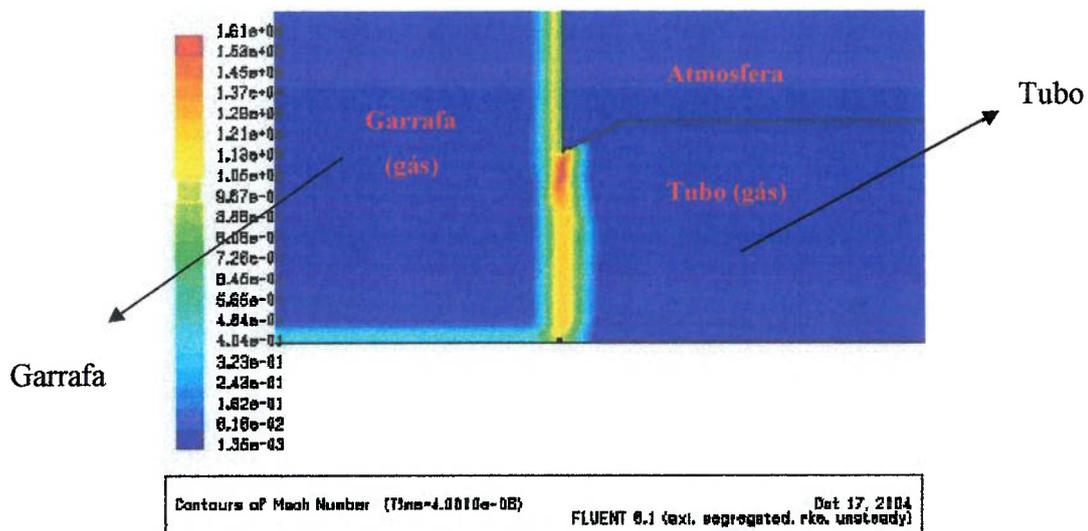
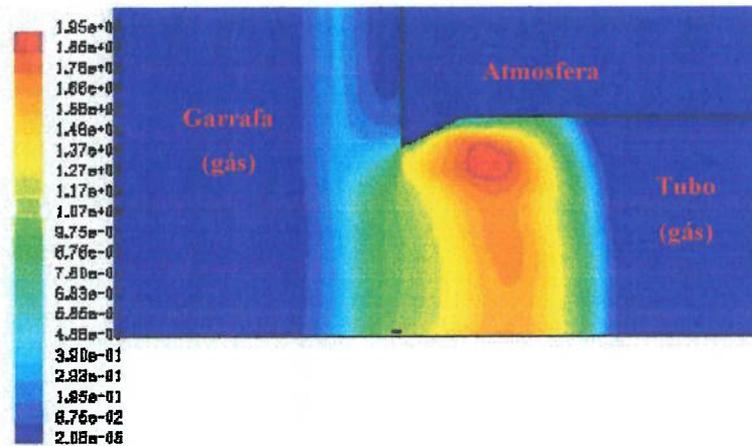


Figura 9.1: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175 no início do escoamento, Fluent®



Contours of Mach Number (Time=2.4010e-06) Dat 17, 2104  
FLUENT 6.1 (axi, segregated, rke, unsteady)

Figura 9.2: Mach na frente de Halon-1301 para o teste 175, Fluent®

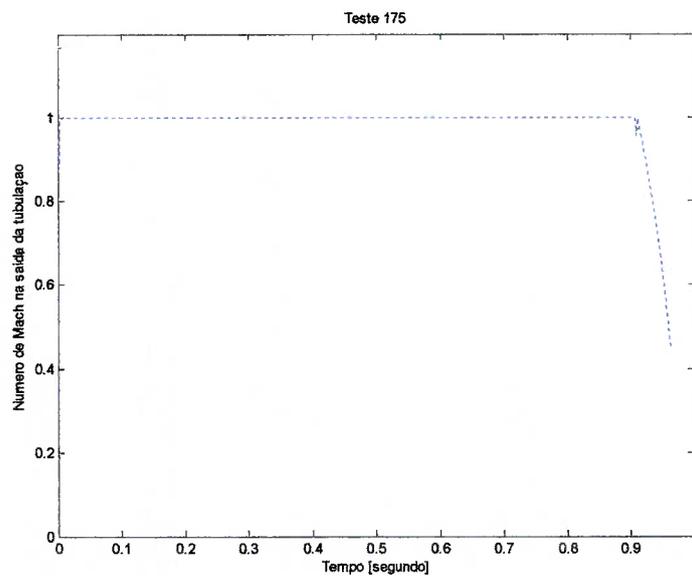


Figura 9.3: Mach calculado na frente de Halon-1301 para o teste 175.

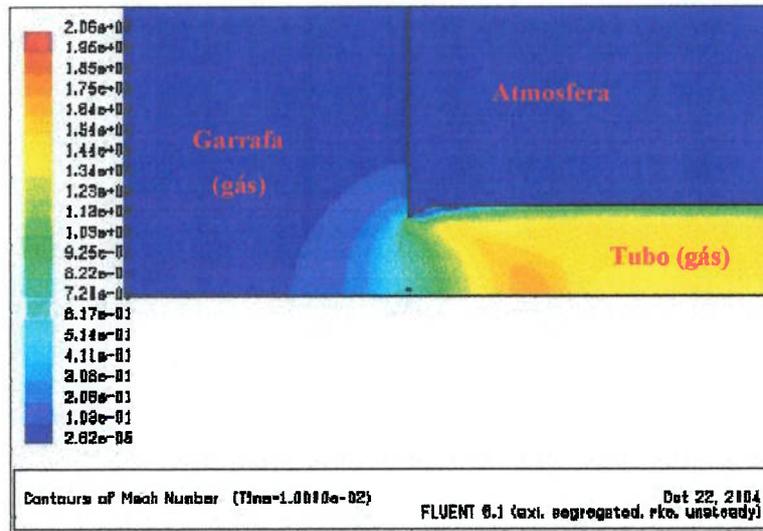


Figura 9.4: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175, Fluent®

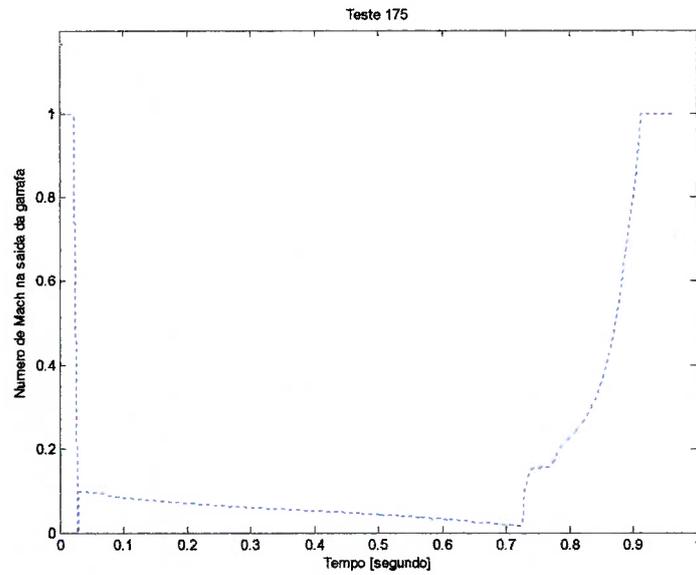


Figura 9.5: Mach calculado na saída garrafa-tubo para o teste 175.

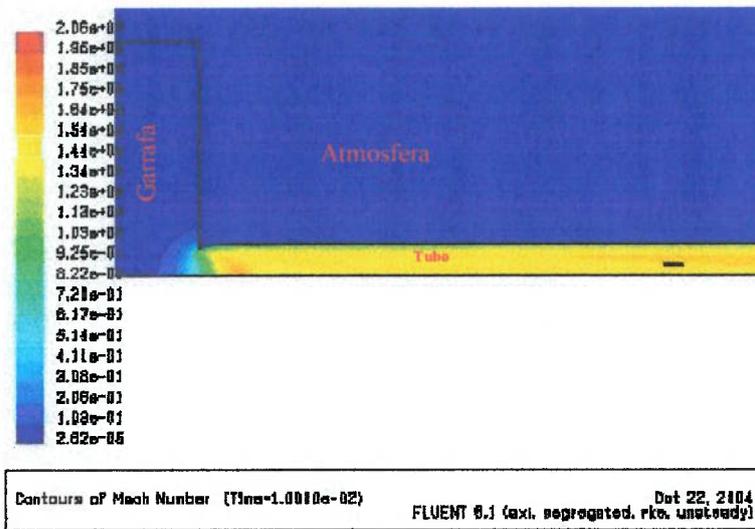


Figura 9.6: Mach na tubulação para o teste 175, Fluent®.

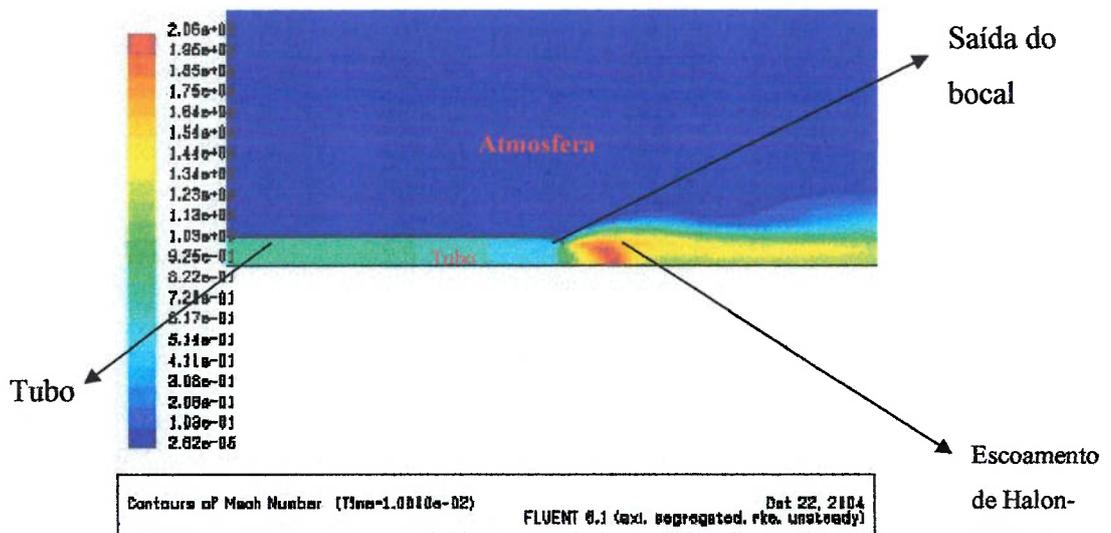


Figura 9.7: Mach na saída da tubulação para o teste 175, Fluent®.

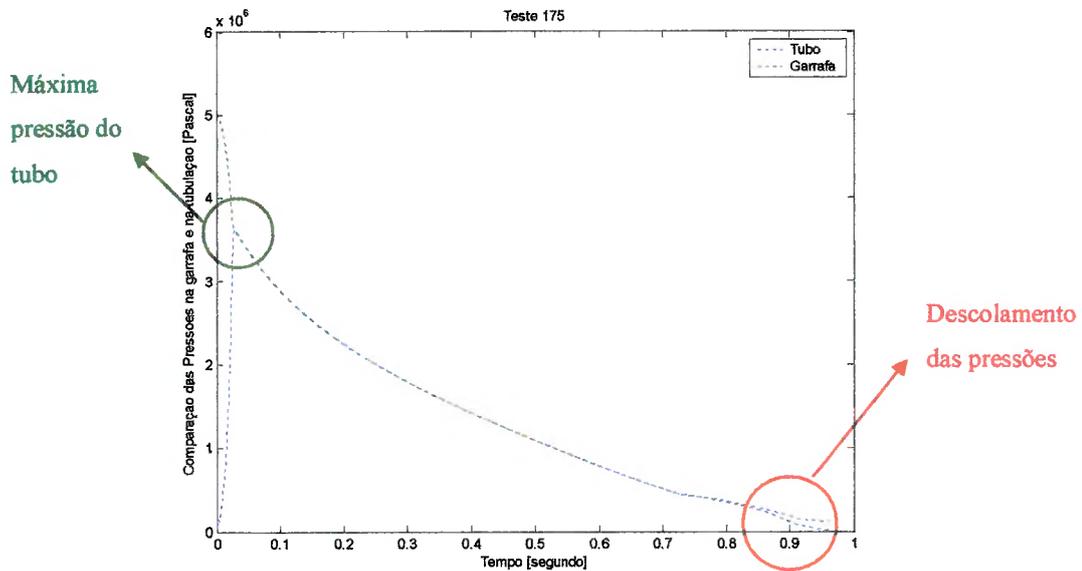


Figura 9.8: Pressão na garrafa versus tubulação calculada para o teste 175

A temperatura da garrafa diminui em função do tempo devido à exaustão da massa de seu interior que diminui gradativamente a sua energia interna.

O escoamento, por ser compressível, deve ter um número de Mach igual a 1 na região de menor área; esta ocorre na saída da garrafa ou no final da tubulação quando a garrafa descarrega para a atmosfera ou para a tubulação respectivamente. O número de Mach na saída da garrafa nos testes 102 e 146 são necessariamente iguais a 1, pois esta é a região de menor área; para os demais testes esta condição inicia-se na interface garrafa-tubo e depois é transferida para o final da tubulação.

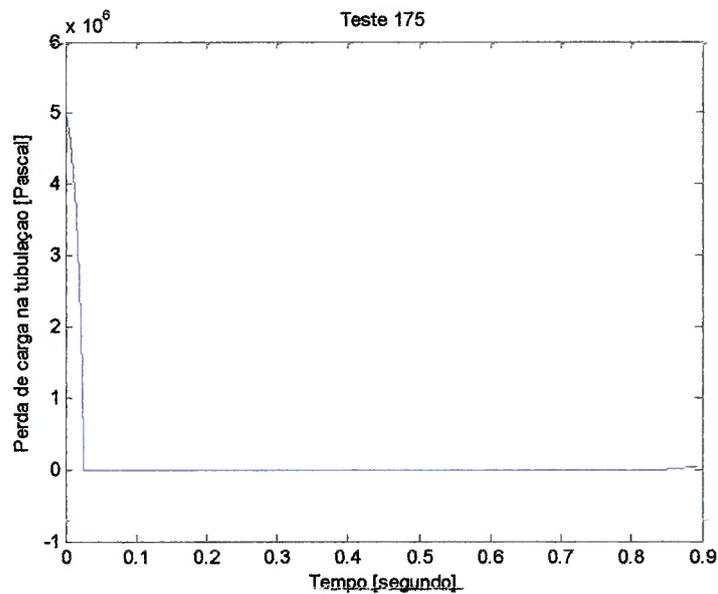


Figura 9.9: Perda de carga da tubulação calculada no Teste 175

A velocidade na saída da garrafa, bem como a pressão total, têm um aumento súbito quando se dá o início do escoamento do nitrogênio porque este gás, por ser mais leve que o Halon-1301, tem uma constante maior ( $\bar{R}$ ) o que acarreta uma maior velocidade do som para uma mesma temperatura.

Observa-se uma alteração na derivada das curvas de temperatura da garrafa e da tubulação em seu final, isto é devido ao fim do escoamento do Halon-1301 e ao início do escoamento do nitrogênio.

O modelo proposto não simula transferência de calor entre a garrafa e o meio, e também assume uma temperatura igual para a fase gasosa (nitrogênio) e a fase líquida (Halon-1301) dentro da garrafa. Segundo Elliot *et al.* (1984) a temperatura teórica decresce mais rapidamente que os resultados experimentais porque há fluxo de calor para a fase gasosa e para os transdutores de temperatura através da parede da garrafa (Capítulo 4). Tentou-se obter outra medição de temperatura através de um transdutor de fio quente, mas este se quebrava durante o escoamento.

Durante a descarga da garrafa para a tubulação, observa-se que a pressão e temperatura são muito próximas da condição da garrafa o que leva a crer que o Halon-1301 ainda é líquido na tubulação, como evidenciado por Cleary *et al.* (1995).

Durante o escoamento dos gases na tubulação verifica-se que há um intervalo de tempo para que a pressão atinja seu valor máximo; este instante coincide com o momento em que a frente de Halon-1301 alcança o fim da tubulação; isto também foi observado por Elliot *et al.* (1984).

Nota-se nos resultados do Teste 175 (Figura 7.7) uma discrepância do valor máximo da pressão da tubulação. Ao se comparar com o resultado do Teste 174 (Figura 7.5), que não tem grandes diferenças das condições iniciais de temperatura e pressão, o pico de pressão é praticamente o mesmo (3,5 MPa); o diâmetro do bocal é a única variável que foi alterada significativamente. Esta discrepância é devida ao fato do ar, que preenche a tubulação inicialmente, não ter sido modelado conforme Fanno, desta maneira o ar não sofre resistência do atrito da tubulação e do bocal e isto faz com que os resultados sejam similares até a que frente de Halon-1301 atinja o final da tubulação; a partir de então toda a tubulação está preenchida com Halon-1301 e, portanto sujeita a Fanno.

O comportamento da relação de calores específicos, principalmente para o Halon-1301, modifica-se bastante em função do tempo (Apêndice A) porque os calores específicos, como mostrados por Reid *et al.* (1987), são dependentes da temperatura (Apêndice B).

Nota-se que devido à queda de pressão dentro da garrafa, e conseqüentemente da temperatura, o volume ocupado pelo Halon-1301 líquido diminui em função do tempo devido ao aumento da densidade (aumenta com a queda da temperatura) e pela própria exaustão do líquido.

Os resultados (Apêndice A) mostram claramente a queda da massa de Halon-1301 na garrafa, enquanto que a de nitrogênio permanece constante até o início da vazão deste gás.

O fluxo de massa de Halon-1301 diminui constantemente, até a sua exaustão completa, devido a continua queda de temperatura e pressão dentro da garrafa.

A variação observada no fluxo de massa entre os valores do modelo matemático de Elliot *et al* (1984) e do modelo proposto nas Figuras (7.11) e (7.12) é devido ao fato do primeiro modelo prever a vaporização na tubulação e não na garrafa, e isto aumenta o fator de atrito e consequentemente o fluxo de massa, assim o fluxo de Halon-1301 na saída da tubulação inicia-se um pouco antes e a sua descarga é também mais rápida.

A densidade do nitrogênio decresce rapidamente na garrafa no final do gráfico porque o escoamento deste gás se inicia e, portanto a queda que ocorria inicialmente pela exaustão do Halon-1301 se dá agora pela queda de massa de nitrogênio.

## 10. ESTUDO DE CASO

### 10.1. Condições de contorno

Toma-se como condições de contorno para o cálculo um avião a 10.000 pés (3000 m) de altura e a garrafa da UAP com as seguintes condições iniciais:

- Massa inicial de Halon-1301 = 1,805 kg
- Pressão inicial da garrafa = 3217783 Pa – absoluta
- Pressão atmosférica = 69706 Pa
- Temperatura inicial da garrafa = 268,35 K
- Volume da garrafa = 0,0025 m<sup>3</sup>
- Diâmetro equivalente de saída da garrafa = 15,5 mm
- Diâmetro equivalente da tubulação = 17,7 mm
- Diâmetro equivalente do bocal = 10,5 mm
- Comprimento equivalente da tubulação = 2,274 m

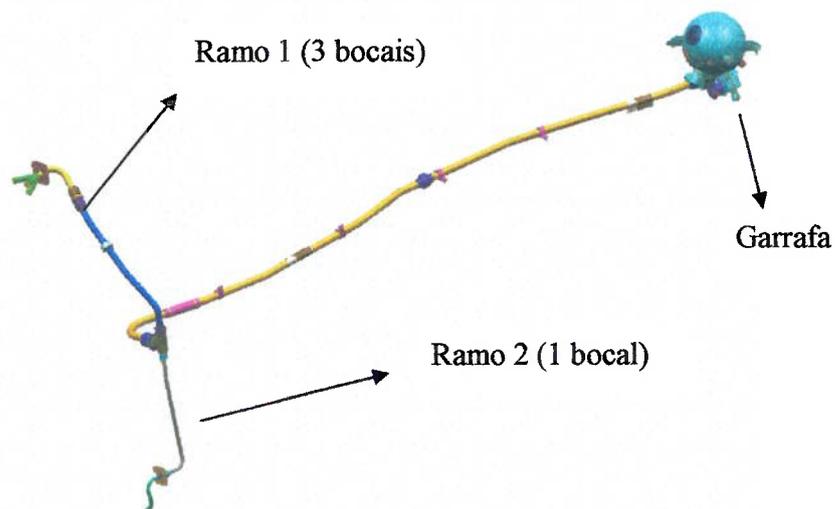


Figura 10.1: Representação da montagem da garrafa da UAP

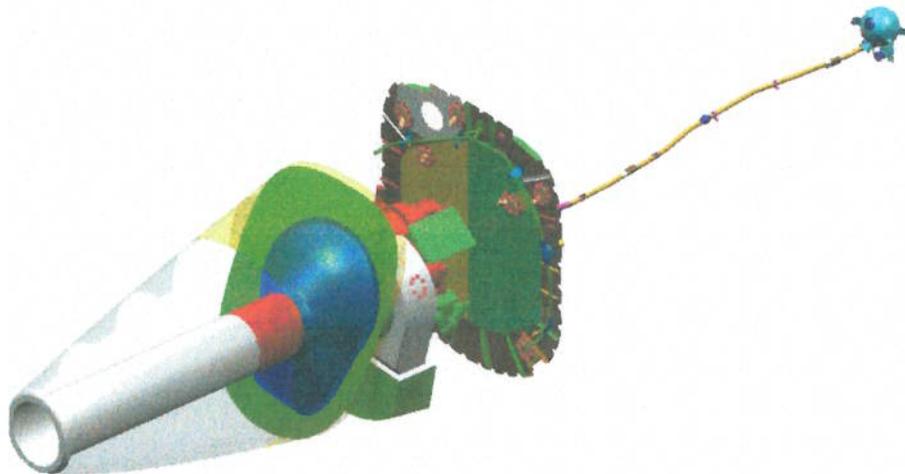


Figura 10.2: Representação da montagem da garrafa no compartimento da UAP

As condições ambientais são provenientes da condição da garrafa em voo, isto é pressão e temperatura nas condições ambiente a 10.000 pés de altura, na atmosfera padrão, conforme as equações de Pratt & Whitney (1996); as condições de contorno (CC) para o fluxo de massa de ar (Figura 10.3) foram obtidas através de simulações realizadas anteriormente e não são objeto deste estudo.

Em caso de fogo em voo, a tripulação desligará a UAP, o fornecimento de combustível, esperará ao redor de 30 segundos para eliminar, através da queima, todo o combustível da região e somente então disparará a garrafa de Halon-1301.

As condições de contorno são faces aonde foram impostas o fluxo de entrada de ar e a pressão de saída do compartimento da UAP; a partir destas informações iniciais o Fluent<sup>®</sup> é capaz de resolver o escoamento interno. Durante o voo, o compartimento da UAP é ventilado por uma entrada de ar dedicada (CC1) e a exaustão é realizada, também, por uma saída dedicada (CC2), de modo que há um fluxo de ar interno ao compartimento que precisa ser resolvido antes da descarga do Halon-1301.

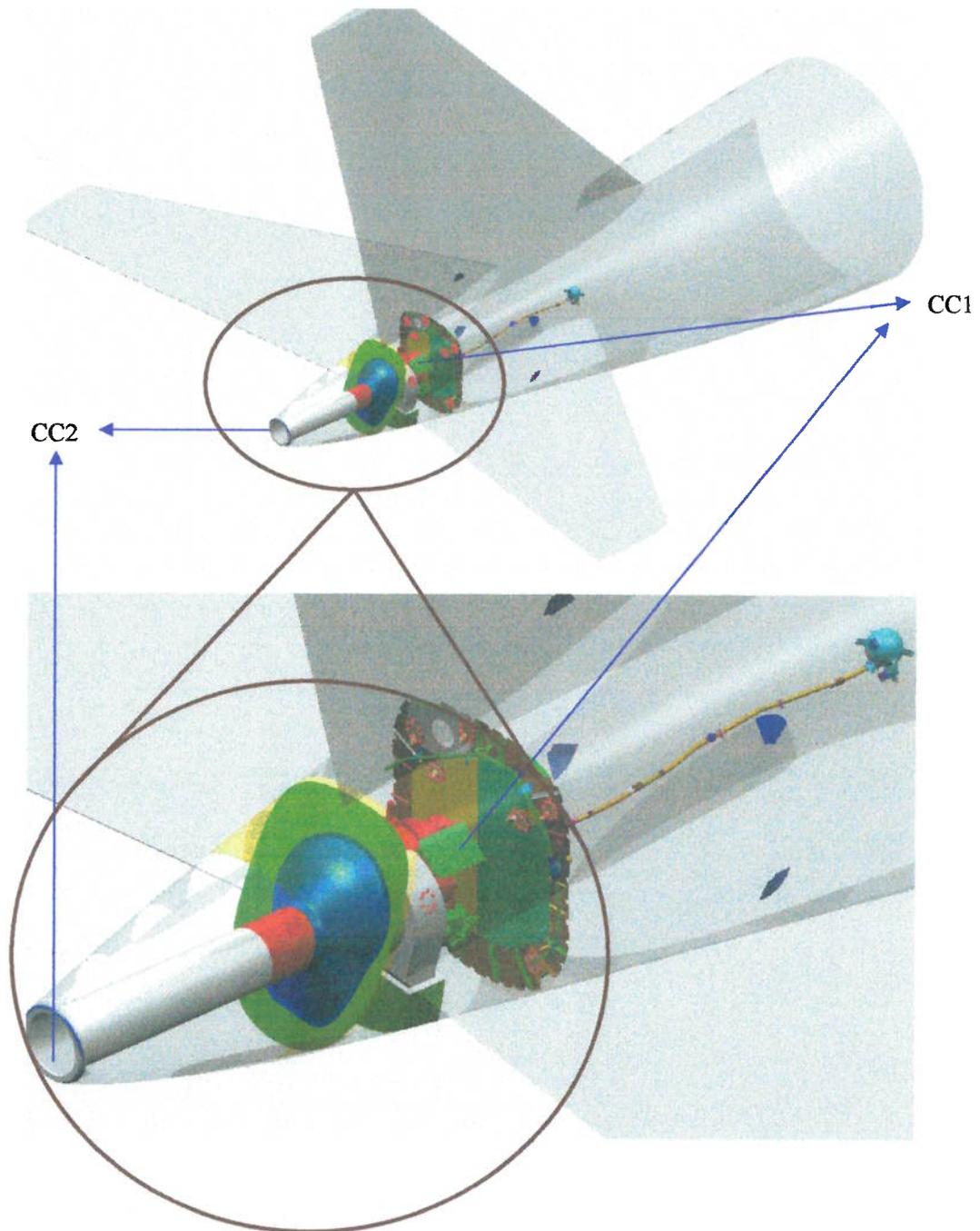


Figura 10.3: Condições de contorno da UAP em voo

CC1: Fluxo de entrada de ar = 0,72 kg/segundo; Temperatura total = 286 K

CC2: Pressão de saída = 2659 psig; Temperatura total = 286 K

A temperatura total é utilizada somente caso haja retorno de fluxo.

