

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

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 Matos Silves

Paulo Henrique Hasmann,

Vanderaldo Palma

Vilma Ramos Franco Fernandez

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
SIMBOLOGIA GREGA	XI
LISTA DE TABELAS	XII
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	4
3. JUSTIFICATIVA	6
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
5. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	17
5.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES	17
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
5.2. DEFINIÇÕES	21
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	28
5.2.7.	VAZÃO MÁSSICA	29
6.	<u>MALHA COMPUTACIONAL</u>	30
6.1.	TIPOS DE MALHA	30
6.2.	A MALHA PARA O ESTUDO DE CASO	31
6.3.	QUALIDADE DA MALHA NO ICEM	34
7.	<u>MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)</u>	38
7.1.	EQUAÇÃO DE TRANSPORTE	38
7.2.	O MVF PARA O ESTUDO DE CASO	39
7.2.1.	MÉTODO DE SOLUÇÃO	40
7.2.2.	MODELO DE TURBULÊNCIA	43
7.2.3.	ACOPLAMENTO PRESSÃO-VELOCIDADE	45
7.3.	CONFIGURAÇÕES	46
8.	<u>METODOLOGIA DO MODELO GARRAFA-TUBO</u>	47
8.1.	DADOS DE ENTRADA	48
8.2.	CONSTANTES AMBIENTAIS E FÍSICAS	49
8.3.	DENSIDADE ATMOSFÉRICA LOCAL	49
8.4.	COEFICIENTES DE DESCARGA DE FLUXO	49
8.5.	CÁLCULO DAS CONDIÇÕES INICIAIS	51
8.5.1.	SUPOSIÇÕES	51
8.5.2.	GARRAFA	52
8.5.3.	TUBULAÇÃO	54
8.6.	DETERMINAÇÃO DA TUBULAÇÃO EQUIVALENTE	54
8.7.	MODELAGEM DO ESCOAMENTO DA GARRAFA	56

8.8. MODELAGEM DO ESCOAMENTO DA TUBULAÇÃO	59
<u>9. VALIDAÇÃO DO MODELO GARRAFA-TUBO</u>	<u>63</u>
9.1. OS TESTES EXPERIMENTAIS	63
9.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	63
9.2.1. TESTE 102	64
9.2.2. TESTE 146	65
9.2.3. TESTE 174	66
9.2.4. TESTE 175	68
9.2.5. TESTE 293	69
<u>10. DIAGRAMA DE BLOCOS-MODELO GARRAFA-TUBO</u>	<u>74</u>
10.1. DEFINIÇÃO DO ESTADO INICIAL DA GARRAFA	74
10.2. CÁLCULO DA VAZÃO DA GARRAFA	75
10.3. LOOP DE CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO E DE FANNO	76
10.4. CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DA TUBULAÇÃO	77
<u>11. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS GARRAFA-TUBO</u>	<u>78</u>
<u>12. ESTUDO DE CASO</u>	<u>86</u>
12.1. CONDIÇÕES DE CONTORNO	86
12.2. RESULTADOS DO FLUXO DE HALON GARRAFA-TUBO	89
12.3. RESULTADOS DO COMPARTIMENTO DA UAP	91
12.3.1. RESULTADOS DO FLUXO DE AR	91
12.3.2. RESULTADOS DA CONVECÇÃO DO HALON-1301	94
<u>13. CONCLUSÕES</u>	<u>103</u>

<u>ANEXO A – RESULTADOS ADICIONAIS DO CÁP. 9</u>	<u>105</u>
<u>ANEXO B – CÁLCULO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS</u>	<u>136</u>
<u>ANEXO C – EQUACÃO DE ESTADO</u>	<u>137</u>
<u>ANEXO D – CÁLCULO DA VISCOSIDADE</u>	<u>144</u>
<u>ANEXO E – CÁLCULO DA DENSIDADE DE LÍQUIDOS</u>	<u>149</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>150</u>

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 6.1: Exemplo de malha estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).	30
Figura 6.2: Exemplo de malha não-estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).	31
Figura 6.3: Exemplo de malha 3D estruturada, ICEM [©]	31
Figura 6.4: UAP original	32
Figura 6.5: UAP modificado para estudo de CFD	33
Figura 6.6: Malha da UAP gerada no ICEM [®]	33
Figura 6.7: Raio inscrito e circunscrito de um triângulo equilátero.	34
Figura 6.8: Histograma e malha sem tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.	35
Figura 6.9: Histograma e malha com tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.	35
Figura 6.10: Histograma de qualidade da malha do compartimento do UAP	36
Figura 6.11: Condição de entrada de Halon: detalhe dos tubos superiores	37
Figura 6.12: Condição de entrada de Halon: detalhe do tubo inferior	37
Figura 7.1: Modelo de célula centrada, Fluent [®] User’s Guide	39

Figura 7.2: Método de resolução SEGREGATED, Fluent® User's Guide	40
Figura 7.3: Método de resolução COUPLED, Fluent® User's Guide	41
Figura 7.4: Menu DEFINE, Fluent®	41
Figura 7.5: Menu SOLVER, Fluent®	42
Figura 7.6: Menu ENERGY, Fluent®	42
Figura 7.7: Menu VISCOUS, Fluent®	43
Figura 7.8: Menu SOLUTION CONTROL, Fluent®	45
Figura 7.9: Menu SPECIES, Fluent®	46
Figura 8.1: Representação da garrafa descarregando para a atmosfera	47
Figura 8.2: Representação da garrafa descarregando para uma tubulação	48
Figura 8.3: Fases de expansão da garrafa conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	52
Figura 8.4: Fator de correção de área para o bocal conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	55
Figura 8.5: Teste 102 utilizando-se a densidade do Halon-1301 líquido para escoamento chocado	57
Figura 9.1: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 102	64
Figura 9.2: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 146	65
Figura 9.3: Comparação do modelo com os resultados experimentais da temperatura da garrafa do teste 146	66
Figura 9.4: Comparação do modelo com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na garrafa do teste 174	67
Figura 9.5: Comparação da pressão na tubulação com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na tubulação do teste 174	67

Figura 9.6: Comparação do modelo com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na garrafa do teste 175	68
Figura 9.7: Comparação do modelo com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na tubulação do teste 175	69
Figura 9.8: Esquemático do teste 293 conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	70
Figura 9.9: Comparação da pressão da garrafa do teste 293 conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	71
Figura 9.10: Comparação da pressão da tubulação do teste 293 conforme Elliot <i>et al.</i> (1984).	72
Figura 9.11: Massa de Halon descarregada no ramo 1 comparada com os resultados teóricos de Elliot et al. (1984).	72
Figura 9.12: Massa de Halon descarregada no ramo 2 comparada com os resultados teóricos de Elliot et al. (1984).	73
Figura 10.1: Algoritmo 1/4	74
Figura 10.2: Algoritmo 2/4	75
Figura 10.3: Algoritmo 3/4	76
Figura 10.4: Algoritmo 4/4	77
Figura 11.1: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175 no início do escoamento, Fluent [®]	79
Figura 11.2: Mach na frente de Halon-1301 para o teste 175, Fluent [®] .	80
Figura 11.3: Mach calculado na frente de Halon-1301 para o teste 175.	80
Figura 11.4: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175, Fluent [®] .	81
Figura 11.5: Mach calculado na saída garrafa-tubo para o teste 175.	81
Figura 11.6: Mach na saída da tubulação para o teste 175, Fluent [®] .	82
Figura 11.7: Mach na tubulação para o teste 175, Fluent [®] .	82
Figura 11.8: Pressão na garrafa versus tubulação calculada para o teste 175	83

Figura 11.7: Perda de carga da tubulação calculada no Teste 175	84
Figura 12.1: Representação da montagem da garrafa da UAP	86
Figura 12.2: Representação da montagem da garrafa no compartimento da UAP	87
Figura 12.3: Condições de contorno da UAP em vôo	88
Figura 12.4: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 1	89
Figura 12.5: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 2	90
Figura 12.6: Pressão estática na tubulação equivalente	90
Figura 12.7: Distribuição da velocidade na entrada de ar da UAP	92
Figura 12.8: Distribuição da velocidade na saída de ar da UAP	92
Figura 12.9: Perfil de velocidades no plano $y = 0$	93
Figura 12.10: Perfil de velocidades no plano $x = 27,55$	93
Figura 12.11: Relatório de resíduos do calculo do ar	94
Figura 12.12: Fração molar de Halon-1301 - ramo 1	96
Figura 12.13: Pressão estática de Halon-1301 - ramo 1	96
Figura 12.14: Temperatura estática de Halon-1301 - ramo 1	97
Figura 12.15: Velocidade de saída de Halon-1301 - ramo 1	97
Figura 12.16: Fração molar de Halon-1301 - ramo 2	98
Figura 12.17: Pressão estática de Halon-1301 - ramo 2	98
Figura 12.18: Temperatura estática de Halon-1301 - ramo 2	99
Figura 12.19: Velocidade de saída de Halon-1301 - ramo 2	99
Figura 12.20: Fração molar de Halon-1301 – plano $y = 0$	100
Figura 12.21: Fração molar de Halon-1301 – plano $x = 27,55$	100
Figura 12.22: Relatório de resíduos do cálculo da convecção do Halon-1301	101
Figura 12.23: Resultados experimentais da convecção do Halon-1301	102
Figura 12.24: Resultados teóricos da convecção do Halon-1301	102
Figura A.1: Resultados teóricos de temperatura do teste	106

Figura A.2: Relação de calores específicos calculados do teste 102	106
Figura A.3: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 102	107
Figura A.4: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 102	107
Figura A.5: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 102	108
Figura A.6: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 102	108
Figura A.7: Fluxo de massa calculado do teste 102	109
Figura A.8: Relação de calores específicos calculados do teste 146	109
Figura A.9: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 146	110
Figura A.10: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 146	110
Figura A.11: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 146	111
Figura A.12: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 146	111
Figura A.13: Fluxo de massa calculado do teste 146	112
Figura A.14: Temperatura da garrafa calculada do teste 174	112
Figura A.15: Temperatura da tubulação calculada do teste 174	113
Figura A.16: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 174	113
Figura A.17: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 174	114
Figura A.18: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 174	114
Figura A.19: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 174	115
Figura A.20: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 174	115

Figura A.21: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 174	116
Figura A.22: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 174	116
Figura A.23: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 174	117
Figura A.24: Fluxo de massa do Halon-1301 da tubulação calculado do teste 174	117
Figura A.25: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa calculado do teste 174	118
Figura A.26: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 174	118
Figura A.27: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 174	119
Figura A.28: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 174	119
Figura A.29: Temperatura da garrafa calculada do teste 175	120
Figura A.30: Temperatura da tubulação calculada do teste 175	120
Figura A.31: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 175	121
Figura A.32: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 175	121
Figura A.33: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 175	122
Figura A.34: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 175	122
Figura A.35: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 175	123
Figura A.36: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 175	123

Figura A.37: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 175	124
Figura A.38: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 175	124
Figura A.39: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa calculada do teste 175	125
Figura A.40: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 175	125
Figura A.41: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 175	126
Figura A.42: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 175	126
Figura A.43: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 175	127
Figura A.43: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 175	127
Figura A.45: Pressão na tubulação do estudo de caso	128
Figura A.46: Temperatura da garrafa do estudo de caso	128
Figura A.47: Temperatura da tubulação do estudo de caso	129
Figura A.48: Número de Mach na saída da tubulação do estudo de caso	129
Figura A.49: Número de Mach na saída da garrafa do estudo de caso	130
Figura A.50: Massa acumulada na tubulação do estudo de caso	130
Figura A.51: Densidade dos gases na tubulação do estudo de caso	131
Figura A.52: Densidade do Halon-1301 na garrafa do estudo de caso	131
Figura A.53: Volume de nitrogênio na garrafa do estudo de caso	132
Figura A.54: Densidade do nitrogênio na garrafa do estudo de caso	132

Figura A.55: Velocidade de saída dos gases da garrafa do estudo de caso	133
Figura A.56: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa do estudo de caso	133
Figura A.57: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa do estudo de caso	134
Figura A.58: Número de Reynolds na tubulação do estudo de caso	134
Figura A.59: Velocidade dos gases na saída da tubulação do estudo de caso	135
Figura C1: Pressão na tubulação calculada com a equação de Peng-Robinson	141
Figura C2: Pressão na tubulação calculada com a equação de Soave	142
Figura C3: Pressão na tubulação calculada com a equação de Lee-Kesler	142
Figura D.1: Viscosidade calculada na tubulação do teste 175	148

SÍMBOLO DESCRIÇÃO

\vec{n}	Vetor normal à área de escoamento
\forall	Volume.
A	Área.
A, a_1 , a_2	Velocidade do som no meio; Constante da equação cúbica de estado; Parâmetro para o método de Lucas; Parâmetro para o método de Lucas.
B	Constante da equação de Lee-Kesler.
b , b_1 ... b_4	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.

$c, c_1 \dots c_4$	Constante da equação de Lee-Kesler; Parâmetro para o método de Lucas.
C_d	Coefficiente de descarga.
C_p	Calor específico isobárico.
C_{pa}	Constante para o cálculo de C_p .
C_{pb}	Constante para o cálculo de C_p .
C_{pc}	Constante para o cálculo de C_p .
C_{pd}	Constante para o cálculo de C_p .
D	Diâmetro; Constante da equação de Lee-Kesler.
d, d_1, d_2	Constante da equação de Lee-Kesler; Parâmetro para o método de Lucas.
E	Energia interna.
e	Rugosidade relativa, Energia interna por unidade de massa; 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.
h	Entalpia.
L	Comprimento da tubulação.
L^*	Comprimento necessário da tubulação para escoamento chocado.
m	Massa.
M	Número de Mach, Massa molecular.
M_h	Massa de Halon 1301 necessária.
n	Fator da equação de Haaland.
P	Pressão estática.

P_{atm}	Pressão atmosférica local.
P_c	Pressão crítica.
P_g	Pressão da garrafa.
P_o	Pressão total.
P_r	Pressão reduzida; Pressão de referencia para o n-octano.
P_t	Pressão da tubulação.
q	Calor absorvido ou emitido por unidade de massa.
Q	Calor absorvido ou emitido.
R	Constante Universal dos gases.
∇_r	Volume de referencia para o n-octano.
Re	Número de Reynolds.
t	Tempo.
T	Temperatura estática.
T_{atm}	Temperatura atmosférica local.
T_c	Temperatura crítica.
T_g	Temperatura da garrafa.
T_o	Temperatura total.
T_r	Temperatura reduzida; Temperatura de referencia para o n-octano.
u	Velocidade na direção x; Constante da equação cúbica de estado.
V	Velocidade.
w	Trabalho por unidade de massa, Constante da equação cúbica de estado; Fator acêntrico de Pitzer.
W	Trabalho.
Y	Parâmetro para o método de Lucas.
Z_1, Z_2	Parâmetros para o método de Lucas.
Z_c	Fator de compressibilidade crítico.
Z_{RA}	Fator de compressibilidade de Rackett.

SIMBOLOGIA GREGA	DESCRIÇÃO
ε	Energia interna específica, Rugosidade relativa; Parâmetro para o método de Lucas.
α	Parâmetros para o método de Lucas.
β	Constante da equação de Lee-Kesler; Parâmetro para o método de Lucas.
γ	Relação de calores específicos; Constante da equação de Lee-Kesler; Parâmetro para o método de Lucas.
μ	Momento do dipolo da molécula.
μ_r	Momento adimensional do dipolo da molécula.
μ_t	Viscosidade turbulenta.
ρ	Densidade.
ρ_{atm}	Densidade atmosférica local.
ν	Viscosidade cinemática; volume específico, função de Prandtl-Meyer.
ξ	Viscosidade inversa.
δ	Parâmetro para o método de Lucas.
τ	Tensão de cisalhamento.
η	Viscosidade dinâmica.
η^0	Viscosidade dinâmica a baixa pressão (~1 bar).
Γ	Coefficiente de difusão.
ζ	Parâmetro para o método de Lucas.

INDICES	DESCRIÇÃO
1	Montante.
2	Jusante.
t	Variável no instante atual.
t+Δt	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 7.1: Configurações de cálculo para o Fluent®.	46
Tabela 8.1: Dados de entrada.	48
Tabela 8.2: Constantes ambientais e físicas.	49
Tabela 8.3: Coeficientes de descarga.	50
Tabela 8.4: Relação temperatura-pressão para a garrafa do estudo de caso.	53
Tabela 12.1: Configurações para o calculo do ar.	91
Tabela 12.2: Configurações para o calculo da convecção do Halon-1301.	95
Tabela B.1: Constantes termodinâmicas.	136
Tabela C.1: Constantes para as equações cúbicas de estado.	137
Tabela C.2: Constantes para as equações de Lee-Kesler.	138
Tabela D.1: Constantes para o método de Lucas.	147

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[®], 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[®] 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 consequências 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 comparados com outros agentes extintores, é o gás que necessita da menor quantidade em massa para extinguir o fogo.

Conforme o boletim Dupont[®] 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 que são 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[®] 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 diversos pontos no interior do compartimento com os dados experimentais disponíveis.

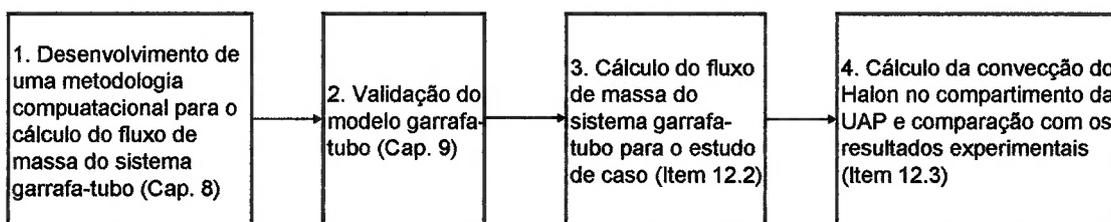
A seguir no capítulo 3 está descrito a importância deste trabalho para as empresas fabricantes de aeronaves regulamentadas conforme RBHA 25. A revisão da literatura disponível, sobre a descarga da garrafa de Halon-1301 pressurizada por nitrogênio, encontra-se no capítulo 4, as considerações teóricas utilizadas no modelo proposto estão descritas no capítulo 5 e os capítulos 6 e 7 decorrem brevemente sobre malhas computacionais e o método dos volumes finitos.

A metodologia de cálculo utilizada é descrita no capítulo 8, seguida pela sua validação no capítulo 9, enfim é apresentado um diagrama de blocos do modelo/código proposto no capítulo 10. Os resultados deste código, quando comparados aos dados experimentais, estão discutidos no capítulo 11 juntamente com algumas checagens utilizando a ferramenta de CFD.

O capítulo 12 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.

Segue-se, no final do trabalho, cinco apêndices descrevendo assuntos relevantes do código: no apêndice A está apresentado 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 máquina, 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.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Halon-1301, quimicamente conhecido como monobromotrifluormetano, CF_3Br 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), 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 CF_3Br 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 é baseada no tamanho do compartimento de fogo V e na concentração necessária C . Industrialmente, conforme o boletim Dupont® (1980) esta quantidade é dada por:

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

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 CF₃Br 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:

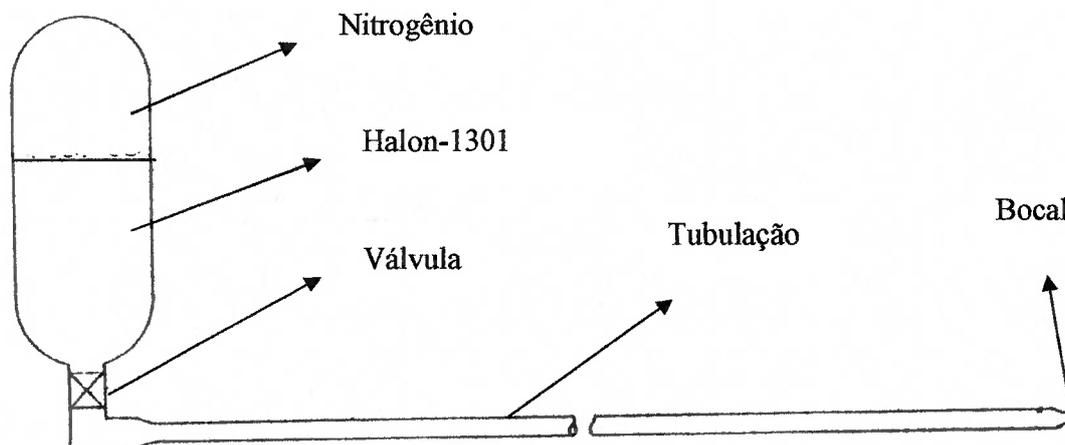


Figura 4.1: Esquema padrão do sistema garrafa-tubo conforme Elliot *et al.* (1984).

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.

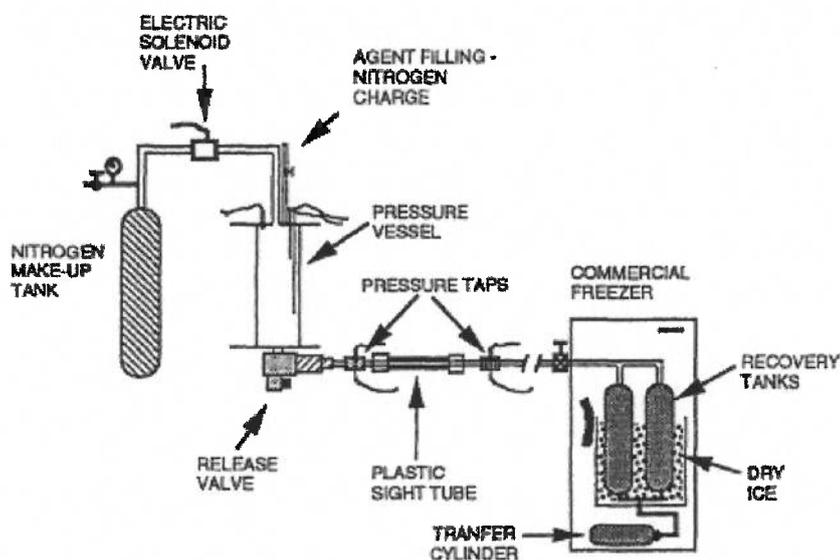


Figura 4.2: Experimento de Cleary *et al.* (1995).

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 μm , 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 C_3F_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.

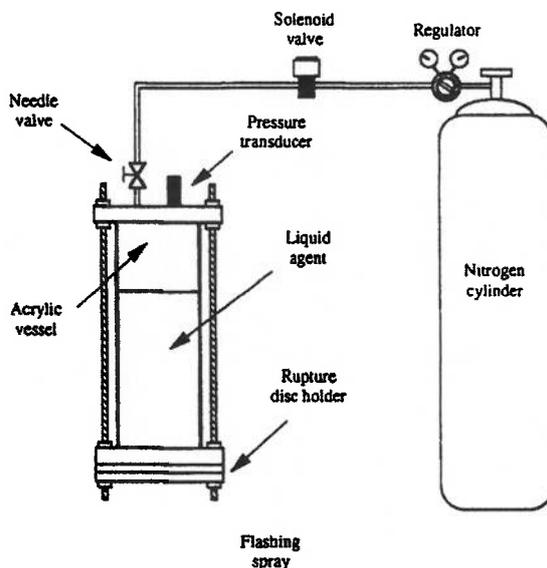


Figura 4.3 Experimento de Yang *et al.* (1996).

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 μm , 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 μm 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

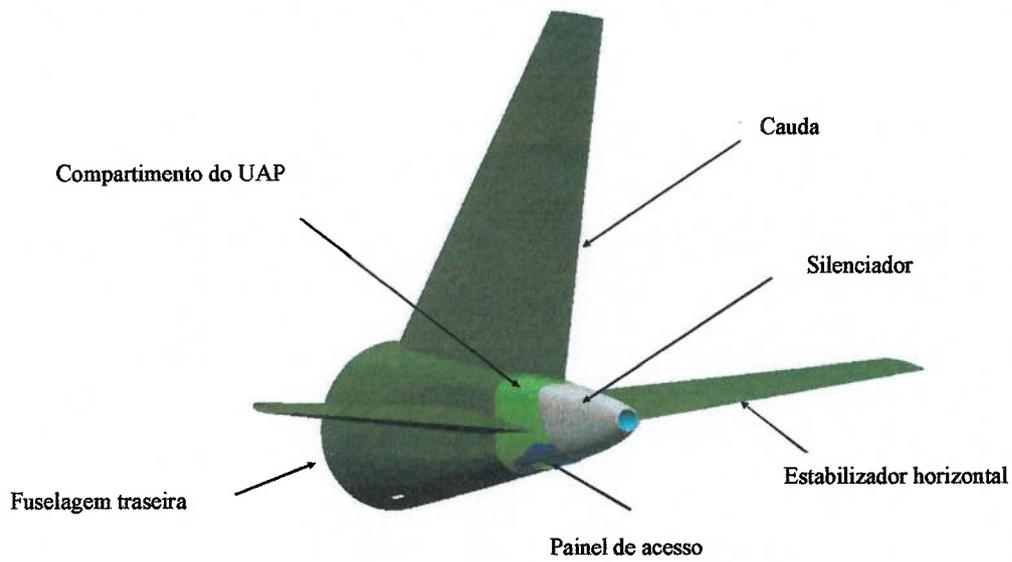


Figura 4.5: Detalhe da cauda da aeronave

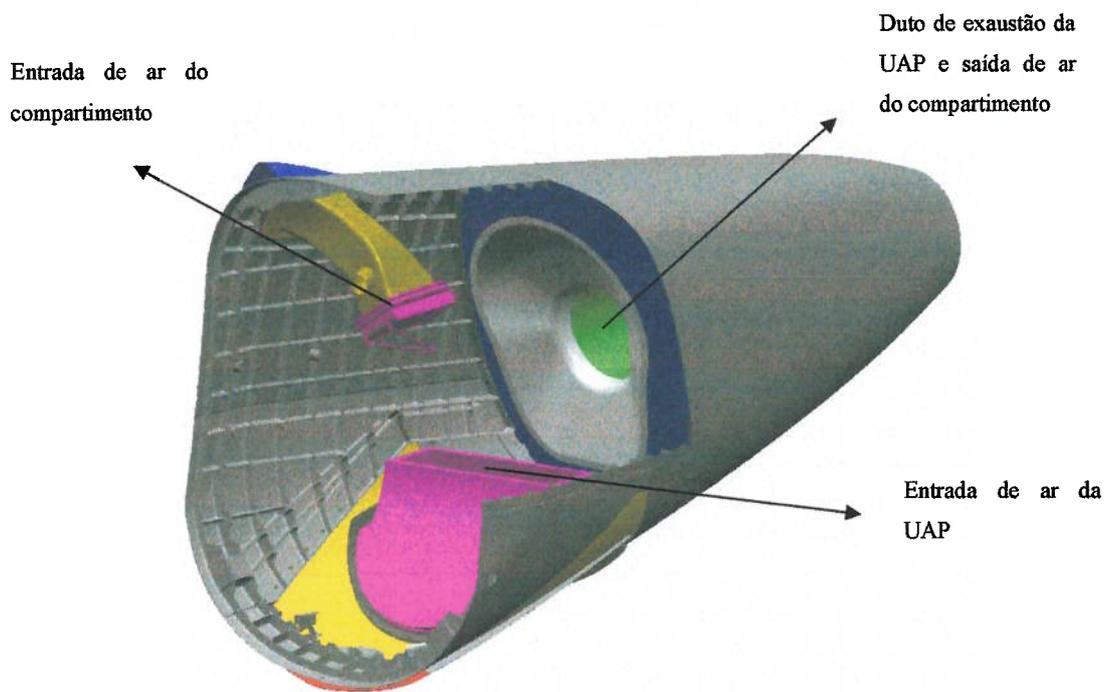


Figura 4.6: Perspectiva do compartimento da UAP

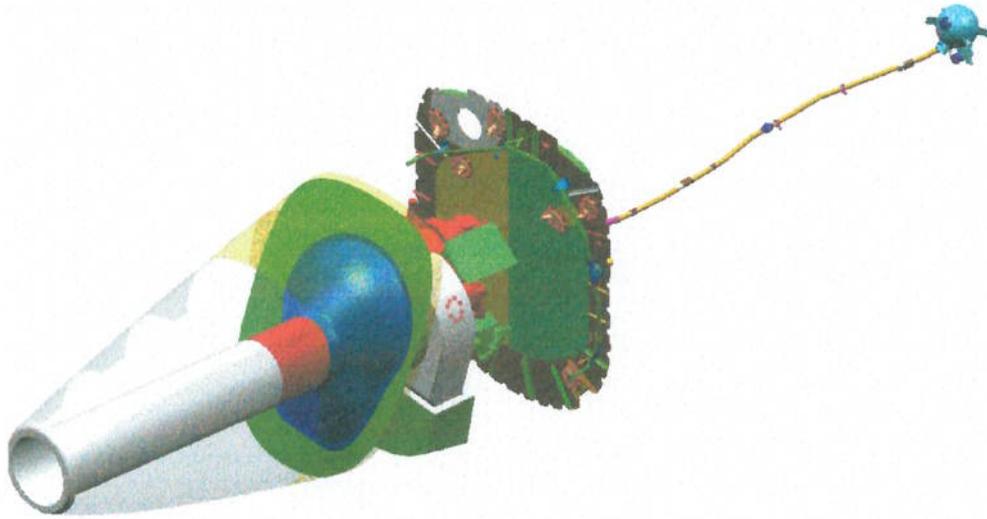


Figura 4.7: Isométrico da UAP montado

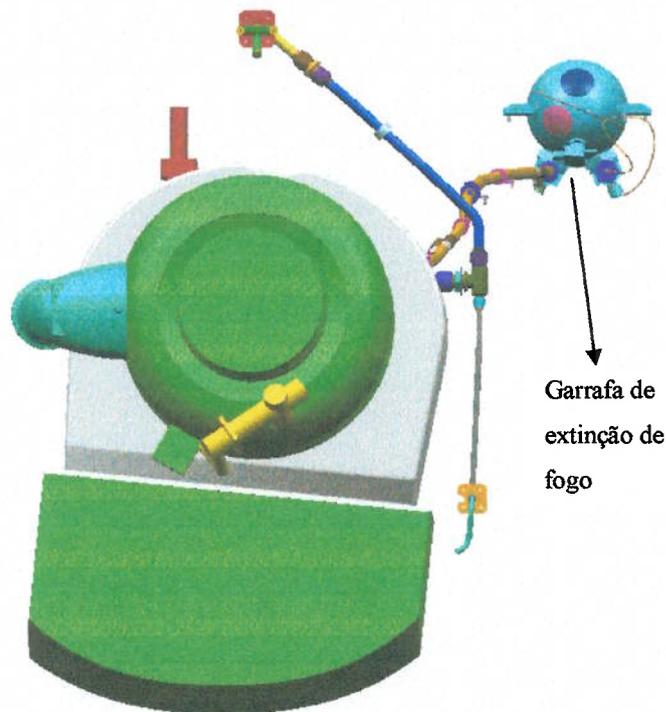


Figura 4.8: Vista frontal da UAP

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 taxa de variação da quantidade de movimento dentro do volume de controle, devido à entrada e saída de massa deste volume 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 atravessam 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 e assumindo-se que os efeitos da gravidade são nulos 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) foram obtidas assumindo-se escoamento isentrópico e, portanto não devem ser utilizadas para cálculos das propriedades através de ondas de choque, porém podem ser empregadas nos cálculos de escoamento em tubulações, amenos dos efeitos da força de atrito que ainda serão incorporados, antes ou depois do choque.

A partir da equação (5.3), reescrevendo-a para um volume de controle obtemos:

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

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.

Conforme Hodge e Koenig (1995), 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 (5.14) muito pequena, como as consideradas na aplicação objeto deste trabalho, Hodge e Koenig (1995) propõe a utilização da relação de Fanning (5.15) e de Haaland (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 onde a densidade varia, ou seja, neste caso não é mais possível utilizar a equação de Bernoulli. Um importante parâmetro neste tipo de escoamento é a velocidade do som.

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 informação 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, Anderson (1990) demonstra 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 subdivide-se ainda em subsônico, onde o número de Mach é menor que 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 (ou de estagnação), e a pressão a jusante, que é a estática.

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

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) 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, conforme Anderson (1990), para a temperatura total e estática em função do número de Mach:

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

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

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 ao aumento do diferencial de pressão.

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, portanto neste caso a equação (5.24) não é mais válida.

5.2.3.4. A onda de choque

Em um escoamento transônico 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:

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

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

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

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

5.2.3.5. A onda de expansão de Prandtl-Meyer

A onda 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.

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” da onda 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 ν ; 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 θ 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 e comprimento L , obtém-se:

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

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), é possível demonstrar que:

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

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. Ainda, conforme o mesmo autor, 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:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \frac{P_1 + P_2}{2}(v_1 - v_2) \quad (5.39)$$

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:

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

Esta 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. MALHA COMPUTACIONAL

6.1. 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 são definidas 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.

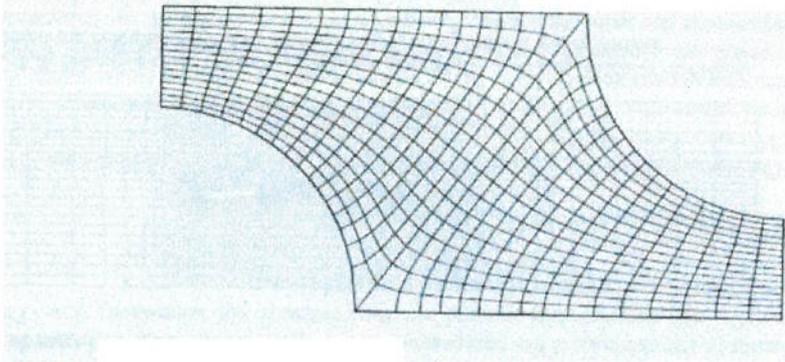


Figura 6.1: Exemplo de malha estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).

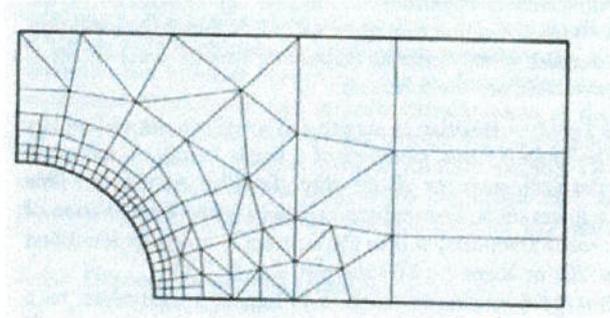


Figura 6.2: Exemplo de malha não-estruturada, conforme Ferziger e Peric (1996).

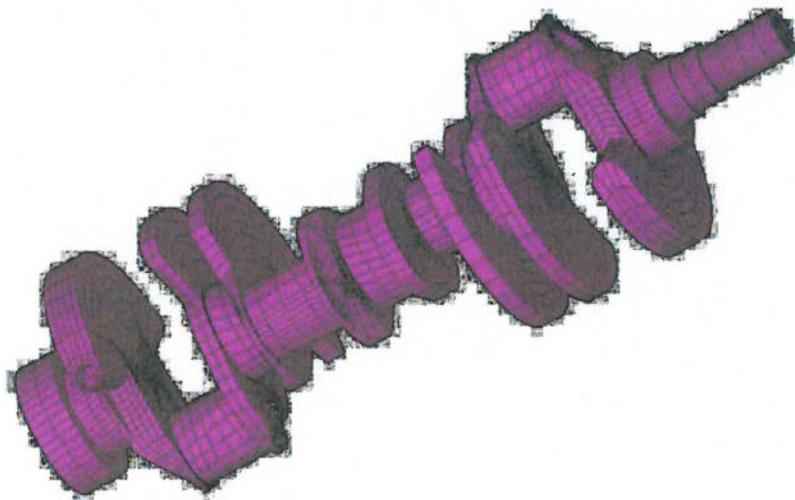


Figura 6.3: Exemplo de malha 3D estruturada, ICEM[®]

6.2. 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 9 e Apêndice A);

- Estudo convectivo da distribuição do **Halon-1301** no compartimento da UAP.

As malhas, para os estudos acima, foram geradas utilizando-se um software disponível comercialmente, chamado ICEM[®].

As malhas geradas são não-estruturadas e composta 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 o mesmo padrão sem nenhuma recomendação especial.

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[®].

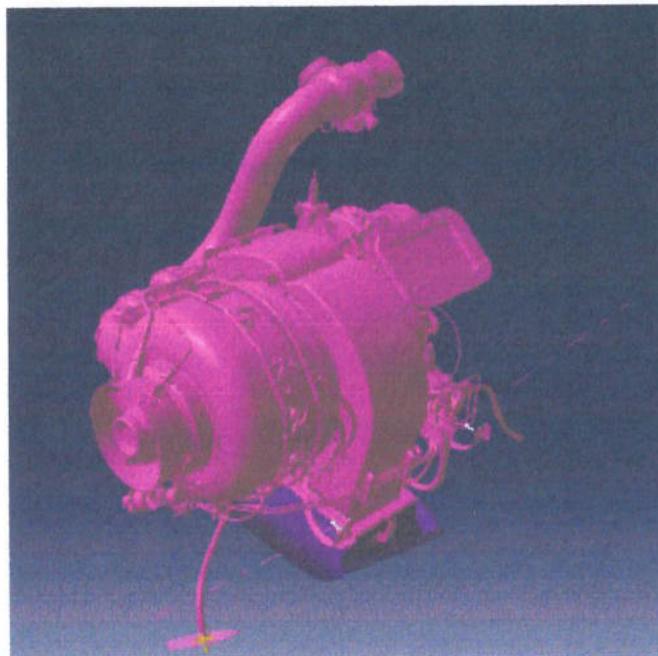


Figura 6.4: UAP original

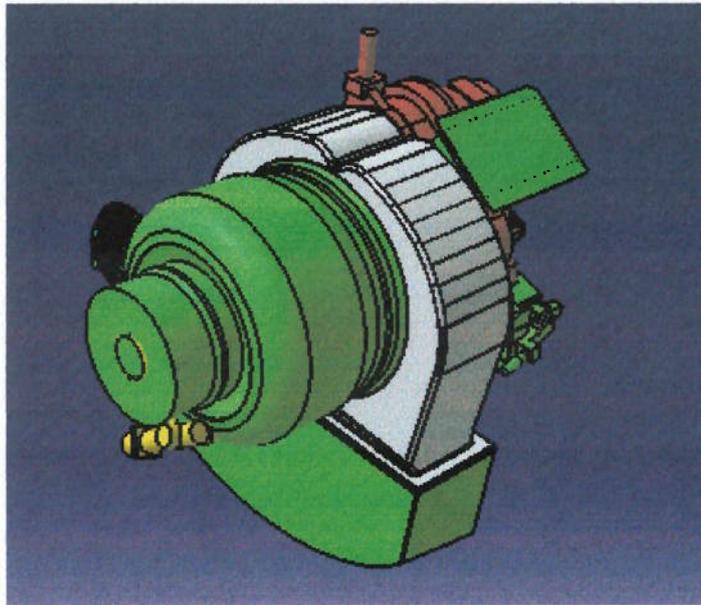


Figura 6.5: UAP modificado para estudo de CFD

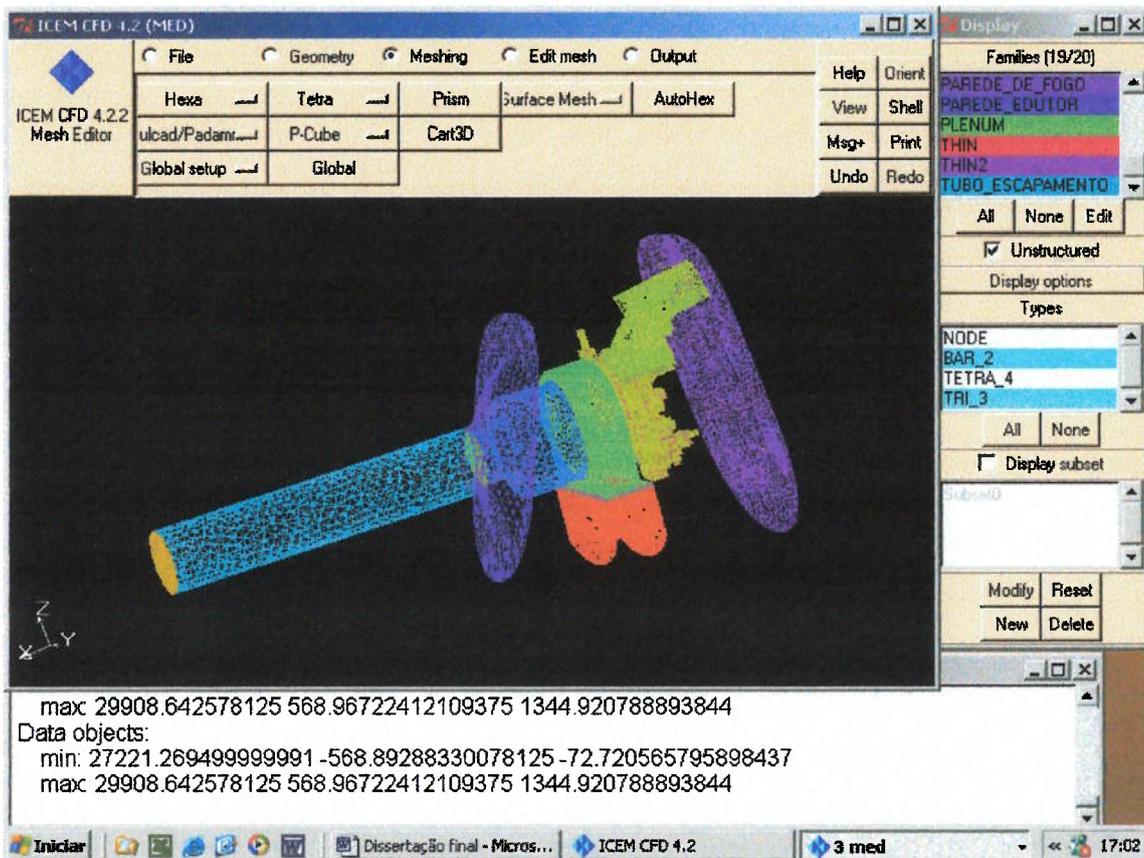


Figura 6.6: Malha da UAP gerada no ICEM®

6.3. 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.

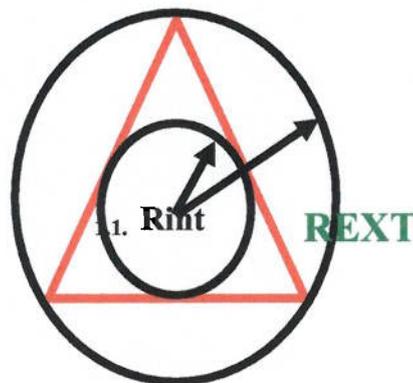


Figura 6.7: Raio inscrito e circunscrito de um triângulo eqüilátero.

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

$$Qualidade = \frac{\left(\frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)}{\left(\frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)_{ideal}} \quad (6.1)$$

Geralmente a primeira malha gerada pode ser melhorada através de tratamentos específicos dos triângulos, através de um comando chamado “smooth”. No exemplo abaixo, retirado do Tutorial do Icem, observamos a primeira malha gerada e a mesma após este tratamento:

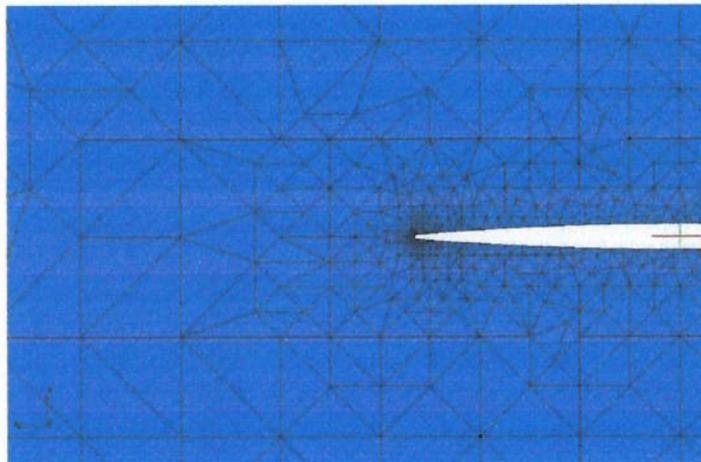
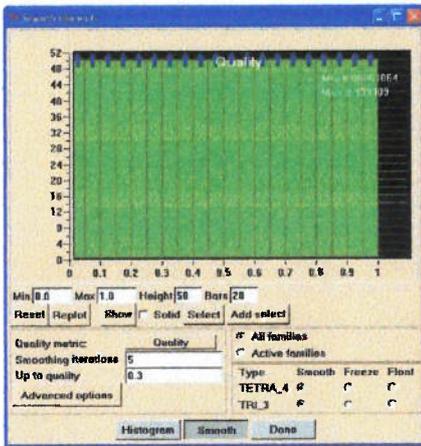


Figura 6.8: Histograma e malha sem tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.

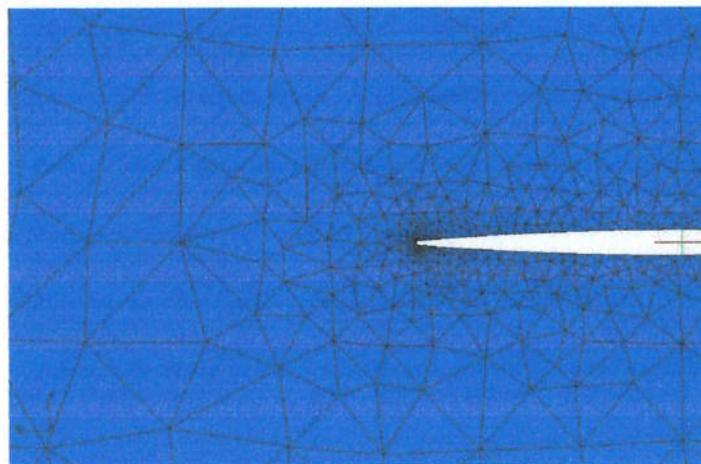
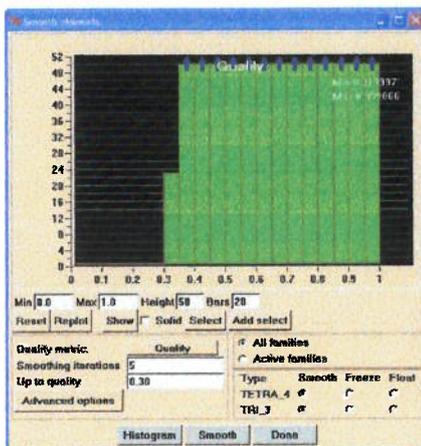


Figura 6.9: Histograma e malha com tratamento “smooth”, ICEM Tutorial.

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 6.10.

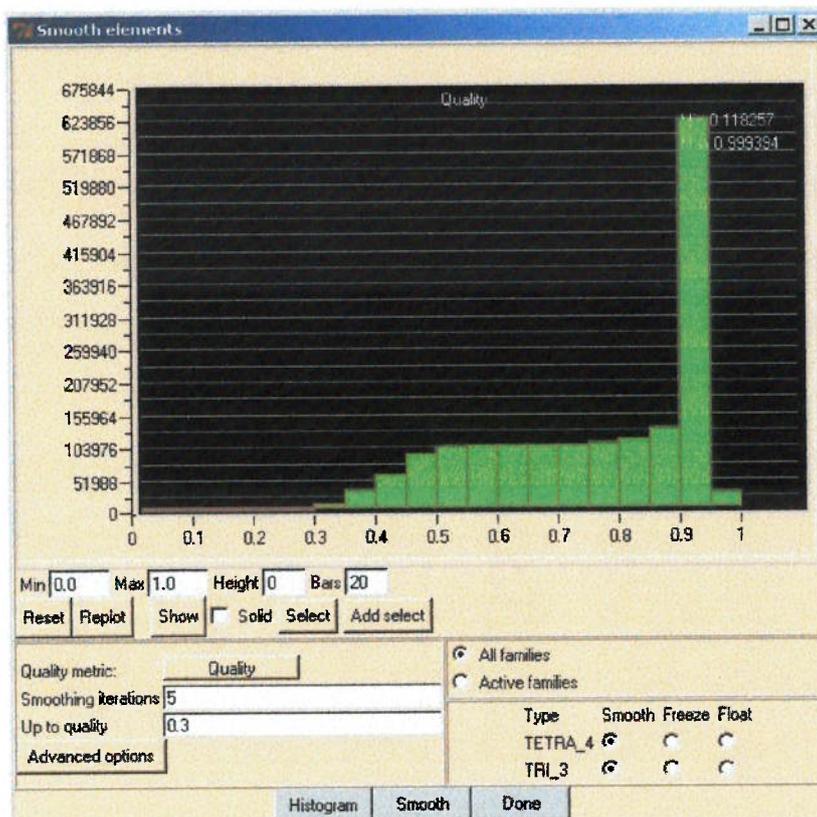


Figura 6.10: Histograma de qualidade da malha do compartimento do UAP

A máquina originalmente possui muitos detalhes e, portanto ela foi simplificada de modo a se manter os principais componentes, como mostrado nas figuras 6.4 e 6.5.

A malha volumétrica foi refeita no Tgrid[®] com o objetivo de inserir um pedaço de tubo na superfície de entrada do fluxo de massa de Halon-1301, pois o Fluent[®] não entende que o fluxo de massa já está na condição da garganta, i.e. Mach = 1; além do mais a malha foi adaptada durante o cálculo conforme as necessidades.

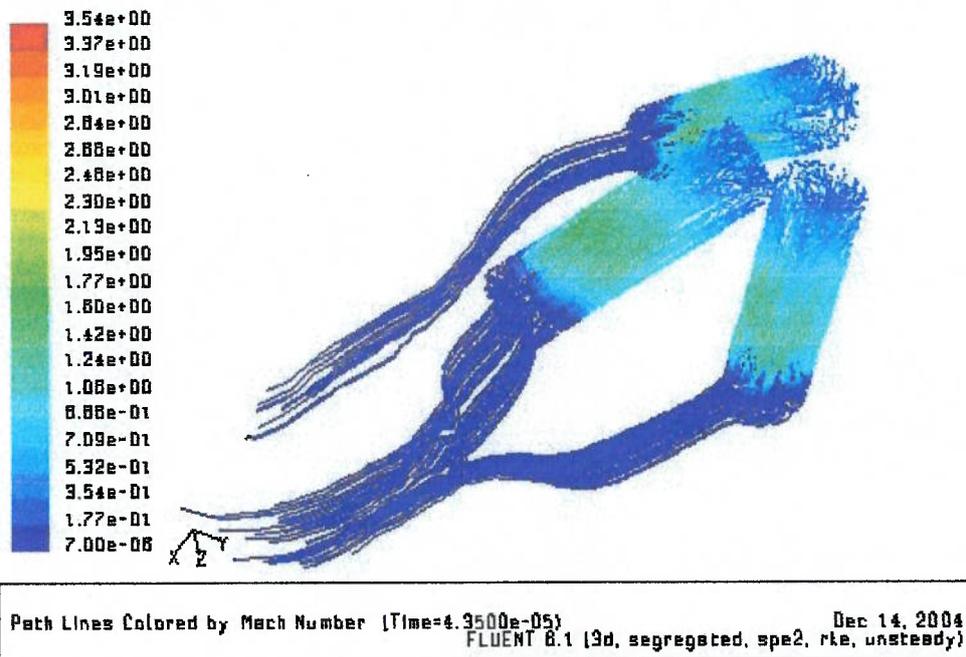


Figura 6.11: Condição de entrada de Halon: detalhe dos tubos superiores

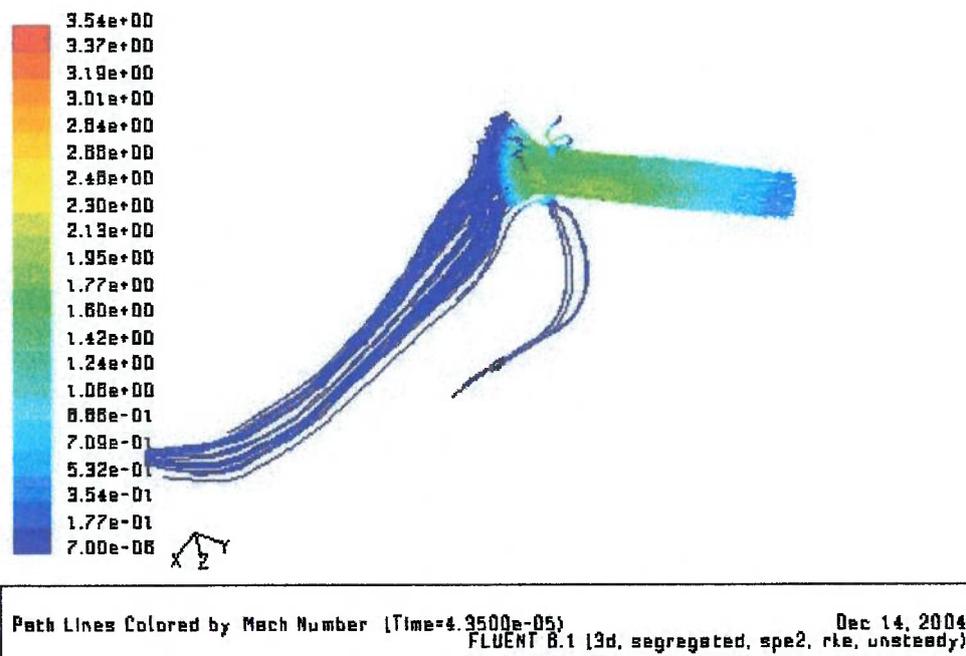


Figura 6.12: Condição de entrada de Halon: detalhe do tubo inferior

7. 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[®]; 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. 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. A malha define as fronteiras dos volumes de controle e não precisa estar relacionada a um sistema de coordenadas.

7.1. Equação de transporte

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

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\bar{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (7.1)$$

Em outras palavras:

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

A equação (7.1) é chamada de Equação de Transporte para a propriedade ϕ . O termo Γ representa a difusividade e o termo S_ϕ a fonte ou sorvedouro para o escalar ϕ .

Os próximos passos para a formulação do MVF são: a integração da equação (7.1) 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).

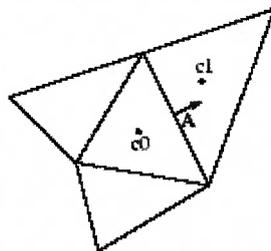


Figura 7.1: Modelo de célula centrada, Fluent® User's Guide

7.2. 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 7.4 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.

7.2.1. Método de solução

Há dois tipos de solução adotada 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®:

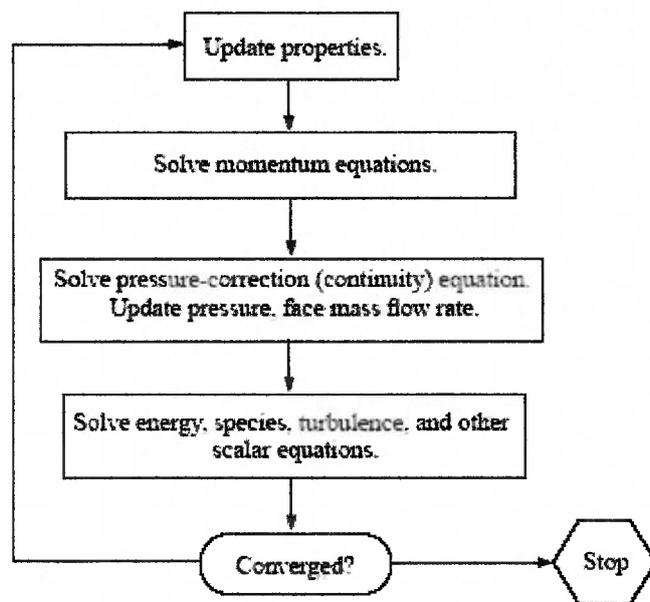


Figura 7.2: Método de resolução SEGREGATED, Fluent® User's Guide

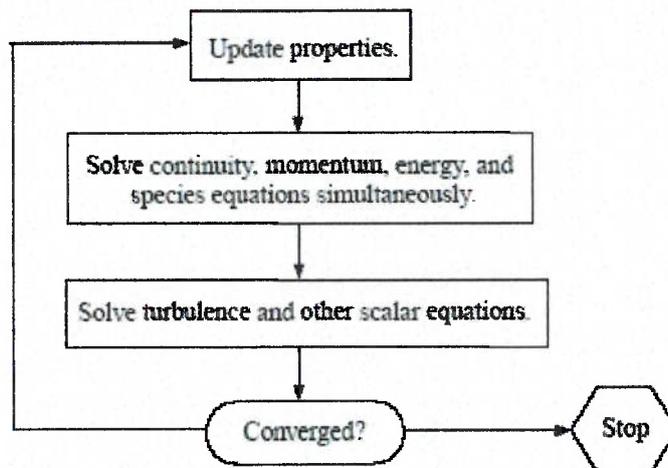


Figura 7.3: Método de resolução COUPLED, Fluent® User's Guide

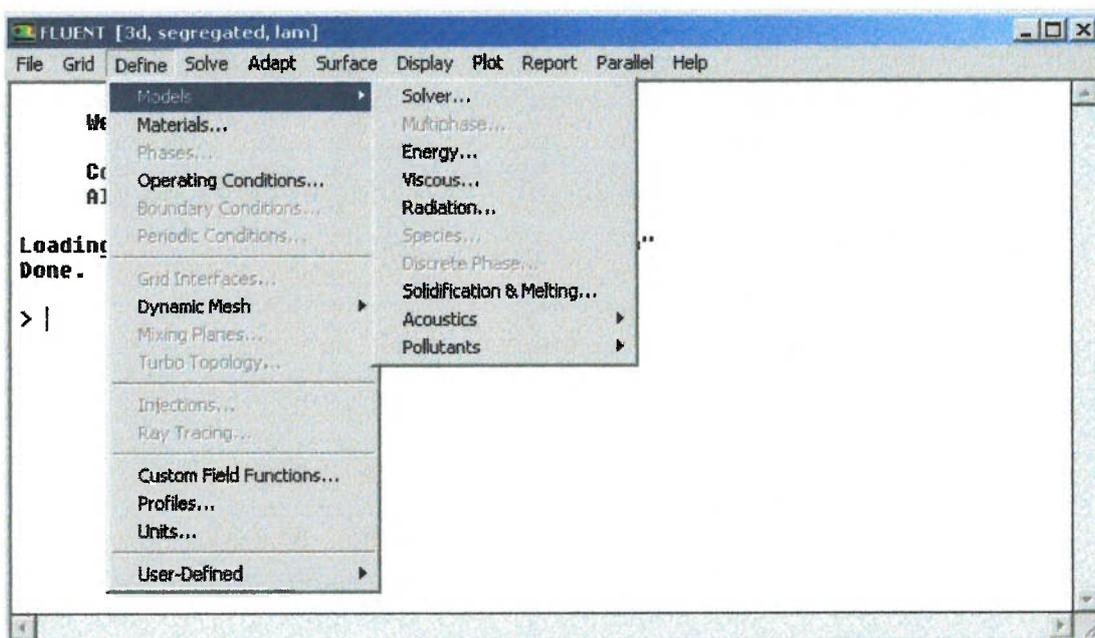


Figura 7.4: Menu DEFINE, Fluent®

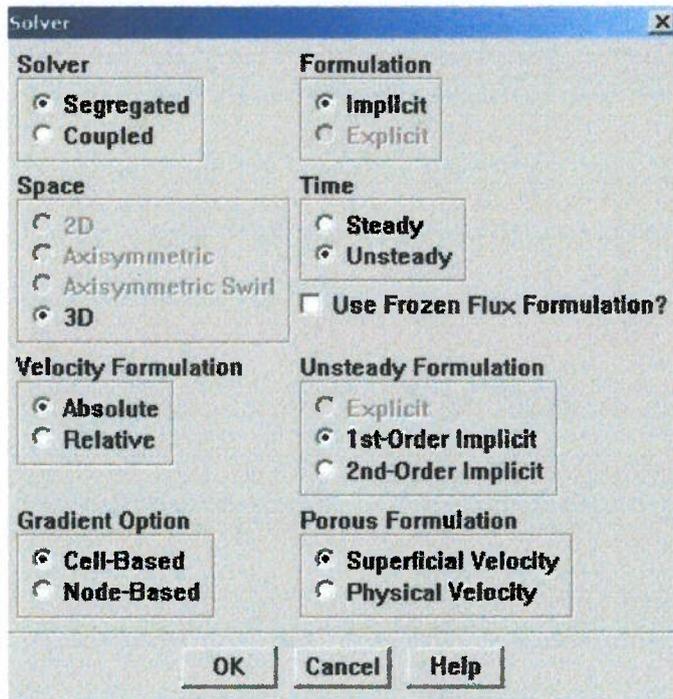


Figura 7.5: Menu SOLVER, Fluent®

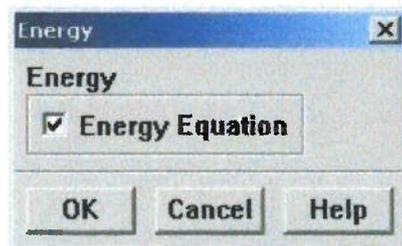


Figura 7.6: Menu ENERGY, Fluent®

O menu da figura 7.6 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.