## 10.2. Malha computacional

### 10.2.1. Tipos de malha

A malha é uma representação discreta de um domínio que pode ter uma, duas ou três dimensões.

A localização onde as variáveis de interesse serão calculadas é definida pela malha numérica, que é na realidade uma representação discreta do domínio geométrico onde o problema é resolvido; isto divide a solução em um número finito de sub-domínios, denominados elementos ou volume de controles (VC).

Há basicamente dois tipos de discretização de domínios: a malha estruturada e a não-estruturada. Na malha estruturada cada vértice, exceto nas bordas da malha, tem uma vizinhança local isomórfica e possuem sempre o mesmo número de elementos adjacentes, já na malha não-estruturada os vértices podem apresentar vizinhos locais arbitrariamente variados e em números variados.

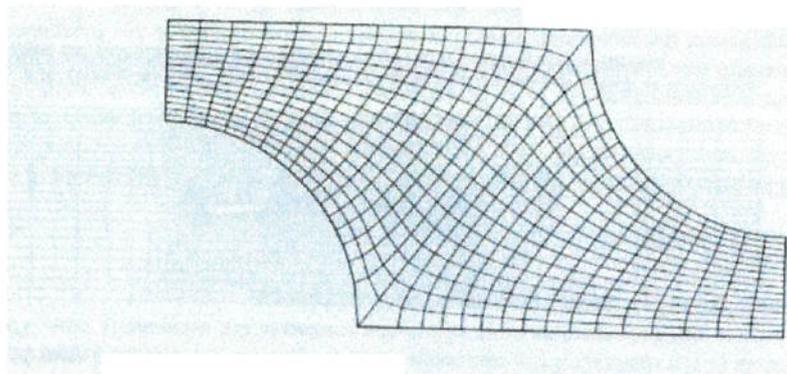


Figura 10.4: Exemplo de malha estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).

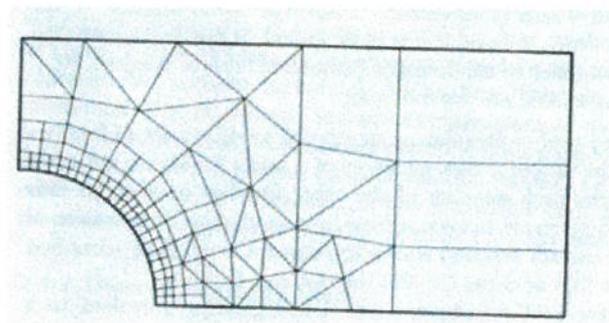


Figura 10.5: Exemplo de malha não-estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).

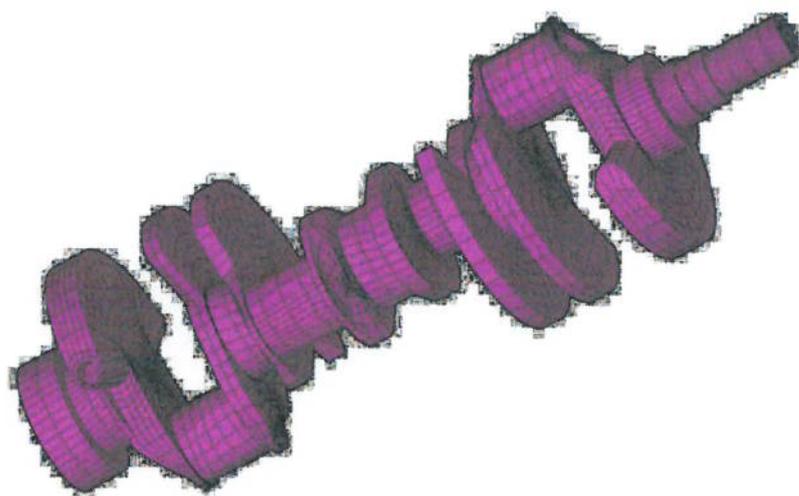


Figura 10.6: Exemplo de malha 3D estruturada, ICEM<sup>®</sup>

### 10.2.2. A malha para o estudo de caso

Foram geradas duas malhas:

- Estudo do número de Mach na interface garrafa-tubo e no final da tubulação, segundo os dados do **Teste 175** (vide capítulo 7 e Apêndice A);
- Estudo convectivo da distribuição do **Halon-1301** no compartimento da UAP.

As malhas, para os estudos acima, foram geradas utilizando-se softwares disponíveis comercialmente, chamados ICEM<sup>®</sup> e Tgrid<sup>®</sup>.

As malhas geradas são não-estruturadas e compostas de elementos tetraédricos, pois os inúmeros contornos existentes ao redor da máquina e da entrada de ar não permitiriam a utilização de uma malha estruturada; já para o caso do Teste 175 utilizou-se malha quadrangular.

A máquina foi simplificada em seus detalhes de maneira a não eliminar nenhum grande volume para que o escoamento calculado seja o mais próximo do real. Esta simplificação visa diminuir o tempo de geração e do tratamento da malha bem como o tempo do cálculo computacional no Fluent<sup>®</sup>.

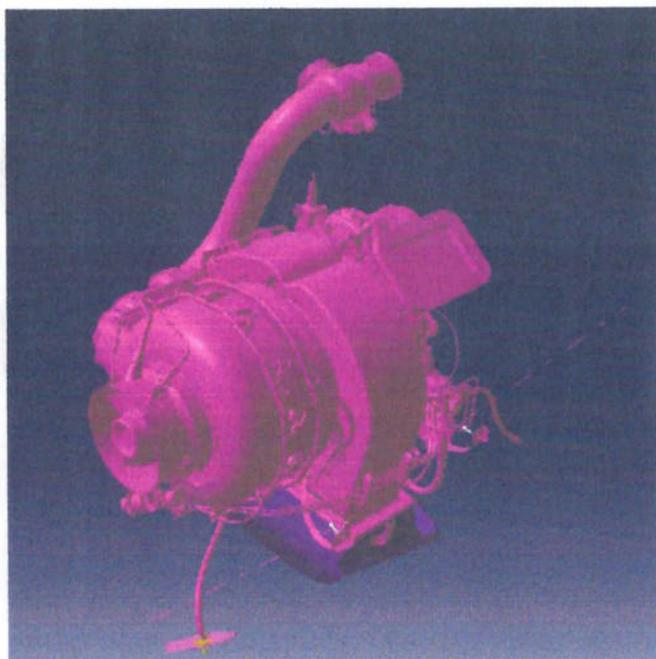


Figura 10.7: UAP original

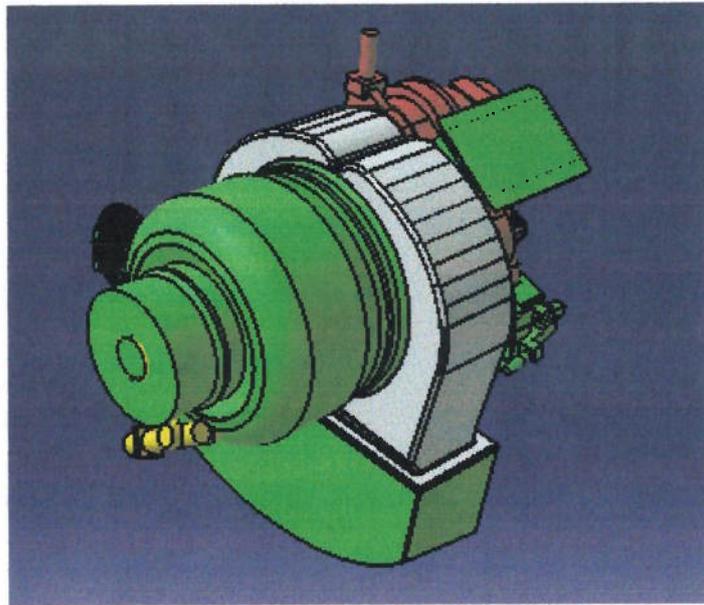


Figura 10.8: UAP modificado para estudo de CFD

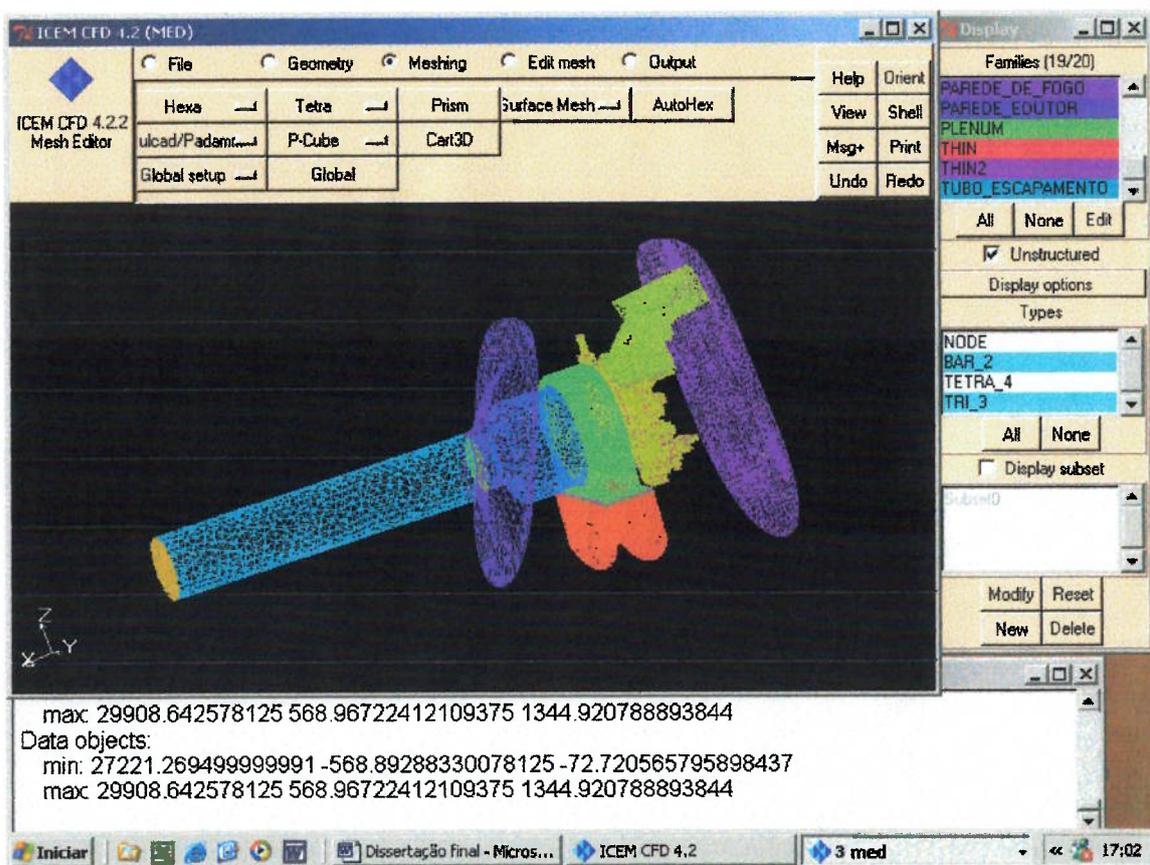


Figura 10.9: Malha da UAP gerada no ICEM®

### 10.2.3. Qualidade da malha no ICEM

A qualidade de uma malha é função da forma dos seus triângulos, e conseqüentemente dos tetraedros, que na maioria das aplicações deseja-se que se aproxime da forma de um triângulo / tetraedro eqüilátero. A qualidade da malha é, portanto dada pelo seu pior elemento.

No caso do software ICEM, as medidas típicas analisam a razão entre os raios dos círculos inscrito e circunscrito, tendo por parâmetro a relação dos triângulos eqüiláteros.

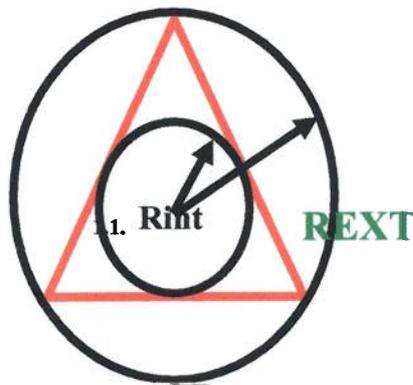


Figura 10.10: Raio inscrito e circunscrito de um triângulo eqüilátero.

A qualidade da malha no ICEM é calculada conforme a equação abaixo:

$$Qualidade = \frac{\left(\frac{R_{int}}{R_{ext}}\right)}{\left(\frac{R_{int}}{R_{ext}}\right)_{ideal}} \quad (10.1)$$

Onde os raios ideais são dados pelas dimensões de um triângulo / tetraedro eqüilátero.

Geralmente a primeira malha gerada pode ser melhorada através de tratamentos específicos dos triângulos, através de um comando chamado “smooth” ou suavização. No exemplo

abaixo, retirado do Tutorial do Icem, observamos a primeira malha gerada e a mesma após este tratamento:

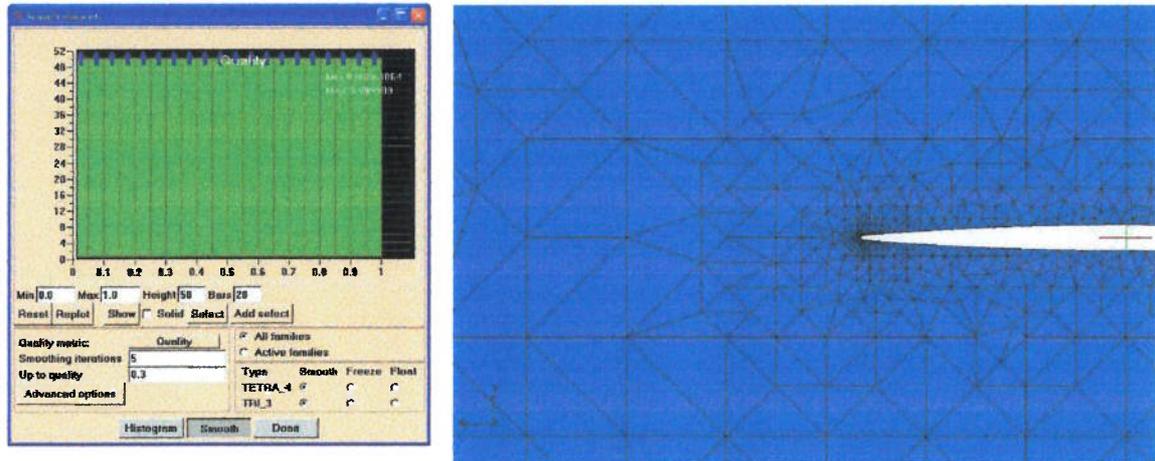


Figura 10.11: Histograma e malha sem tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.

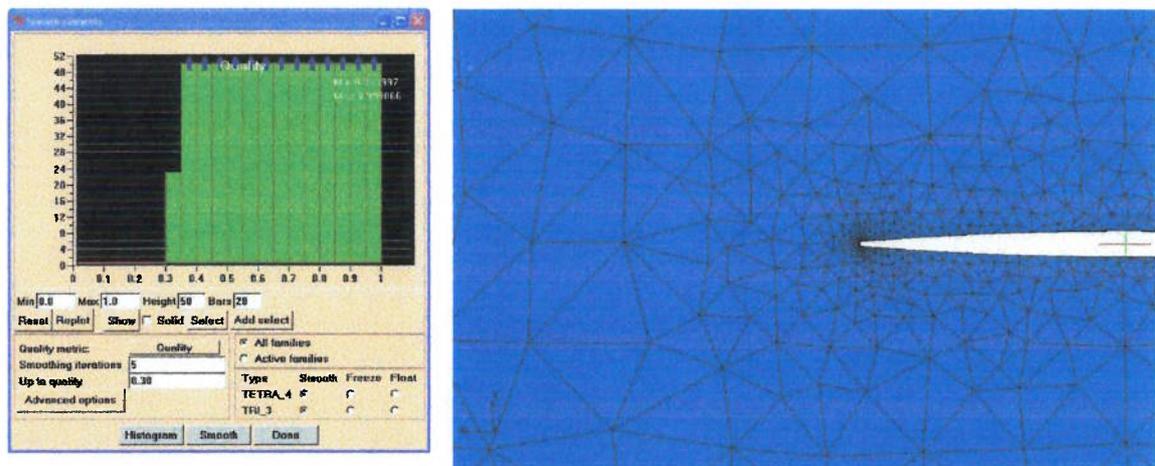


Figura 10.12: Histograma e malha com tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.

No lado esquerdo da malha encontra-se o histograma dos elementos; na abscissa encontra-se a qualidade e nas ordenadas o número de elementos. É possível verificar a variação na forma dos triângulos que, após o tratamento “smooth”, estão muito mais equiláteros; além também de observarmos que o histograma está deslocado para a direita (abscissa) o que indica um aumento da qualidade da malha.

O compartimento do UAP possui um volume aproximado de  $1,11 \text{ m}^3$  e a malha gerada tem perto de 1.500.000 elementos. Foram utilizadas 5 iterações “smooth” e o pior e melhor elemento possuem respectivamente 0.31 e 0.98 de qualidade . O histograma contendo a qualidade da malha do compartimento do UAP é mostrado na figura 10.13.

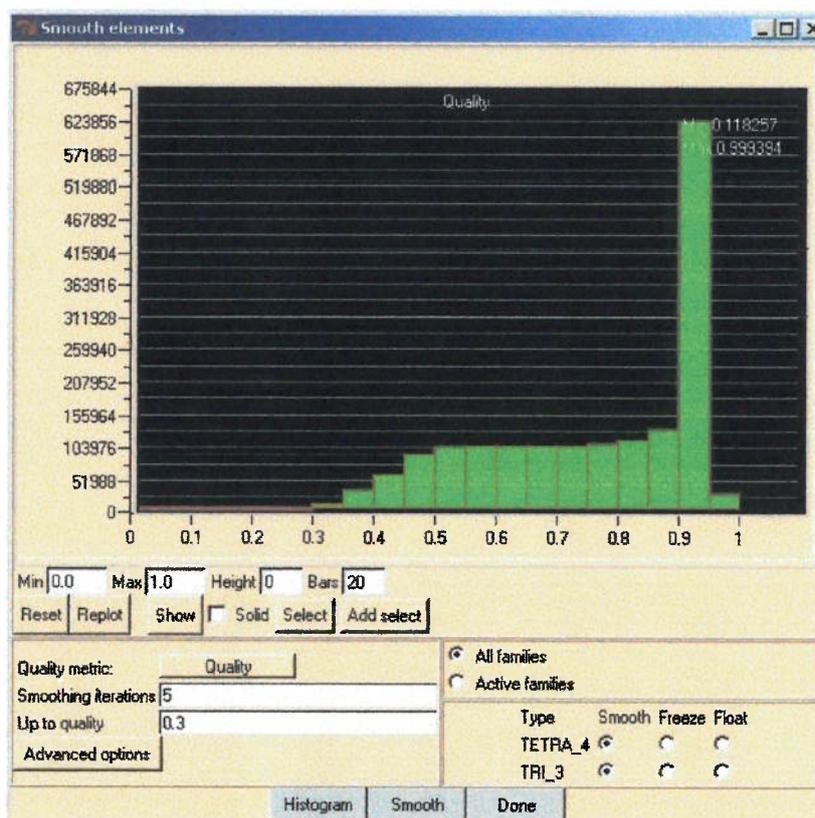


Figura 10.13: Histograma de qualidade da malha do compartimento do UAP

A máquina originalmente possui muitos detalhes e, portanto ela foi simplificada de modo a se manter os principais componentes, como mostrado nas figuras 10.7 e 10.8.

Não é possível colocar somente a face final do tubo de descarga do Halon-1301 e identificá-lo como entrada de massa nas condições de contorno, pois o Fluent<sup>®</sup> não entende que o fluxo de massa já está na condição da garganta, i.e.  $Mach = 1$ , neste caso são calculados números de Mach fisicamente não possíveis. A malha volumétrica foi refeita no Tgrid<sup>®</sup> com o objetivo de inserir um pedaço de tubo na superfície de entrada do fluxo de

massa de Halon-1301 para que o próprio Fluent<sup>®</sup> pudesse chocar o escoamento; além do mais a malha foi adaptada durante o cálculo conforme as necessidades.

### 10.3. Método dos Volumes Finitos (MVF)

O método dos volumes finitos (MVF) foi utilizado para o cálculo do escoamento do Halon-1301 do Teste-175 e também para o cálculo da convecção do Halon-1301 no compartimento da UAP. Este método foi escolhido por estar disponível comercialmente no mercado através do software Fluent<sup>®</sup>; além do mais este software é utilizado normalmente por grandes empresas e universidades do país, o que aumenta a sua confiabilidade.

O método dos volumes finitos utiliza as equações de conservação na forma integral como ponto de partida. O domínio é subdividido em um número finito de volumes de controle (VCs) e as equações de conservação são aplicadas a cada VC. Conforme Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1998), no centróide de cada VC localiza-se um nó computacional onde algumas variáveis são calculadas e posteriormente interpoladas para as superfícies de cada VC; outras variáveis são calculadas diretamente nas faces.

O método dos volumes finitos, conforme Ferziger e Peric (1996), pode acomodar qualquer tipo de malha, portanto pode ser utilizado em geometrias complexas.

#### 10.3.1. Equação de transporte

Conforme Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1998), para uma variável  $\phi$  qualquer é possível escrever todas as equações, incluindo equações para escalares como a temperatura ou concentrações de espécies, da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (10.2)$$

Em outras palavras:

$$\begin{array}{ccccccc} & & & & \text{Taxa de} & & \\ & & & & \text{aumento de } \phi & & \text{Taxa de} \\ \text{Taxa de} & & & & \text{aumento de } \phi & & \text{aumento de } \phi \\ \text{aumento de } \phi & + & \text{Fluxo de } \phi \text{ para} & = & \text{devido à} & + & \text{devido às fontes} \\ \text{dentro do VC} & & \text{fora do VC} & & \text{difusão} & & \end{array}$$

A equação (10.2) é chamada de Equação de Transporte para a propriedade  $\phi$ . O termo  $\Gamma$  representa a difusividade e o termo  $S_\phi$  a fonte ou sorvedouro para o escalar  $\phi$ .

Os próximos passos para a formulação do MVF são: a integração da equação (10.2) para um VC, a aplicação do teorema de Gauss e a sua discretização. Não sendo escopo deste trabalho, a descrição detalhada do método dos volumes finitos pode ser encontrada no livro dos autores Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1998).

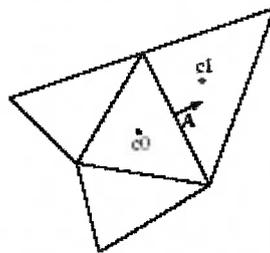


Figura 10.14: Modelo de célula centrada, Fluent® User's Guide (2003)

### 10.3.2. O MVF para o estudo de caso

Foi utilizado um software baseado no Método dos Volumes Finitos, disponível comercialmente no mercado, para a análise da convecção do Halon-1301 no compartimento da UAP e da descarga de Halon-1301 da garrafa.

A tela inicial do Fluent® é mostrada na figura 10.17 e a configuração é feita pelos menus, geralmente da esquerda para a direita. O principal menu é o “DEFINE”, que como o próprio nome diz, é onde se define as condições de cálculo e contorno.

### 10.3.2.1. Método de solução

Há dois tipos de solução adotadas no Fluent®: “SEGREGATED” e “COUPLED”; elas se diferem pelo modo de resolução das equações governantes, ou seja, da conservação da massa, quantidade de movimento e energia.

O primeiro modelo resolve as equações de forma separada enquanto que o segundo as resolve simultaneamente, conforme indicado no manual do usuário do Fluent®:

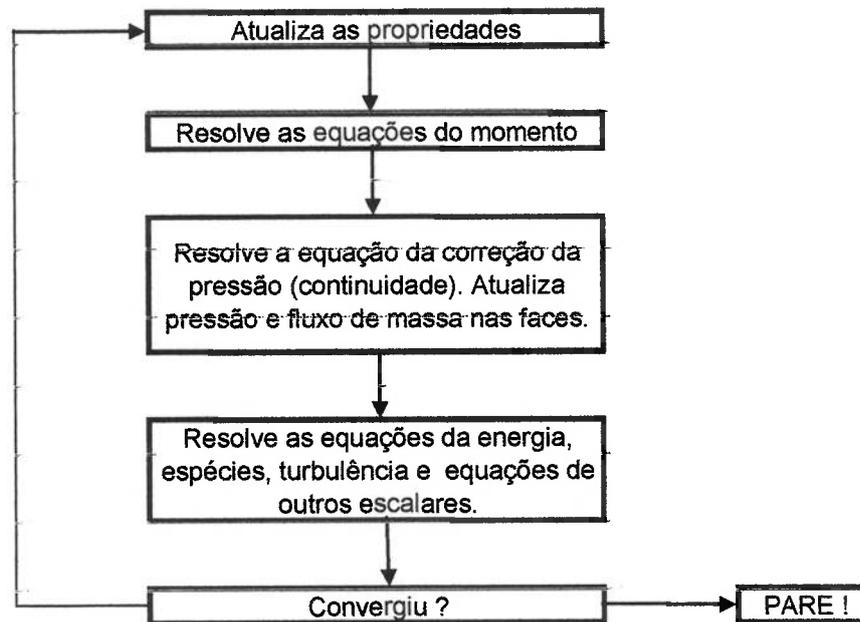


Figura 10.15: Método de resolução SEGREGATED, Fluent® User's Guide (2003)

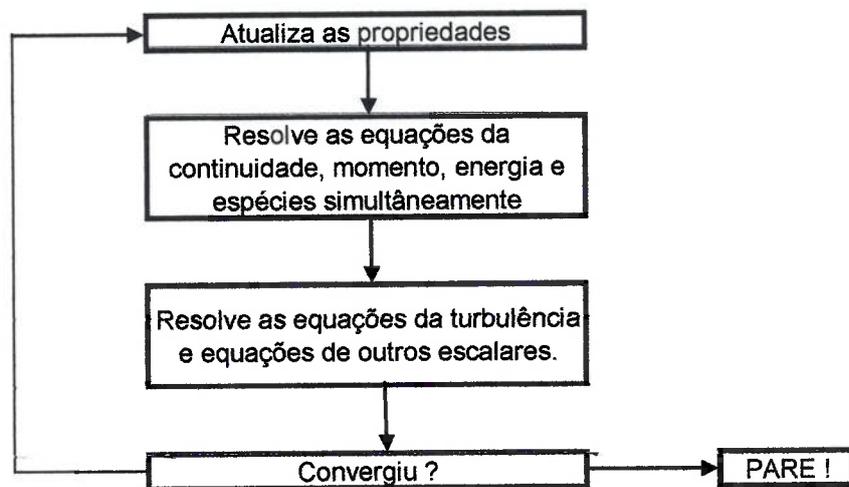


Figura 10.16: Método de resolução COUPLED, Fluent® User's Guide (2003)

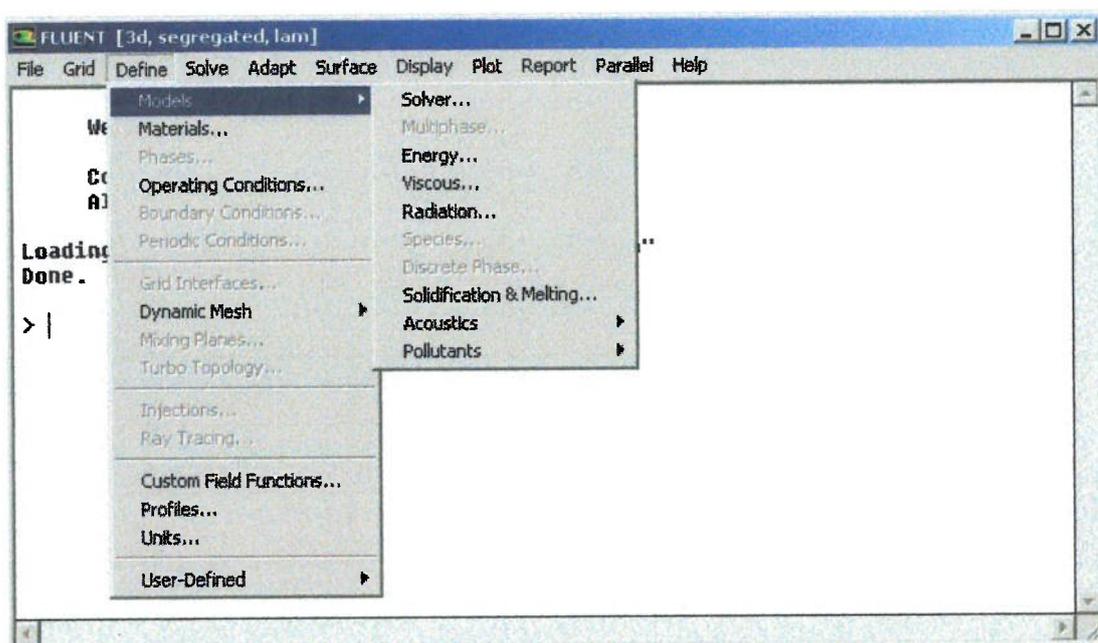


Figura 10.17: Menu DEFINE, Fluent®

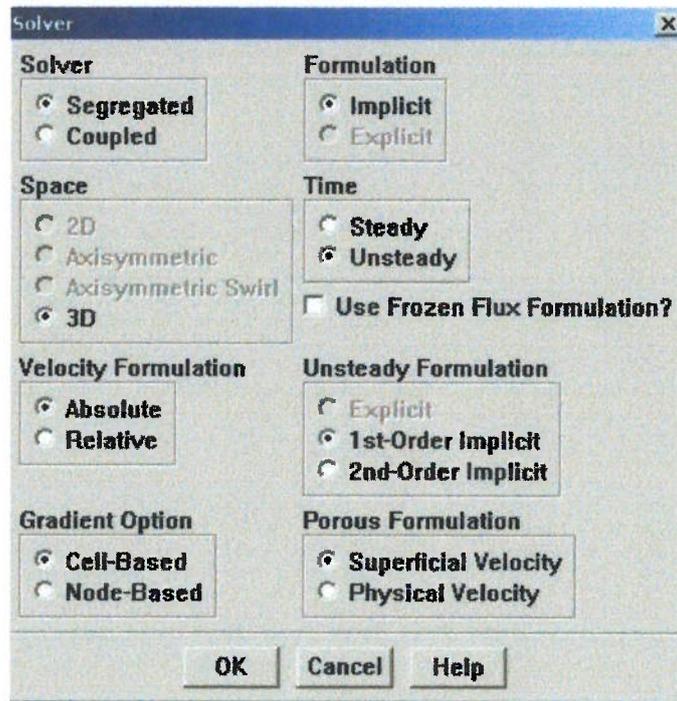


Figura 10.18: Menu SOLVER, Fluent®

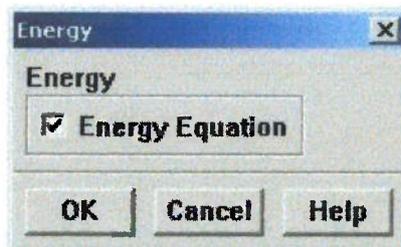


Figura 10.19: Menu ENERGY, Fluent®

O menu da figura 10.19 habilita ou desabilita a resolução da equação da energia; no caso, para escoamentos compressíveis, a sua resolução deve ser ativada.

As propriedades do Halon-1301 foram obtidas conforme o Apêndices B, D e E, e inseridas dentro do menu MATERIALS.

### 10.3.2.2. Modelo de turbulência

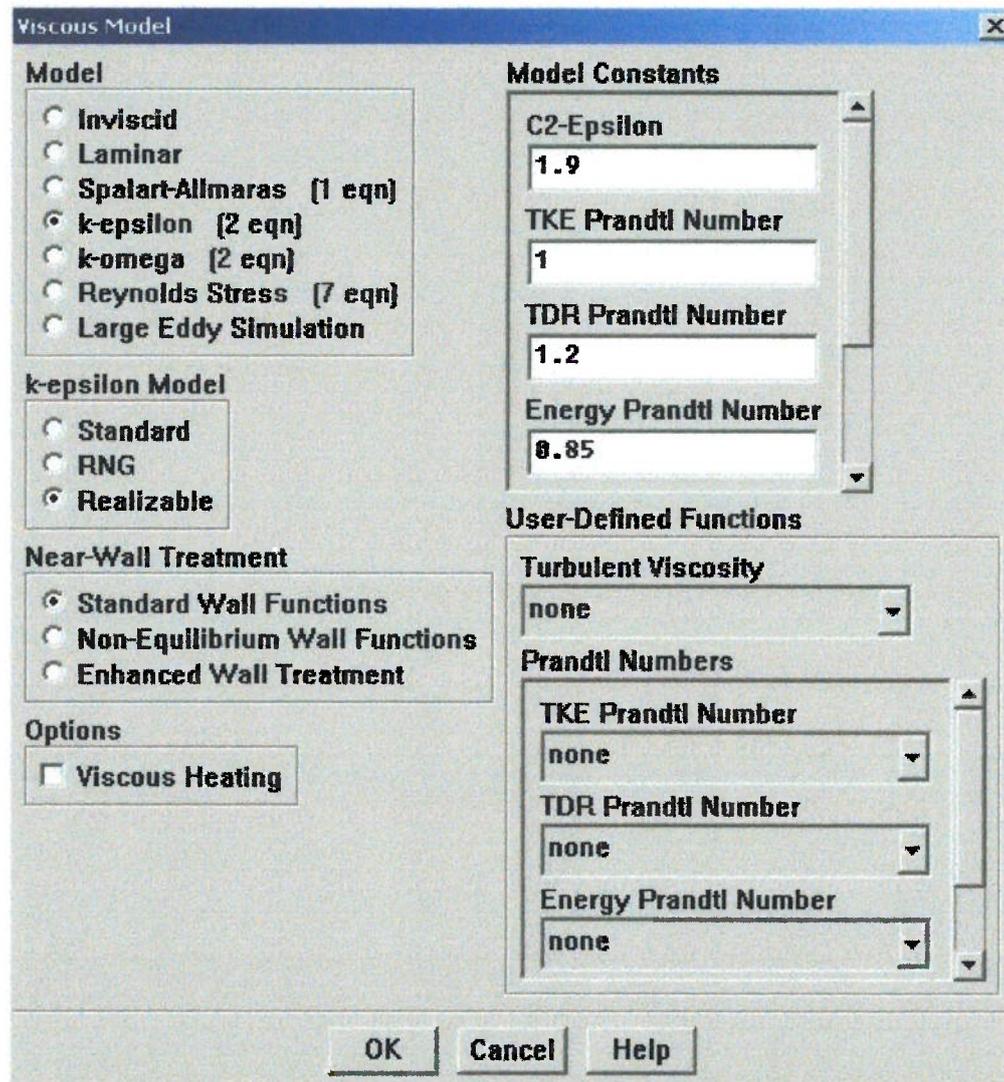


Figura 10.20: Menu VISCOUS, Fluent®

O modelo de turbulência adotado foi o K-epsilon; os outros parâmetros mostrados na figura 10.20 foram mantidos e são padrões do Fluent®.

Este modelo baseia-se na taxa de dissipação turbulenta  $\kappa$  e na energia cinética turbulenta  $\epsilon$  para o cálculo da viscosidade turbulenta  $\mu_t$ , conforme a equação (10.3):

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (10.3)$$

Aonde  $C_\mu$  é uma constante e vale 0,09.

A intensidade turbulenta  $I$ , que está relacionada às flutuações de velocidade, pode ser estimada através da equação (10.3), conforme Versteeg e Malalasekera (1998), a qual foi derivada empiricamente de fluxos em tubulações:

$$I = 0,16 \cdot (\text{Re})^{-1/8} \quad (10.4)$$

O comprimento característico de turbulência  $l$ , conforme Versteeg e Malalasekera (1998), é uma quantidade física relacionada aos maiores vórtices que contêm a energia dos escoamentos turbulentos.

Em escoamentos totalmente desenvolvidos em tubos  $l$  é limitado pelas dimensões do tubo  $L$ , no caso o diâmetro hidráulico  $D_H$ , conforme a equação (10.5) extraído do Versteeg e Malalasekera (1998):

$$l = 0,07 \cdot D_H \quad (10.5)$$

É possível estimar a energia cinética turbulenta  $\kappa$  e a taxa de dissipação turbulenta  $\varepsilon$  através das equações (10.6) e (10.7) respectivamente:

$$\kappa = \frac{3}{2} \cdot (V \cdot I)^2 \quad (10.6)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \cdot \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (10.7)$$

Desta maneira, as equações de transporte do modelo  $\kappa\text{-}\epsilon$  podem ser resolvidas para cada condição de contorno, a saber: entrada de ar e Halon-1301 e saída.

### 10.3.2.3. Acoplamento pressão-velocidade

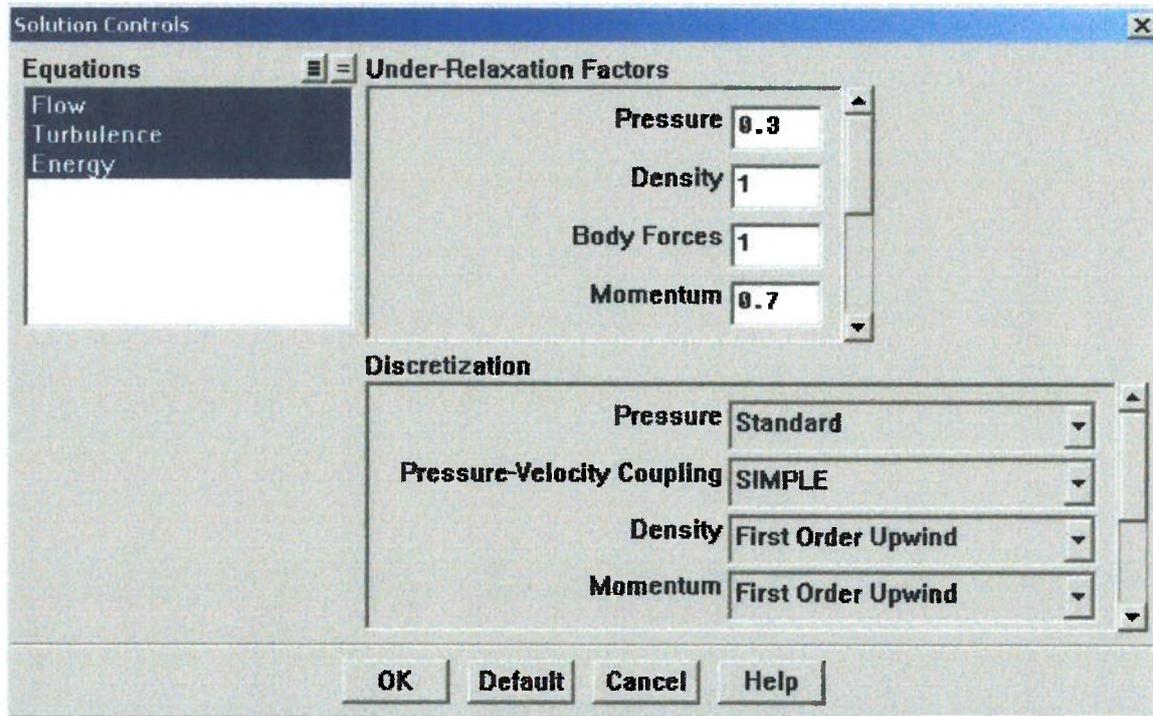


Figura 10.21: Menu SOLUTION CONTROL, Fluent®

A equação da quantidade de movimento é resolvida através de um valor de pressão estimado e, portanto o fluxo de massa obtido não satisfaz a equação da continuidade; o fluxo de massa é então corrigido de modo a satisfazer a equação da continuidade e, por fim é realizado um novo cálculo para a pressão; este processo é então realizado continuamente até que os valores convirjam.

Existem vários tipos de algoritmos para o acoplamento pressão-velocidade, a saber: SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC e PISO. Não sendo escopo deste trabalho, a descrição detalhada dos algoritmos acima citados pode ser encontrada no livro dos autores Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1998).

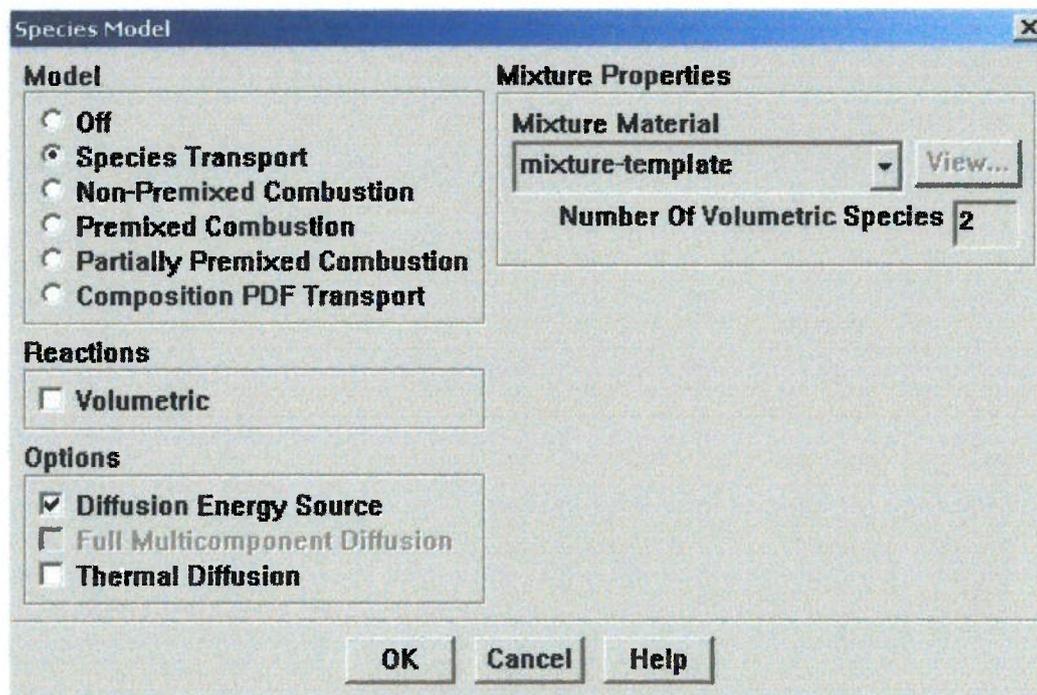


Figura 10.22: Menu SPECIES, Fluent®

No menu SPECIES é possível inserir uma nova espécie, isto é um novo elemento químico, de forma a ser resolvido pelas equações de transporte.

### 10.3.3. Configurações

MODELO	TESTE 175	UAP
SOLUÇÃO	SEGREGADA	SEGREGADA
EQ. ENERGIA	HABILITADA	HABILITADA
TURBULÊNCIA	K-ε	K-ε
ACOPLAMENTO	SIMPLE	SIMPLE (Ar)
PRESSÃO-VELOCIDADE		PISO (Halon-1301)
ESPÉCIE	NÃO	SIM
TEMPO	NÃO-PERMANENTE	NÃO-PERMANENTE

Tabela 10.1: Configurações de cálculo para o Fluent®

A solução acoplada é recomendada no caso de haver uma forte dependência entre a densidade, momento, energia e espécies que é o caso de escoamentos compressíveis e consequentemente do jato de Halon-1301; todavia, uma vez que a maior parte do compartimento da UAP possui escoamento de baixa velocidade, optou-se pela utilização do método segregado, tipicamente mais robusto para solução de problemas com diferentes escalas de velocidade.

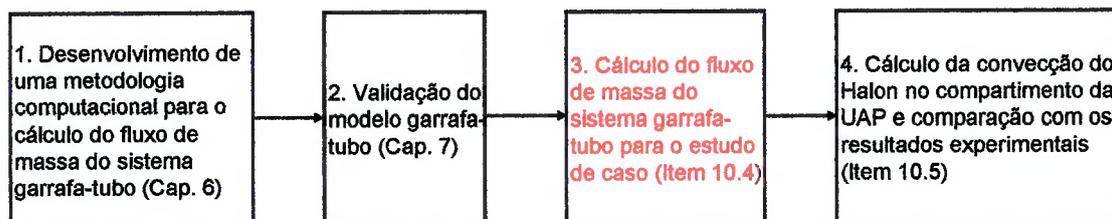
Como o escoamento do jato de Halon-1301 é altamente compressível, a equação da energia foi habilitada e a densidade modelada através da equação de gaz pefeito.

O modelo de turbulência k-epsilon realizável foi o escolhido, pois conforme Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1998), ele é o mais adaptado para escoamentos de jatos.

O acoplamento pressão velocidade é utilizado para corrigir a pressão através da solução das equações do momento e da energia. O método SIMPLE é o padrão e também é o mais robusto, todavia, conforme o Fluent® User Guide (2003), no caso de escoamentos transientes e com malhas com distorções de vizinhança acima da média é recomendado o método PISO.

#### 10.4. Resultados do fluxo de Halon garrafa-tubo

Apresenta-se a seguir os resultados do fluxo de massa do sistema garrafa-tubo para o estudo de caso.



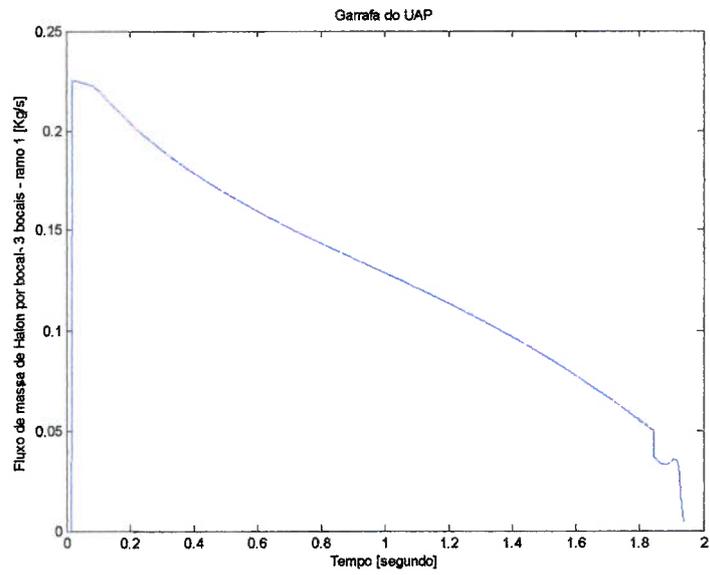


Figura 10.23: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 1

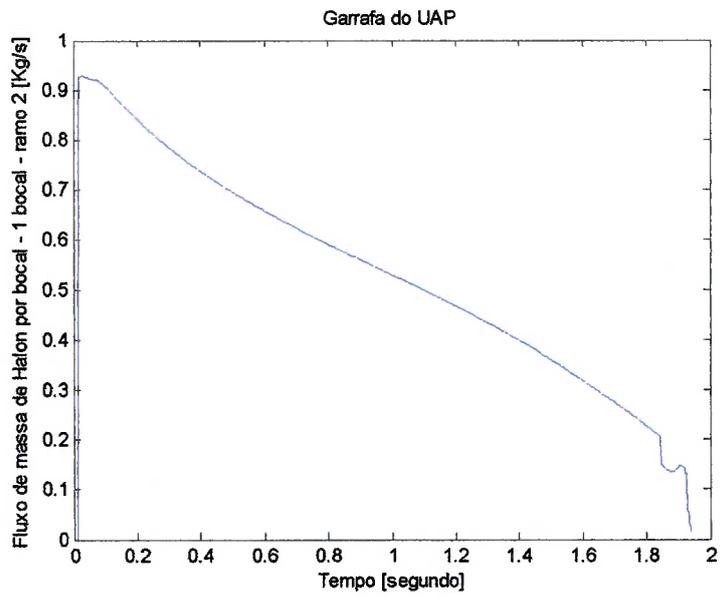


Figura 10.24: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 2

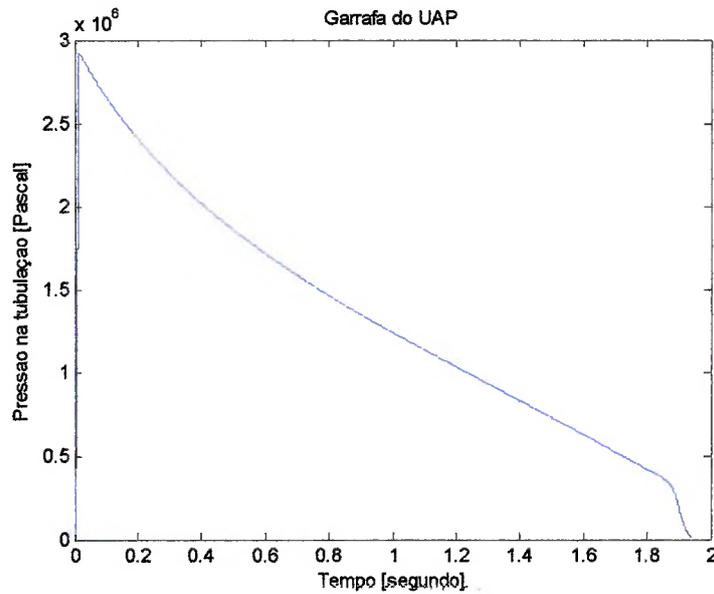
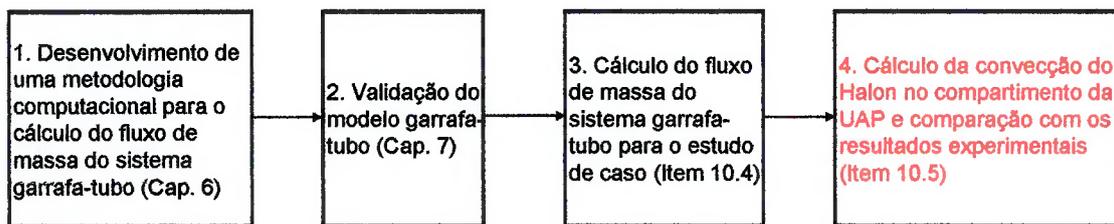


Figura 10.25: Pressão estática na tubulação equivalente

### 10.5. Resultados do compartimento da UAP

O estudo da convecção do Halon-1301 foi dividido em duas partes: a primeira (item 10.5.1) resolve o fluxo de ar, em regime permanente, dentro do compartimento da UAP; a segunda (item 10.5.2) impõe, no fluxo de ar resolvido, a descarga do Halon-1301 nos bocais extintores e resolve a convecção deste gás no compartimento em regime não-permanente.