7.2.2. Modelo de turbulência

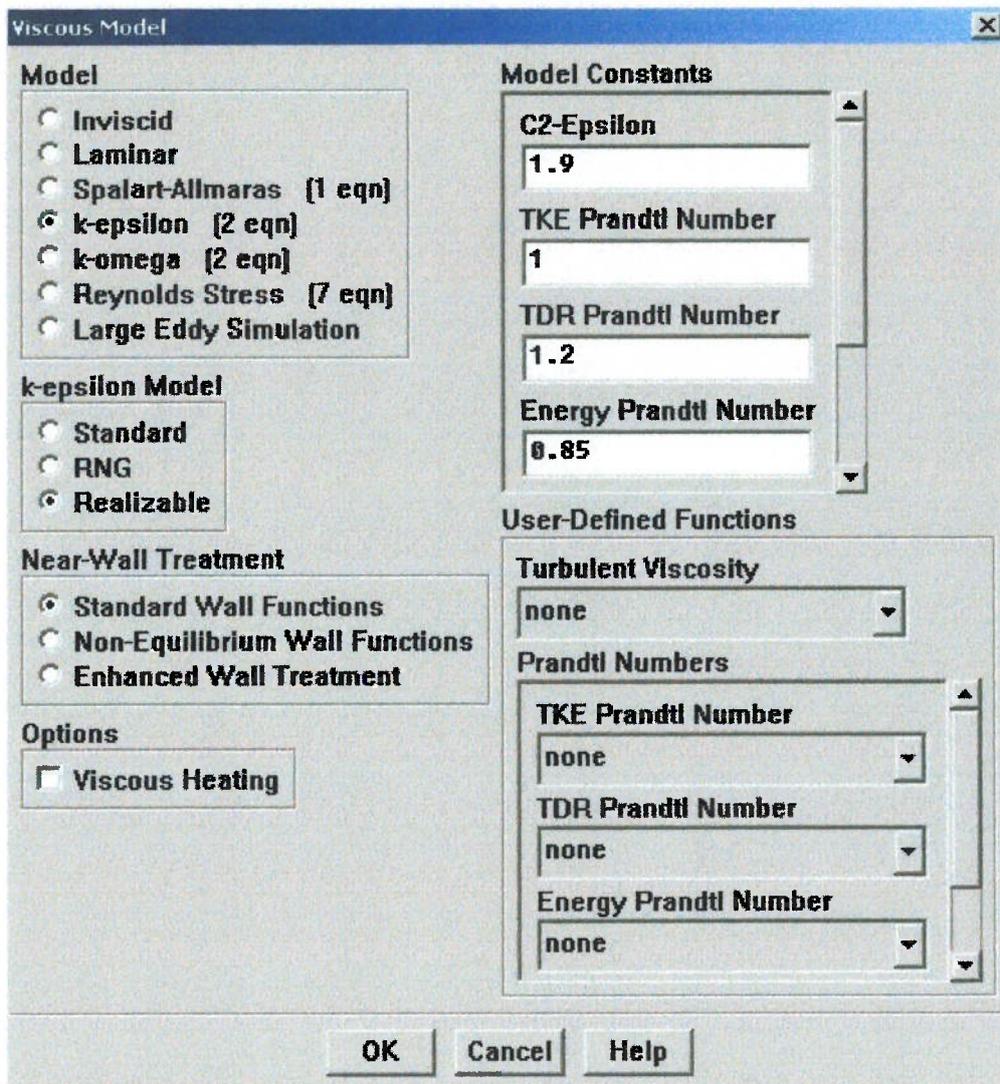


Figura 7.7: Menu VISCOUS, Fluent®

O modelo de turbulência adotado foi o K-epsilon; os outros parâmetros mostrados na figura 7.7 foram mantidos e são padrões do Fluent®.

Este modelo baseia-se na energia cinética turbulenta \mathcal{E} e na sua taxa de dissipação κ para o cálculo da viscosidade turbulenta μ_t , conforme a equação (7.3):

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (7.2)$$

Aonde C_μ é uma constante e vale 0,09.

A intensidade turbulenta I , que está relacionada às flutuações de velocidade, pode ser estimada através da equação (7.3), conforme o Fluent® User Guide (2002), a qual foi derivada empiricamente de fluxos em tubulações:

$$I = 0,16 \cdot (\text{Re})^{-1/8} \quad (7.3)$$

O comprimento característico de turbulência l , conforme o Fluent® User Guide (2002), 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 (7.4) extraído do Fluent® User Guide (2002):

$$l = 0,07 \cdot D_H \quad (7.4)$$

É possível estimar a taxa de dissipação turbulenta κ e a energia cinética turbulenta ε através das equações (7.5) e (7.6) respectivamente:

$$\kappa = \frac{3}{2} \cdot (V \cdot I)^2 \quad (7.5)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \cdot \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (7.6)$$

Desta maneira, as equações de transporte do modelo κ - ϵ podem ser resolvidas para cada condição de contorno, a saber: entrada de ar e halon-1301 e saída.

7.2.3. Acoplamento pressão-velocidade

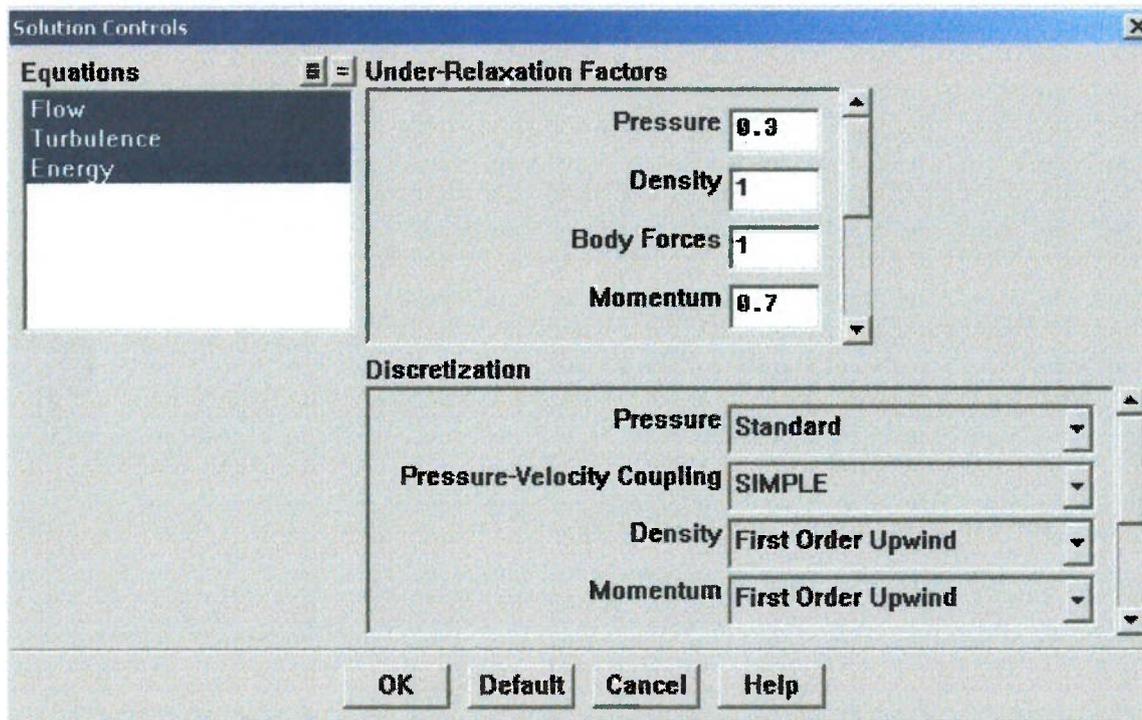


Figura 7.8: Menu SOLUTION CONTROL, Fluent®

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).

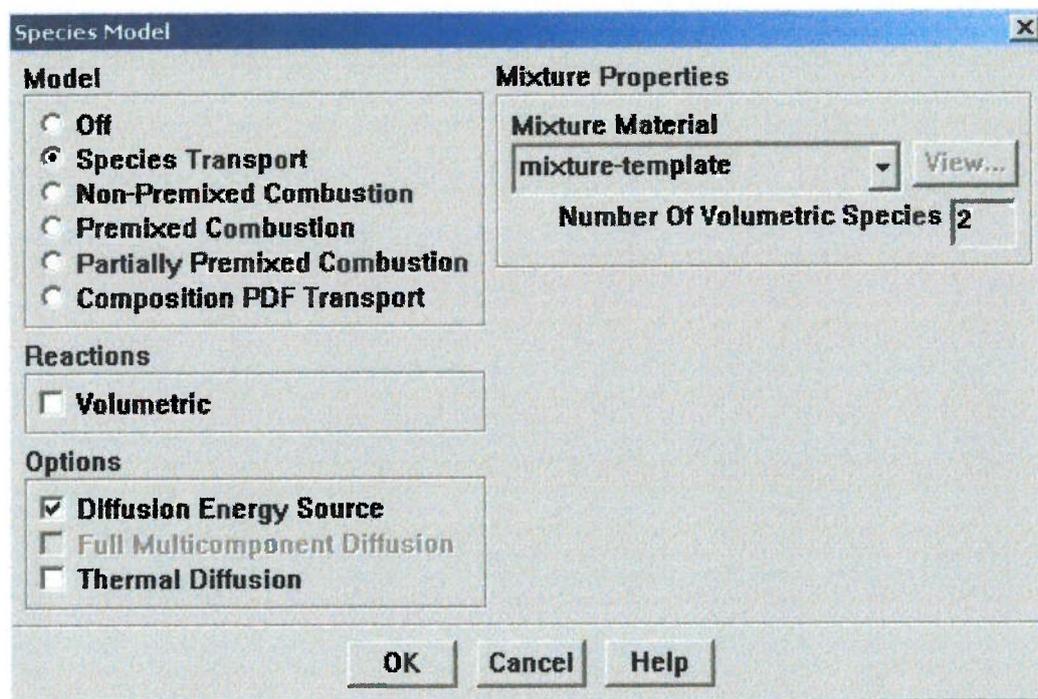


Figura 7.9: Menu SPECIES, Fluent®

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

7.3. Configurações

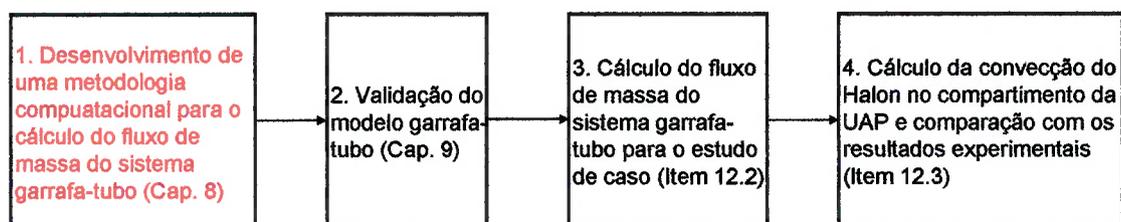
MODELO	TESTE 175	UAP
SOLUÇÃO	SEGREGADA	SEGREGADA
EQ. ENERGIA	HABILITADA	HABILITADA
TURBULÊNCIA	κ - ϵ	κ - ϵ
ACOPLAMENTO	SIMPLE	SIMPLE (Ar)
PRESSÃO-VELOCIDADE		PISO (Halon-1301)
ESPÉCIE	NÃO	SIM
TEMPO	NÃO-PERMANENTE	NÃO-PERMANENTE

Tabela 7.1: Configurações de cálculo para o Fluent®

8. 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 10.



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.

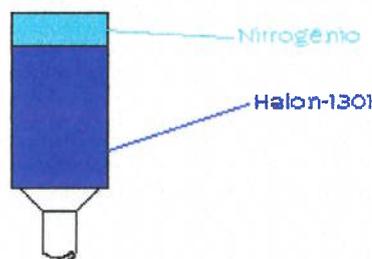


Figura 8.1: Representação da garrafa descarregando para a atmosfera

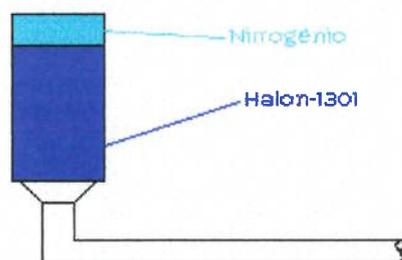


Figura 8.2: Representação da garrafa descarregando para uma tubulação

8.1. 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 local	Pascal
Pressão manométrica da garrafa	Pascal
Temperatura da garrafa à pressão atmosférica local	Celsius
Temperatura ambiente	Kelvin
Massa inicial do Halon 1301 dentro da garrafa	kilograma
Volume da garrafa	metro ³
Comprimento equivalente da tubulação	metro

Tabela 8.1: Dados de entrada

O comprimento equivalente da tubulação foi calculado conforme o método descrito pelo NFPA. Este método será detalhado no item 8.6.

8.2. 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 kJ/kg.K
Massa molecular do Halon	148.91 g
Massa molecular do Nitrogênio	28.02 g
Constante R para o Halon	55,84 kJ/kg.K
Constante R para o Nitrogênio	296,73 kJ/kg.K
Rugosidade relativa	1×10^{-6}

Tabela 8.2: Constantes ambientais e físicas

8.3. Densidade atmosférica local

A densidade atmosférica local é calculada conforme o Aeronautical Vestpocket Handbook (1996):

$$\rho_{atm} = 6,27 \times 10^{-3} \frac{P_{atm}}{1,8 \times T_{atm} - 0,27} \quad (8.1)$$

Sendo a pressão atmosférica local P_{atm} em polegadas de mercúrio (pol.Hg), a temperatura ambiente local T_{atm} em °R e a densidade atmosférica ρ_{atm} em Kg/m³.

8.4. 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, e sendo assim foram adicionados ao cálculo dois 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 adicionados na formulação 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 8.3 compara os valores utilizados neste trabalho com os usados por outros autores.

Jusante	Atmosfera	Tubulação	Atmosfera	Tubulação	Atmosfera	Tubulação
Montante	Yang		Netto		Modelo Proposto	
Garrafa	0,60	-	0,61	0,61	0.60*	0,61
Tubulação	-	-	0,82	-	0,82	-

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

Tabela 8.3: 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 bases nos resultados, que para descargas da tubulação para a atmosfera os coeficientes descritos por Netto (1996) 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 (8.2).

$$C_d = (4,08 \cdot P_g^2 - 54,67 \cdot P_g) \cdot 10^{-4}, \text{ sendo } P_g \text{ a pressão em atm} \quad (8.2).$$

Sendo o intervalo atualmente testado: $357031 < P_g < 376266$; P_g [atm].

8.5. Cálculo das condições iniciais

8.5.1. 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 8.3). Pelo fato do modelo proposto não considerar a dissolução dos componentes constituintes da mistura, este pico não é encontrado nos resultados.

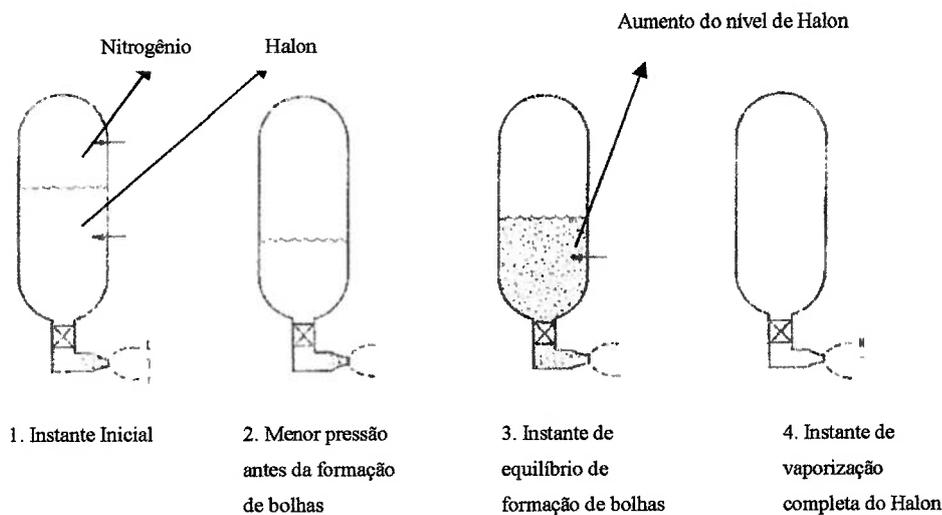


Figura 8.3: Fases de expansão da garrafa conforme Elliot *et al.* (1984).

A inexistência no modelo teórico proposto da dissolução dos componentes não compromete os resultados finais, pois o tempo de exaustão continua próximo dos dados reais demonstrando que o fluxo teórico está adequado 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.

8.5.2. 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 8.5.1.

A temperatura da garrafa é determinada pela condição atmosférica local 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 8.4: 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).

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.

8.5.3. 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 (8.1), 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).

8.6. 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 8.4, 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.

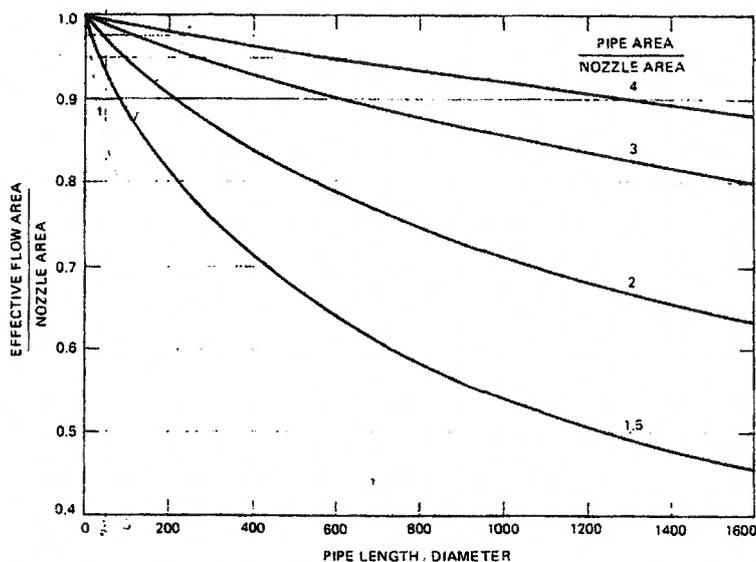


Figura 8.4: Fator de correção de área para o bocal conforme Elliot *et al.* (1984).

8.7. Modelagem do escoamento da garrafa

À medida que o Halon-1301 escoar 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, contanto que os coeficientes de descarga sejam utilizados.

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 (8.3), 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).

$$P\bar{V} = m\bar{R}T \quad (8.3)$$

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 atmosférica; já no caso de saída subsônica a densidade considerada é igual à do Halon-1301 dentro da garrafa. 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, líquido na garrafa, pois compensa a premissa do modelo proposto de vaporização instantânea e completa.

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 8.5.

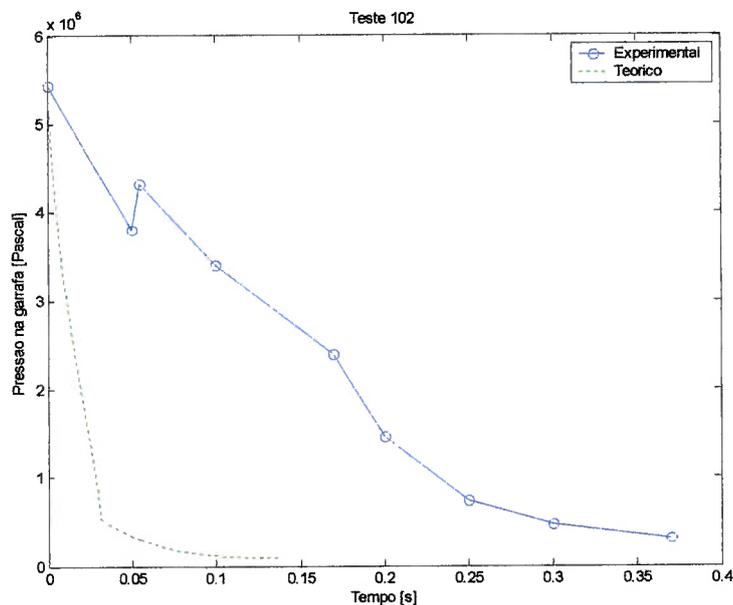


Figura 8.5: Teste 102 utilizando-se a densidade do Halon-1301 líquido para escoamento chocado

Enquanto o Halon-1301 escoar da garrafa a sua massa é atualizada diminuindo-se do fluxo de massa que sai (5.41) da garrafa; o nitrogênio só escoar quando a massa do Halon-1301 torna-se nula, pois é considerado que o nitrogênio “empurra” o Halon-1301.

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:

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

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:

$$de = -\int h_s dm_s \quad (8.4)$$

Conforme Modell e Reid (1974), a energia interna de um gás real pode ser calculada conforme a equação (8.5):

$$E = mc_v \int dT \quad (8.5)$$

Lembrando-se da relação de calores específicos:

$$\bar{R} = c_p - c_v \quad (8.6)$$

Substituindo-se as equações (5.10), (8.5) e (8.6) em (8.4) obtemos:

$$mc_v \int dT + Tc_v \int dm = (e + P\forall) \int dm \quad (8.7)$$

Simplificando obtemos:

$$\frac{c_v}{R} \int \frac{dT}{T} = \int \frac{dm}{m} \quad (8.8)$$

Calculando-se a integral e simplificando a partir da equação (8.6), tem-se:

$$\frac{T_{t+\Delta t}}{T_t} = \left(\frac{m_{t+\Delta t}}{m_t} \right)^{\gamma-1} \quad (8.9)$$

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.

8.8. 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 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 para o comprimento atingido no passo de tempo (para o instante inicial este valor é zero) 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 10 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 relação de calores específicos γ e a viscosidade ν na tubulação são calculadas a partir da 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 transônico e a pressão da tubulação seja menor que a atmosférica, ou de

uma onda de expansão de Prandtl-Meyer quando o escoamento é transônico e a pressão da tubulação é maior que a atmosférica.

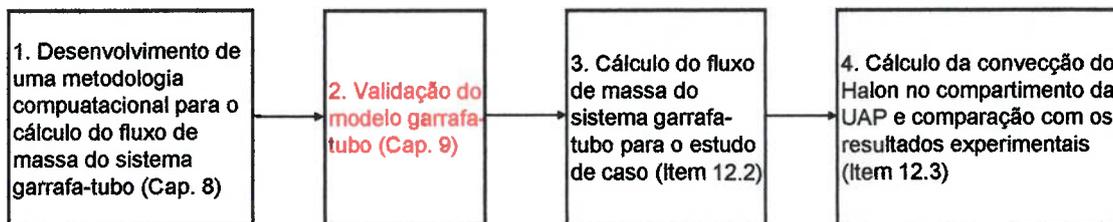
No caso da onda de expansão de Prandtl-Meyer, considera-se que o ângulo de expansão é de 45° , caso este ângulo não resolva a equação (5.32) ele é diminuído gradativamente até que a função encontre a sua raiz.

Para maiores detalhes do funcionamento do código, favor referir-se ao capítulo 10.

9. VALIDAÇÃO DO MODELO GARRAFA-TUBO

9.1. 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.