### 10.5.1. Resultados do fluxo de ar

A entrada e a saída de ar foram configuradas, no Fluent<sup>®</sup>, conforme a tabela 10.2. As velocidades de entrada e saída de ar estão descritas nas figuras 10.26 e 10.27 respectivamente e o perfil de velocidade, nos planos  $y = 0$  e  $x = 27,55$ , nas figuras 10.28 e 10.29 respectivamente.

GRANDEZA	ENTRADA	SAIDA
Vazão em massa	0.72 kg/s	-
Pressão de saída	-	2659 Pa
Temperatura Total	286 K	286 K
Vetor velocidade	Normal	Normal
Intensidade turbulenta	6.6 %	6.6 %
Comprimento turbulento	0.01	0.02
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE	

Tabela 10.2: Configurações para o cálculo do ar

O vetor velocidade normal significa que a velocidade é normal à condição de contorno, ou seja à face.

O relatório de resíduos pode ser encontrado na figura 10.30 o que evidencia, além do relatório de resíduos, a convergência do cálculo em regime permanente; nesta condição a vazão em massa calculada na saída é de 0.72 kg/s o que está de acordo com os dados experimentais de vôo.

A intensidade turbulenta é calculada a partir dos valores de velocidade de saída da tubulação fornecidos pelo método descrito no Capítulo 6 e pela equação (10.4), o comprimento característico de turbulência é calculado conforme a Equação (10.5).

O acoplamento pressão-velocidade adotado foi o SIMPLE, pois conforme o Fluent® User Guide (2003), é o mais robusto e funcionou adequadamente.

Este cálculo leva geralmente 12 horas para convergir.

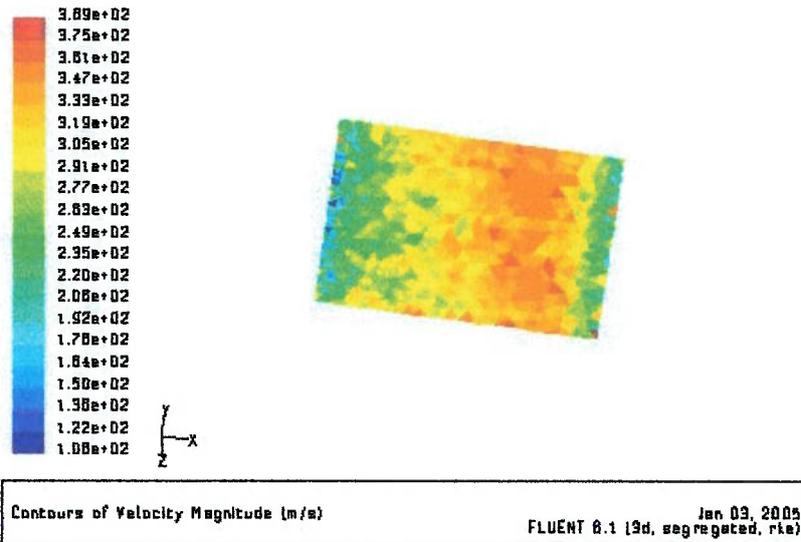


Figura 10.26: Distribuição da velocidade na entrada de ar da UAP

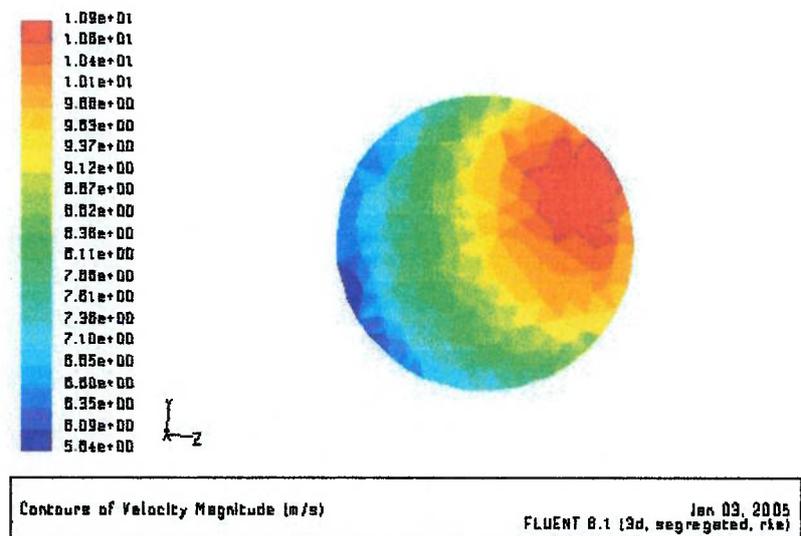


Figura 10.27: Distribuição da velocidade na saída de ar da UAP

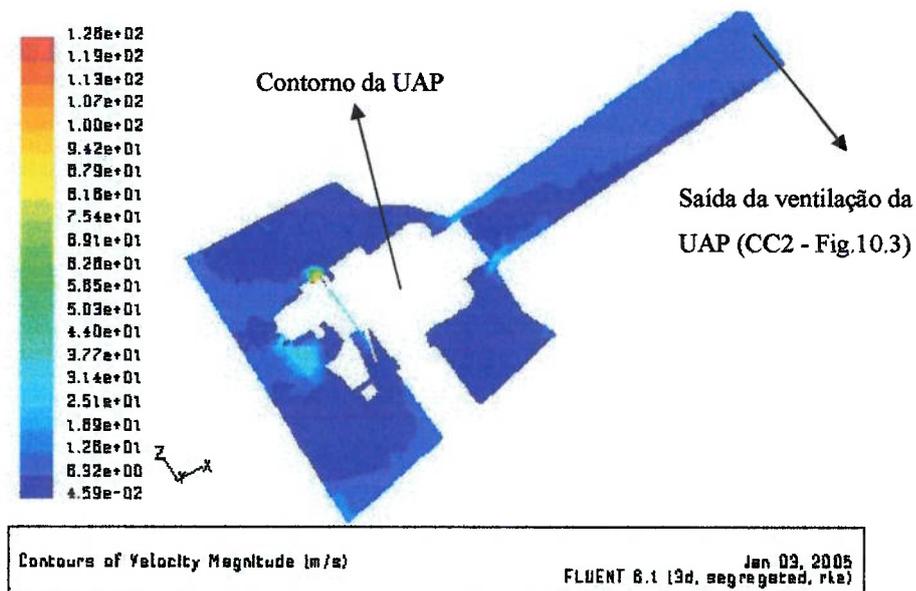


Figura 10.28: Distribuição de velocidades no plano  $y = 0$

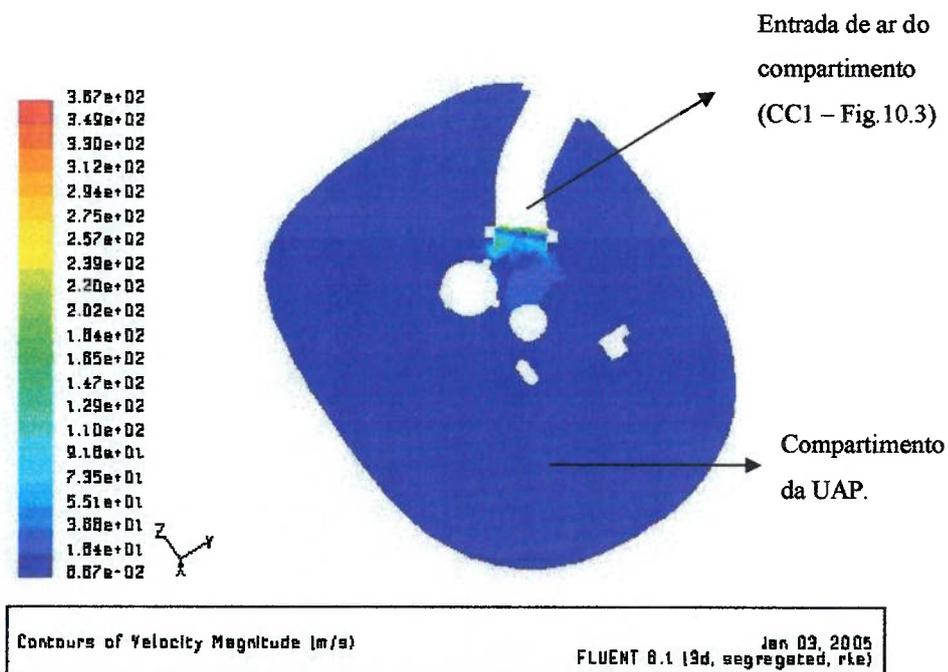


Figura 10.29: Distribuição de velocidades no plano  $x = 27,55$

Nota-se pelas figuras 10.28 e 10.29 que as velocidades do fluxo de ar que ventilam o compartimento da UPA em vô são muito baixas e da ordem de 5 m/s.

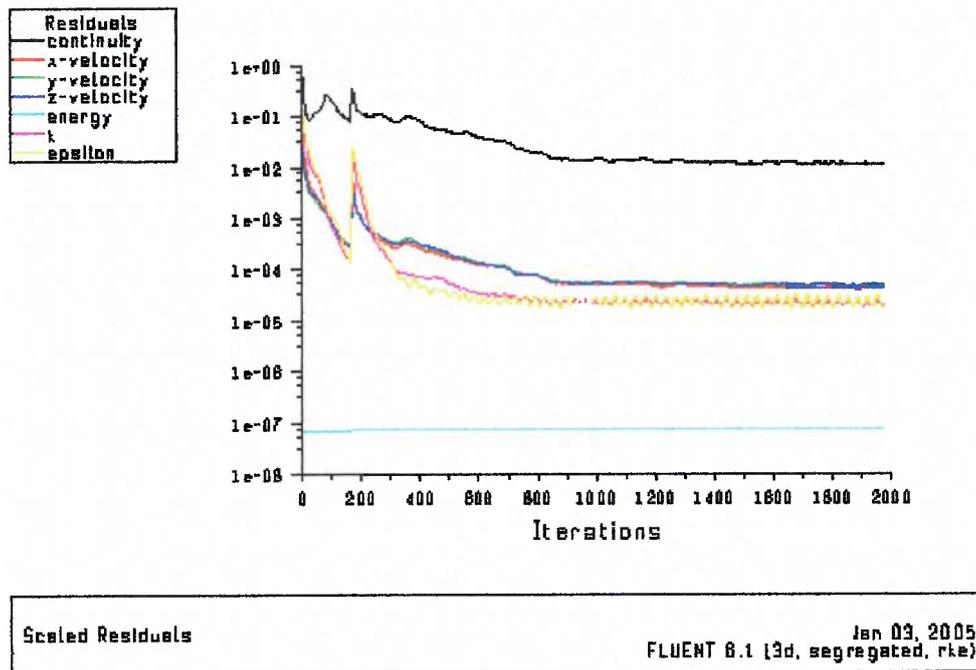


Figura 10.30: Relatório de resíduos do cálculo do ar

### 10.5.2. Resultados da convecção do Halon-1301

Na segunda parte do cálculo, i.e. da convecção transiente do Halon-1301, houveram dificuldades de convergência e alguns parâmetros foram modificados:

- O cálculo do ar foi feito com o acoplamento de pressão-velocidade SIMPLE, todavia este algoritmo não se mostrou eficiente para a descarga do Halon-1301; o algoritmo utilizado foi o PISO, pois apresentou resíduos muito mais baixos devido aos seus dois fatores de correção;
- Após a modificação deste parâmetro iniciou-se um fluxo reverso na saída do compartimento e este fluxo, ao invés de diminuir, aumentava a cada iteração, assim a pressão de saída do compartimento foi modificada de 2659 Pa para zero Pa a fim de facilitar a convergência. Todo o caso foi rodado nesta configuração.

A configuração para o cálculo da convecção do Halon-1301 no compartimento da UAP está descrito na tabela 10.3.

<b>GRANDEZA</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SAIDA</b>	<b>Bocal 1 Ramo 1</b>	<b>Bocal 2 Ramo 2</b>
Vazão em massa	0.72 kg/s	-	Fig. 12.4	Fig. 12.5
Pressão de saída	-	0 Pa	-	-
Temperatura Total	286 K	286 K	268 K	268 K
Pressão estática	-	-	Fig. 12.6	Fig. 12.6
Vetor velocidade	Normal	Normal	Normal	Normal
Intensidade turbulenta	6.6 %	6.6 %	5,0%	5,0%
Comprimento turbulento	$1 \times 10^{-2}$ m	$2 \times 10^{-2}$ m	$1,1 \times 10^{-4}$ m	$6,6 \times 10^{-4}$ m

Tabela 10.3: Configurações para o cálculo da convecção do Halon-1301

A intensidade turbulenta e o comprimento turbulento foram calculados conforme as equações (10.4) e (10.5) respectivamente.

O Fluent<sup>®</sup> resolve o regime transiente levando-se em conta que as condições no instante da iteração são fixas, a partir de então o cálculo é resolvido de forma permanente e posteriormente este resultado é convertido para a condição da próxima iteração conforme o passo no tempo especificado. Cada iteração transiente é resolvida a partir de um número fixo de iterações permanentes, que para o estudo de caso variaram de 20 a 30.

O cálculo foi iniciado com um passo no tempo de  $10^{-6}$  segundos e não foi possível aumentá-lo até  $5,5 \times 10^{-3}$  segundos, que foi o tempo total resolvido até o momento. Cada iteração, com 32 processadores, leva aproximadamente 2 minutos e, portanto o cálculo não pode ser terminado.

Nas figuras a seguir estão mostradas as comparações dos resultados teóricos com os experimentais da convecção do Halon-1301 no compartimento da UAP. Note que o tempo de cálculo teórico alcançado (Figura 10.32) é muito pequeno em relação ao período dos resultados experimentais (Figura 10.31).

A concentração volumétrica do Halon-1301 foi calculada em 2 pontos (A e B), todavia o tempo rodado de cálculo ( $5,5 \times 10^{-3}$  segundos) está ainda abaixo da frequência de amostragem (10 Hz) do experimento e portanto não foi possível realizar a comparação.

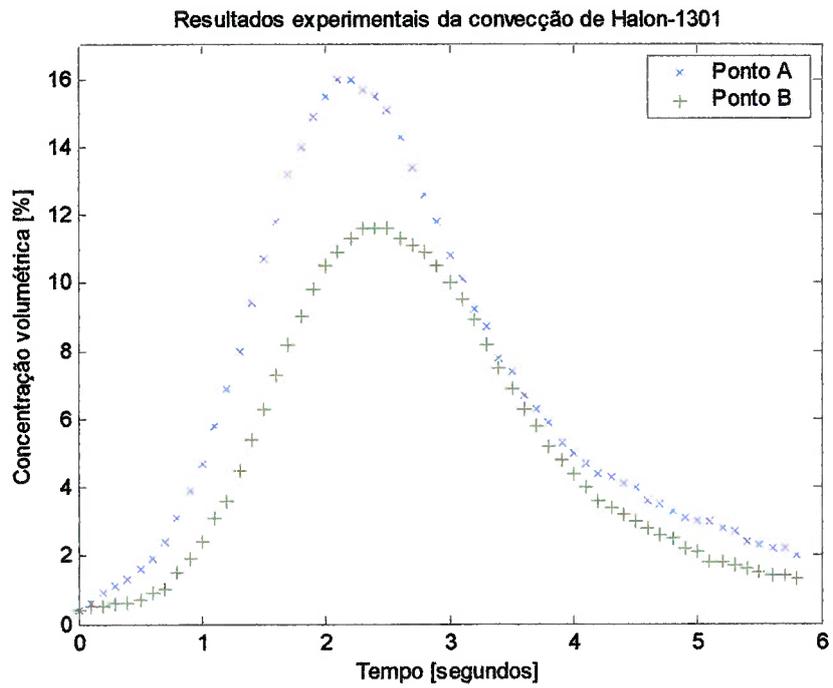


Figura 10.31: Resultados experimentais da convecção do Halon-1301

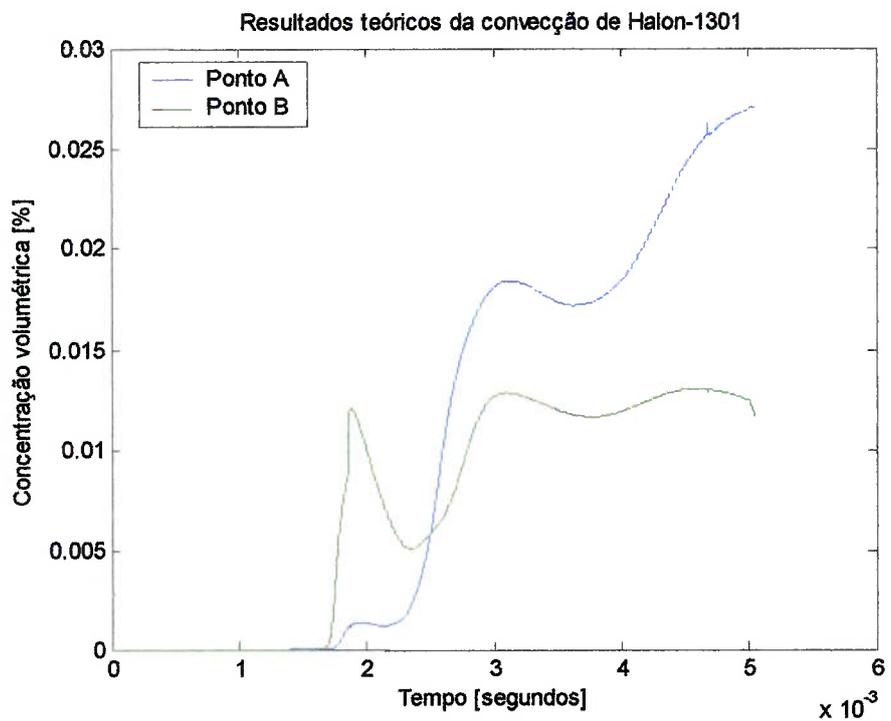


Figura 10.32: Resultados teóricos da convecção do Halon-1301

## 11. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A metodologia, baseada na utilização de ferramentas computacionais, para simular o escoamento do Halon-1301 no sistema garrafa-tubo apresentou resultados aceitáveis;
- Após a comparação dos resultados obtidos com os dados experimentais de Elliot *et al.* (1984) nota-se que a ausência do modelo de vaporização do nitrogênio não afeta de forma substancial o resultado final do fluxo de massa de Halon-1301;
- O escoamento na tubulação é inicialmente supersônico e torna-se posteriormente subsônico, estando em ambas as condições o bocal chocado;
- O número de Mach na saída garrafa-tubo possui variações bruscas de velocidade no início do escoamento, podendo variar de Mach 1 para 0,1 em menos de 1/100 segundos;
- Enquanto o bocal estiver chocado, as pressões da garrafa e da tubulação decrescem praticamente juntas, o que leva a crer que pode haver atomização de Halon-1301 líquido, conforme observado por Cleary *et al.* (1995);
- O número de Mach na região de menor área é igual a 1, seja na descarga da garrafa para a atmosfera ou de um sistema garrafa-tubo;
- Num sistema garrafa-tubo, o número de Mach na interface inicia-se sendo 1 e diminui gradativamente;
- A frente de Halon-1301 caminha a Mach = 1 da interface até o final da tubulação e, ao atingir o final do tubo, permanece nesta condição enquanto as propriedades a montante permitirem;
- O modelo produz bons resultados com um passo no tempo de  $10^{-5}$  s, todavia ainda é possível obter-se resultados satisfatórios com um passo no tempo de  $10^{-4}$  s;
- Os coeficientes de descarga utilizados são adequados e similares aos de outras literaturas;

- A equação de Hugoniot, apesar de descrever as variações das propriedades físicas através das ondas de choque, mostrou-se adequada para o cálculo da densidade de Halon-1301 após a evaporação;
- Os resultados obtidos da convecção do Halon-1301 no compartimento da UAP não são conclusivos devido ao esforço computacional, ainda necessário, conforme resultados apresentados.

Como sugestões para o dimensionamento de sistemas extintores, a partir do trabalho realizado, podem-se citar:

- A maximização do fluxo de Halon-1301 deve ser obtida levando-se em conta o diâmetro da tubulação e o bocal de saída. O estrangulamento da área na saída do tubo diminui o fluxo de massa devido à condição de bocal chocado e a condição ideal coincide com o descarregamento no menor tempo possível;
- O posicionamento da tubulação deve ser feito de tal forma que a saída do jato não atinja nenhum componente, pois o alto número de Mach e pressão poderiam danificá-lo, caso isto não seja possível recomenda-se que, após os disparos da garrafa, seja efetuada inspeção nos componentes da região crítica;
- Os tubos devem estar bem presos devido à grande variação da quantidade de movimento durante a descarga;

Como continuação do presente estudo pode-se citar os seguintes trabalhos:

- Elaborar um algoritmo para a simulação da formação de bolhas de nitrogênio dentro da garrafa a fim de se obter os picos de pressão durante a exaustão;
- Elaborar um algoritmo para a simulação da vaporização do Halon-1301 líquido na garrafa e na tubulação a fim de se evitar a premissa de vaporização instantânea e do uso da equação de Hugoniot;
- Elaborar um algoritmo para a simulação do escoamento do ar, inicialmente dentro da tubulação, para melhorar o resultado da pressão máxima dentro da tubulação;
- Elaborar um algoritmo para prover as relações de gás real para o nitrogênio para o cálculo da temperatura;
- Mudar a condição de contorno CC2 para “velocidade de entrada” com valor negativo a fim de se evitar o fluxo reverso (item 10.3.2);
- A continuação da validação dos resultados teóricos da convecção do Halon-1301 no compartimento da UAP a partir da comparação com os dados experimentais apresentados;
- Continuar os estudos para entender a física do escoamento no compartimento da UAP a fim de melhorar a convergência e aumentar o passo no tempo.

# APÊNDICE A

<b>Teste 102</b>	<b>103</b>
<b>Teste 146</b>	<b>106</b>
<b>Teste 174</b>	<b>109</b>
<b>Teste 175</b>	<b>117</b>
<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>124</b>