9.2. Comparação dos resultados

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

9.2.1. 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 m³
- Área de saída da garrafa = 500 mm²

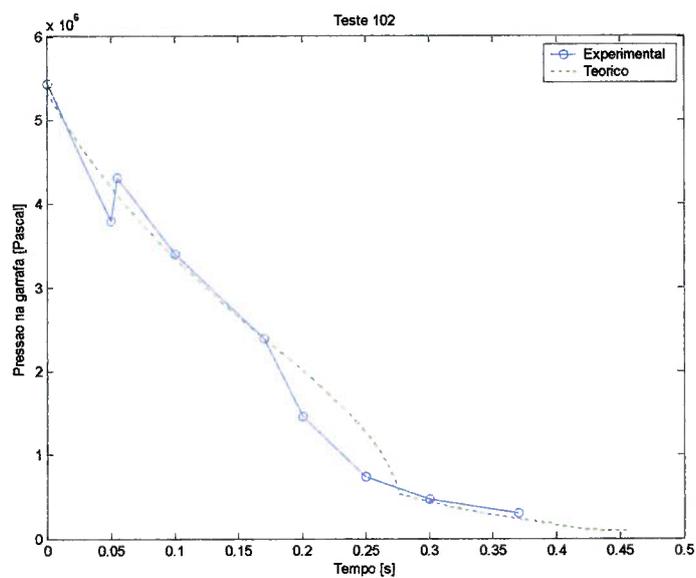


Figura 9.1: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 102

9.2.2. 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 m³
- Área de saída da garrafa = 77 mm²

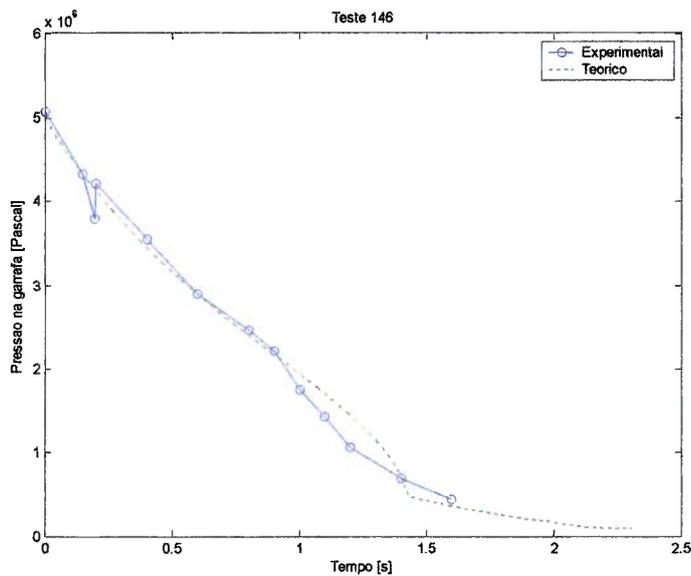


Figura 9.2: Comparação do modelo com os resultados experimentais de pressão na garrafa do teste 146

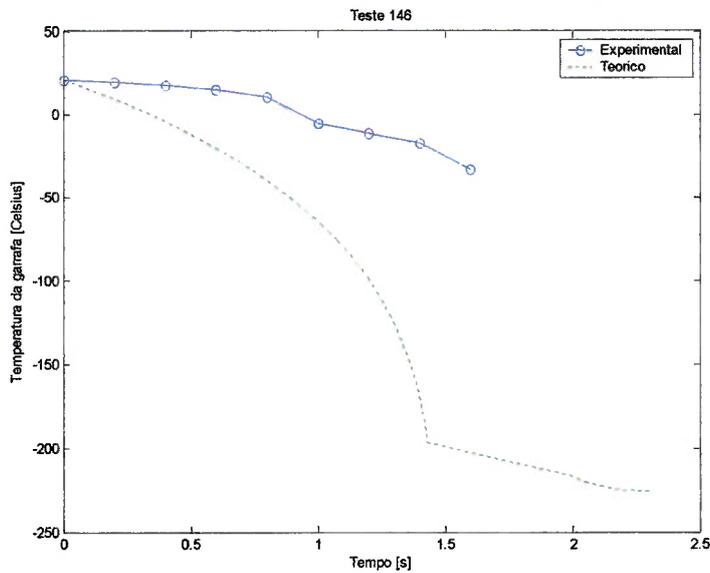


Figura 9.3: Comparação do modelo com os resultados experimentais da temperatura da garrafa do teste 146

9.2.3. 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 m³
- 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

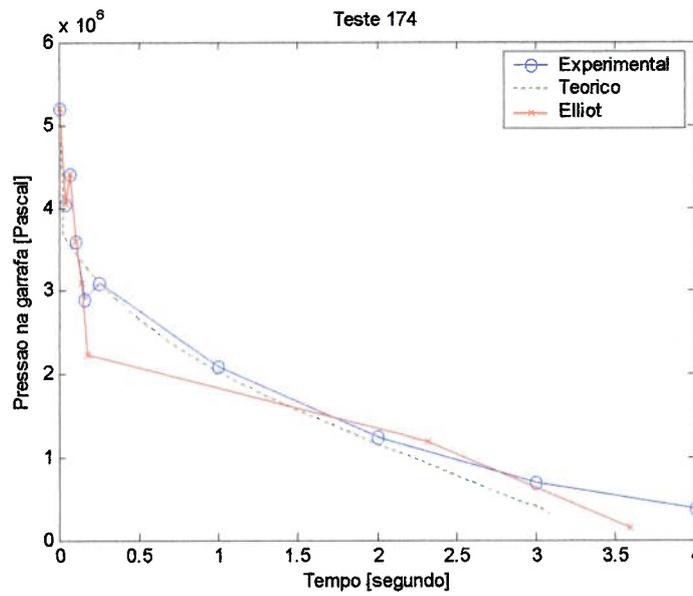


Figura 9.4: Comparação do modelo com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na garrafa do teste 174

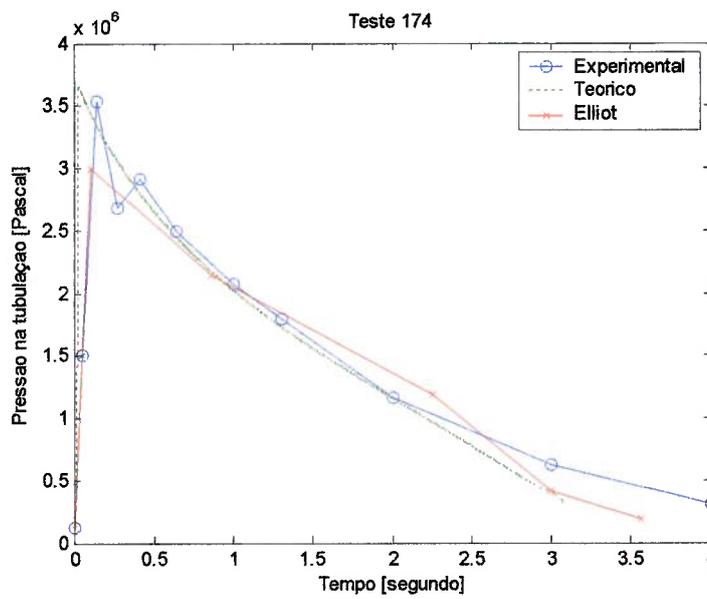


Figura 9.5: Comparação da pressão na tubulação com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na tubulação do teste 174

9.2.4. 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 m³
- 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

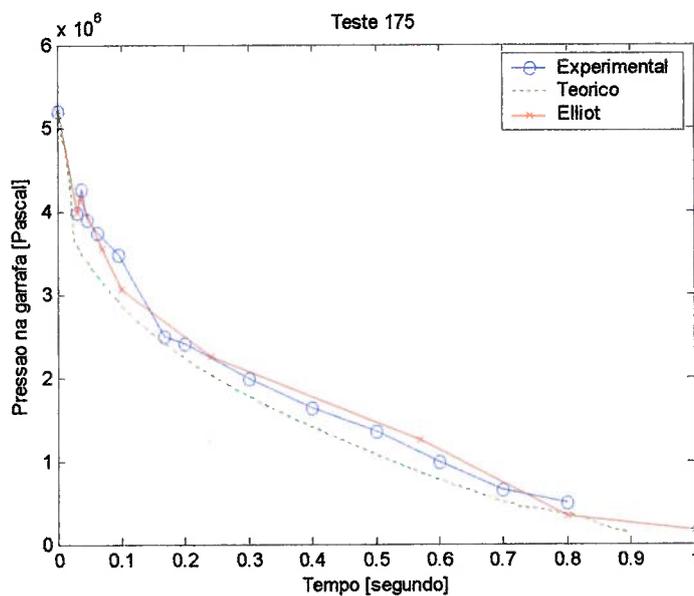


Figura 9.6: Comparação do modelo com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na garrafa do teste 175

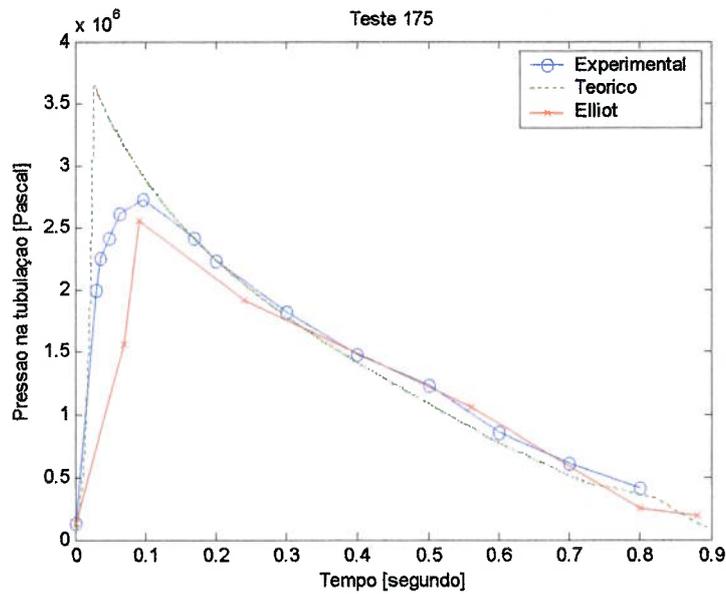


Figura 9.7: Comparação do modelo com os resultados experimentais e de Elliot da pressão na tubulação do teste 175

9.2.5. 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 m³
- 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

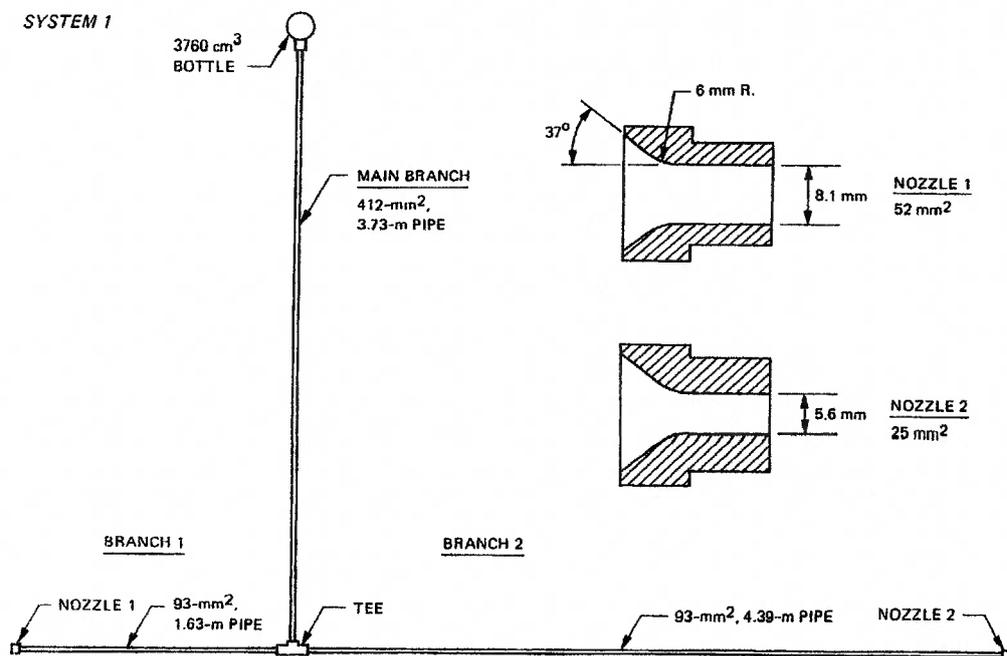


Figura 9.8: Esquemático do teste 293 conforme Elliot *et al.* (1984).

Este teste tem a particularidade de ter sido efetuado com uma tubulação com três ramos de comprimentos diferentes, como mostrado na figura 9.8. O método utilizado para a determinação da tubulação equivalente é o descrito no item 8.6.

Os gráficos das pressões, temperaturas, Reynolds, etc não estão plotados, 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 8.6.

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 8.6 para o cálculo da tubulação equivalente é adequada.

Curiosamente, como mostrado nas figuras 9.9 e 9.10, 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, o que indica que os resultados de fluxo de massa experimentais, mostrado nas figuras 9.11 e 9.12, são na realidade um pouco mais baixos, o que se aproxima dos valores calculados pelo modelo proposto.

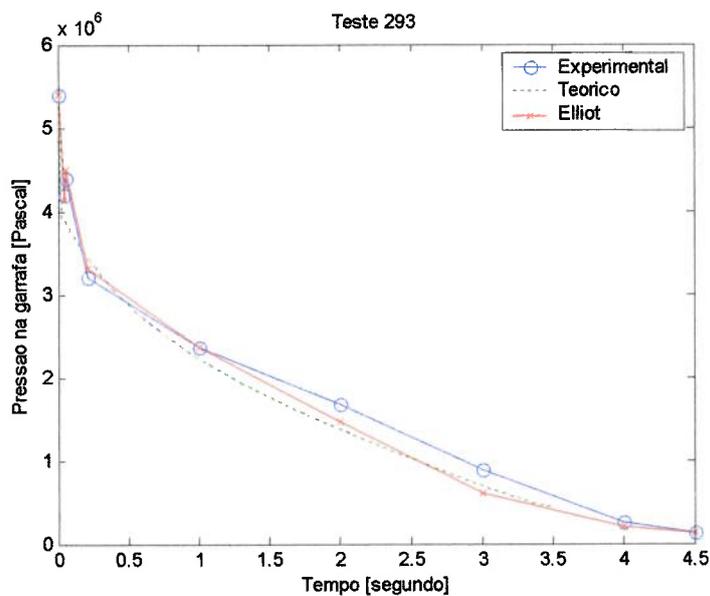


Figura 9.9: Comparação da pressão da garrafa do teste 293 conforme Elliot *et al.* (1984).

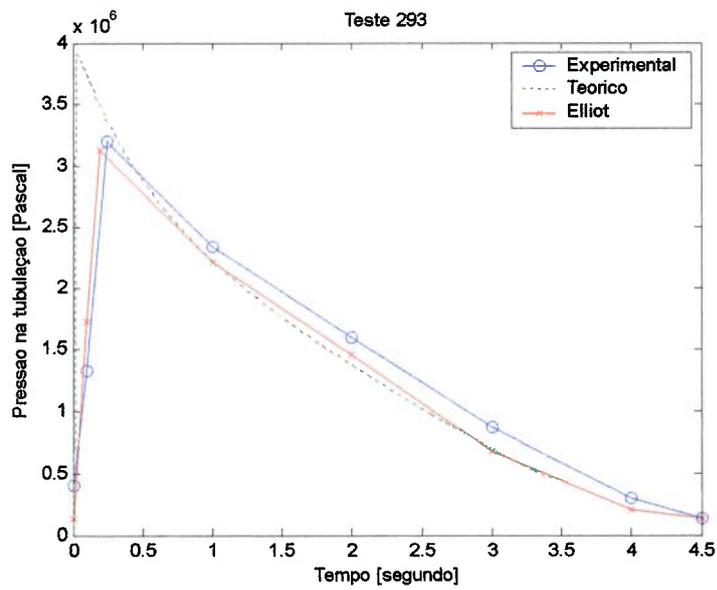


Figura 9.10: Comparação da pressão da tubulação do teste 293 conforme Elliot *et al.* (1984).

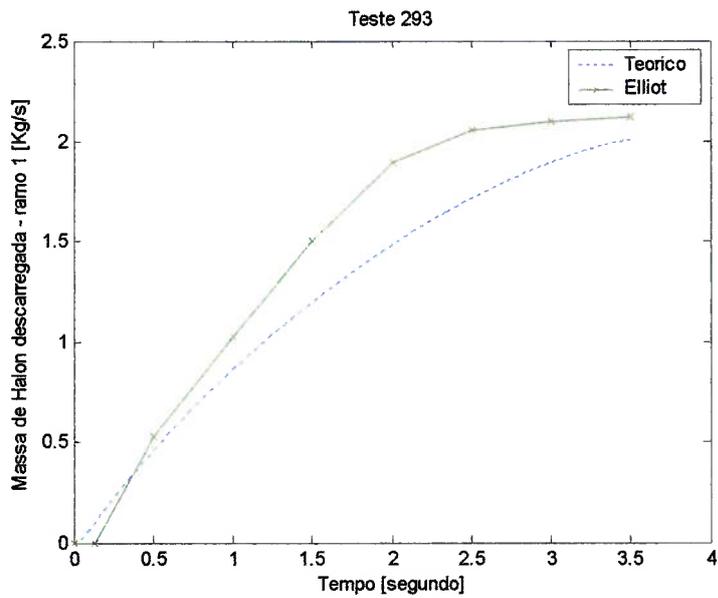


Figura 9.11: Massa de Halon descarregada no ramo 1 comparada com os resultados teóricos de Elliot *et al.* (1984).

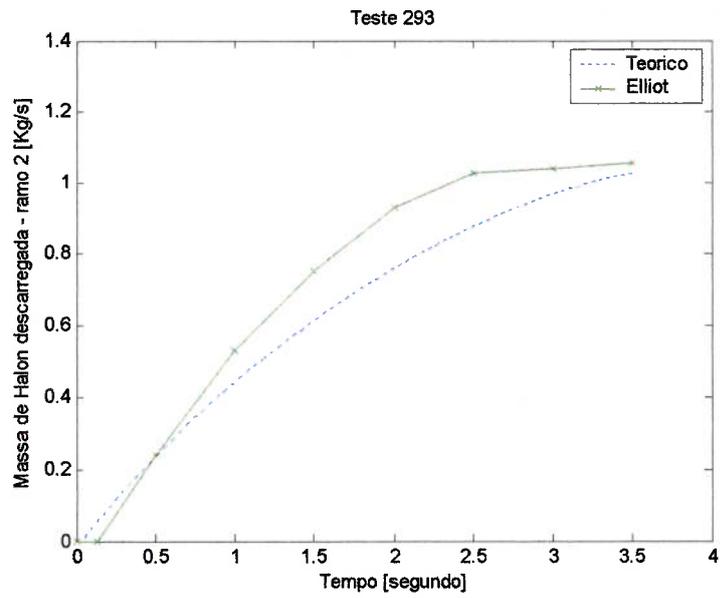


Figura 9.12: Massa de Halon descarregada no ramo 2 comparada com os resultados teóricos de Elliot et al. (1984).

10. DIAGRAMA DE BLOCOS-MODELO GARRAFA-TUBO

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

10.1. Definição do estado inicial da garrafa

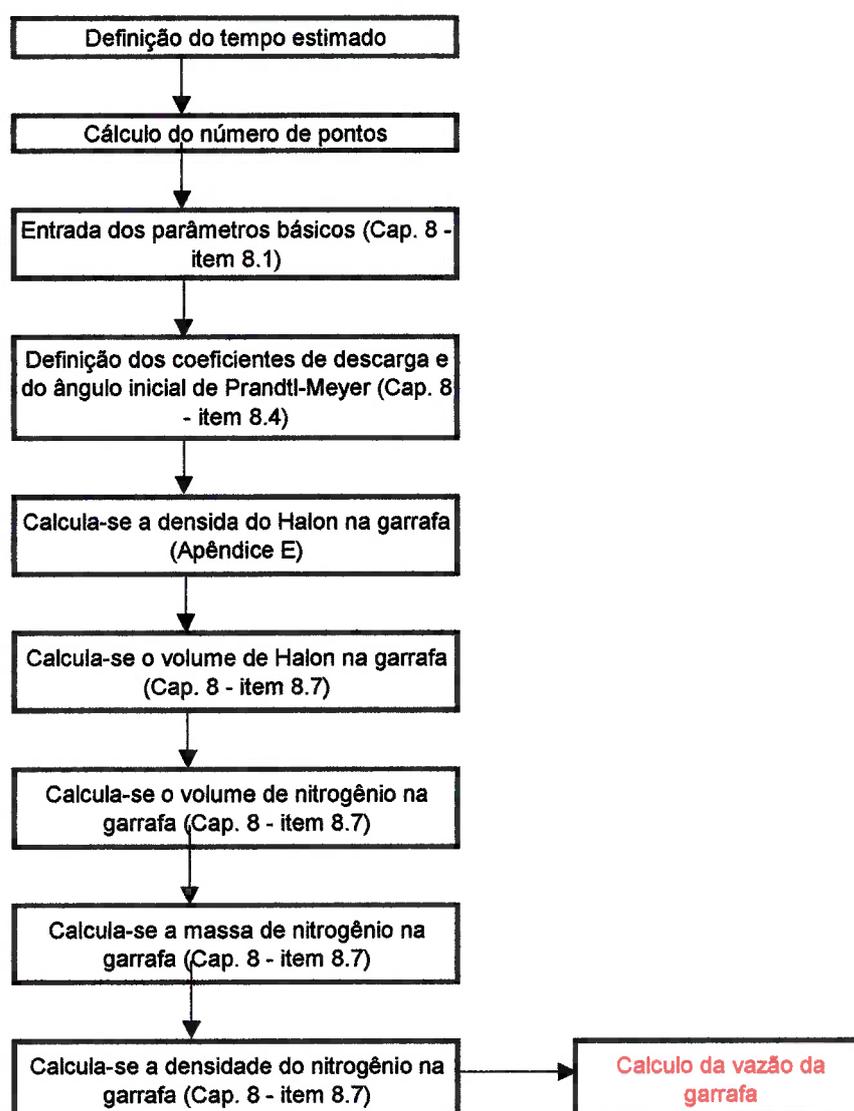


Figura 10.1: Algoritmo 1/4

10.2. Cálculo da vazão da garrafa

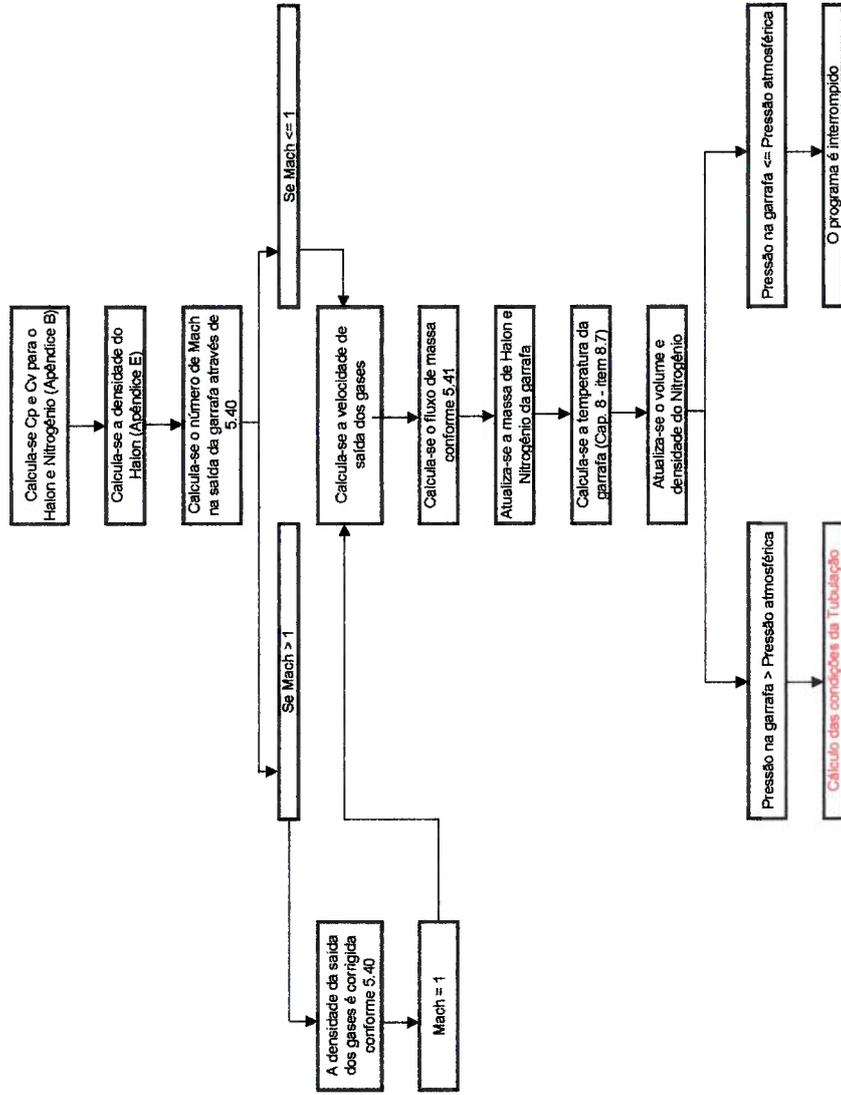


Figura 10.2: Algoritmo 2/4

10.3. Loop de cálculo do fator de atrito e de Fanno

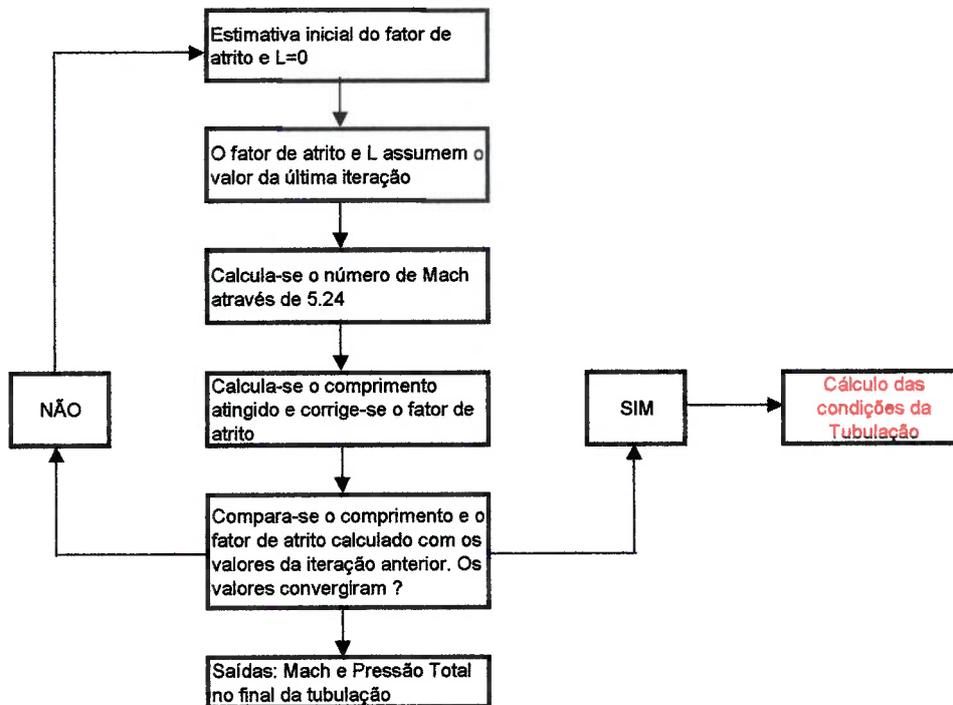


Figura 10.3: Algoritmo 3/4

10.4. Cálculo das condições da tubulação

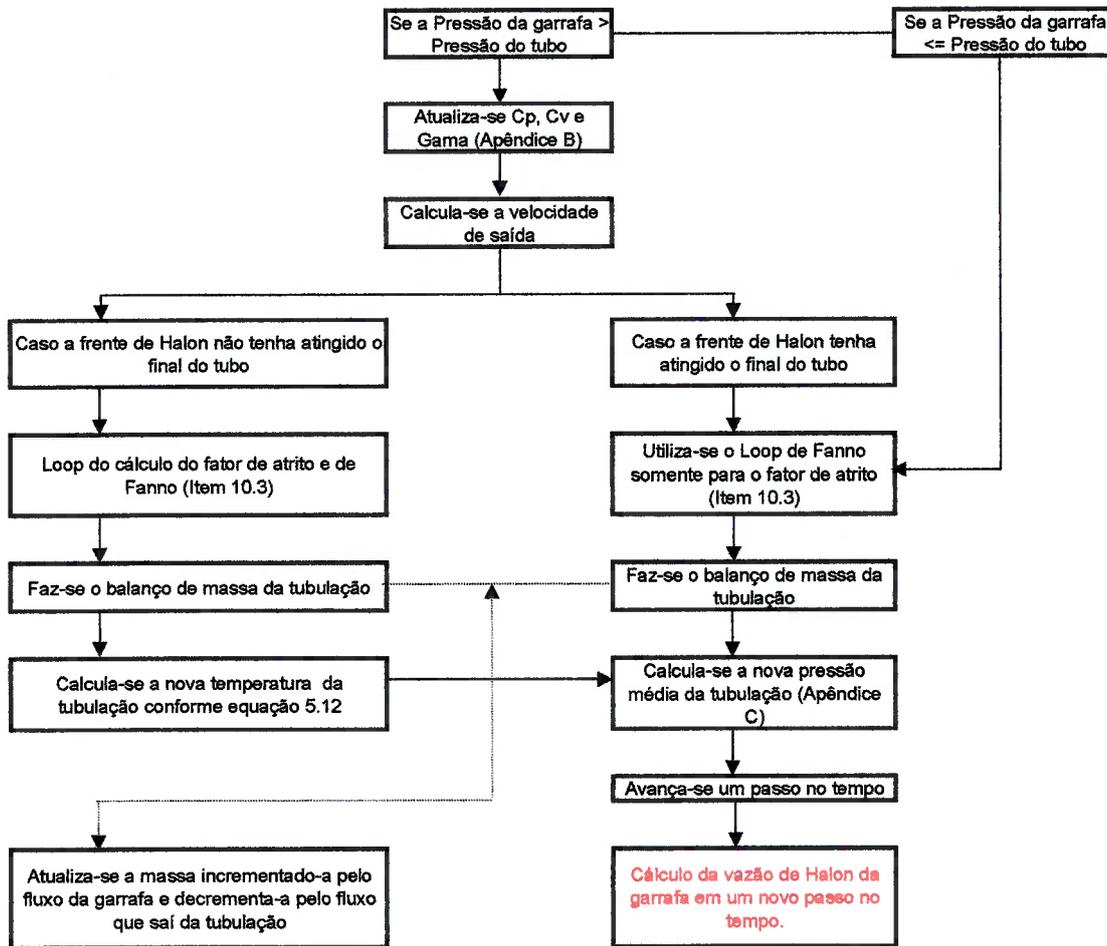


Figura 10.4: Algoritmo 4/4

11. 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 8.4 são utilizados.

Conforme descrito no capítulo 6, foi feita uma malha para estudar a descarga do Halon-1301 no sistema garrafa-tubo. As condições de temperatura e pressão iniciais foram as mesmas, 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 feitos somente comparações do processo físico.

Quando a garrafa dispara a frente de Halon-1301 caminha a $Mach=1$ (Figuras 11.1, 11.2 e 11.3) até atingir o final da tubulação, durante este percurso a pressão na tubulação aumenta gradativamente fazendo com que o Mach na saída garrafa-tubo (Figura 11.3 e 11.5) 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 (Figura 11.3 e 11.6) e o escoamento na tubulação permanece supersônico (Figura 11.7) tornando-se subsônico posteriormente; o fluxo permanece chocado até que não haja pressão suficiente a montante do bocal para manter esta condição. Nota-se 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 11.8).

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 9.2.5). 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.

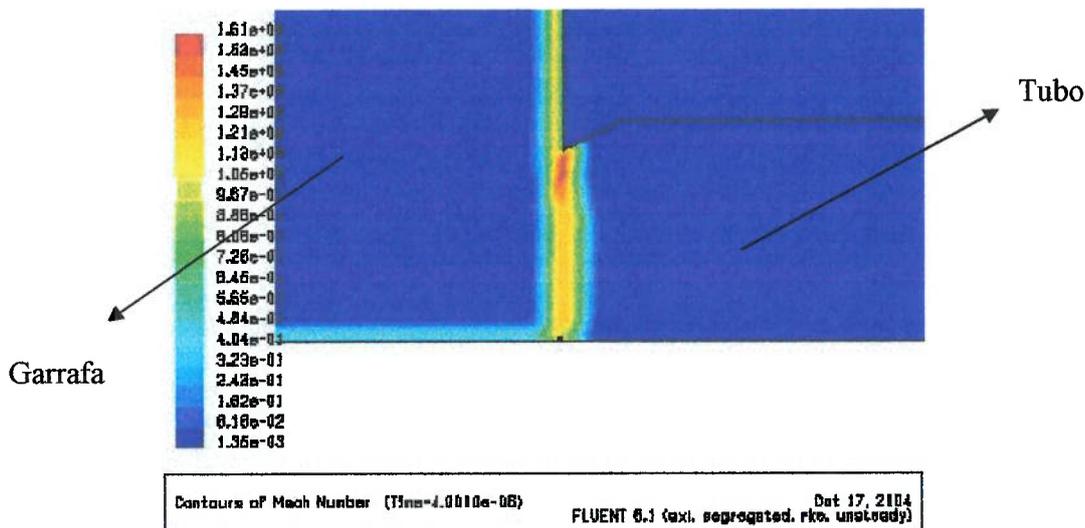


Figura 11.1: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175 no início do escoamento, Fluent®

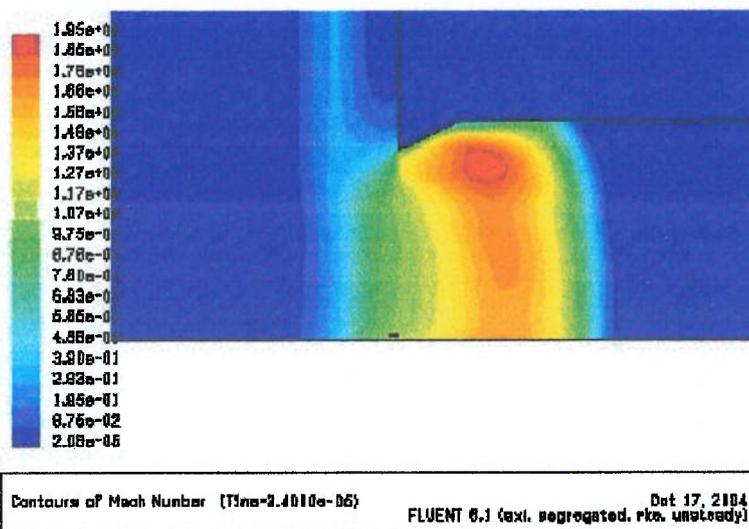


Figura 11.2: Mach na frente de Halon-1301 para o teste 175, Fluent®.

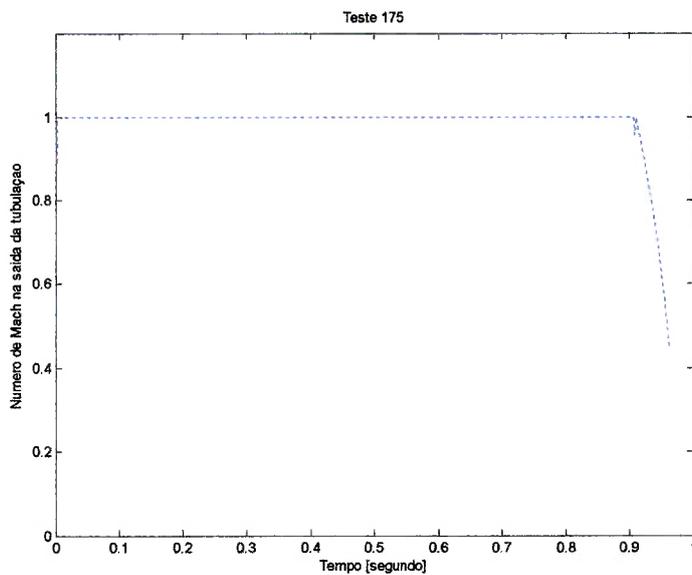


Figura 11.3: Mach calculado na frente de Halon-1301 para o teste 175.

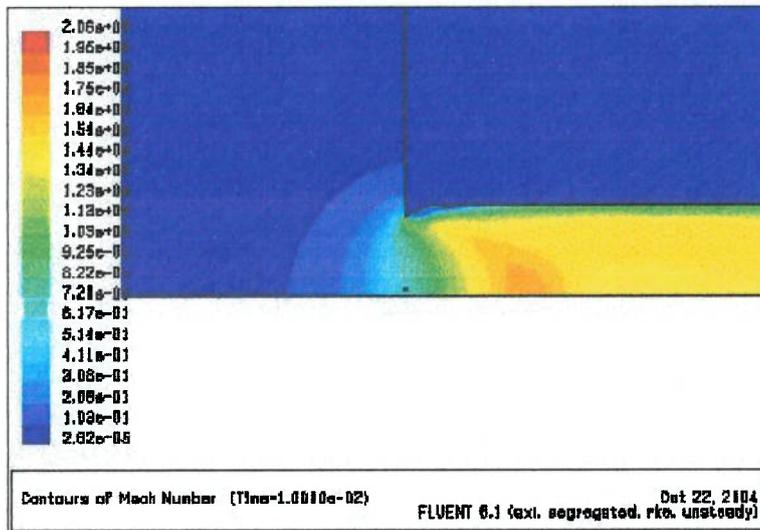


Figura 11.4: Mach na saída garrafa-tubo para o teste 175, Fluent®

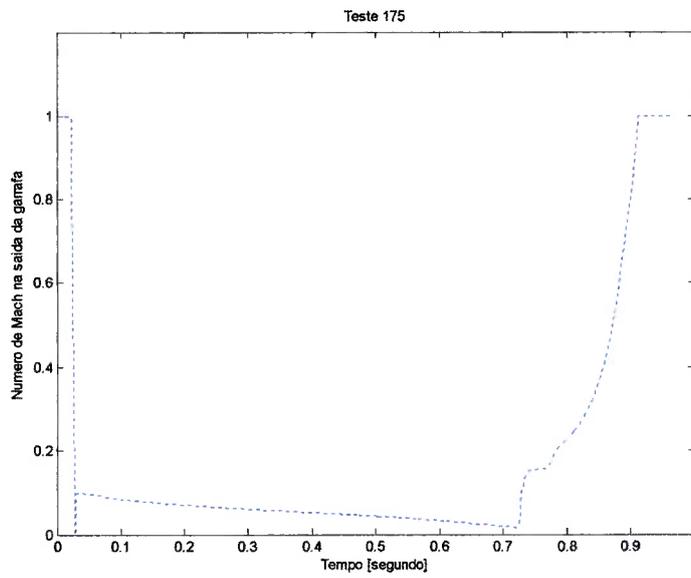


Figura 11.5: Mach calculado na saída garrafa-tubo para o teste 175.

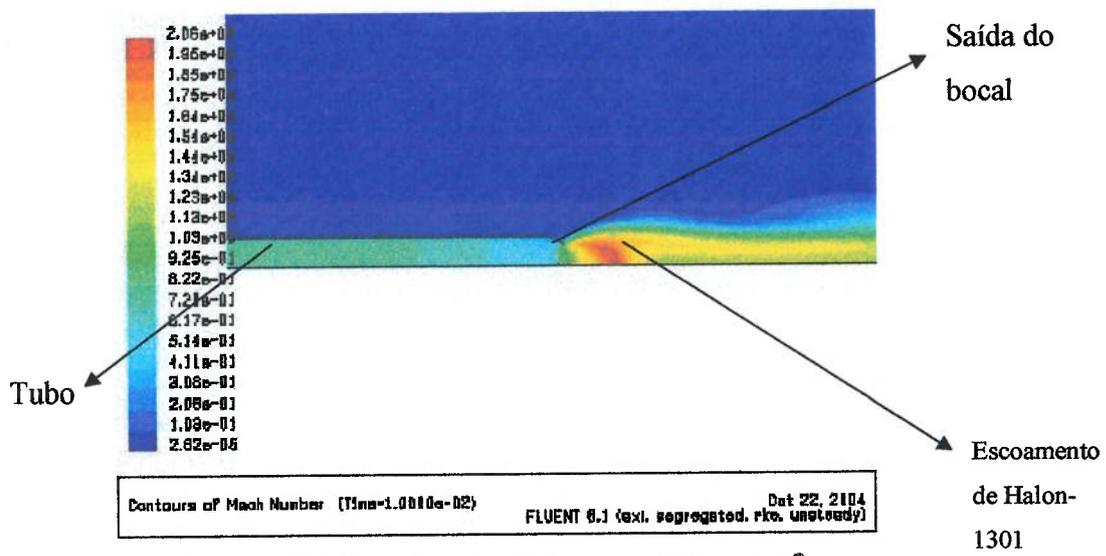


Figura 11.6: Mach na saída da tubulação para o teste 175, Fluent®

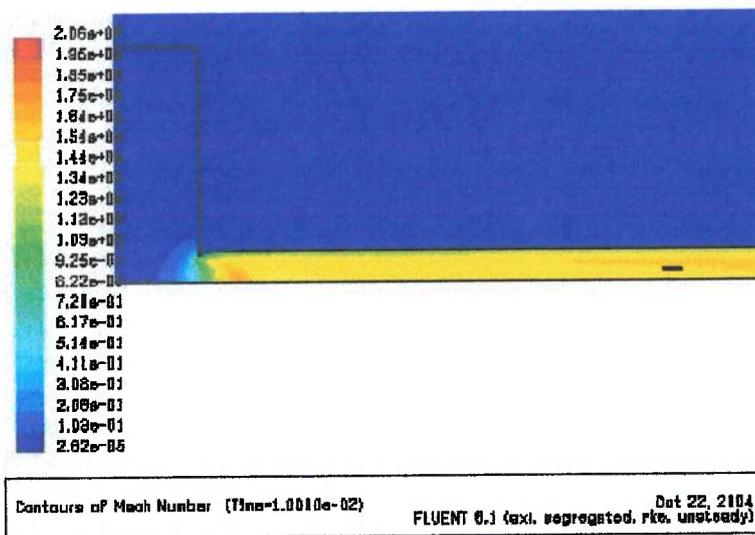


Figura 11.7: Mach na tubulação para o teste 175, Fluent®

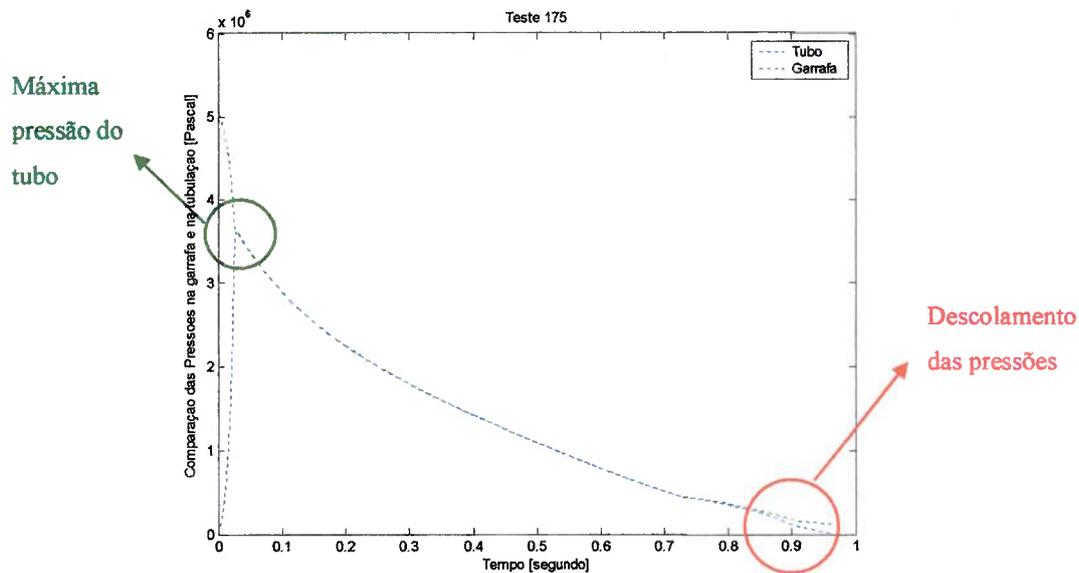


Figura 11.8: Pressão na garrafa versus tubulação calculada para o teste 175

A temperatura da garrafa decai com o tempo devido à exaustão da massa de seu interior que diminui gradativamente a sua energia interna.

O escoamento, por ser compressível, não pode ter um número de Mach maior do que um 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 ocorre no final da tubulação.

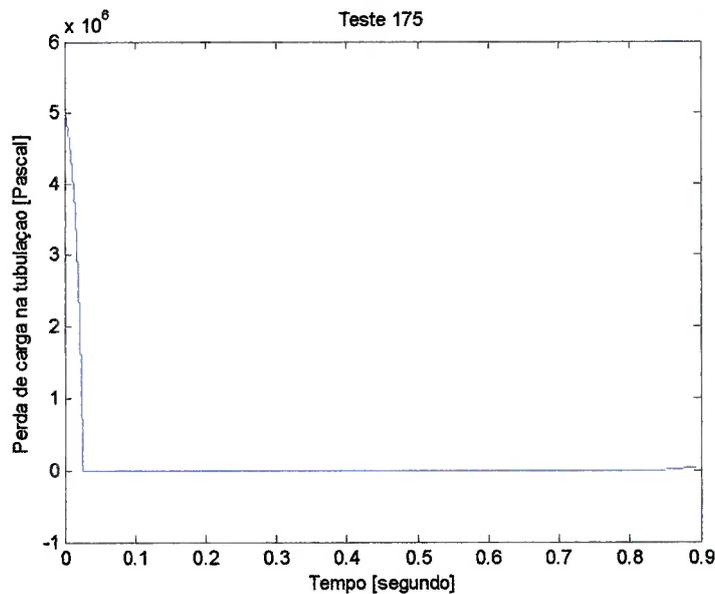


Figura 11.7: Perda de carga da tubulação calculada no Teste 175

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 universal dos gases maior (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).

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).

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 o volume ocupado pelo Halon-1301, ainda líquido, diminui em função do tempo devido ao aumento da densidade que decresce com a queda da temperatura.

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 contínua queda de temperatura e pressão dentro da garrafa.

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.

12. ESTUDO DE CASO

12.1. Condições de contorno

Toma-se como condições de contorno para o cálculo um avião a 10.000 pés 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 m³
- 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

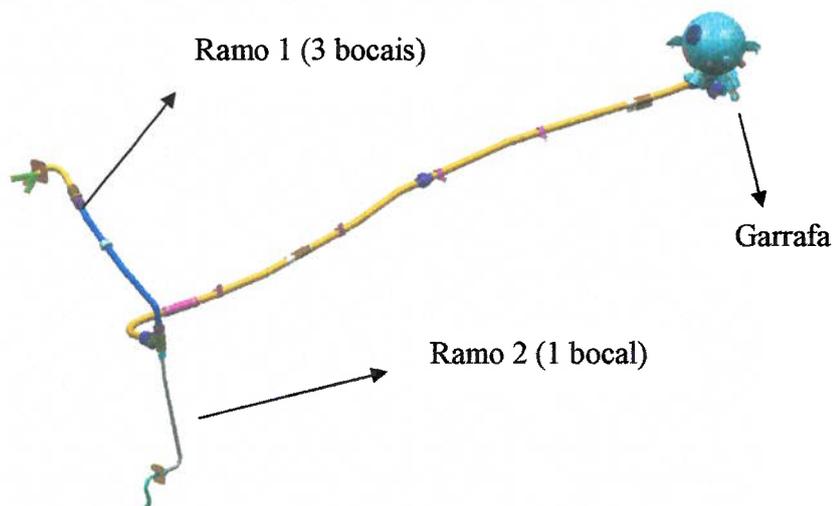


Figura 12.1: Representação da montagem da garrafa da UAP

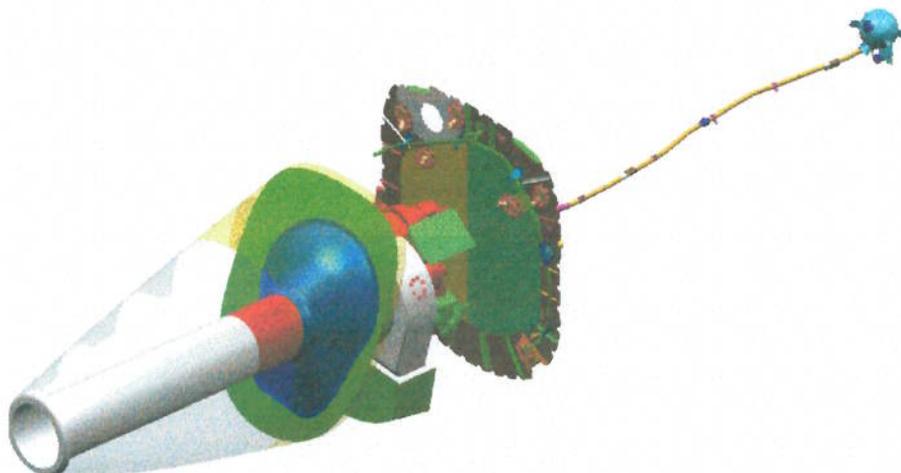


Figura 12.2: Representação da montagem da garrafa no compartimento da UAP

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 do Aeronautical Vestpocket Handbook (1996); as condições de contorno (CC) para o fluxo de massa de ar (Figura 12.3) 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[®] 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.

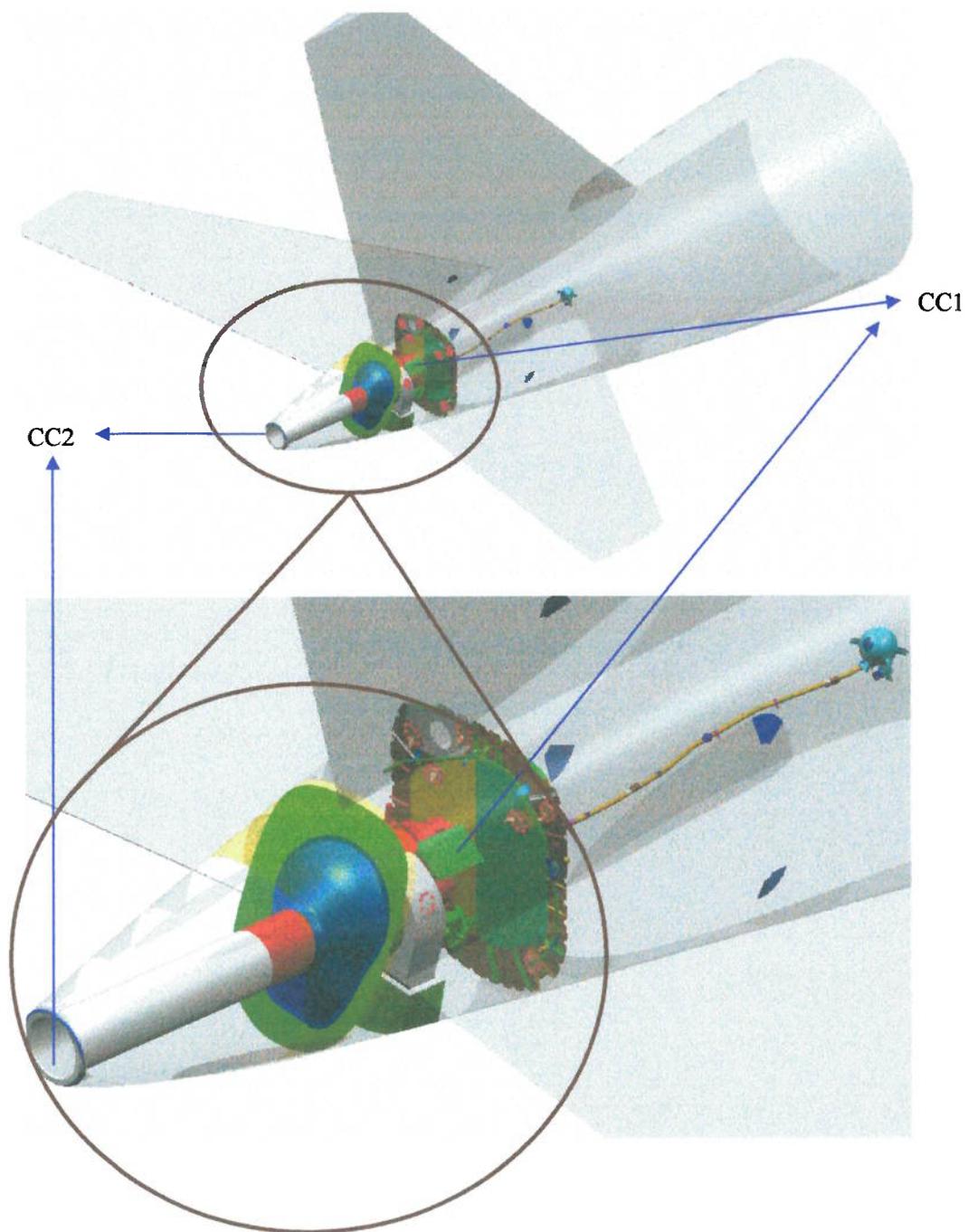


Figura 12.3: Condições de contorno da UAP em voo

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

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

12.2. 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.

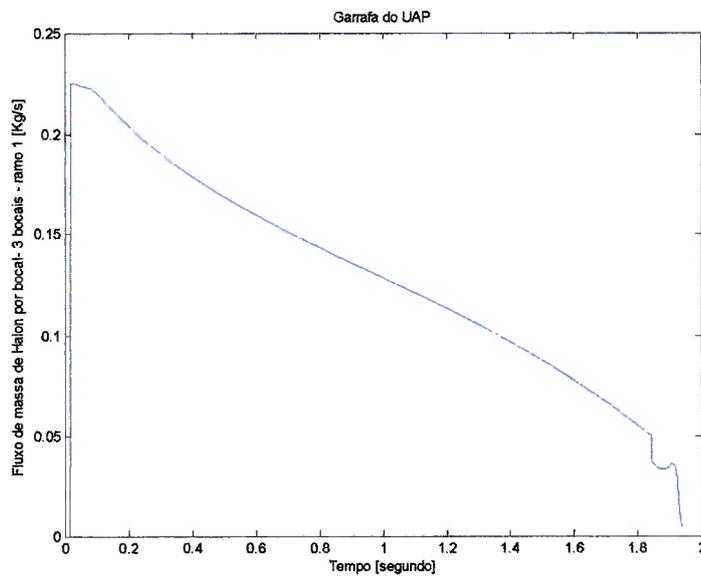
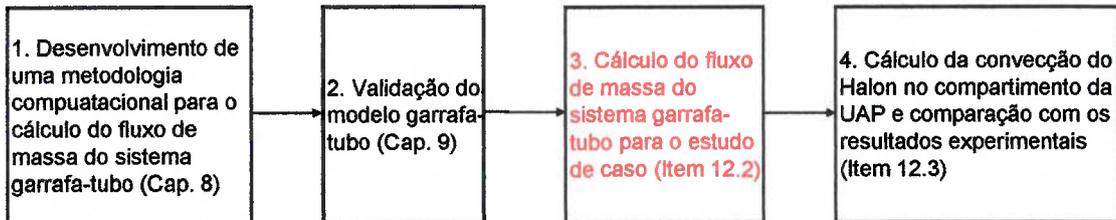


Figura 12.4: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 1

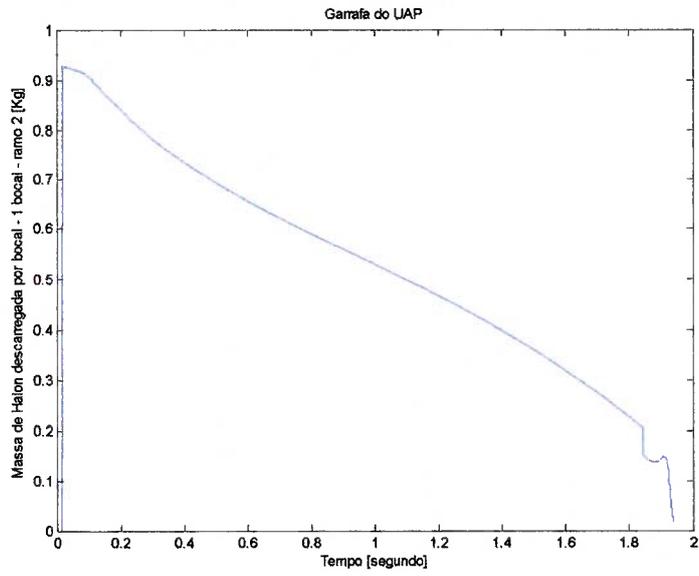


Figura 12.5: Fluxo de massa de Halon-1301 descarregada pelo ramo 2

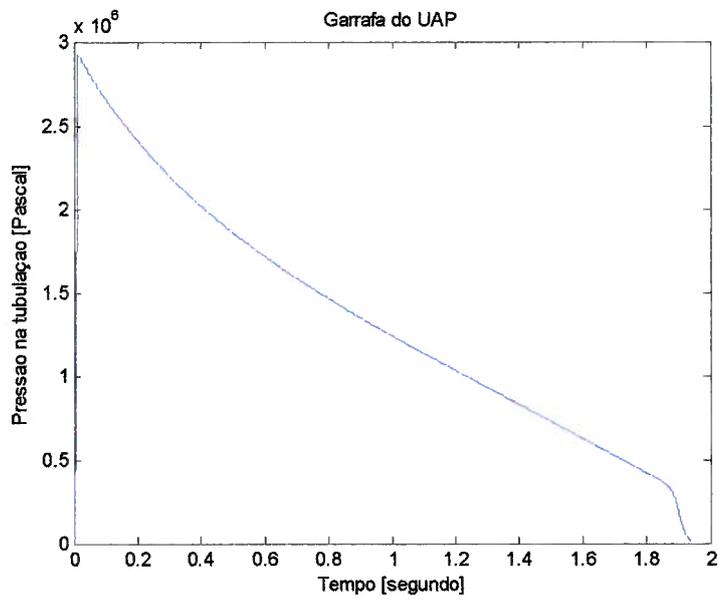
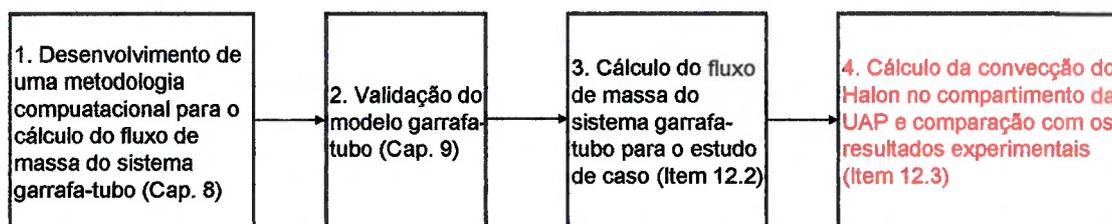


Figura 12.6: Pressão estática na tubulação equivalente

12.3. Resultados do compartimento da UAP

O estudo da convecção do Halon-1301 foi dividido em duas partes: a primeira (item 12.3.1) resolve o fluxo de ar, em regime permanente, dentro do compartimento da UAP; a segunda (item 12.3.2) 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.



12.3.1. Resultados do fluxo de ar

A entrada e a saída de ar foram configuradas, no Fluent[®], conforme a tabela 12.1. As velocidades de entrada e saída de ar estão descritas nas figuras 12.7 e 12.8 respectivamente e o perfil de velocidade, nos planos $y = 0$ e $x = 27,55$, nas figuras 12.9 e 12.10 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 12.1: 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 12.11; nesta condição a vazão em massa calculada na saída é de 0.72 kg/s, o que evidencia, além do relatório de resíduos, a convergência do cálculo em regime permanente.