## Teste 102

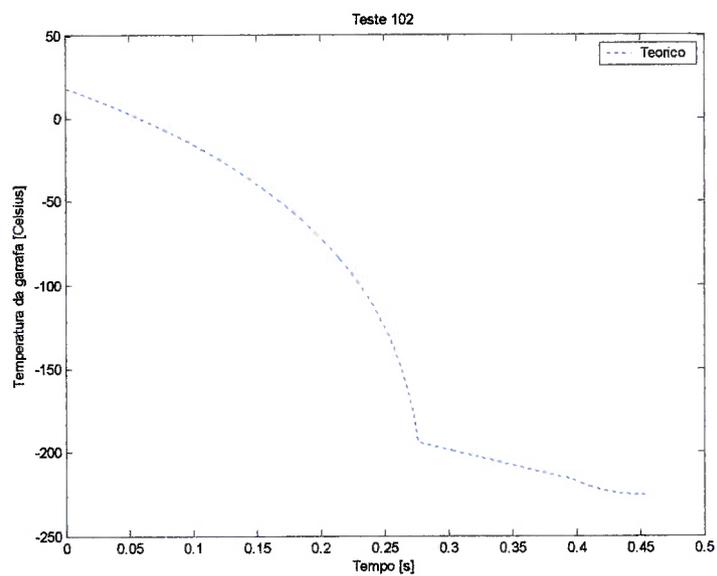


Figura A.1: Resultados teóricos de temperatura do teste 102

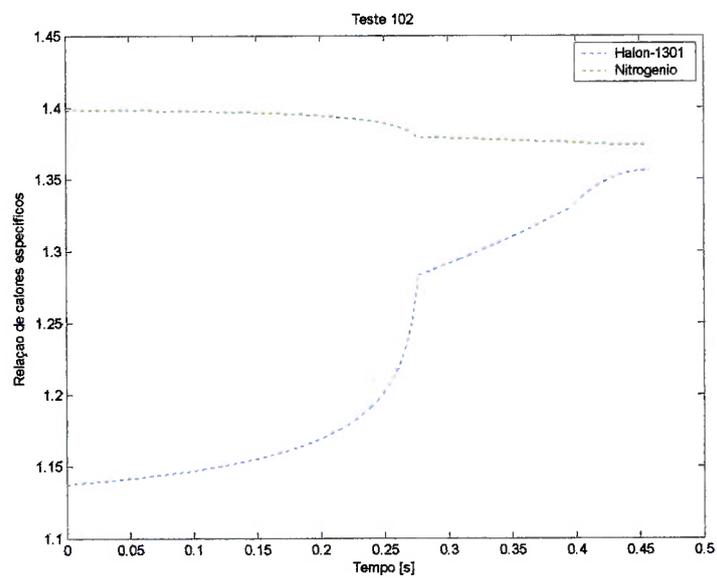


Figura A.2: Relação de calores específicos calculados do teste 102

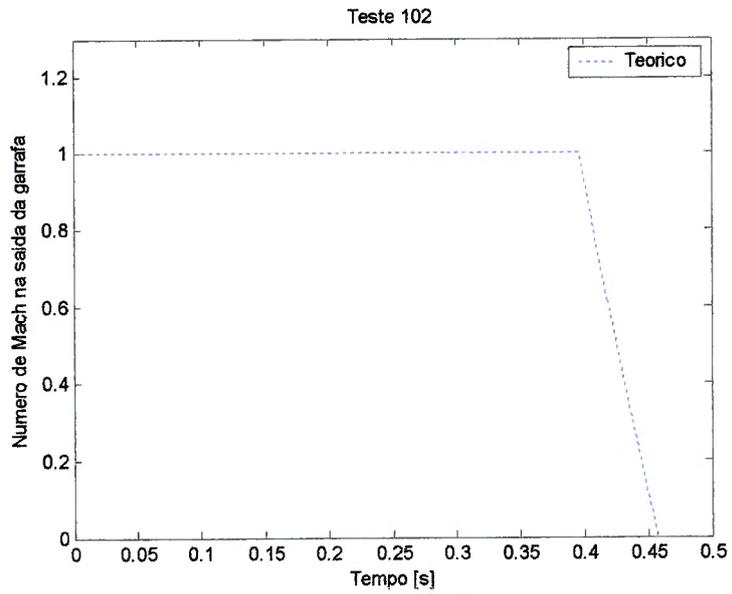


Figura A.3: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 102

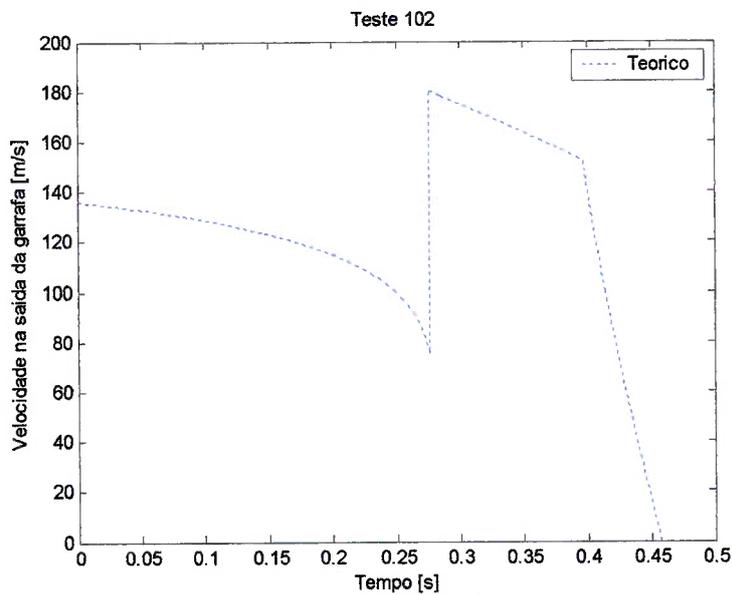


Figura A.4: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 102

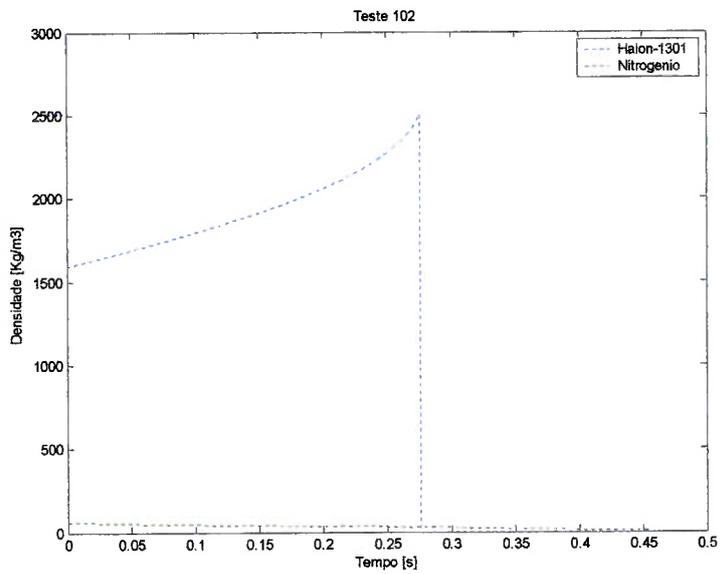


Figura A.5: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 102

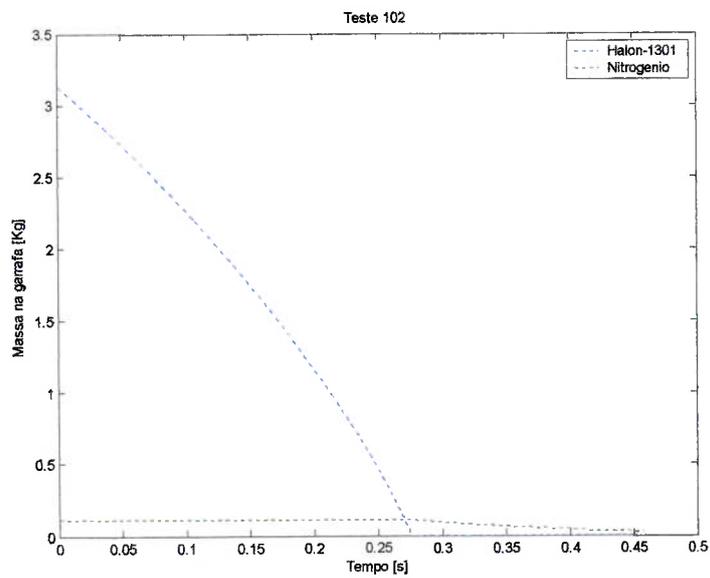


Figura A.6: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 102

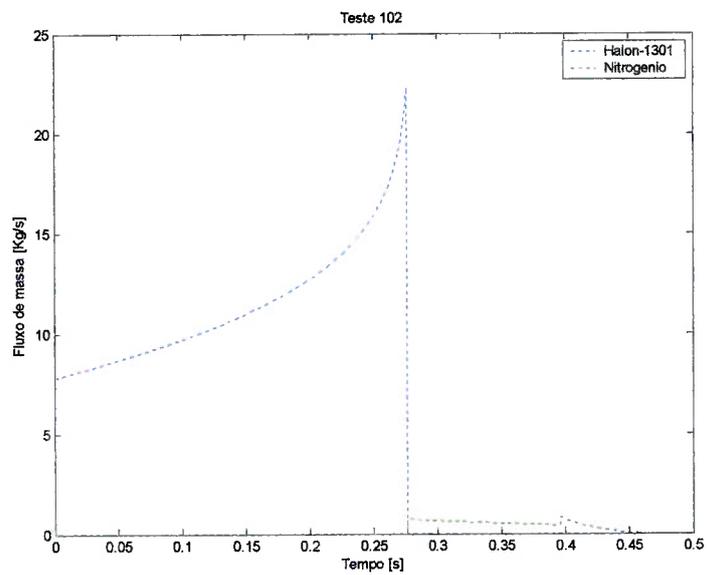


Figura A.7: Fluxo de massa calculado do teste 102

## Teste 146

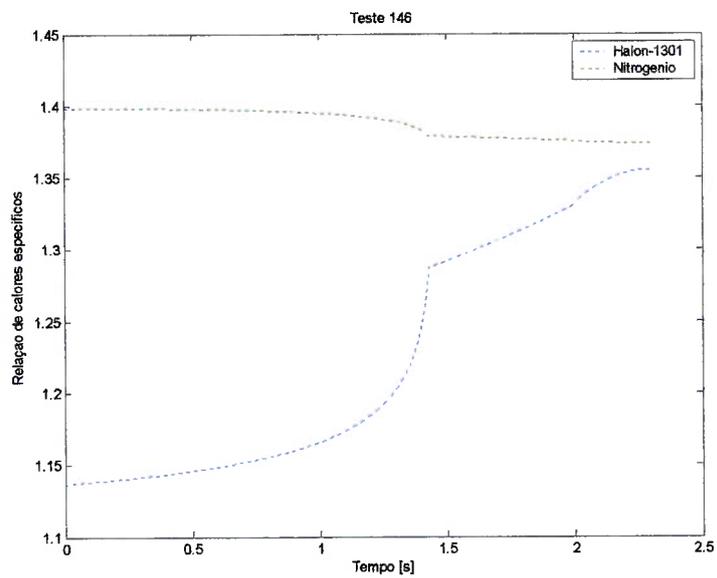


Figura A.8: Relação de calores específicos calculados do teste 146

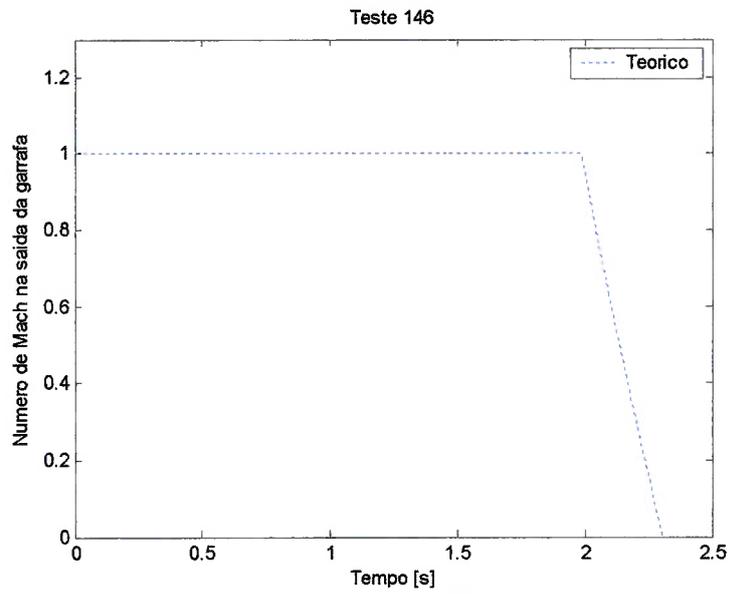


Figura A.9: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 146

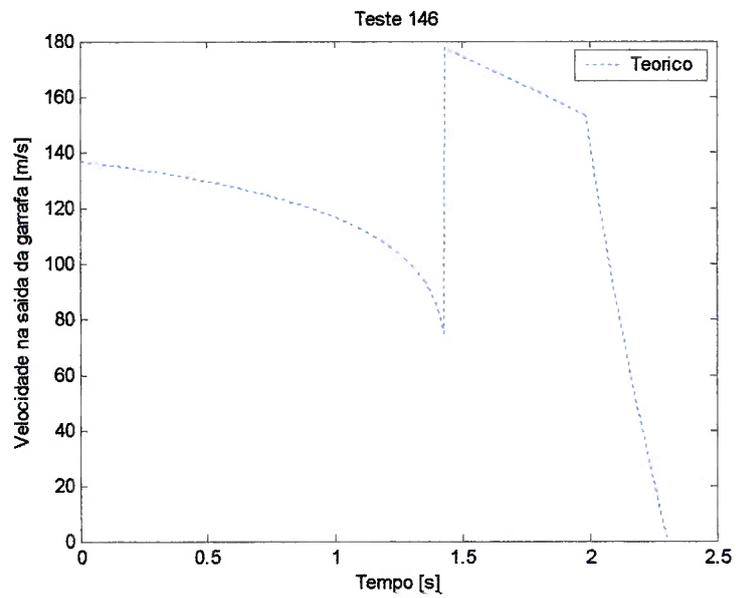


Figura A.10: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 146

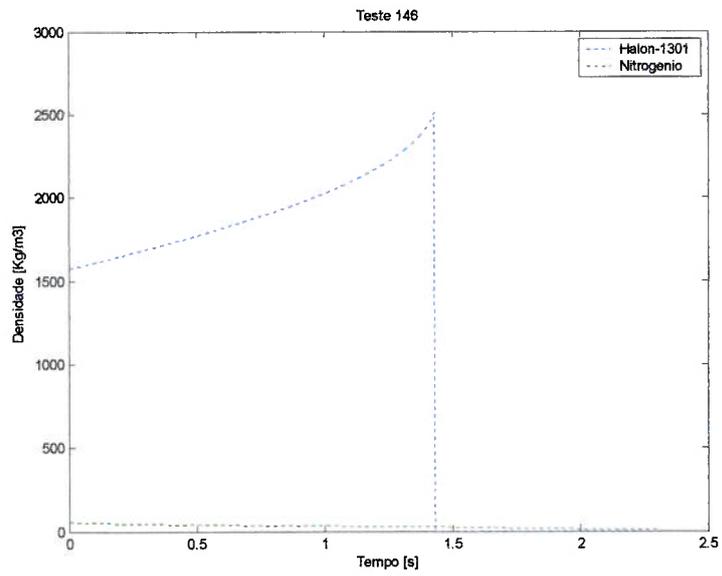


Figura A.11: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 146

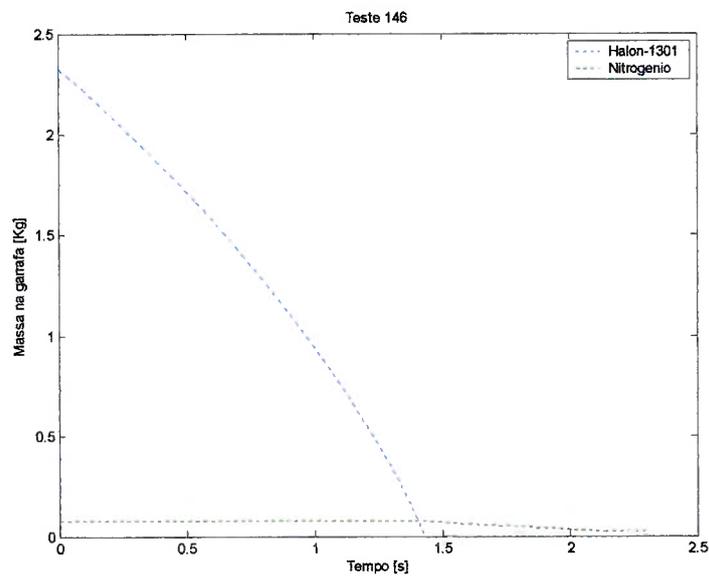


Figura A.12: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 146

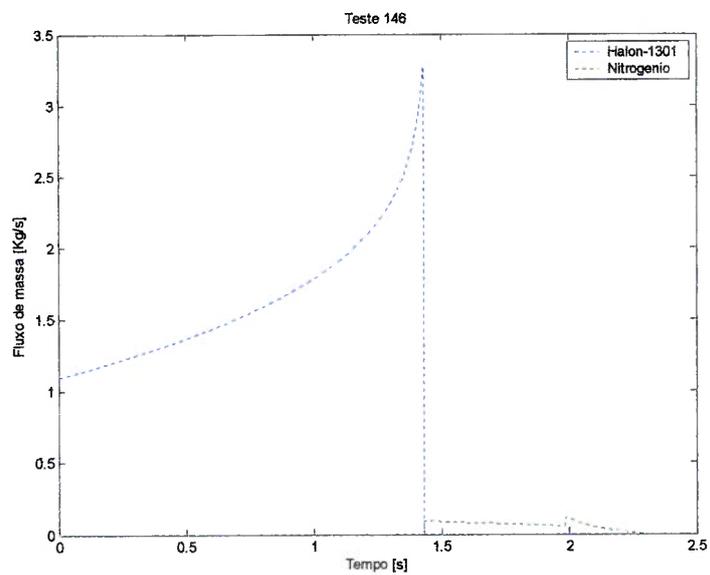


Figura A.13: Fluxo de massa calculado do teste 146

## Teste 174

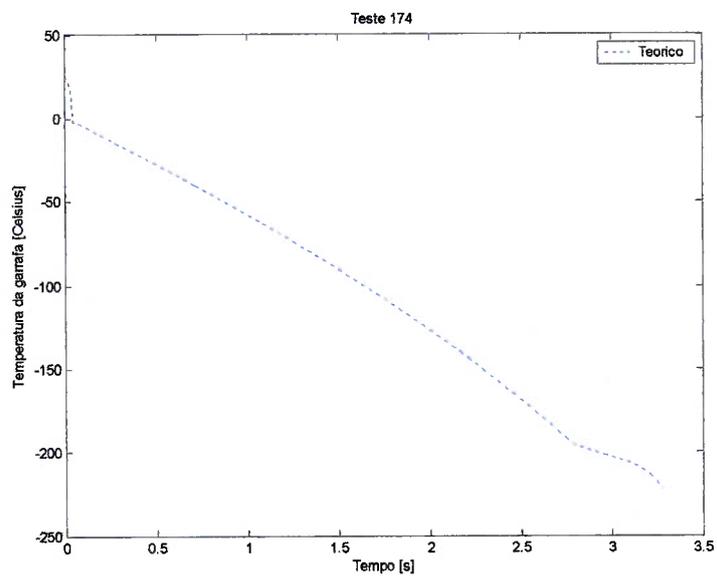


Figura A.14: Temperatura da garrafa calculada do teste 174

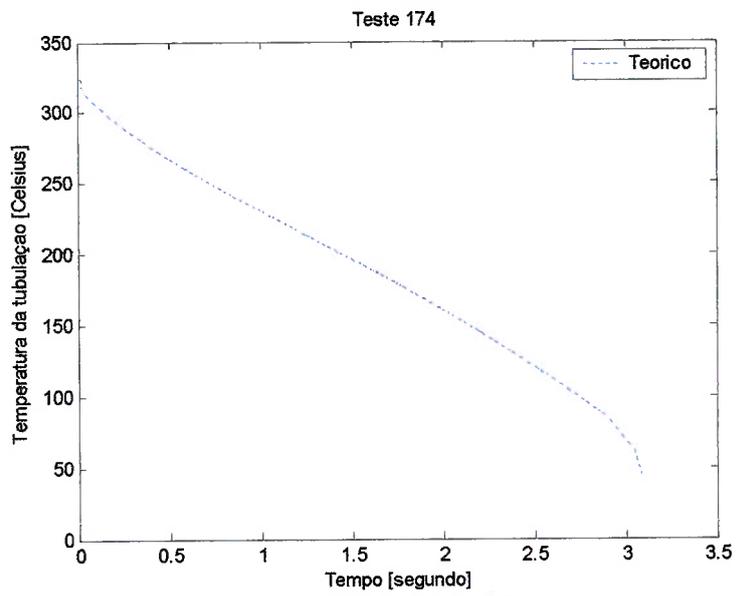


Figura A.15: Temperatura da tubulação calculada do teste 174

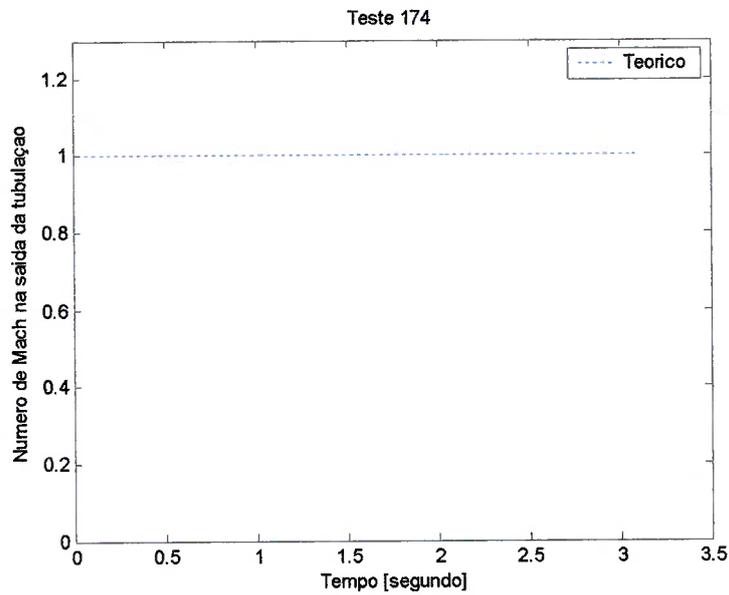


Figura A.16: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 174

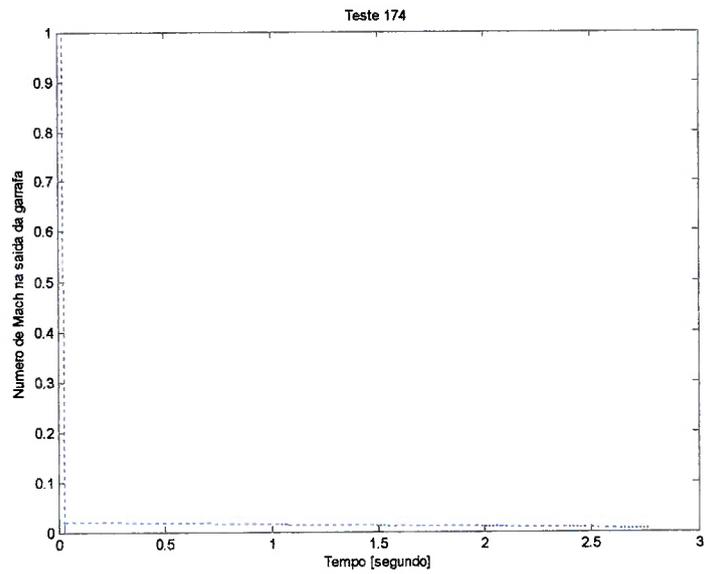


Figura A.17: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 174

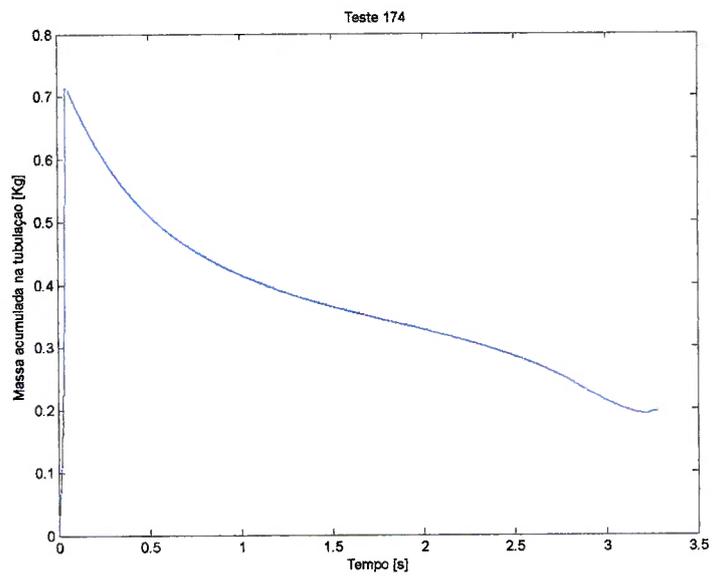


Figura A.18: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 174

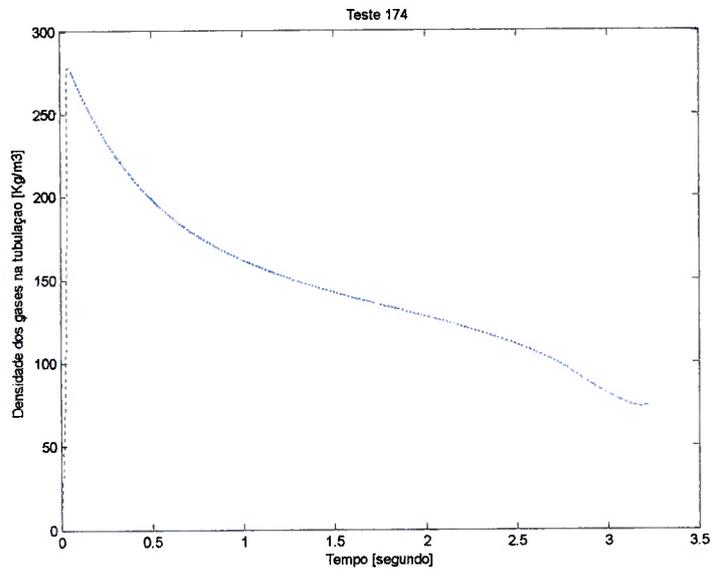


Figura A.19: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 174

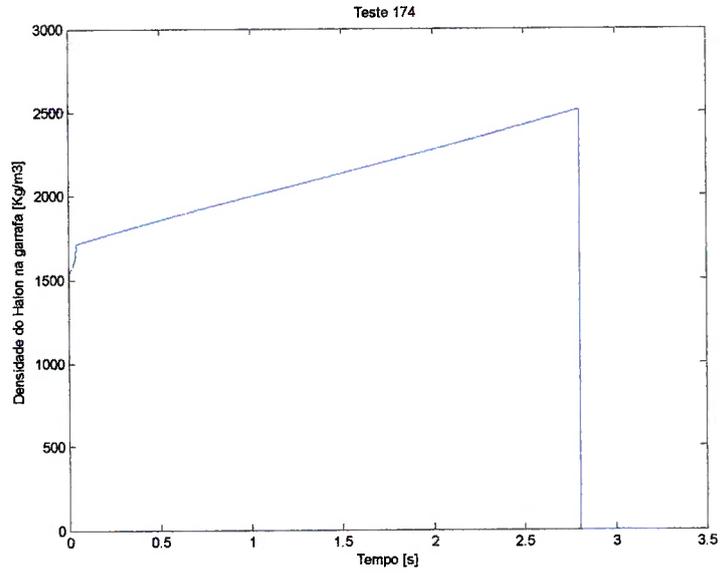


Figura A.20: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 174