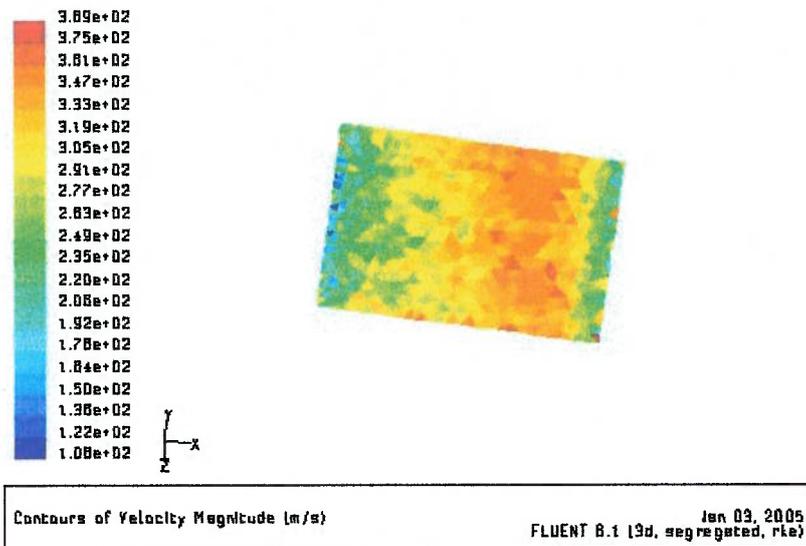


Figura 12.7: Distribuição da velocidade na entrada de ar da UAP

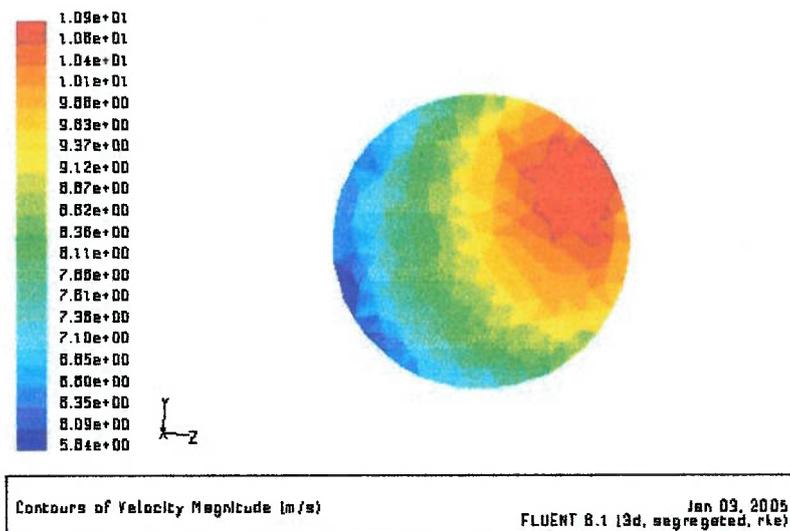


Figura 12.8: Distribuição da velocidade na saída de ar da UAP

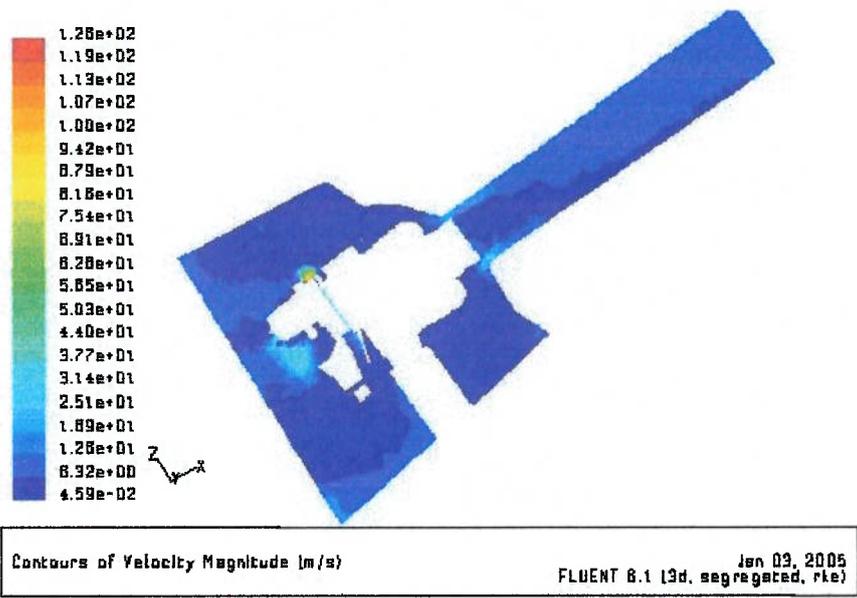


Figura 12.9: Perfil de velocidades no plano $y = 0$

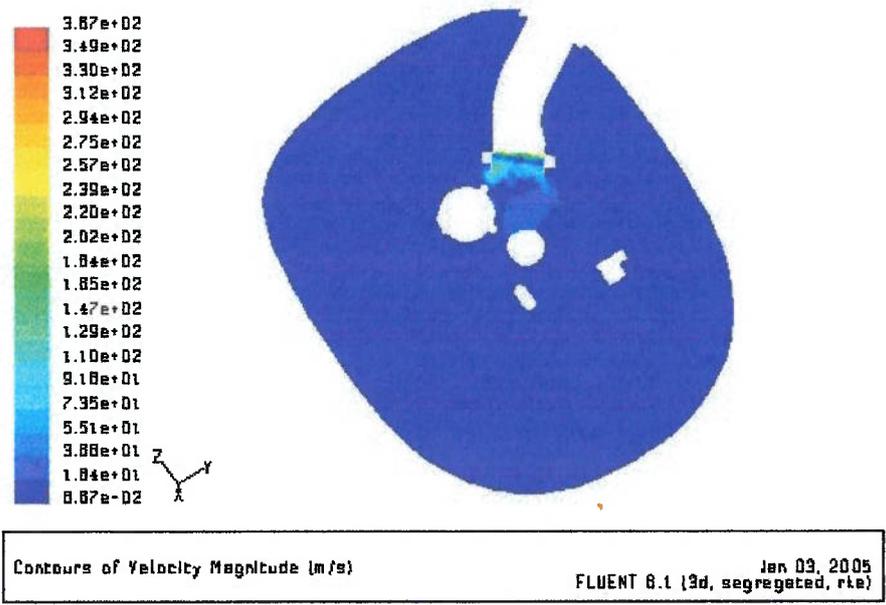


Figura 12.10: Perfil de velocidades no plano $x = 27,55$

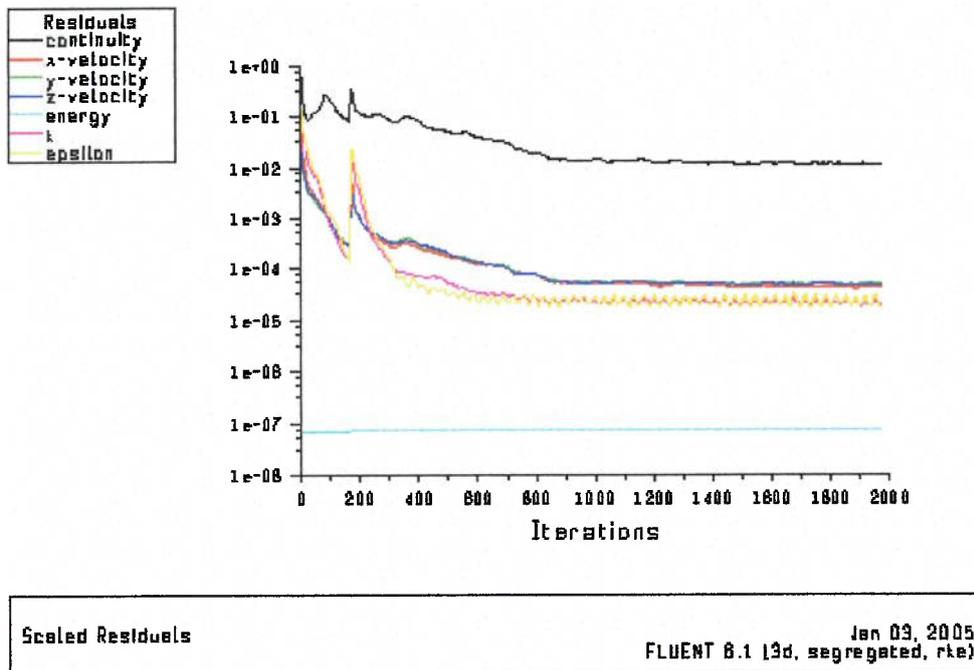


Figura 12.11: Relatório de resíduos do cálculo do ar

12.3.2. 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 porque apresentou resíduos muito mais baixos;
- 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 12.2.

GRANDEZA	ENTRADA	SAIDA	Bocal 1 Ramo 1	Bocal 2 Ramo 2
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	1×10^{-2} m	2×10^{-2} m	$1,1 \times 10^{-4}$ m	$6,6 \times 10^{-4}$ m

Tabela 12.2: Configurações para o calculo da convecção do Halon-1301

A intensidade turbulenta e o comprimento turbulento foram calculados conforme as equações (7.3) e (7.4) respectivamente.

O Fluent[®] 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 0,055 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 próximas figuras podemos observar os resultados obtidos de fração molar, pressão estática, temperatura estática, velocidade e resíduos do cálculo até 0,055 segundos.

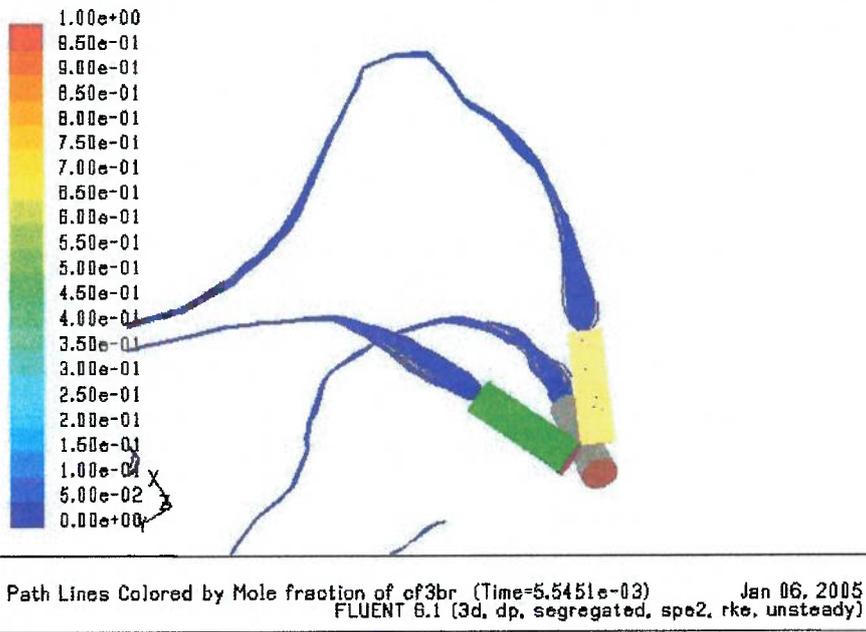


Figura 12.12: Fração molar de Halon-1301 - ramo 1

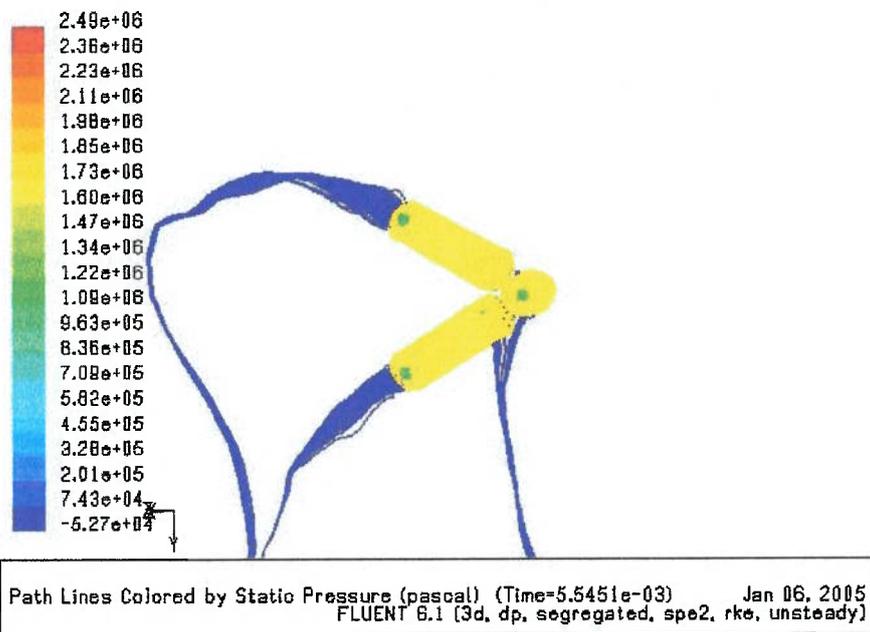


Figura 12.13: Pressão estática de Halon-1301 - ramo 1

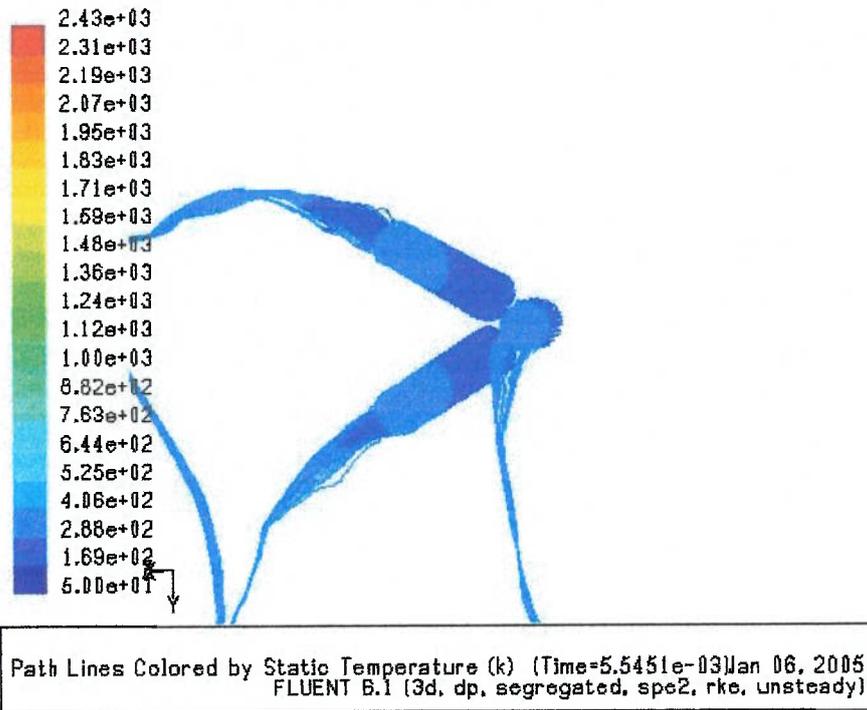


Figura 12.14: Temperatura estática de Halon-1301 - ramo 1

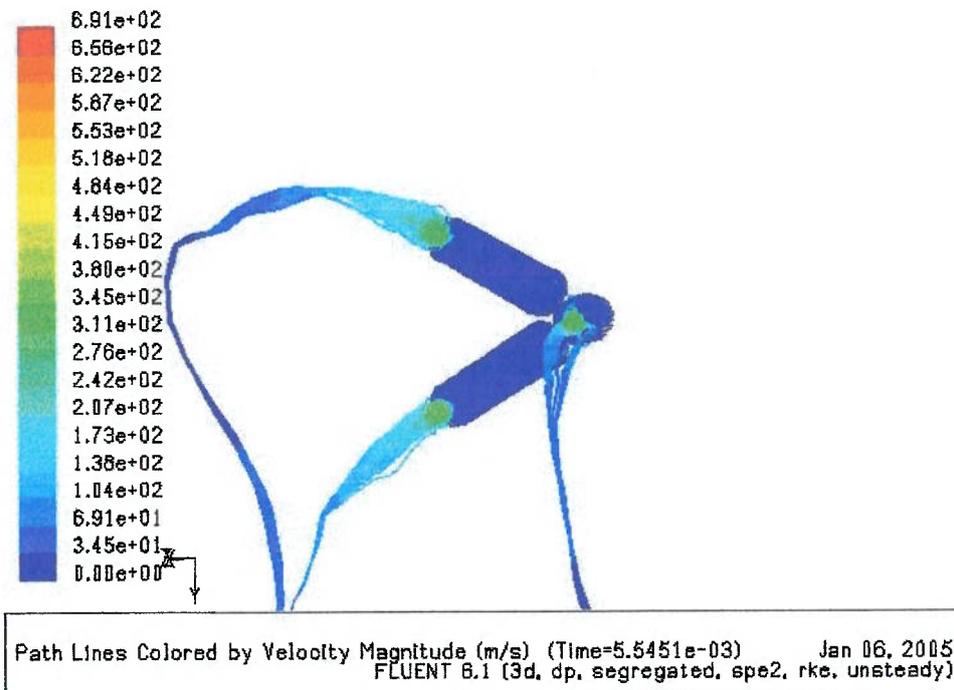
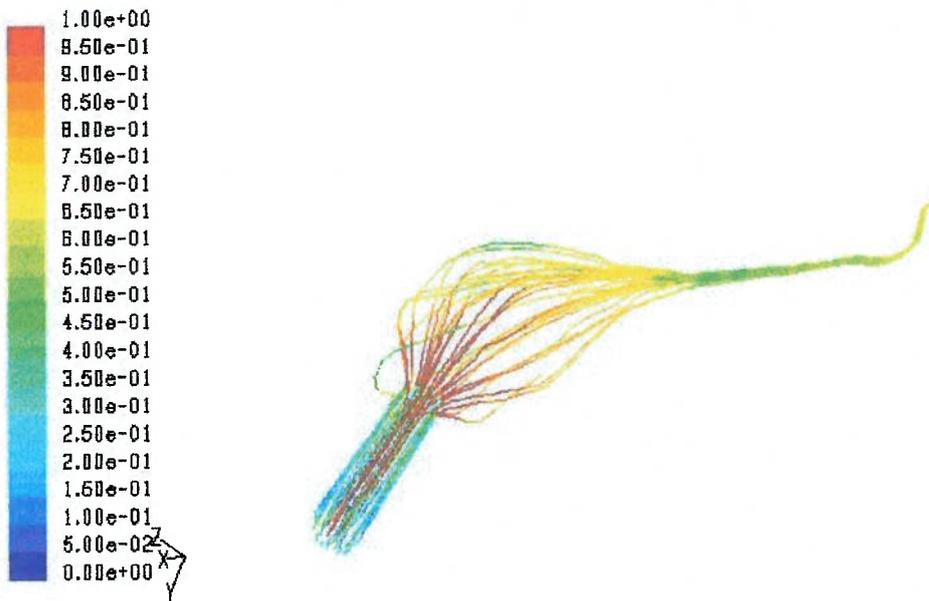
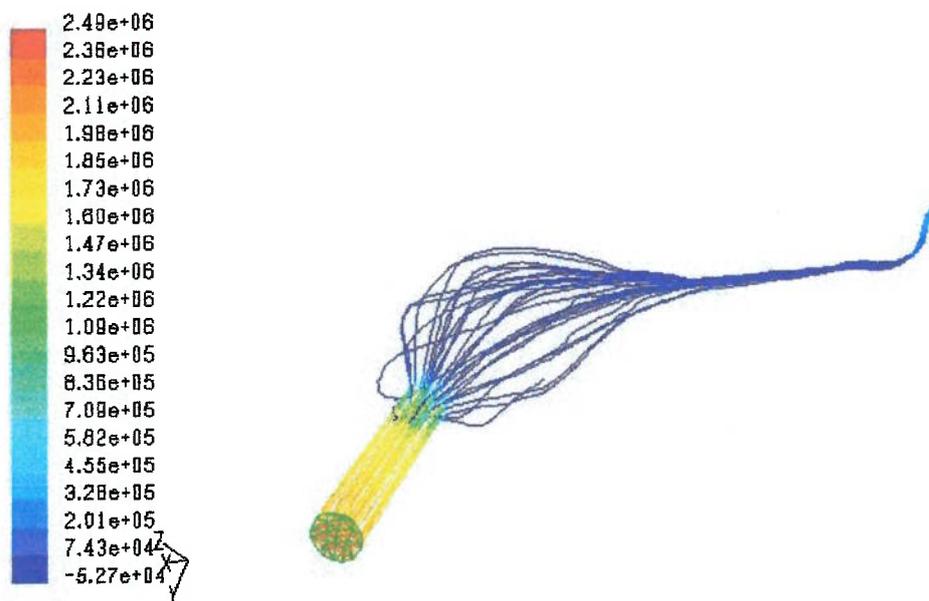


Figura 12.15: Velocidade de saída de Halon-1301 - ramo 1



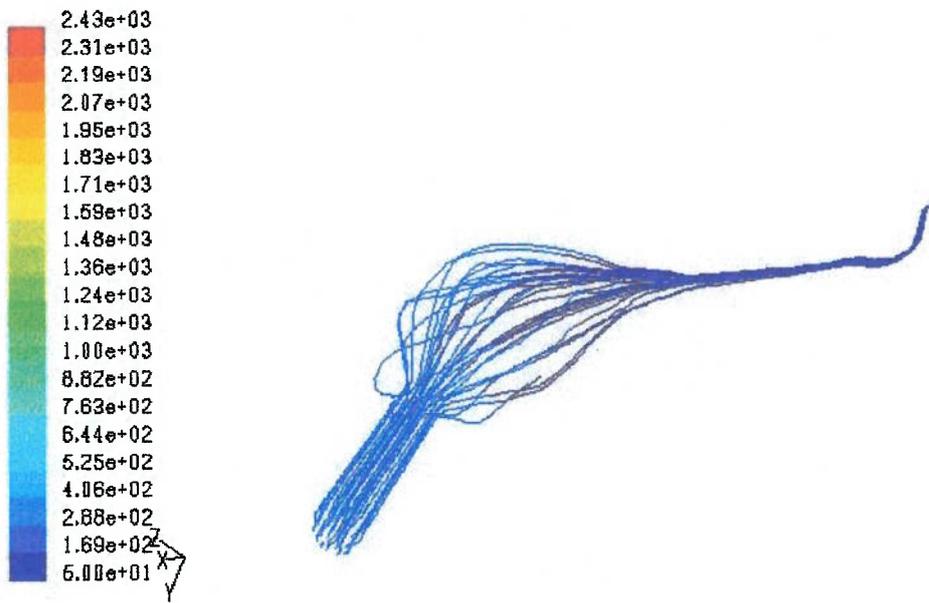
Path Lines Colored by Mole fraction of cf3br (Time=5.5451e-03) Jan 06, 2005
 FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady)

Figura 12.16: Fração molar de Halon-1301 - ramo 2



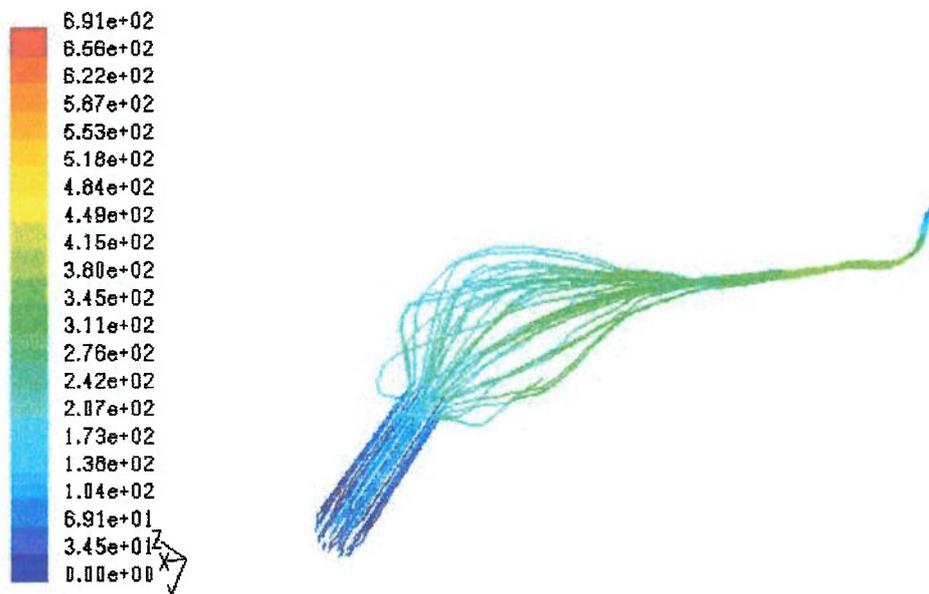
Path Lines Colored by Static Pressure (pascal) (Time=5.5451e-03) Jan 06, 2005
 FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady)

Figura 12.17: Pressão estática de Halon-1301 - ramo 2



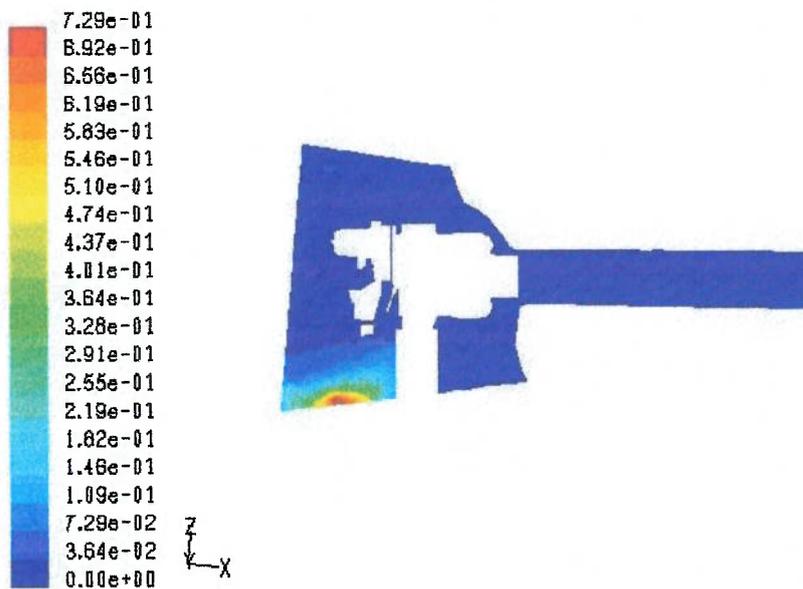
Path Lines Colored by Static Temperature (k) (Time=5.5451e-03) Jan 06, 2005
FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady)

Figura 12.18: Temperatura estática de Halon-1301 - ramo 2



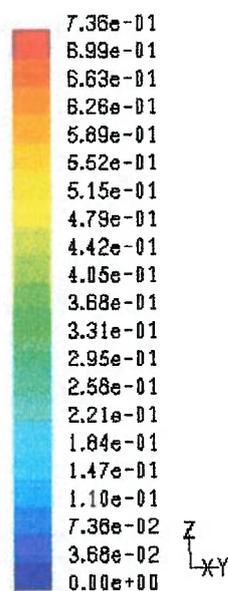
Path Lines Colored by Velocity Magnitude (m/s) (Time=5.5451e-03) Jan 06, 2005
FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady)

Figura 12.19: Velocidade de saída de Halon-1301 - ramo 2



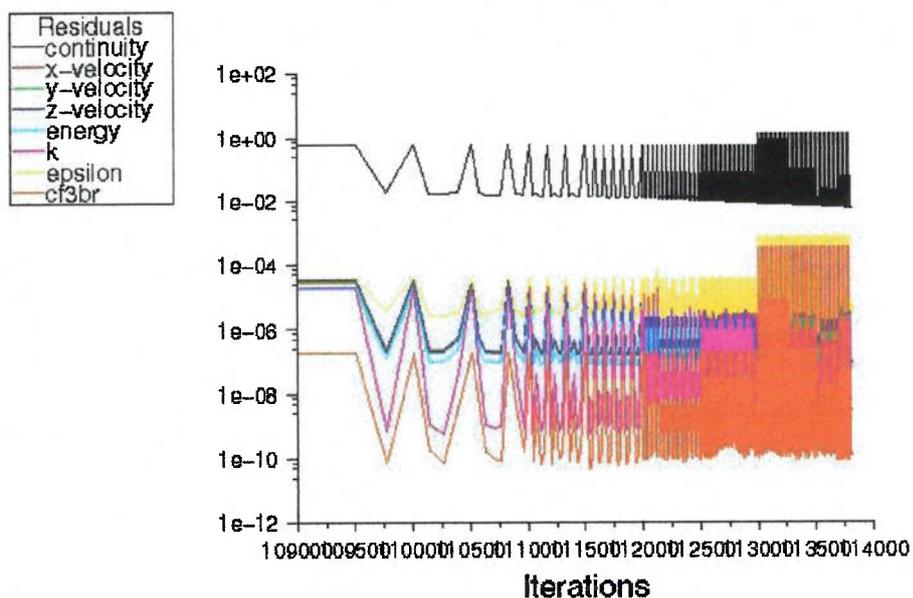
Contours of Mole fraction of cf3br (Time=5.5451e-03) Jan 06, 2005
FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady)

Figura 12.20: Fração molar de Halon-1301 – plano y = 0



Contours of Mole fraction of cf3br (Time=5.5451e-03) Jan 06, 2005
FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady)

Figura 12.21: Fração molar de Halon-1301 – plano x = 27,55



Scaled Residuals (Time=5.5451 e-03)

FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, spe2, rke, unsteady) Jan 06, 2005

Figura 12.22: Relatório de resíduos do cálculo da convecção do Halon-1301

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 (calculado) é muito pequeno em relação ao período dos resultados experimentais.

A concentração volumétrica do Halon-1301 foi calculada em 2 pontos, 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.

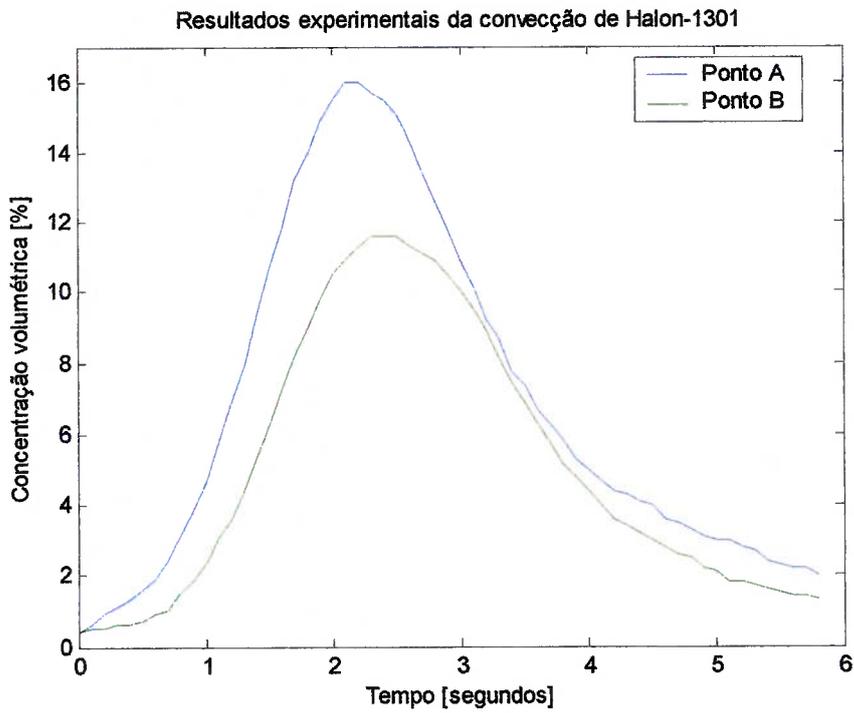


Figura 12.23: Resultados experimentais da convecção do Halon-1301

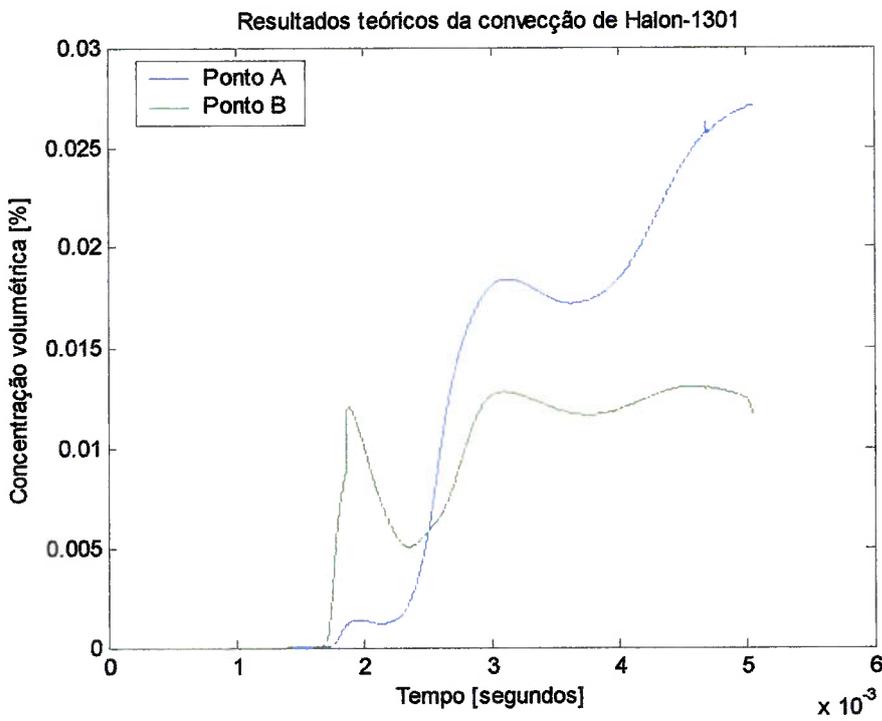


Figura 12.24: Resultados teóricos da convecção do Halon-1301

13. 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} ;
- 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:

- Deve-se evitar o uso de bocais no final das tubulações a fim de se maximizar o fluxo de Halon-1301. O estrangulamento da área na saída do tubo diminui o fluxo de massa devido à condição de bocal chocado. A condição ideal coincide com o descarregamento no menor tempo possível, portanto este estrangulamento não é desejável;
- 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, é necessário 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.

APÊNDICE A

<u>TESTE 102</u>	106
<u>TESTE 146</u>	109
<u>TESTE 174</u>	112
<u>TESTE 175</u>	120
<u>ESTUDO DE CASO</u>	127

Teste 102

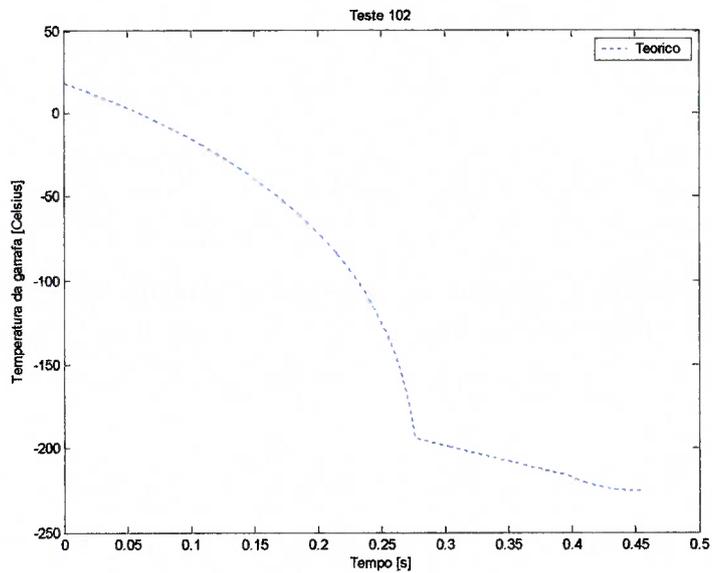


Figura A.1: Resultados teóricos de temperatura do teste 102

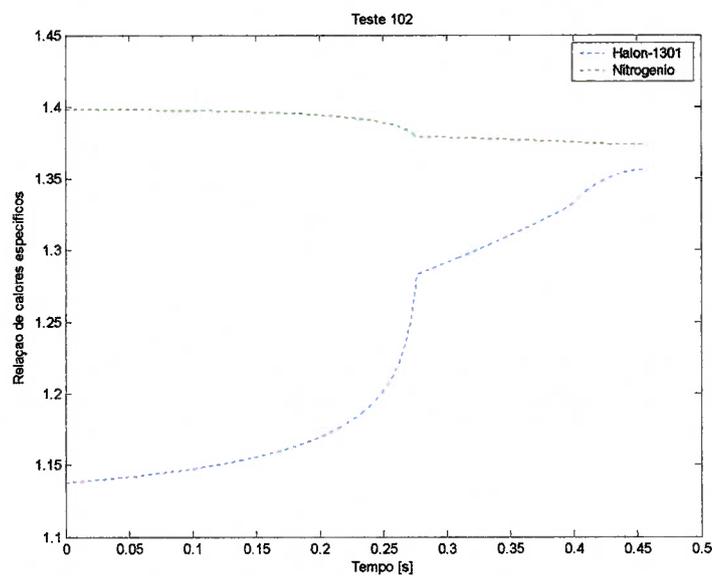


Figura A.2: Relação de calores específicos calculados do teste 102

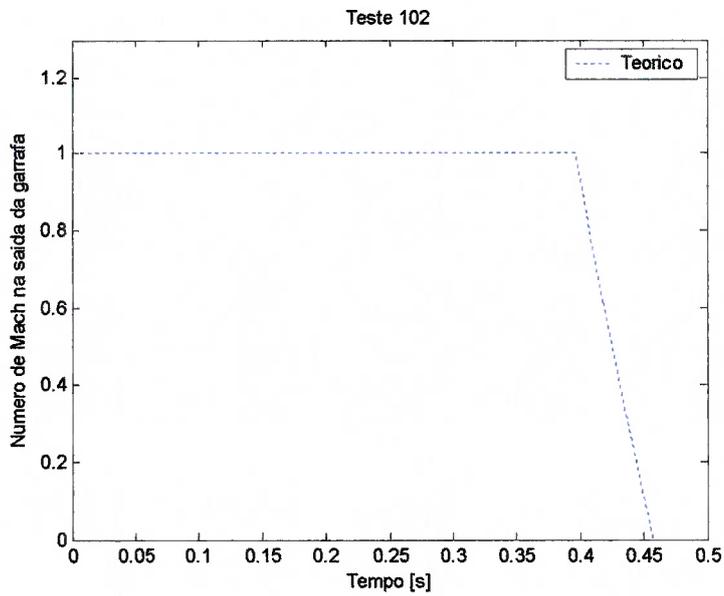


Figura A.3: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 102

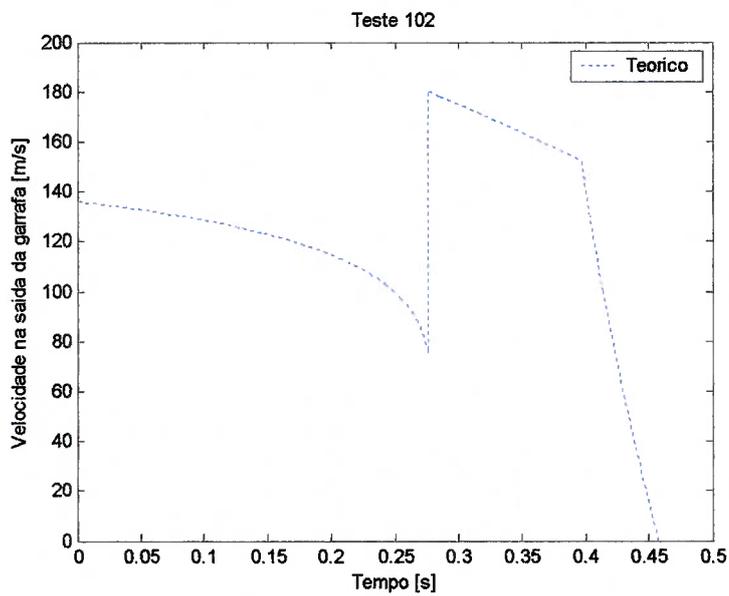


Figura A.4: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 102

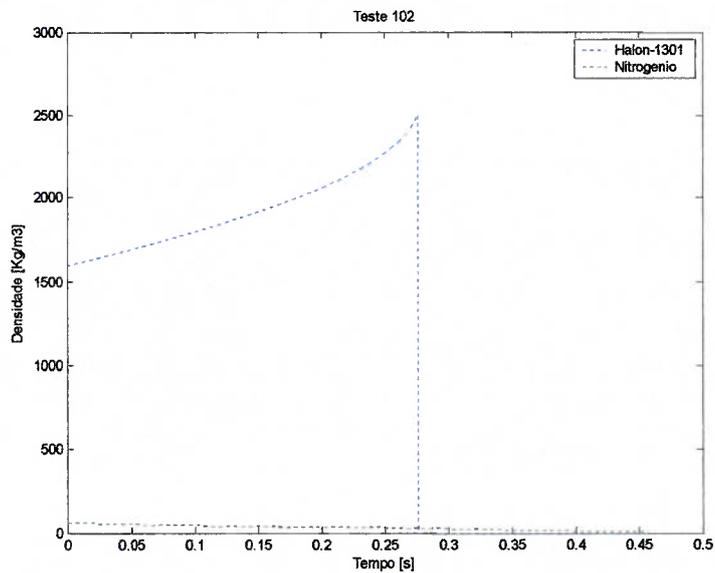


Figura A.5: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 102

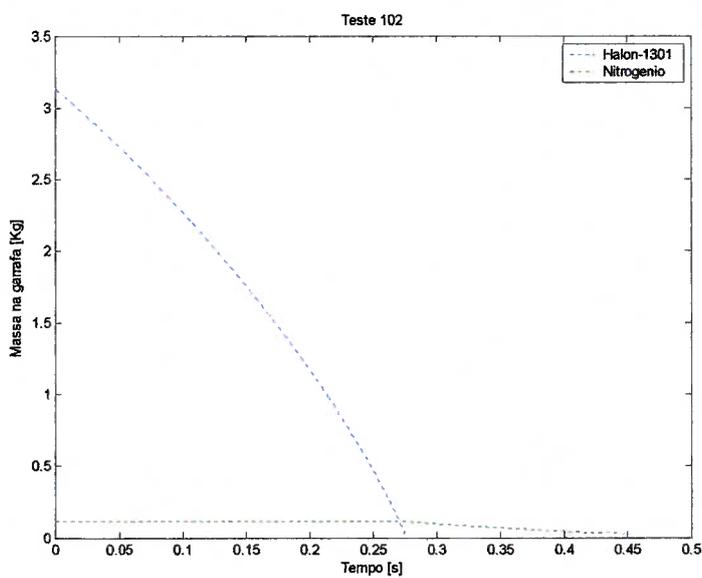


Figura A.6: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 102

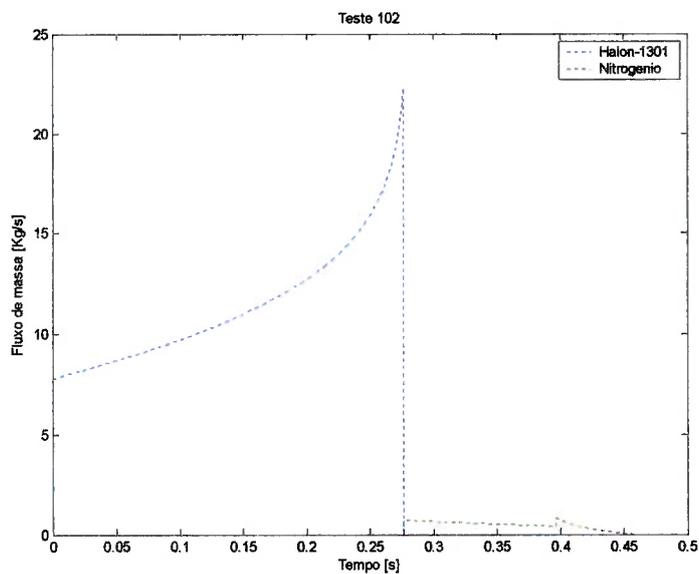


Figura A.7: Fluxo de massa calculado do teste 102

Teste 146

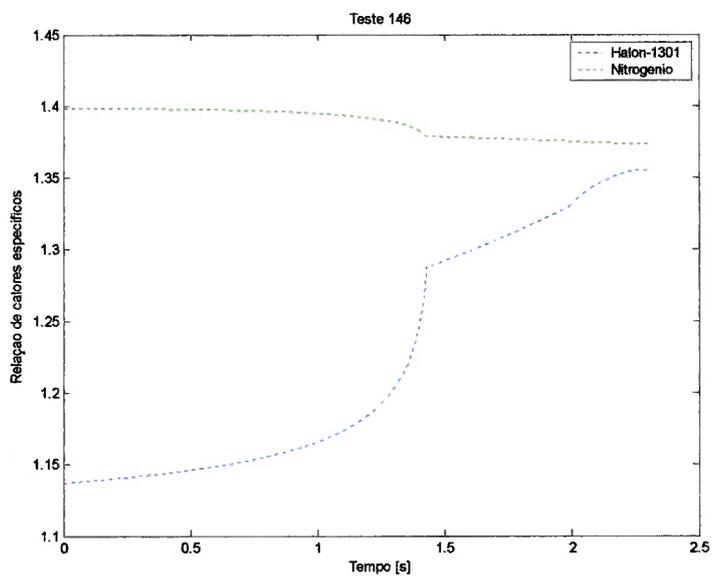


Figura A.8: Relação de calores específicos calculados do teste 146

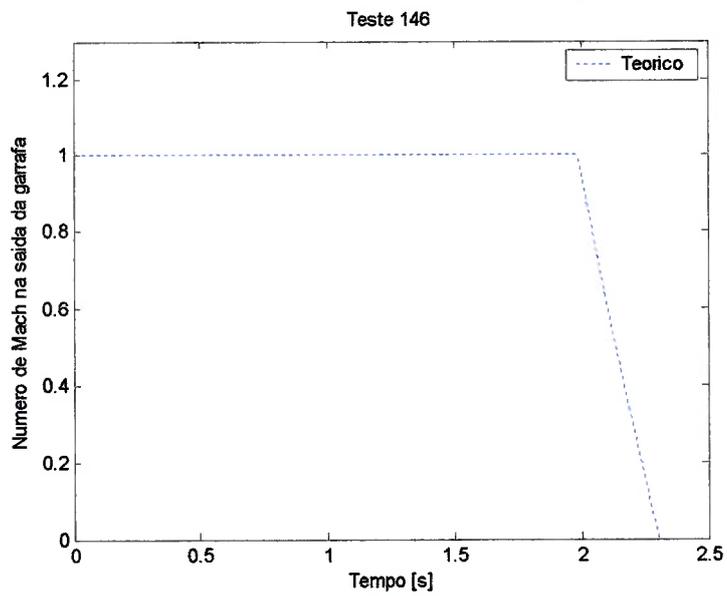


Figura A.9: Número de Mach calculado na saída da garrafa do teste 146

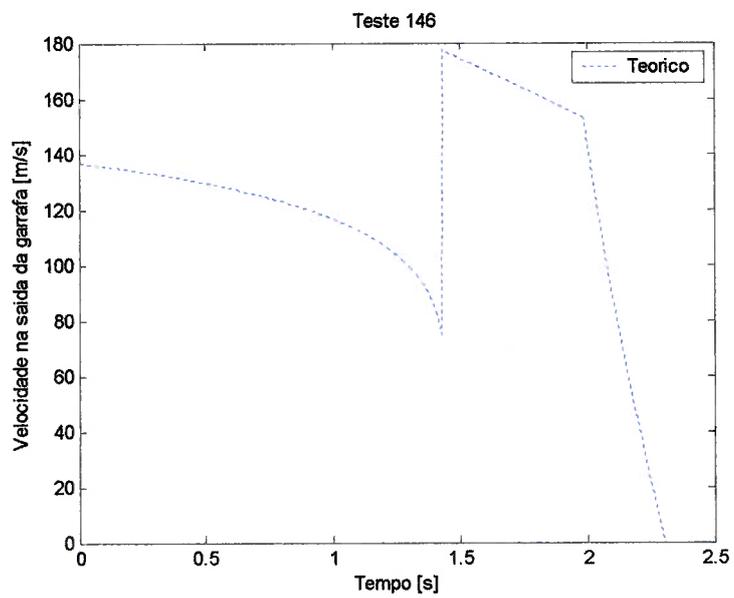


Figura A.10: Velocidade na saída da garrafa calculada do teste 146

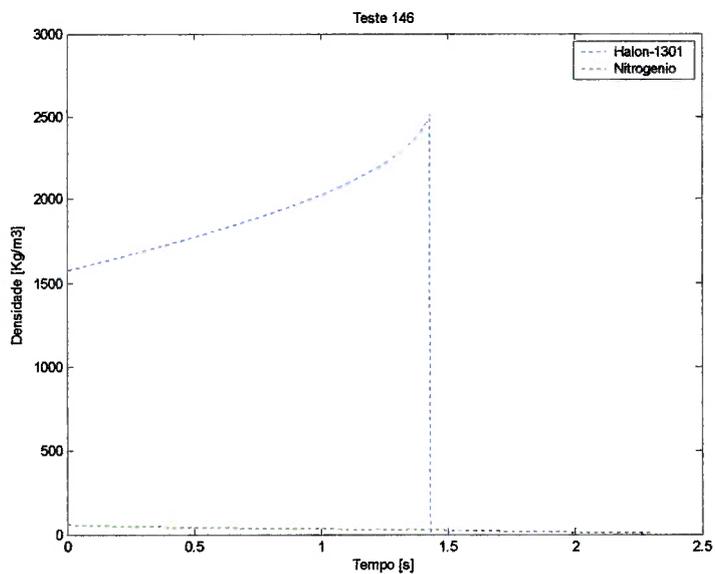


Figura A.11: Densidade calculada dentro da garrafa do teste 146

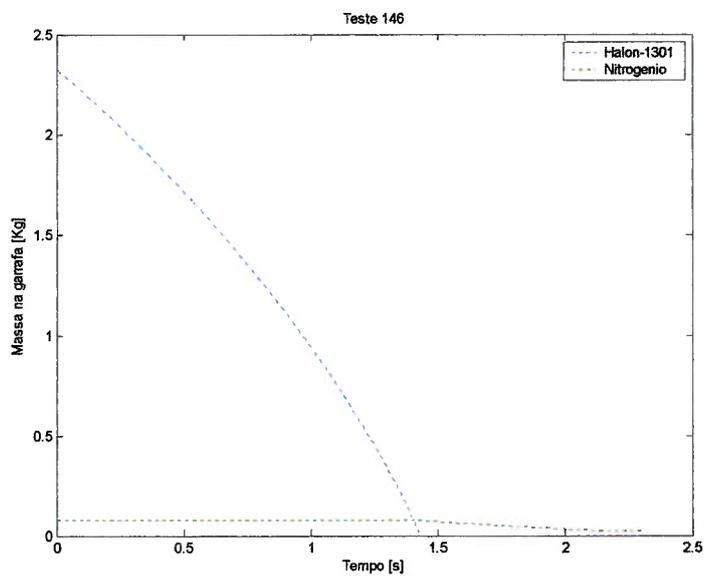


Figura A.12: Variação da massa calculada dentro da garrafa do teste 146

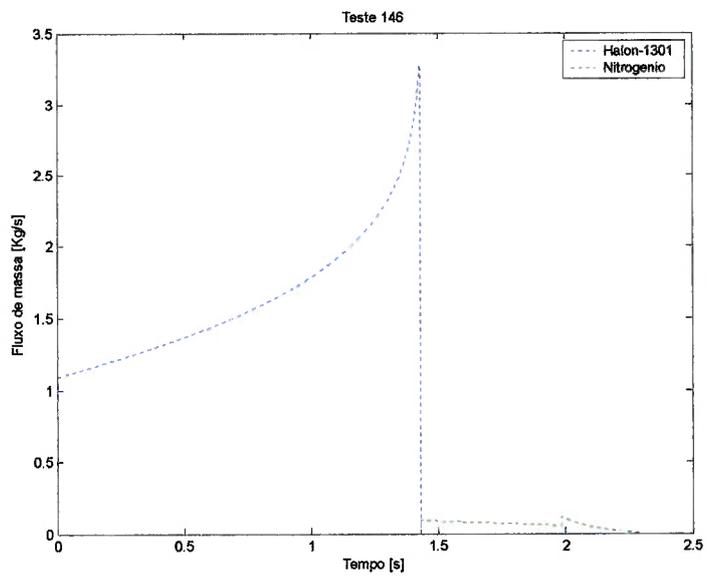


Figura A.13: Fluxo de massa calculado do teste 146

Teste 174

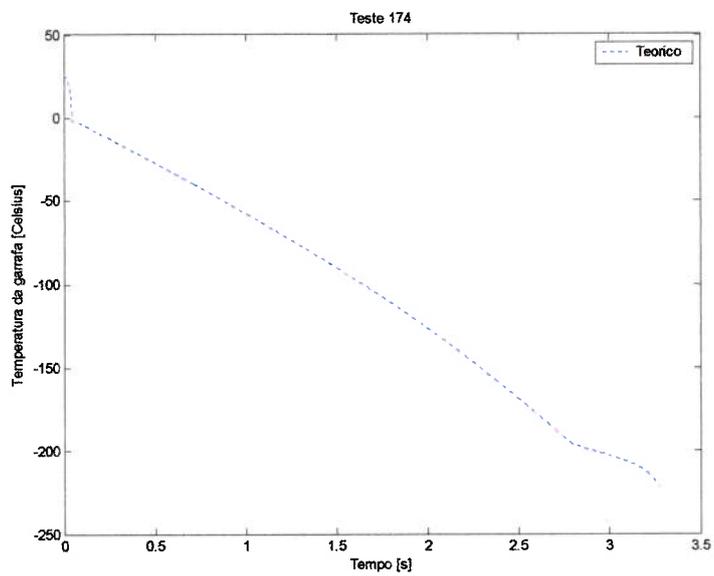


Figura A.14: Temperatura da garrafa calculada do teste 174

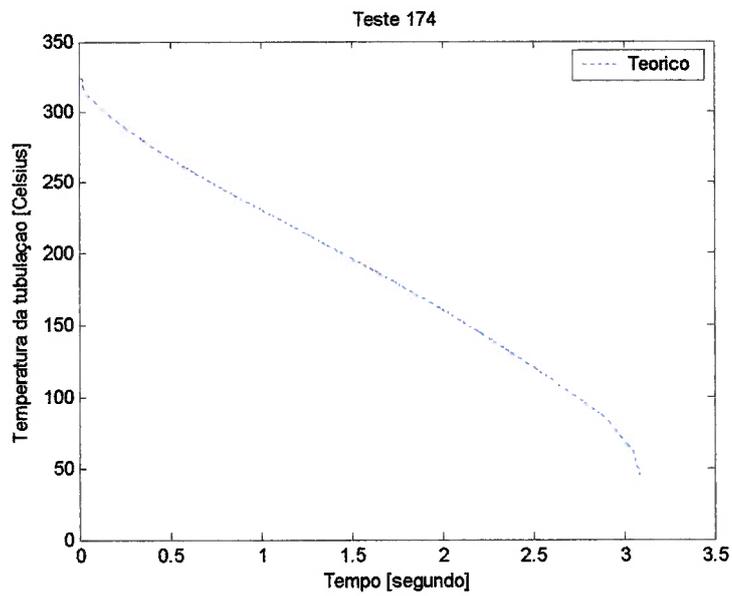


Figura A.15: Temperatura da tubulação calculada do teste 174

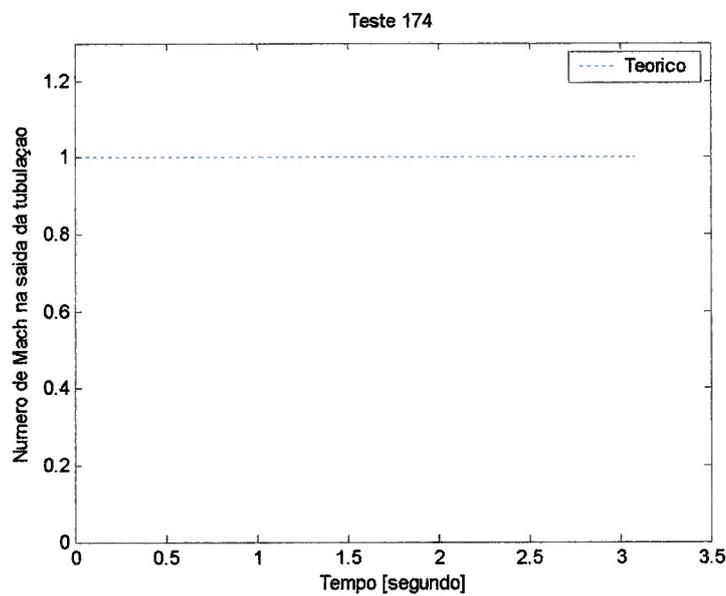


Figura A.16: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 174

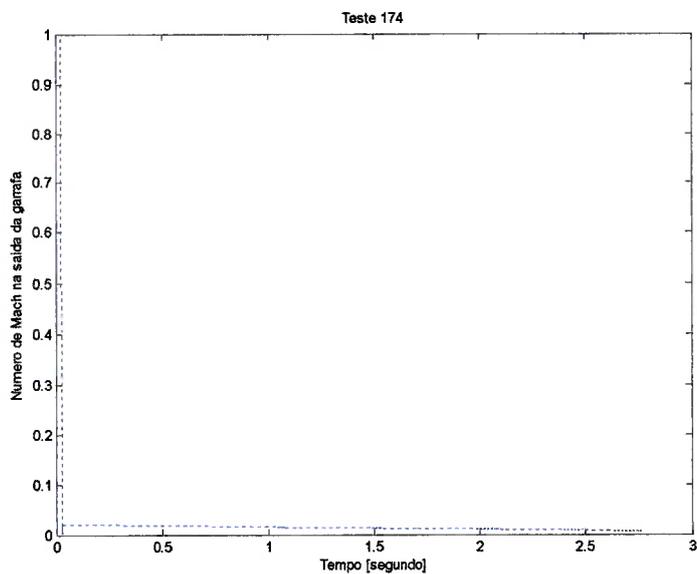


Figura A.17: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 174

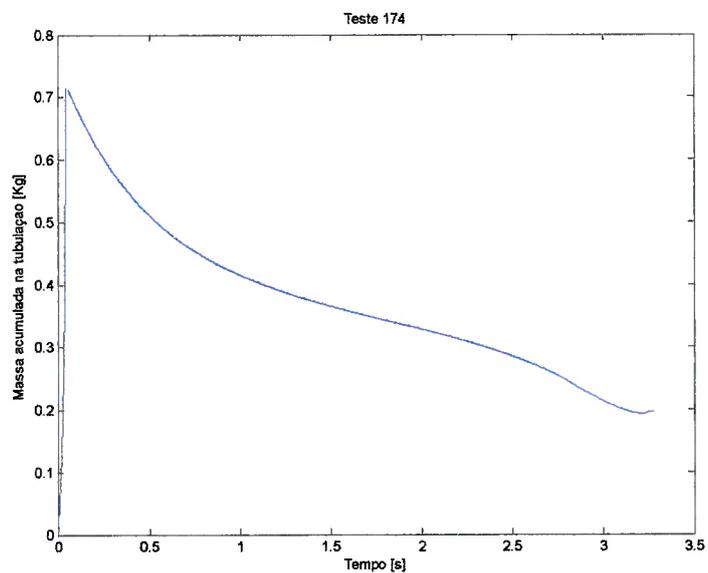


Figura A.18: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 174

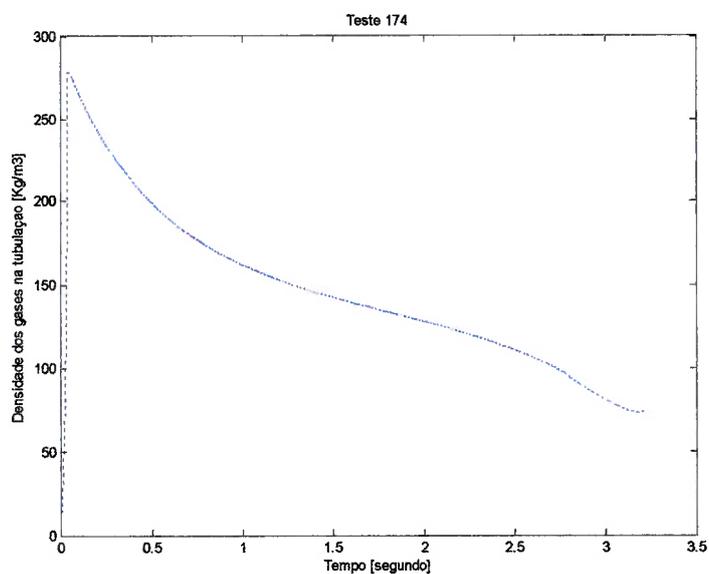


Figura A.19: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 174

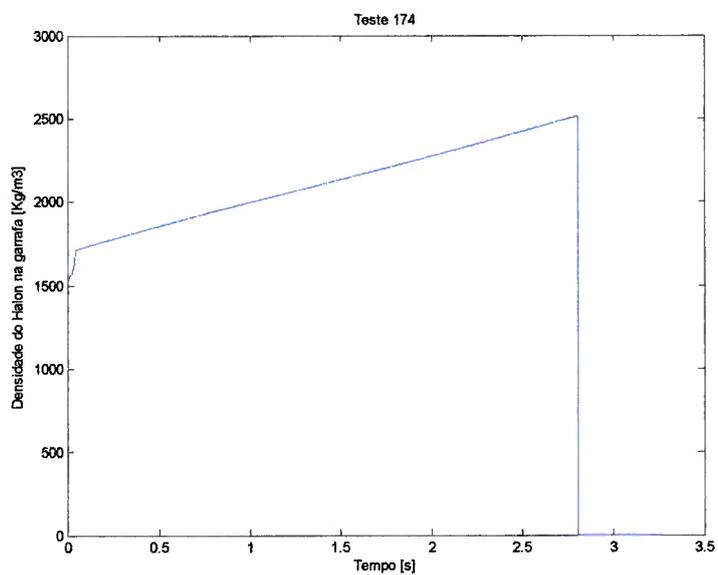


Figura A.20: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 174

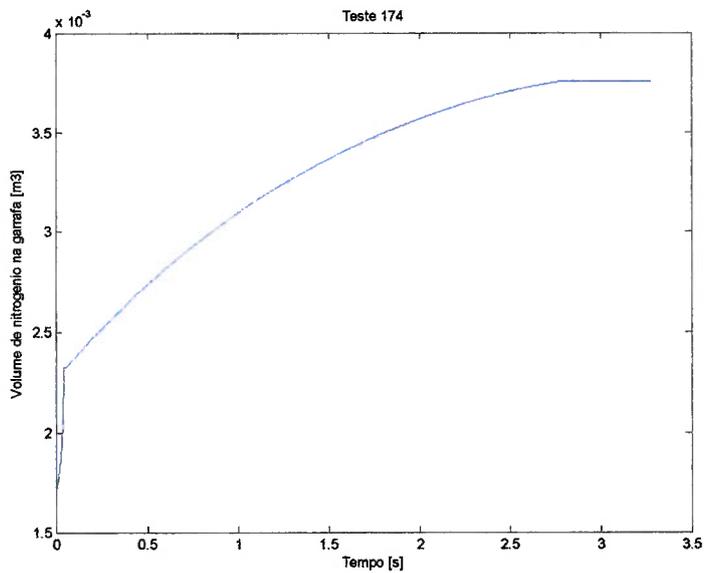