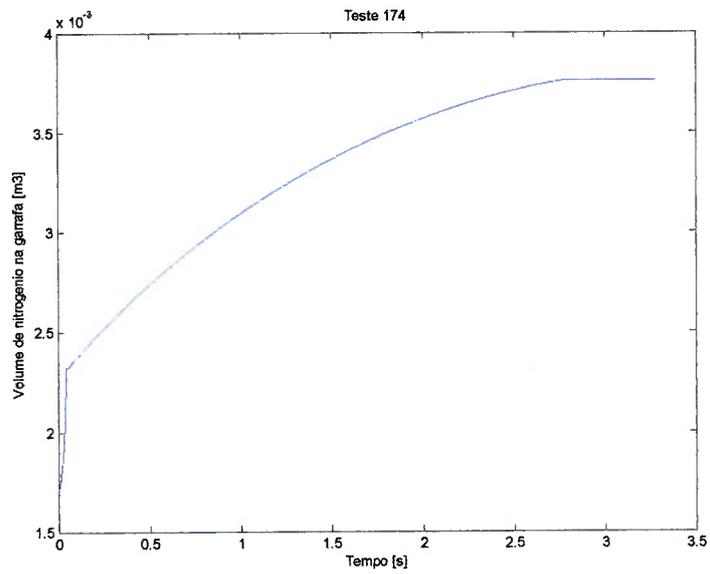


Figura A.21: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 174

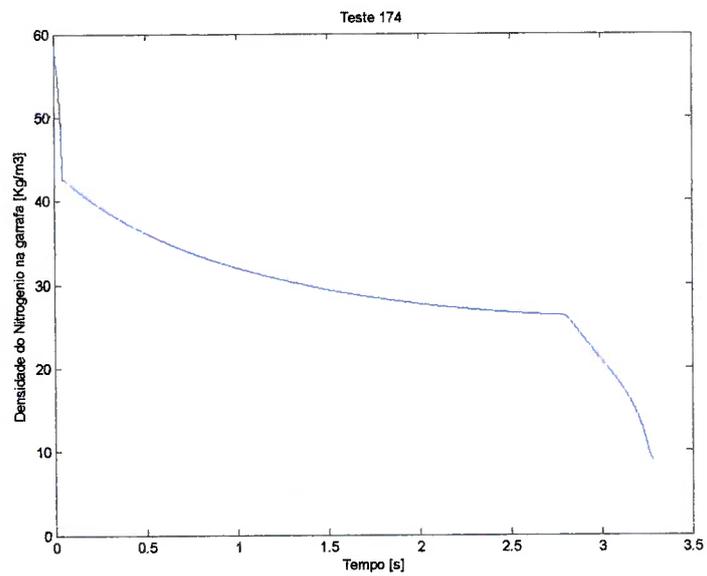


Figura A.22: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 174

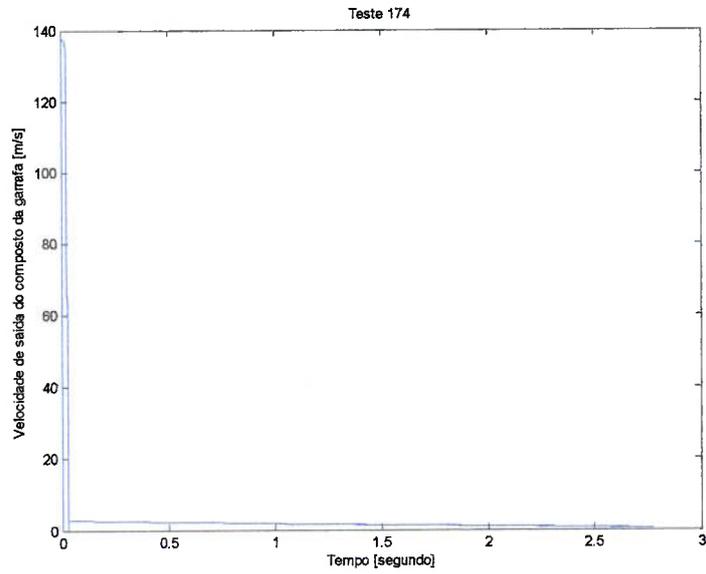


Figura A.23: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 174

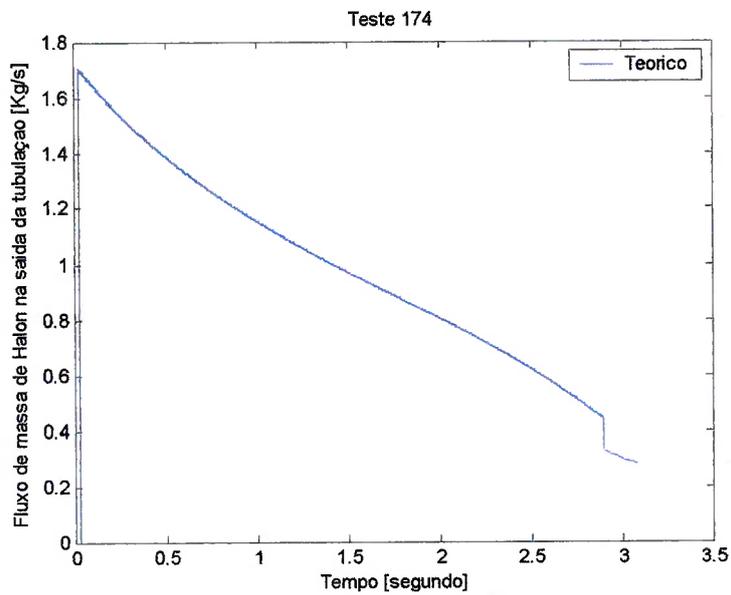


Figura A.24: Fluxo de massa do Halon-1301 calculado do teste 174

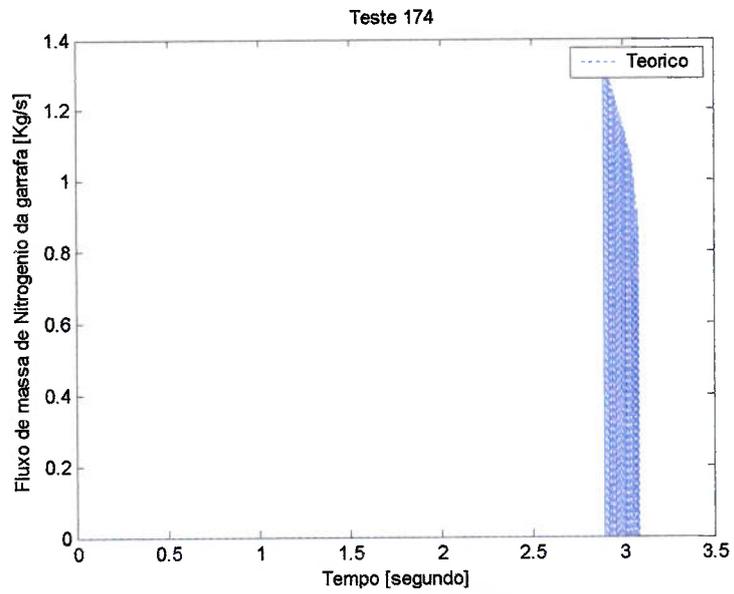


Figura A.25: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 174

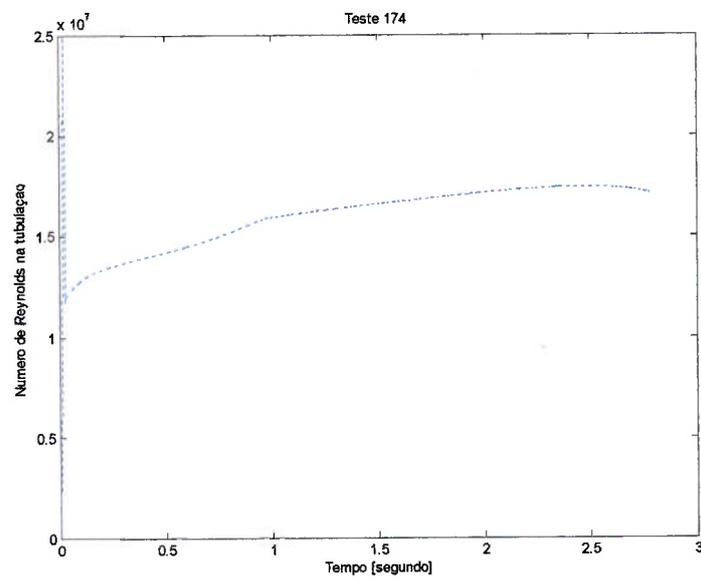


Figura A.26: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 174

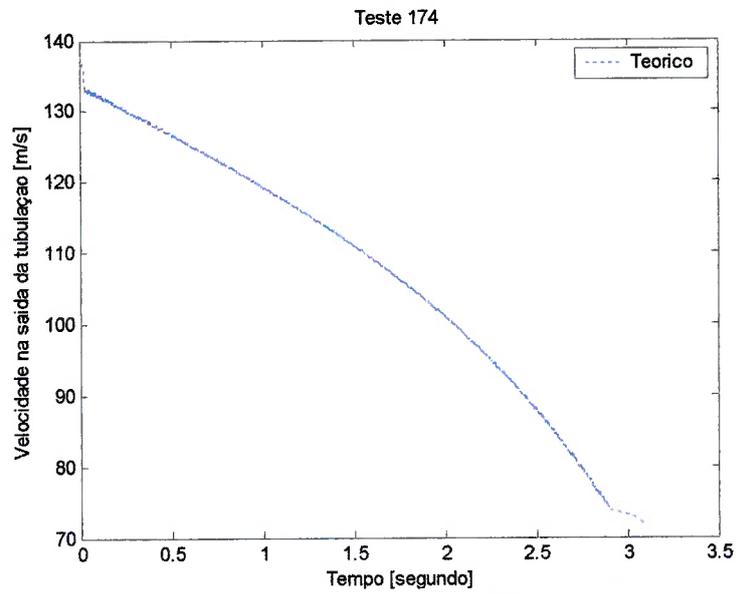


Figura A.27: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 174

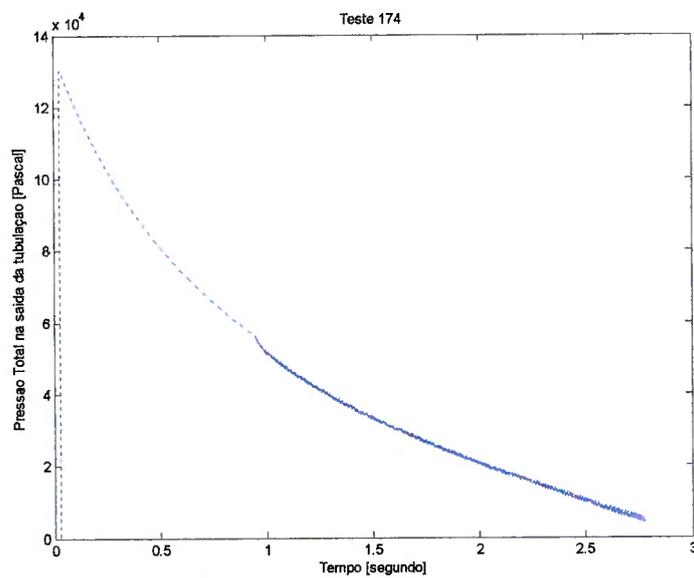


Figura A.28: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 174

## Teste 175

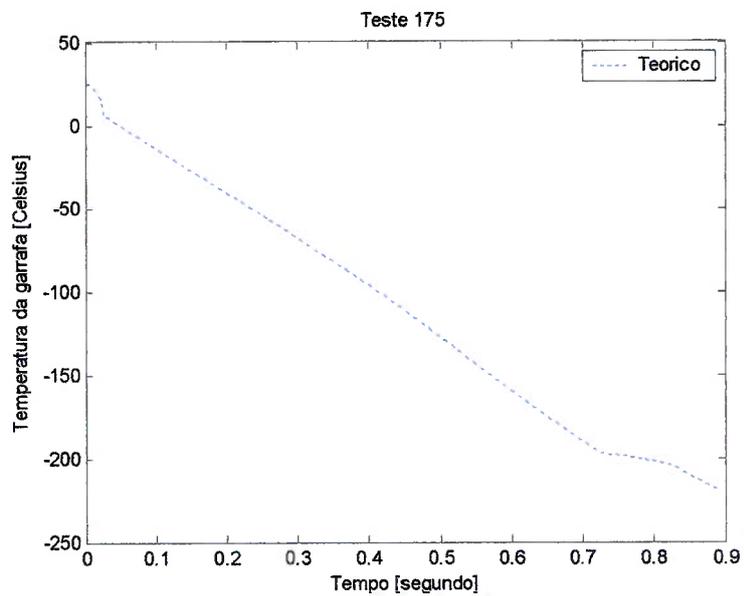


Figura A.29: Temperatura da garrafa calculada do teste 175

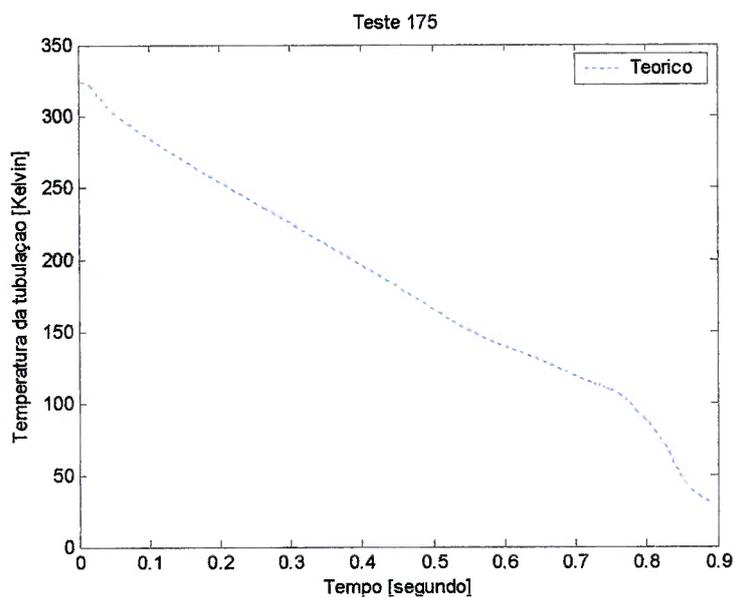


Figura A.30: Temperatura da tubulação calculada do teste 175

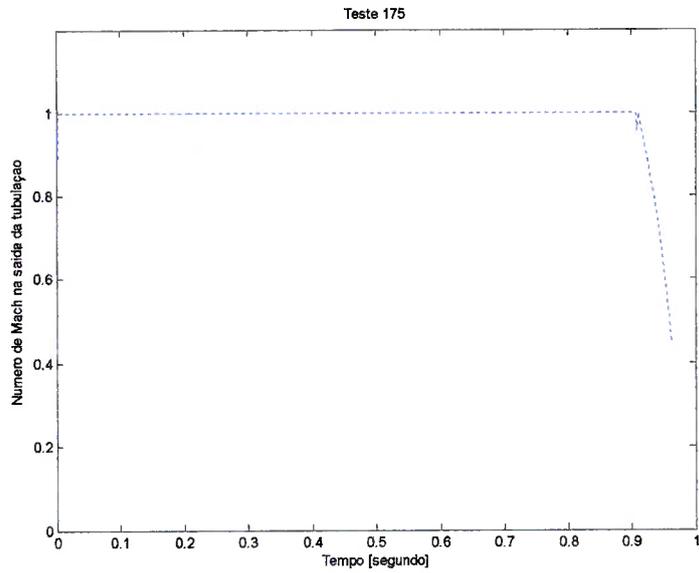


Figura A.31: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 175

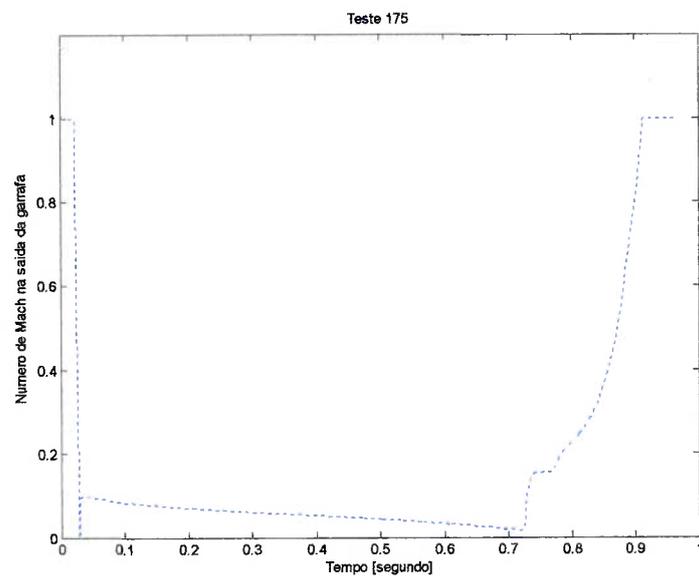


Figura A.32: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 175

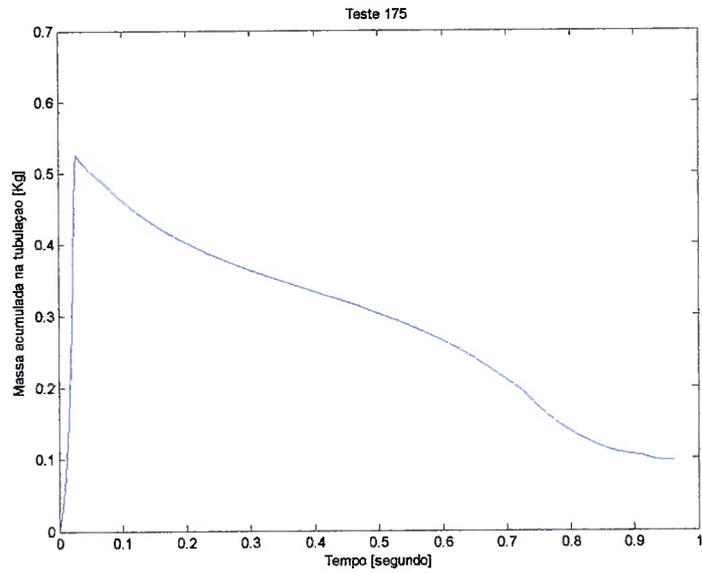


Figura A.33: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 175

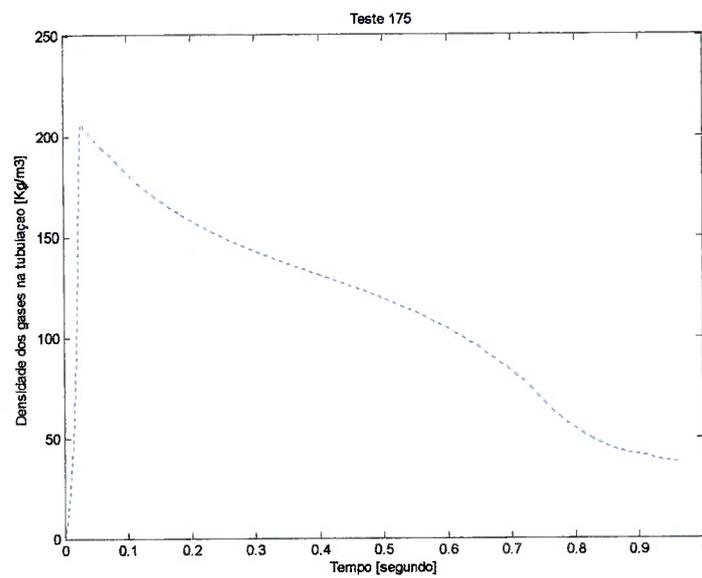


Figura A.34: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 175

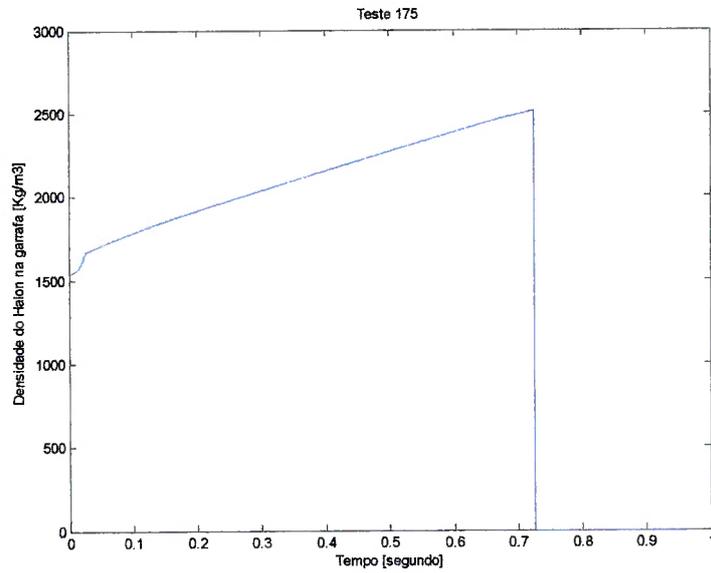


Figura A.35: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 175

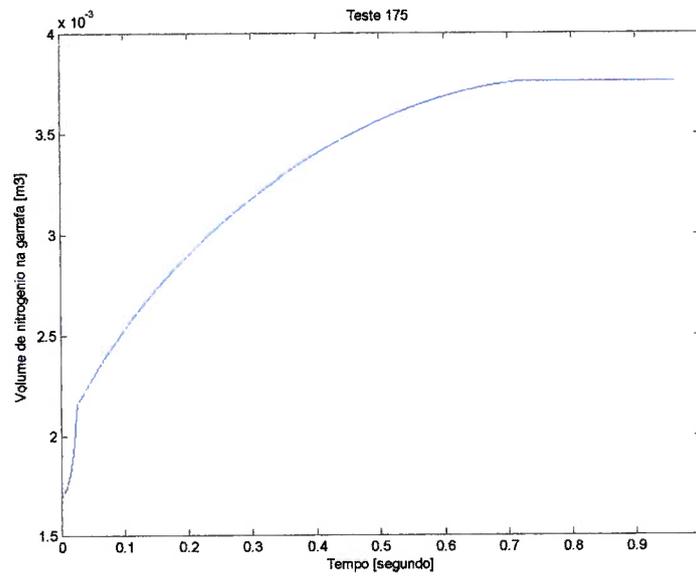


Figura A.36: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 175

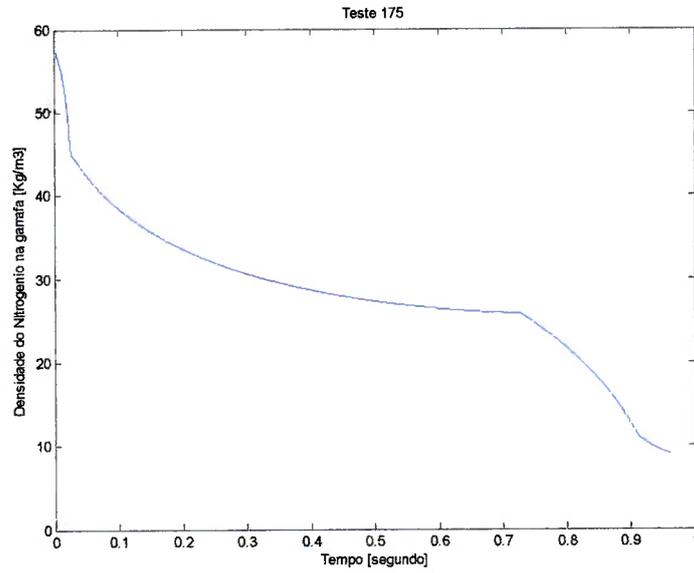


Figura A.37: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 175

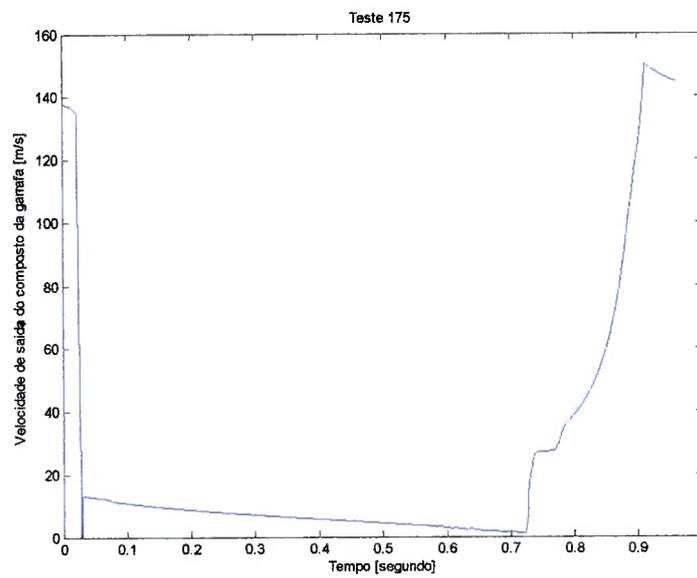


Figura A.38: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 175

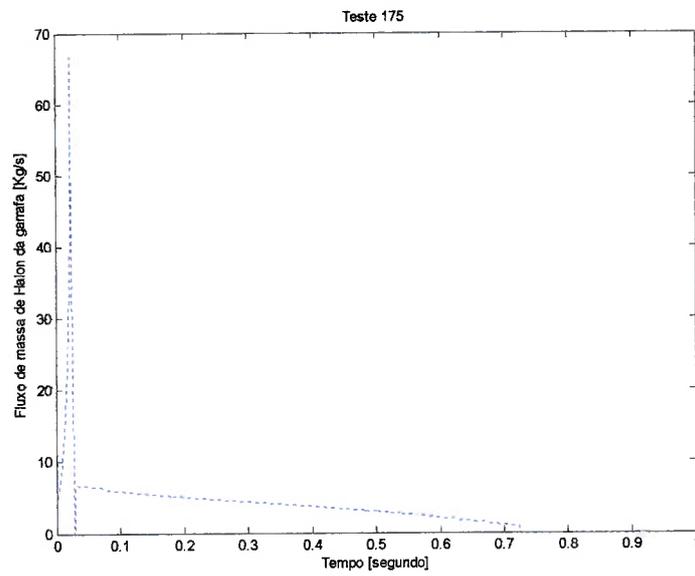


Figura A.39: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa calculada do teste 175

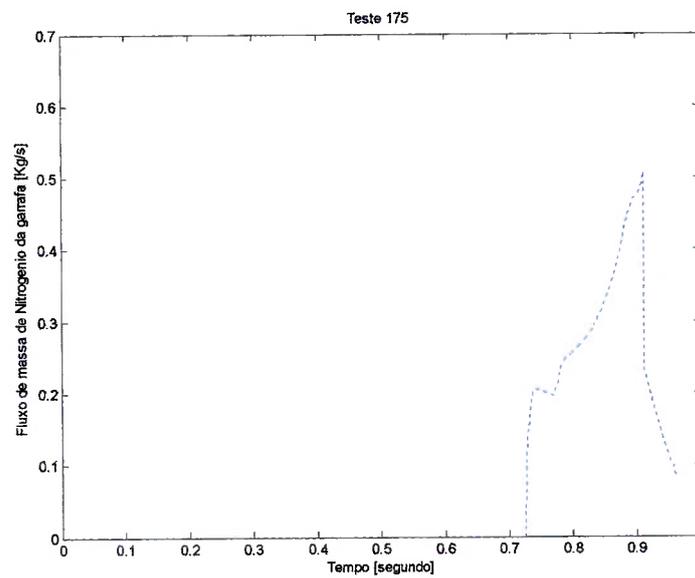


Figura A.40: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 175

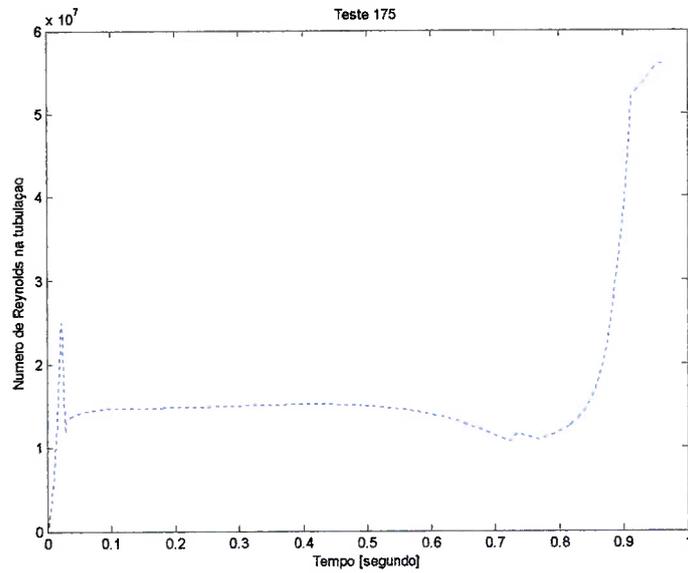


Figura A.41: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 175

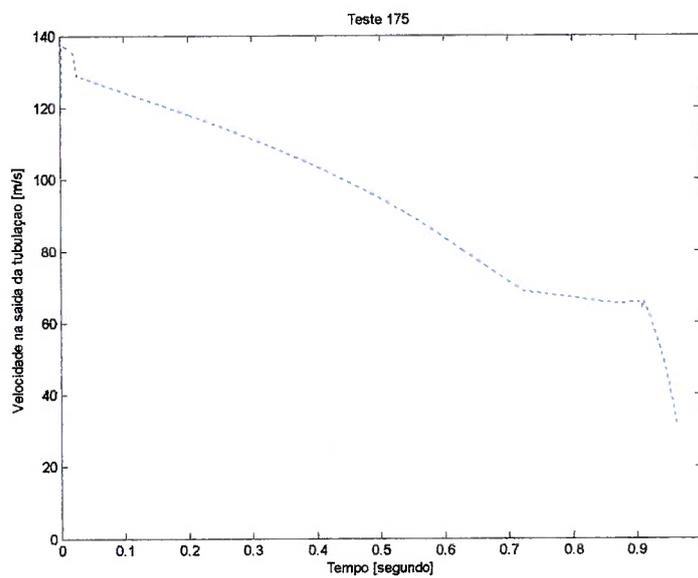


Figura A.42: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 175

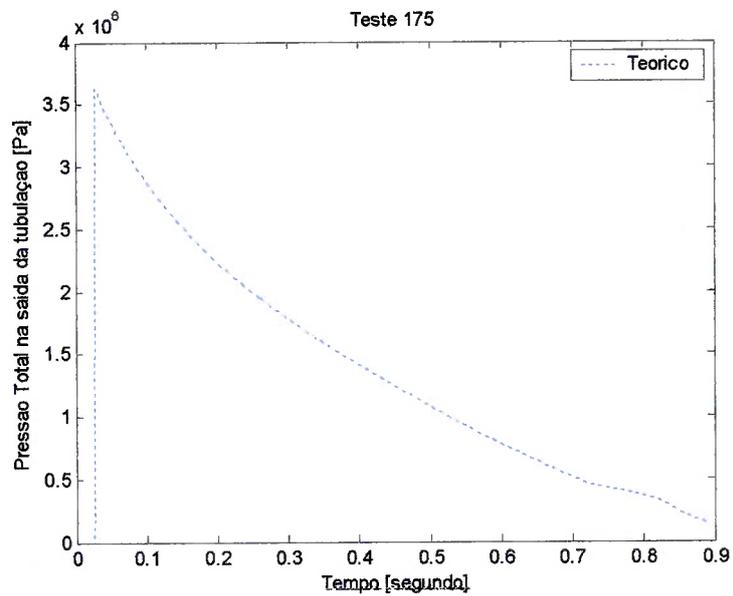


Figura A.43: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 175

## ESTUDO DE CASO

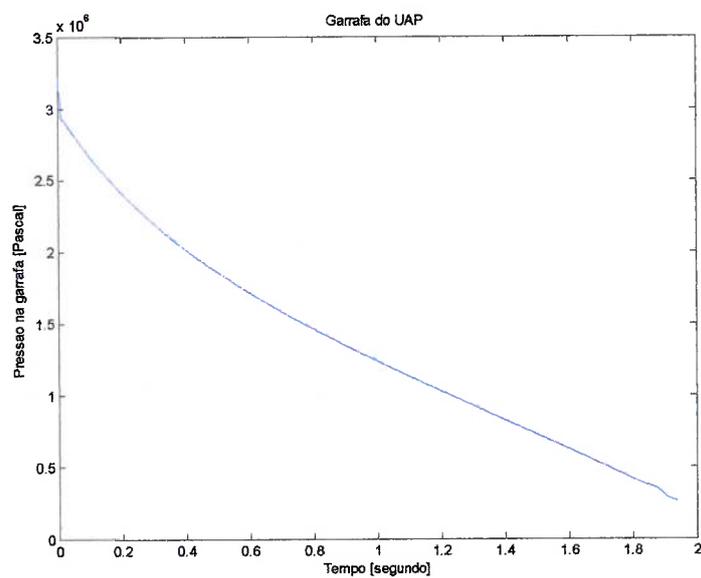


Figura A.44: Pressão na garrafa do estudo de caso

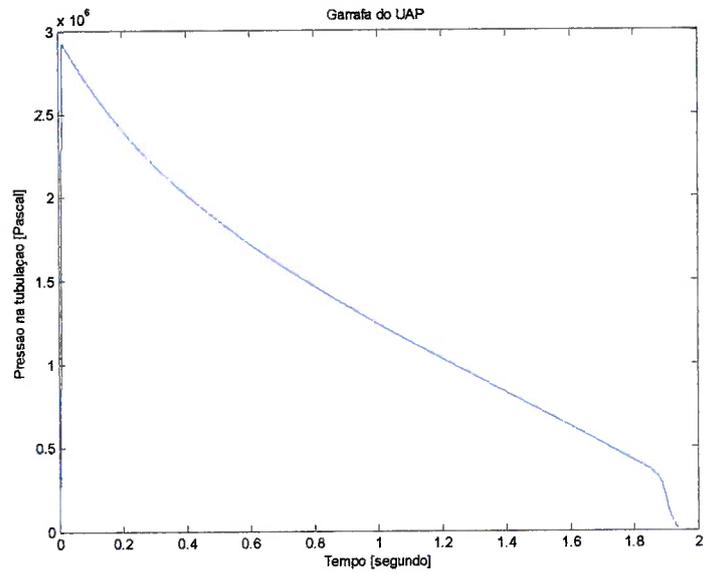


Figura A.45: Pressão na tubulação do estudo de caso

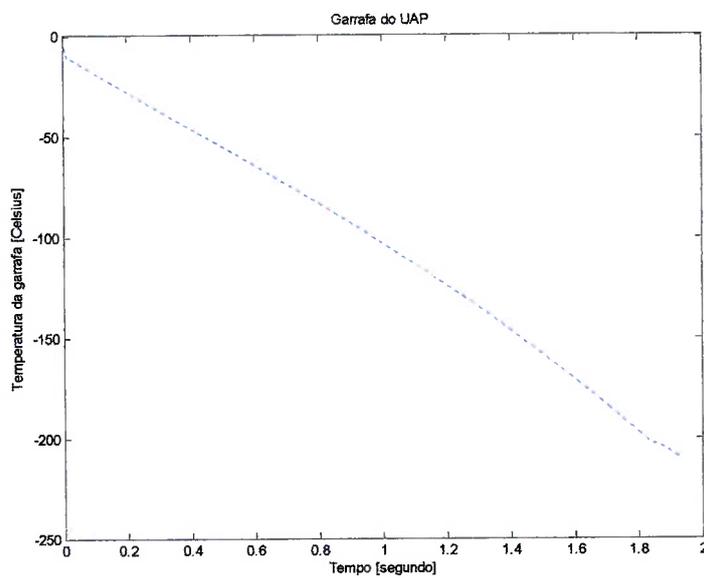


Figura A.46: Temperatura da garrafa do estudo de caso

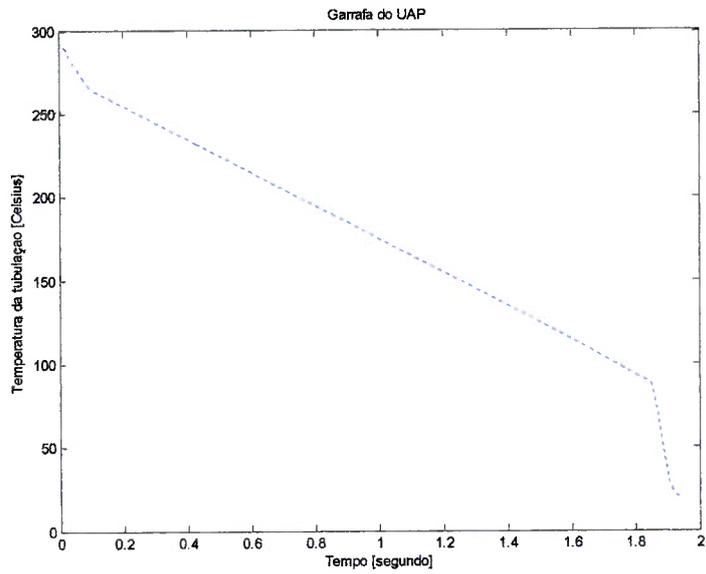


Figura A.47: Temperatura da tubulação do estudo de caso

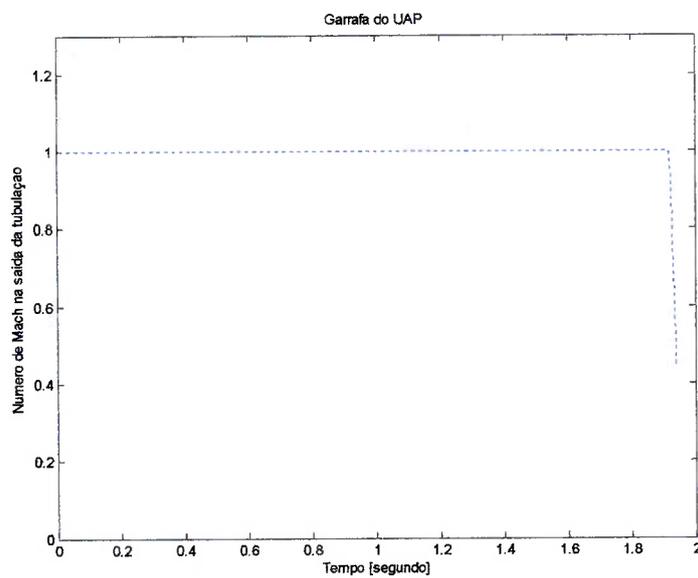


Figura A.48: Número de Mach na saída da tubulação do estudo de caso

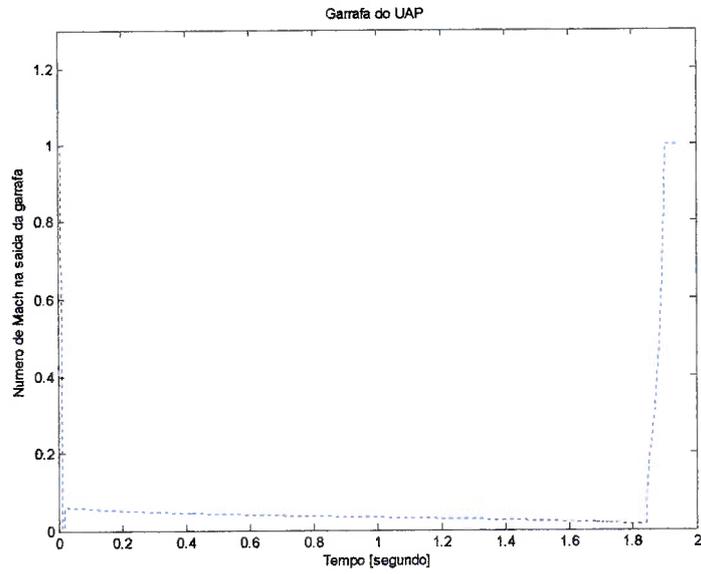


Figura A.49: Número de Mach na saída da garrafa do estudo de caso

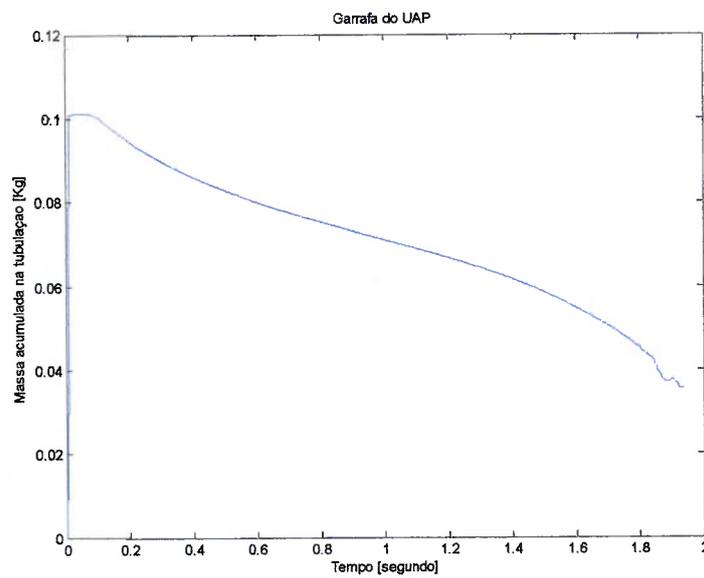


Figura A.50: Massa acumulada na tubulação do estudo de caso

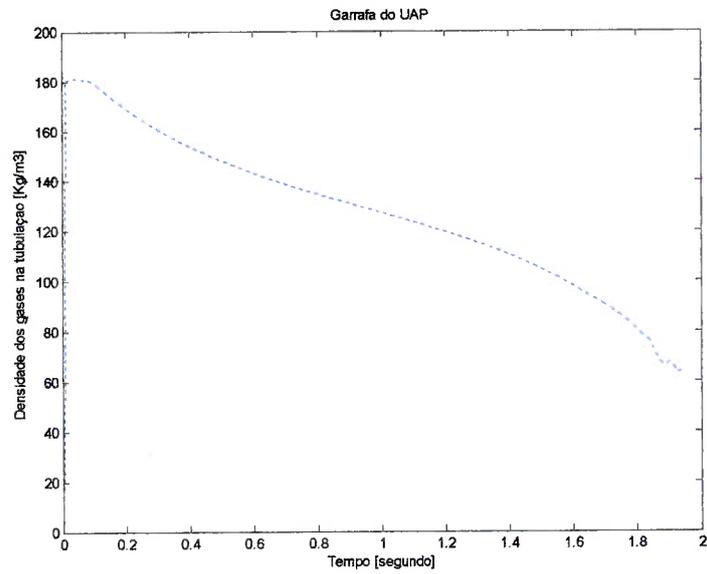


Figura A.51: Densidade dos gases na tubulação do estudo de caso

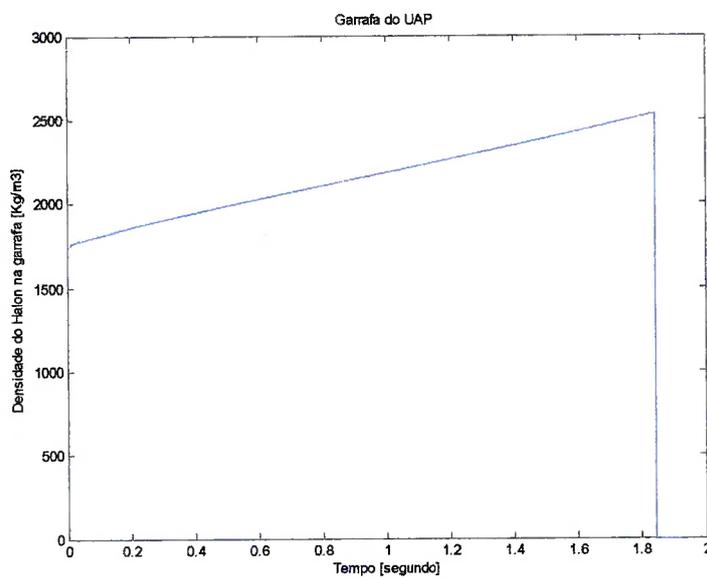


Figura A.52: Densidade do Halon-1301 na garrafa do estudo de caso

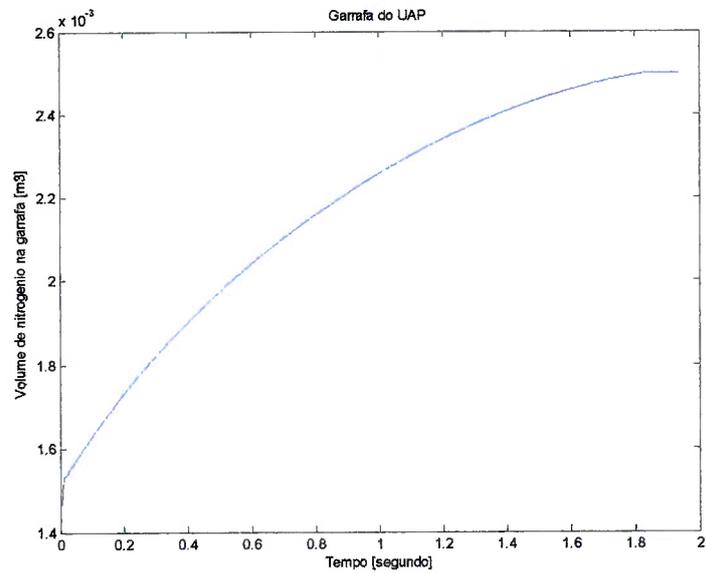


Figura A.53: Volume de nitrogênio na garrafa do estudo de caso

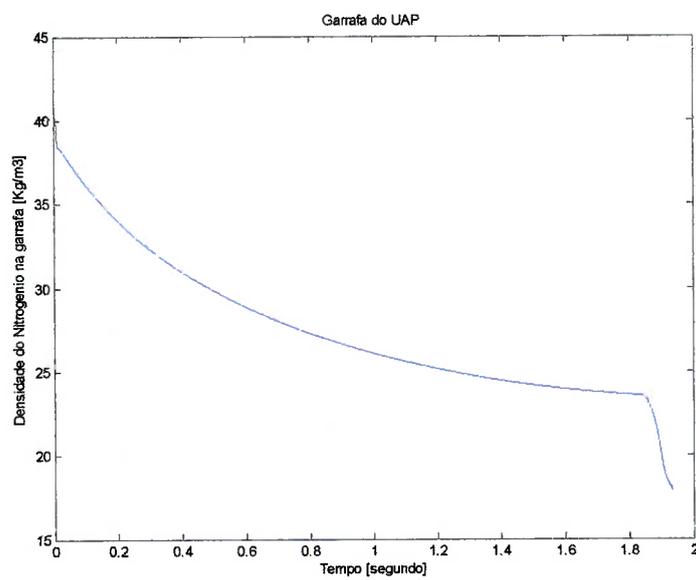


Figura A.54: Densidade do nitrogênio na garrafa do estudo de caso

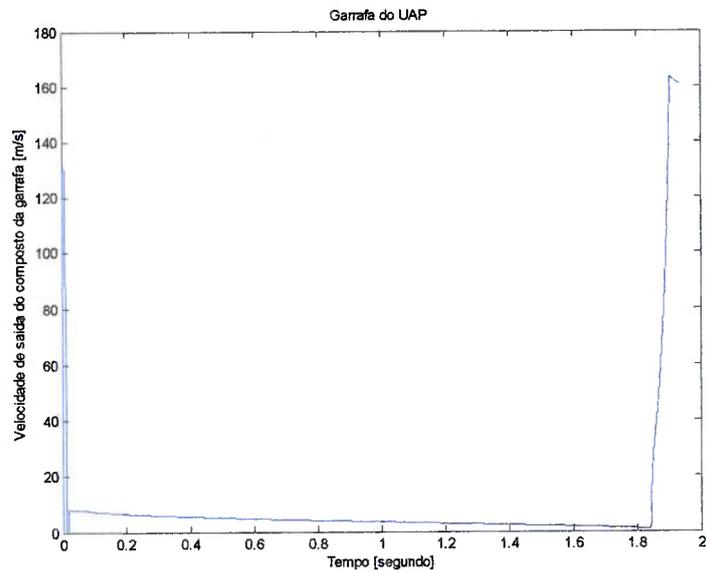


Figura A.55: Velocidade de saída dos gases da garrafa do estudo de caso

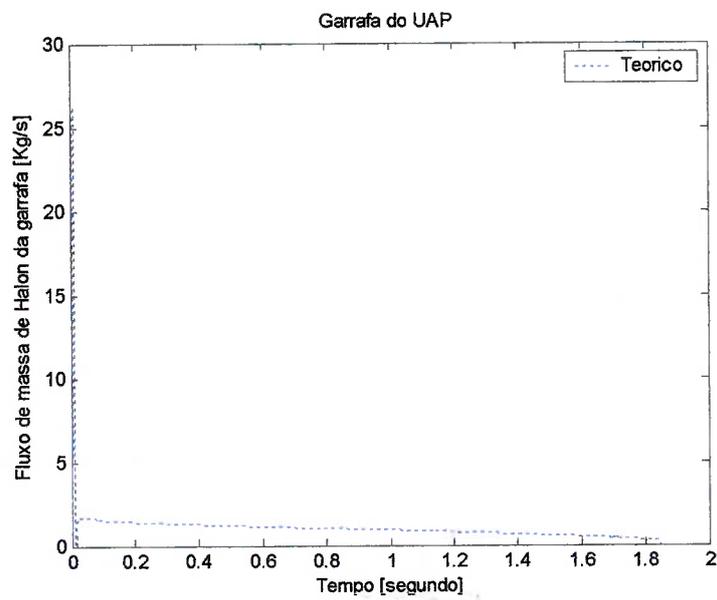


Figura A.56: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa do estudo de caso

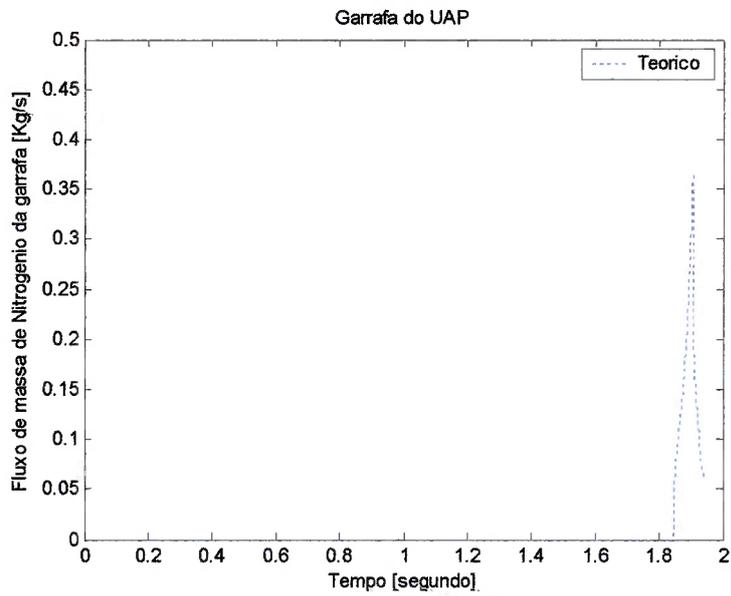


Figura A.57: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa do estudo de caso

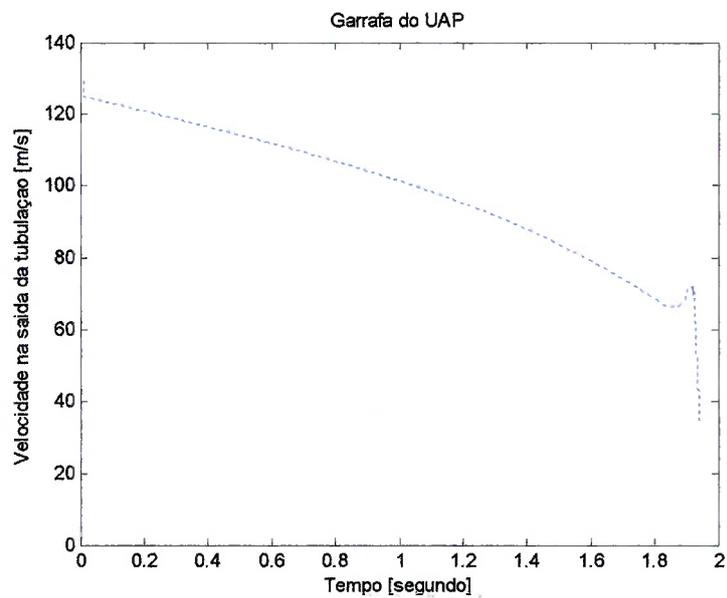


Figura A.58: Número de Reynolds na tubulação do estudo de caso

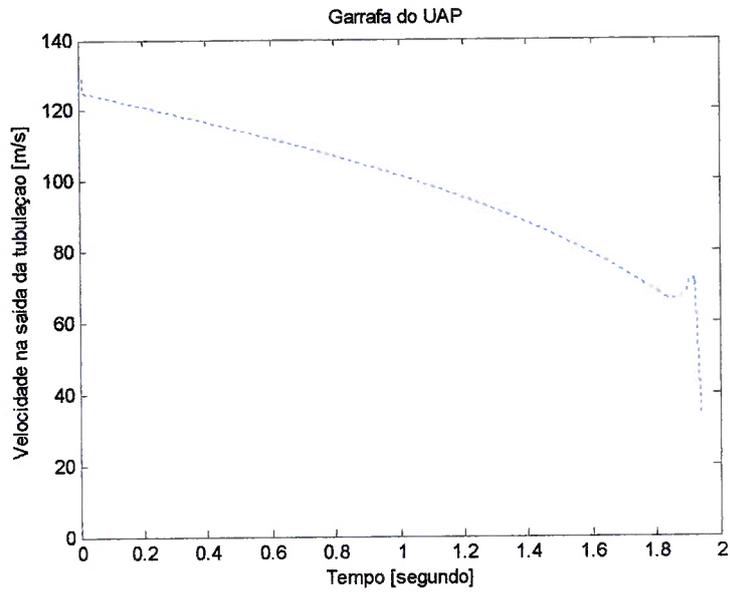


Figura A.59: Velocidade dos gases na saída da tubulação do estudo de caso

## APÊNDICE B

Reid *et al.* (1987) aponta as seguintes propriedades físico-químicas para o Halon-1301 e para o Nitrogênio.

	CF <sub>3</sub> Br	N <sub>2</sub>
M [g]	148,91	28,01
P <sub>c</sub> [bar]	39,7	33,9
T <sub>c</sub> [K]	340,2	126,2
Z <sub>c</sub>	0,275	0,290
ω	0,171	0,039
μ <sub>r</sub> [debye]	0,7	0,0
C <sub>pa</sub>	21,88	31,15
C <sub>pb</sub>	2,159 x 10 <sup>-1</sup>	-1,357 x 10 <sup>-2</sup>
C <sub>pc</sub>	-2,114 x 10 <sup>-4</sup>	2,68 x 10 <sup>-5</sup>
C <sub>pd</sub>	7,464 x 10 <sup>-8</sup>	-1,168 x 10 <sup>-8</sup>

Tabela B.1: Constantes termodinâmicas

Sendo C<sub>pa</sub>, C<sub>pb</sub>, C<sub>pc</sub> e C<sub>pd</sub> constantes para o cálculo de C<sub>p</sub> [J/mol.K] como gás ideal, conforme a relação abaixo.

$$C_p = C_{pa} + C_{pb}T + C_{pc}T^2 + C_{pd}T^3 \quad (\text{B.1})$$

## APÊNDICE C

<b>1. Equações cúbicas de estado</b>	<b>134</b>
<b>2. Equação de Lee-Kesler</b>	<b>135</b>
<b>3. Escolha da equação de estado</b>	<b>137</b>

### 1. EQUAÇÕES CÚBICAS DE ESTADO

A equação cúbica de estado na sua formulação geral é dada por:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2 + ubV + wb^2} \quad (\text{C.1})$$

As constantes para a equação cúbica de estado citada acima são dadas na tabela abaixo.

Equação	u	w	b	a	fw
Redlich-Kwong	1	0	$\frac{0.08664RT_c}{P_c}$	$\frac{0.42748R^2T_c^{2.5}}{P_cT^{0.5}}$	-
Soave	1	0	$\frac{0.08664RT_c}{P_c}$	$\frac{0.42748R^2T_c^2}{P_c} \left[ 1 + f_w (1 - T_r^{0.5}) \right]^2$	$0.48 + 1.57w - 0.176w^2$
Peng-Robinson	2	1	$\frac{0.07780RT_c}{P_c}$	$\frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c} \left[ 1 + f_w (1 - T_r^{0.5}) \right]^2$	$0.37 + 1.54w - 0.269w^2$

Tabela C.1: Constantes para as equações cúbicas de estado

## 2. EQUAÇÃO DE LEE-KESLER

O método de Lee-kesler é baseado na equação de Benedict-Webb-Rubin com o fator de Pitzer. O método baseia-se no cálculo do fator de compressibilidade  $Z$  para o n-octano, que é o fluido de referência, e depois se extrapola o resultado para o fluido desejado.

Determina-se  $T_r$  e  $P_r$  para o fluido de interesse e depois se calcula  $V_r^{(0)}$  a partir da equação abaixo de forma iterativa:

$$\frac{P_r V_r^{(0)}}{T_r} = 1 + \frac{B}{V_r^{(0)}} + \frac{C}{(V_r^{(0)})^2} + \frac{D}{(V_r^{(0)})^5} + \frac{c_4}{T_r^3 (V_r^{(0)})^2} \left[ \beta + \frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right] e^{\left[ \frac{\gamma}{(V_r^{(0)})^2} \right]} \quad (\text{C.2})$$

onde

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3} \quad (\text{C.3})$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3} \quad (\text{C.4})$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r} \quad (\text{C.5})$$

Constante	Fluido desejado	n-octano
$b_1$	0.1181193	0.2026579
$b_2$	0.265728	0.331511
$b_3$	0.154790	0.027655
$b_4$	0.030323	0.203488
$c_1$	0.0236744	0.0313385
$c_2$	0.0186984	0.0503618
$c_3$	0.0	0.016901
$c_4$	0.042724	0.041577
$d_1 \times 10^4$	0.155488	0.48736
$d_2 \times 10^4$	0.623689	0.0740336
$\beta$	0.65392	1.226
$\gamma$	0.060167	0.03754

Tabela C.2: Constantes para as equações de Lee-Kesler

Com  $V_r^{(0)}$  calculado, estima-se o fator de compressibilidade  $Z^{(0)}$ :

$$Z^{(0)} = \frac{P_r V_r^{(0)}}{T_r} \quad (\text{C.6})$$

Agora, utilizando-se as mesmas equações acima para o fluido de referência estima-se  $V_r^{(R)}$ , assim:

$$Z^{(R)} = \frac{P_r V_r^{(R)}}{T_r} \quad (\text{C.7})$$

O fator de compressibilidade final é dado por:

$$Z = Z^{(0)} + \left( \frac{w}{w^{(R)}} \right) (Z^{(R)} - Z^{(0)}) \quad (\text{C.8})$$

### 3. ESCOLHA DA EQUAÇÃO DE ESTADO

Conforme Reid *et al.* (1987) historicamente as equações de estado costumavam representar somente a fase de vapor e somente ultimamente começaram a ser utilizadas também para representar a fase líquida. A equação de estado ideal deve representar a fase líquida e a gasosa, deve ser possível estendê-la a misturas e deve finalmente ser relativamente simples do ponto de vista computacional, todavia isto tudo ainda não é possível.

A equação virial é simples, mas somente pode ser utilizada para a fase de vapor e mesmo assim quando a densidade reduzida for menor que 0.5, portanto ela não foi empregada.

A equação cúbica de estado e a de Benedict-Webb-Rubin (BWR) modificada, mais conhecida como Lee-Kesler, são capazes de representar a fase líquida. A vantagem do método BWR está na possibilidade de aplicação sobre uma faixa maior de temperatura e pressão enquanto que a equação cúbica de estado é muito menos complexa.

As equações cúbicas de estado mais conhecidas são a de Redlich-Kwong, Soave e Peng-Robinson as quais baseiam-se na teoria de que a pressão é resultante das pressões geradas a partir das forças de atração e repulsão das moléculas.

Estas equações têm faixas de aplicabilidade, por exemplo, a RK deve ser utilizada para  $T_r$  e  $P_r$  maiores que 1, já a de Soave não deve ser utilizada para  $T_r$  maiores que 1 e a de BWR  $0.3 < T_r < 4$  e  $0 < P_r < 10$ , portanto todas foram descartadas.

Conforme Reid *et al.* (1987) as equações de BWR ou cúbicas não podem prever com exatidão o comportamento PVT de moléculas polares, que é o caso do Halon-1301.

A escolha de uma equação de estado é difícil visto que a equação de estado ideal não existe. Reid *et al.* (1987) sugere a utilização das equações de Soave ou Peng-Robinson para moléculas não-polares, que é o caso do nitrogênio, e a equação de Gmehling para as moléculas polares, que é o caso do Halon-1301, todavia os parâmetros necessários, como o

coeficiente de fugacidade, não estavam disponíveis e a equação de Gmehling não foi utilizada.

Foram estudados três métodos: o de Lee-Kesler, Peng-Robinson, Soave e gás ideal para o Halon-1301 e somente a equação de gás ideal apresentou resultados satisfatórios para o comportamento PVT do Halon-1301.

O método de Lee-Kesler, apesar de ser indicado para substância polares, mostrou-se ineficaz para o Halon-1301.

Os gráficos abaixo apresentam os estudos do emprego das equações de Soave, Peng-Robinson e Lee-Kesler para o teste 102 rodado com um passo no tempo de  $10^{-4}$  segundos.

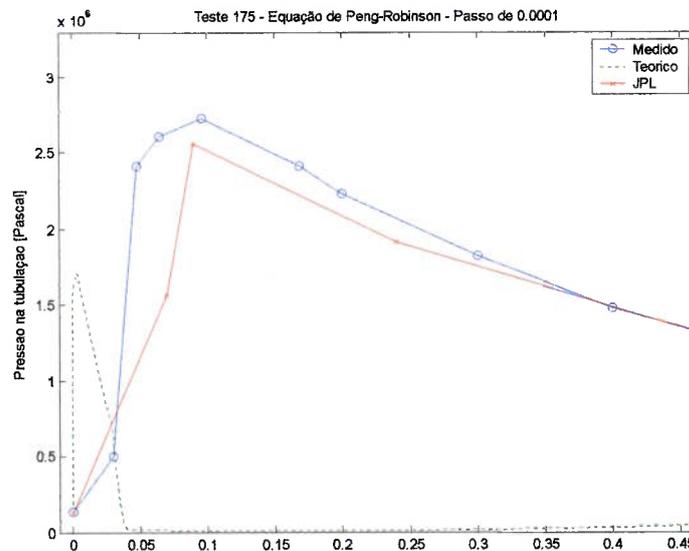


Figura C1: Pressão na tubulação calculada com a equação de Peng-Robinson

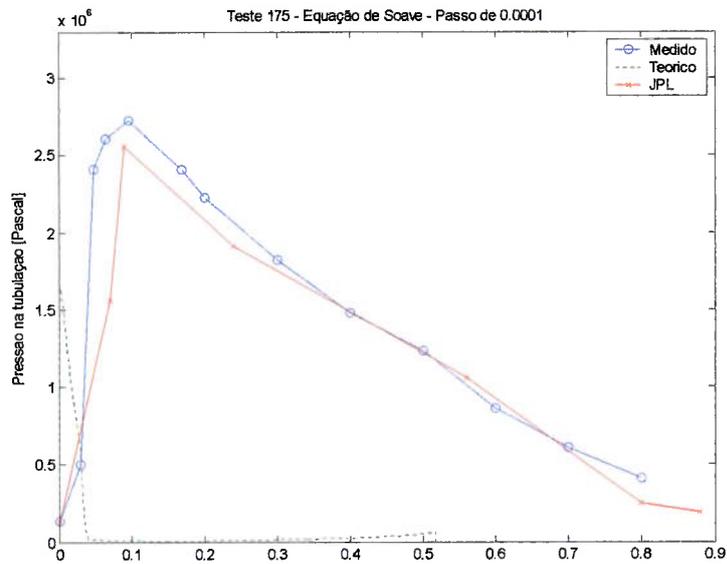


Figura C2: Pressão na tubulação calculada com a equação de Soave

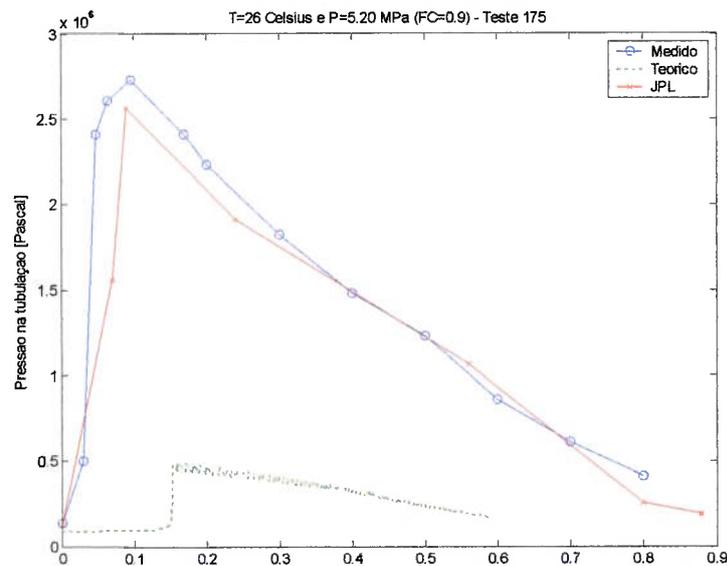


Figura C3: Pressão na tubulação calculada com a equação de Lee-Kesler

Os cálculos da temperatura para as equações de Peng-Robinson e Soave tiveram os seus limite de convergência aumentado em 50%, pois não convergem com o mesmo critério de gás ideal.

Os resultados acima demonstram que as equações de Soave, Peng-Robinson e Lee-Kesler não devem ser empregadas para o Halon-1301.

Para o nitrogênio, conforme Reid *et al.* (1987) indica, o método de Peng-Robinson foi utilizado devido ao seu maior range de aplicabilidade.

## APÊNDICE D

<b>1. Os métodos de cálculo da viscosidade</b>	<b>141</b>
<b>2. O método de Lucas</b>	<b>142</b>

### 1. OS MÉTODOS DE CÁLCULO DA VISCOSIDADE

Conforme Reid *et al.* (1987) a divisão da tensão de cisalhamento do fluido durante o escoamento pelo gradiente da velocidade é definida como a viscosidade do fluido em questão, portanto a viscosidade é uma medida do atrito interno do fluido. A viscosidade possui forte influência da pressão em pressões próximas do ponto crítico e a temperaturas reduzidas de 1 a 2.

Reid *et al.* (1987) apresenta cinco métodos de determinação da viscosidade, a saber: Enskog, Reichenberg, Lucas, Jossi-Stiel-Thodos e Chung; e recomenda os métodos de Lucas ou Chung para estimar a viscosidade de gases polares ou não-polares.

Destes o de Lucas e Reichenberg foram desenvolvidos para terem como parâmetros de cálculo a temperatura e pressão, enquanto os outros três precisam da temperatura e densidade; portanto uma equação de estado é necessária para obter-se a densidade.

Outra diferença entre os métodos está no fato de que os métodos de Reichenberg e Jossi-Stiel-Thodos necessitam ainda de uma viscosidade a baixa pressão na mesma temperatura.

Sendo assim, o método utilizado para o cálculo da viscosidade do gás Halon-1301 foi o de Lucas.

## 2. O MÉTODO DE LUCAS

Para a temperatura reduzida de interesse, calcula-se inicialmente o parâmetro  $Z_1$ :

$$Z_1 = [0.807T_r^{0.618} - 0.357e^{(-0.449T_r)} + 0.340e^{(-4.058T_r)} + 0.018]F_p^0 F_q^0 \quad (D.1)$$

onde  $F_p^0$  e  $F_q^0$  são fatores de correção devido à polaridade da molécula.

$$F_q^0 = 1, \text{ para todos os gases exceto o He, H}_2 \text{ e D}_2. \quad (D.2)$$

Para o cálculo de  $F_p^0$  é necessário calcular o momento do dipolo reduzido, conforme abaixo:

$$\mu_r = 52,46 \frac{\mu^2 P_c}{T_c^2}, \text{ com } P_c \text{ em bar e } T_c \text{ em Kelvin.} \quad (D.3)$$

A partir de então é possível calcular  $F_p^0$ , observando-se as seguintes regras:

$$\begin{aligned} F_p^0 &= 1 & 0 \leq \mu_r < 0.022 \\ F_p^0 &= 1 + 30,55(0.292 - Z_c)^{1,72} & 0,022 \leq \mu_r < 0.075 \\ F_p^0 &= 1 + 30,55(0.292 - Z_c)^{1,72} |0,96 + 0,1(T_r - 0,7)| & 0,075 \leq \mu_r \end{aligned}$$

Com o parâmetro Z1, calcula-se agora Z2:

$$Z_2 = 0,6 + 0,76P_r^\alpha + (6,99P_r^\beta - 0,6)(1 - T_r) \quad T_r \leq 1$$

com

$$\alpha = 3,262 + 14,98P_r^{5,508}$$

$$\beta = 1,39 + 5,746P_r$$

$$Z_2 = \eta^0 \xi \left[ 1 + \frac{aP_r^e}{bP_r^f + (1 + cP_r^d)^{-1}} \right] \quad 1 < T_r < 40$$

com

$$\eta^0 \xi = Z_1$$

$$\xi = 0,176 \left( \frac{T_c}{M^3 P_c^4} \right)^{1/6}$$

As constantes são calculadas por:

$$a = \frac{a_1}{T_r} \exp(a_2 T_r^\gamma) \quad (D.4)$$

$$b = a(b_1 T_r - b_2) \quad (D.5)$$

$$c = \frac{c_1}{T_r} \exp(c_2 T_r^\delta) \quad (D.6)$$

$$d = \frac{d_1}{T_r} \exp(d_2 T_r^\epsilon) \quad (D.7)$$

$$e = 1,3088 \quad (D.8)$$

$$f = f_1 \exp(f_2 T_r^\zeta) \quad (D.9)$$

Sendo

$a_1=1,245 \times 10^{-3}$	$a_2=5,1726$	$\gamma = -0,3286$
$b_1=1,6553$	$b_2=1,2723$	$\delta = -37,7332$
$c_1=0,4489$	$c_2=3,0578$	$\varepsilon = -7,6351$
$d_1=1,7368$	$d_2=2,2310$	$\zeta = 0,4489$
$f_1=0,9425$	$f_2=-0,1853$	

Tabela D.1: Constantes para o método de Lucas

Após calcular  $Z_1$  e  $Z_2$ , define-se:

$$Y = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (\text{D.10})$$

e os seguintes fatores de correção:

$$F_p = \frac{1 + (F_p^0 - 1)Y^{-3}}{F_p^0} \quad (\text{D.11})$$

$$F_q = \frac{1 + (F_q^0 - 1)[Y^{-1} - 0,007(\ln Y)^4]}{F_q^0} \quad (\text{D.12})$$

Finalmente a viscosidade do gás é dada por:

$$\eta = \frac{Z_2 F_p F_q}{\xi} \quad (\text{D.13})$$

Sendo  $\eta$  em poise.

Abaixo um exemplo da viscosidade calculada no Teste 175:

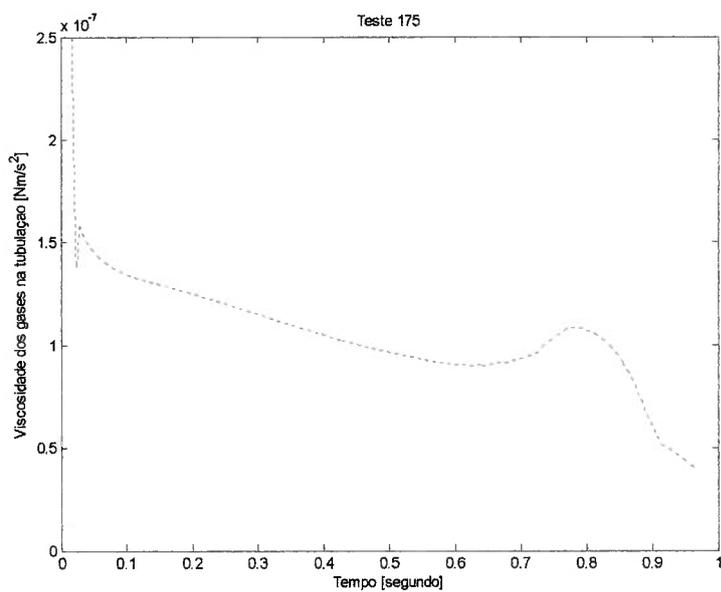


Figura D.1: Viscosidade calculada na tubulação do teste 175

## APÊNDICE E

### **1. cálculo de densidades de líquidos** 146

---

#### **1.1. O MÉTODO DE RACKETT** 146

### **1. CÁLCULO DE DENSIDADES DE LÍQUIDOS**

Reid *et al.* (1987) descreve três métodos para a obtenção da densidade de líquidos: Hankinson-Brobst-Thomson, Rackett e Bhirud's.

O método de Hankinson-Brobst-Thomson precisa de um parâmetro definido como  $w_{SRK}$  e não está disponível para o Halon-1301; neste caso o parâmetro pode ser substituído pelo fator acêntrico real mas esta substituição é uma fonte de erro e por isto foi descartado.

O método de Bhirud's só pode ser utilizado para fluidos não polares, portanto foi descartado.

O método de Rackett apesar de ter estimativas de parâmetro, é muito mais simples que o método de Hankinson-Brobst-Thomson, e por isto foi escolhido.

#### **1.1. O método de Rackett**

A densidade do líquido é calculada por:

$$\rho = \frac{RT_c}{P_c} Z_{RA}^{[1+(1-T_r)^{2,17}]} \quad (\text{E.1})$$

onde  $Z_{RA}$  é dado por:

$$Z_{RA} = 0,29056 - 0,08775w \quad (\text{E.2})$$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J.D.Jr., Modern Compressible Flow with Historical Perspective, McGraw-Hill, second edition, 1990.
- Clearly, T.G., Yang, J.C., King, M.D., Boyer, C.I. e Grosshandler, W.L., Pipe Flow Characteristics of Alternative Agents for Engine Nacelle Fire Protection, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 1995.
- Dupont® Halon 1301 Fire Extinguishant bulletin, 1980.
- Elliot, D.G., Garrison, P.W., Klein, G.A., Moran, K.M., Zydowicz, M.P., Flow of Nitrogen-pressurized Halon 1301 in Fire Extinguishing Systems, Jet Propulsion Laboratory, 1984.
- Ferziger, J.H., Peric, M., Computational Methods for Fluid Dynamics, 1996.
- Fluent® User Guide, Fevereiro 2003
- Grosshandler, W.L., Presser, C., Lowe, D., Rinkinen, W., Assessing Halon Alternatives for Aircraft Engine Nacelle Fire Suppression, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 1995.
- Hodge, B.K., Koenig, K., Compressible Fluid Dynamics with Personal Computer Applications, Prentice Hall, 1995.
- Modell, M., Reid, R.C., Thermodynamics and its Applications, Massachusetts Institute of Technology, Prentice-Hall, 1974
- Netto, J.M.A., Manual de Hidráulica, Editora Edgard Blucher Ltda., 4ª edição, 1966.
- NFPA 12a, National Fire Protection Association
- Pratt & Whitney, Aeronautical Vestpocket Handbook – 23<sup>rd</sup> edition, 1996.
- Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E., The properties of Gases & Liquids, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 1987.
- Shapiro, H.N., Moran, M.J., Principios de Termodinâmica para Engenharia, Editora LTC, 4ª edição, 2000.
- Tutorial do ICEM CFD, 2004
- U.S. Environmental Protection Agency, 04 de Novembro de 2004, [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Addison Wesley Longman Limited, 1998.
- White, F.M., Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, second edition, 1991.
- Yang, J.C., Pitts, W.M., Breuel, B.D., Grosshandler, W.L. and Cleveland, W.G., Rapid Discharge of a Fire Suppressing Agent, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 1996.

## REFERÊNCIAS ADICIONAIS

- Berry, R.J., Burgess, D. R. F. Jr., Nyden, M. R. and M. R. Zachariah, Melius, C. F., Sandia National Laboratories, Schwartz, M., Halon Thermochemistry: Calculated Enthalpies of Formation of Chlorofluoromethanes, Wright Laboratory, National Institute of Science and Technology, UniVersity of North Texas, 1995.
- Federal Aviation Regulation, site: [www.faa.gov](http://www.faa.gov)
- Fialho, P.S., Nieto de Castro, C.A., Prediction of Liquid Densities for halocarbon mixtures by a modified Hard-sphere-De Santis Equation of State, Universidade dos Açores and Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1995.
- Gann, R., Fire Suppression System Performance of Alternative Agents in Aircraft Engine and Dry Bay, National Institute of standards and Technology, 1995.
- Gathee, M.H., Farsi, M., Determination of ISM equation of state for liquids from surface energy: a simplified procedure for mixtures, Department of Chemistry, Shiraz University, 2000.
- Hamins, A., Cleary, T., Yang, J., An Analysis of the Wright Patterson Full-scale Engine Nacelle Fire Suppression Experiments, National Institute of standards and Technology, 1997.
- Kovenya, V., Cherny, S., Sharov, S., Karamyshev, V., Lebedev, A., On Some Approaches to Solve CFD Problems, Institute of Computational Technologies of the Russian Academy, 2001.

- Nicolette, V.F., Tieszen, S.R., Gritzo, L.A., Numerical Simulation of Fire in an Aircraft Engine Nacelle, Sandia National Laboratories – Unsteady and Reactive Fluid Mechanics Dept.
- Novozhilov, V., Computational Fluid Dynamics Modeling of Compartment Fires, School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University, 2000
- Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980
- Pitts, W.M., Mulholland, G.W., Breuel, B.D., Johnsson, E.L., Chung, S., Harris, R.H., Real-Time Suppressant Concentration Measurement, Building and Fire Research Laboratory, 1995.
- Sanchez, I.C., Cho, J., A Universal Equation of State for polymer liquids, University of Texas at Austin, 1994.
- Walmsley, S.J., Yule, A.J., A Computational Study of the Sprays Produced by Fire Suppression Sprinkler Systems and their Interaction with Buoyancy Driven Flows, University of Manchester Institute of Science and Technology.
- Wylen, G.J.V., Sonntag, R.E., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, 3ª edição 1993.