Figura A.21: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 174

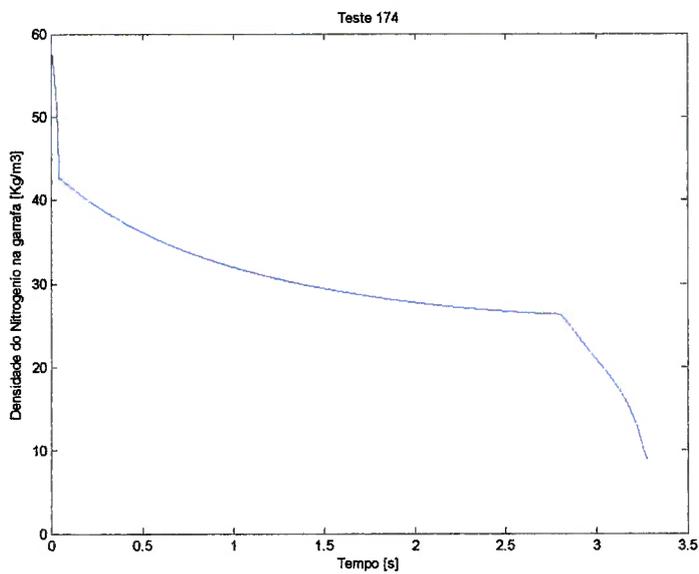


Figura A.22: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 174

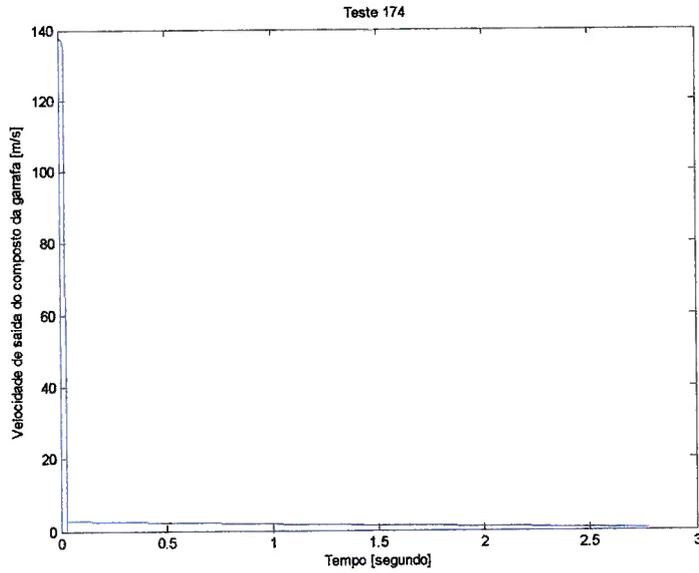


Figura A.23: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 174

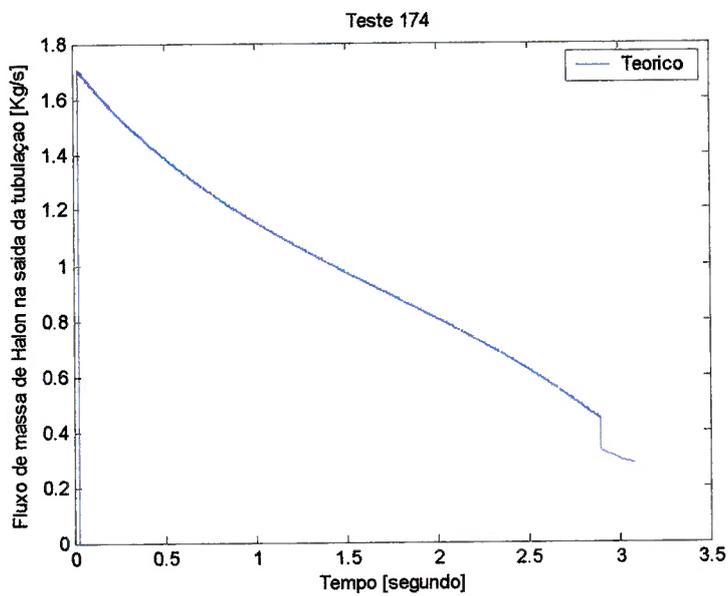


Figura A.24: Fluxo de massa do Halon-1301 calculado do teste 174

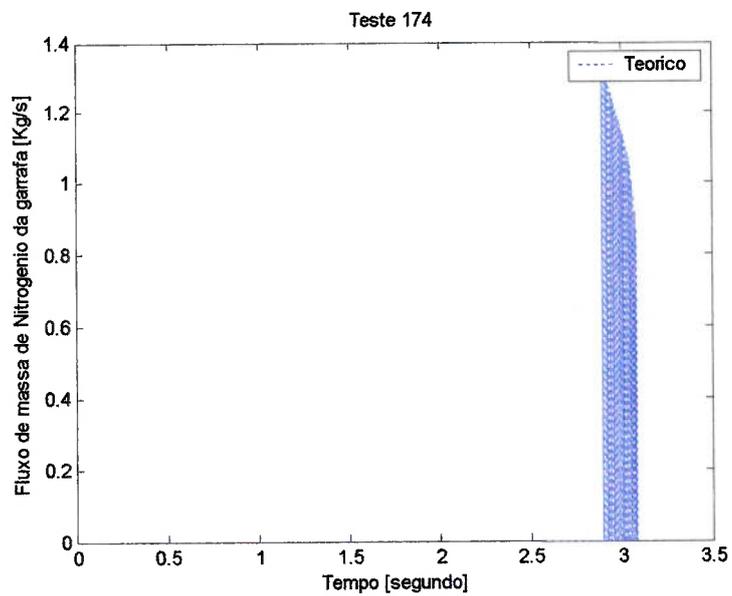


Figura A.25: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 174

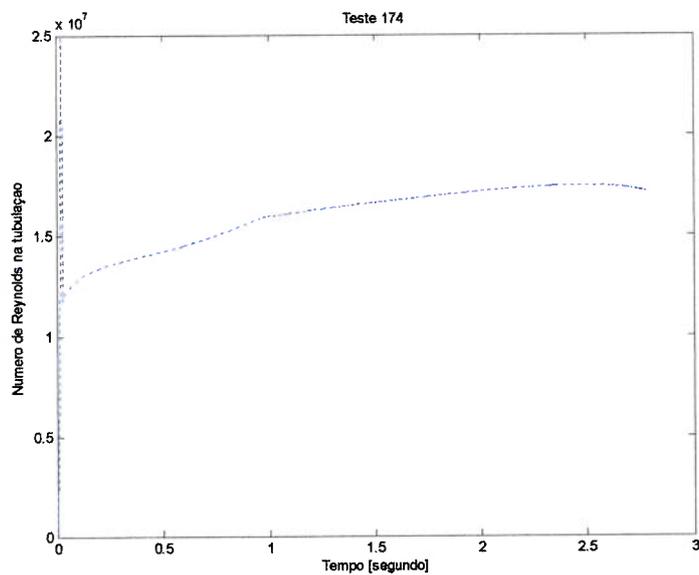


Figura A.26: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 174

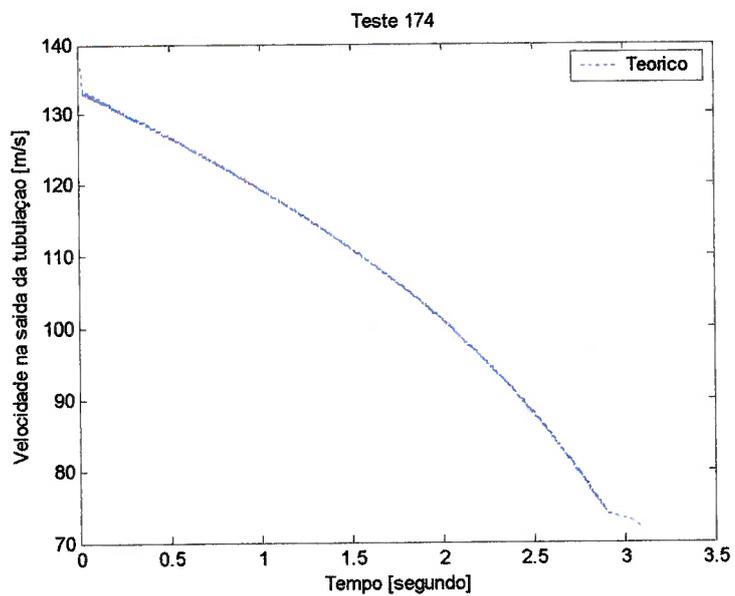


Figura A.27: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 174

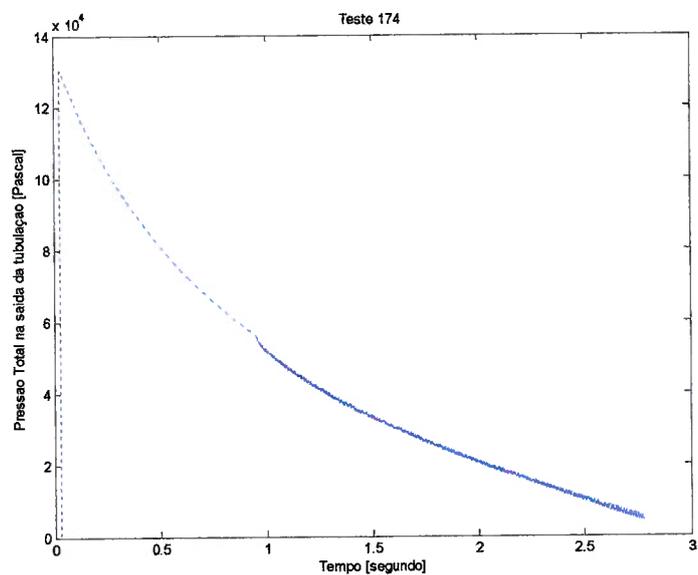


Figura A.28: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 174

Teste 175

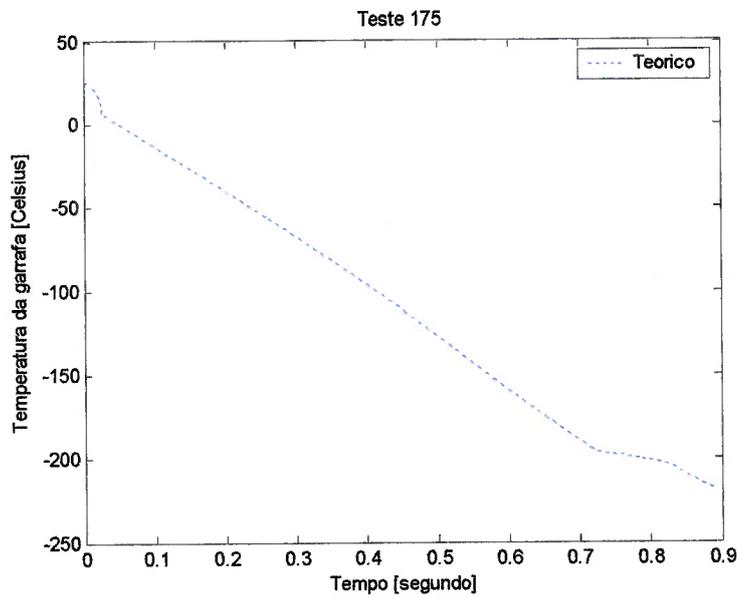


Figura A.29: Temperatura da garrafa calculada do teste 175

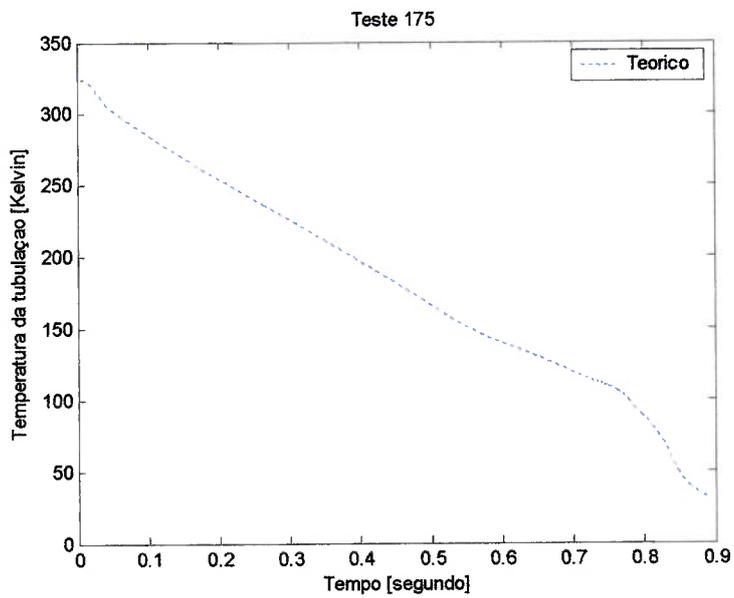


Figura A.30: Temperatura da tubulação calculada do teste 175

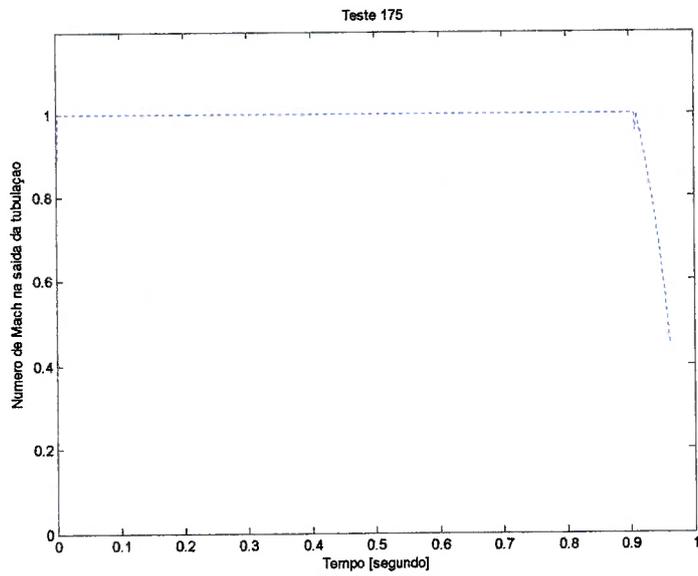


Figura A.31: Número de Mach na saída da tubulação calculado do teste 175

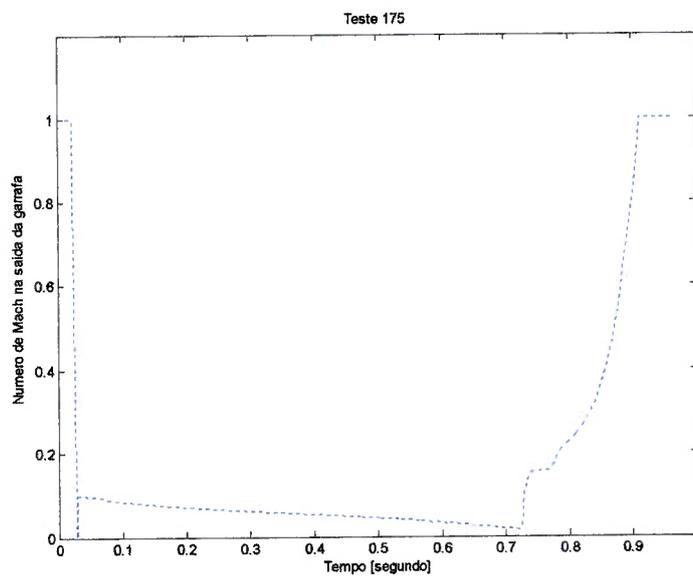


Figura A.32: Número de Mach na saída da garrafa calculado do teste 175

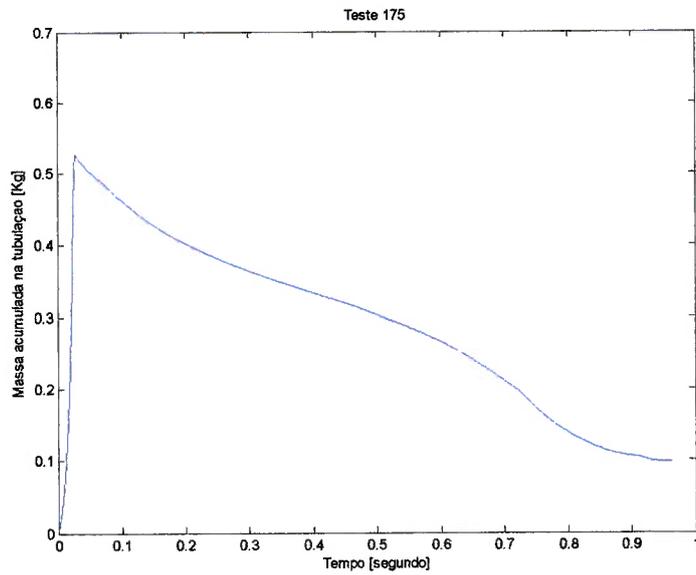


Figura A.33: Massa acumulada na tubulação calculada do teste 175

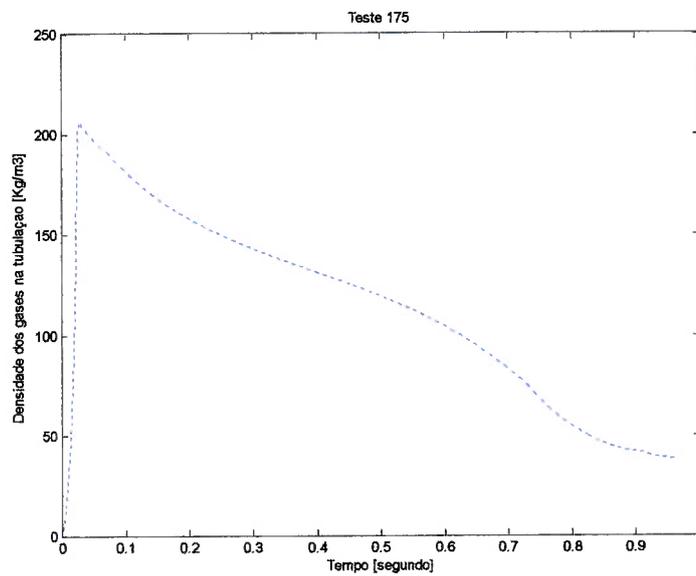


Figura A.34: Densidade dos gases na tubulação calculada do teste 175

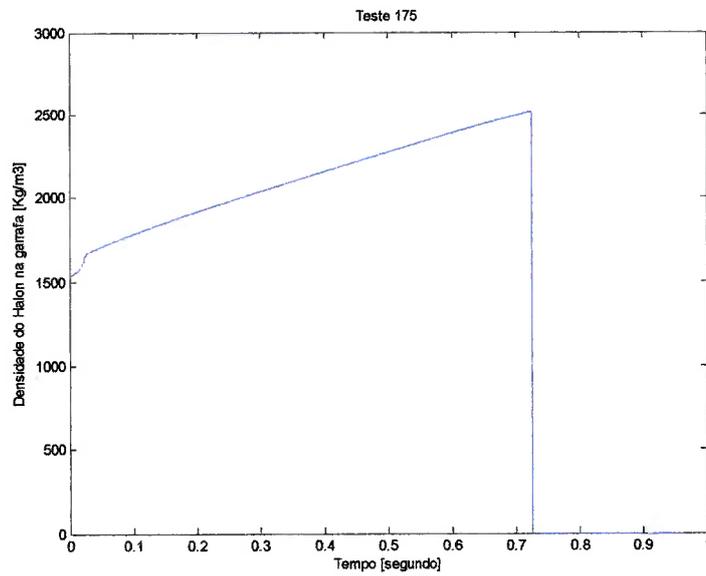


Figura A.35: Densidade do Halon-1301 na garrafa calculada do teste 175

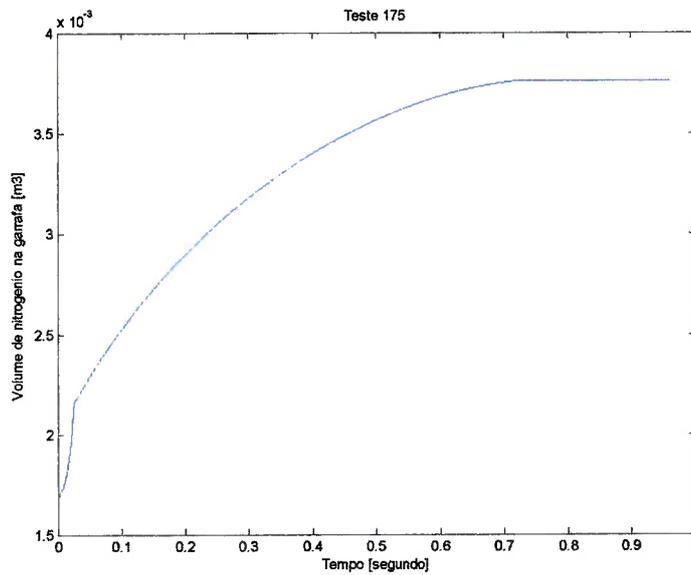


Figura A.36: Volume de nitrogênio na garrafa calculado do teste 175

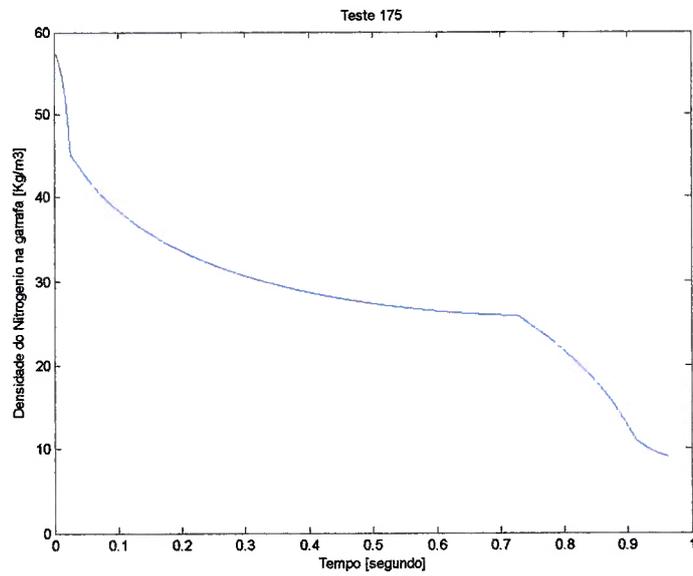


Figura A.37: Densidade do nitrogênio na garrafa calculada do teste 175

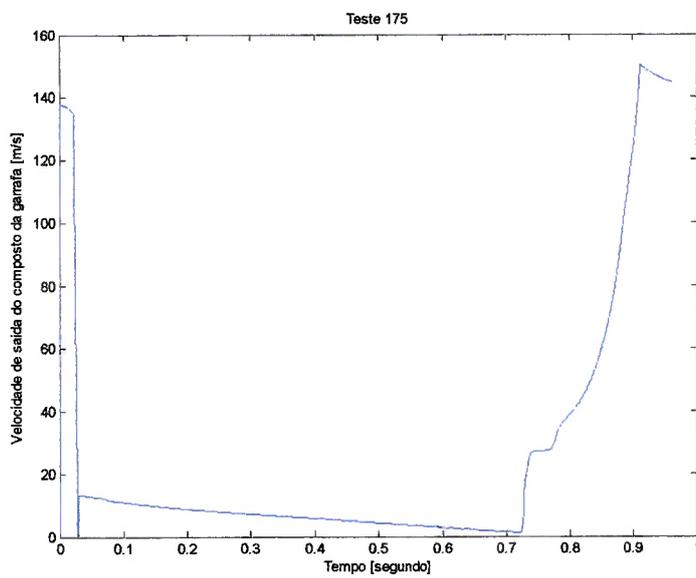


Figura A.38: Velocidade de saída dos gases da garrafa calculada do teste 175

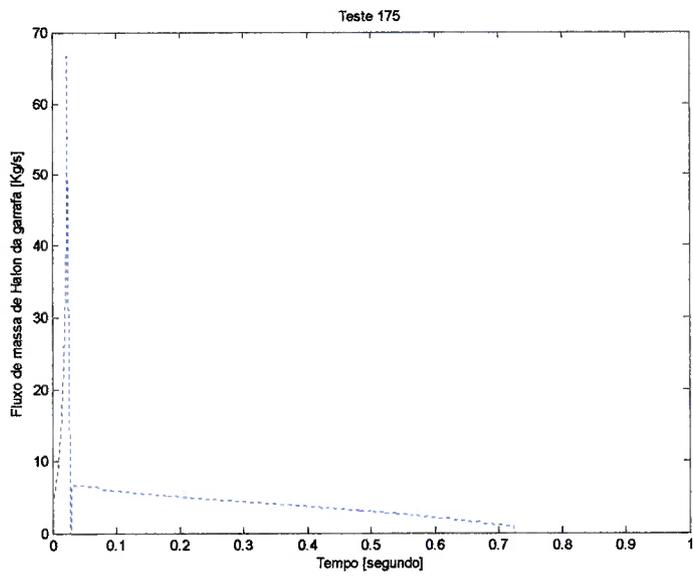


Figura A.39: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa calculada do teste 175

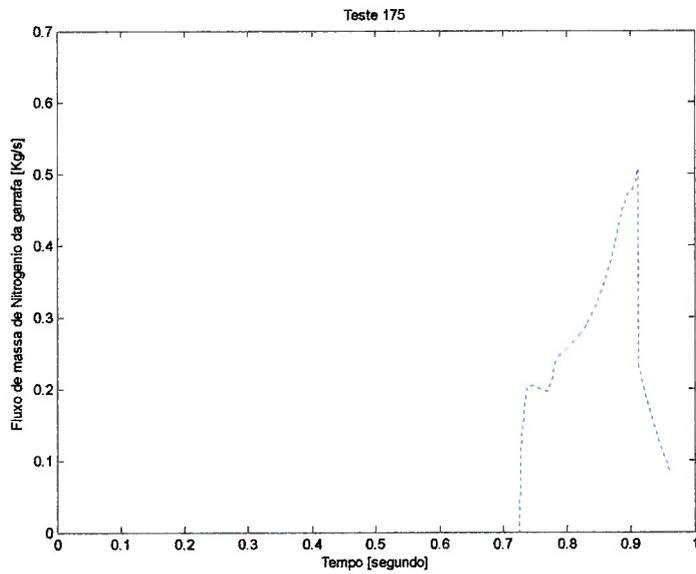


Figura A.40: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa calculado do teste 175

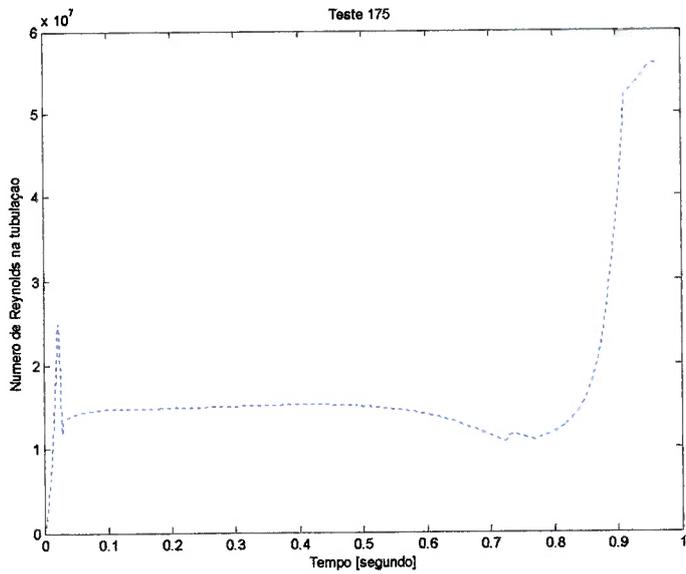


Figura A.41: Número de Reynolds na tubulação calculado do teste 175

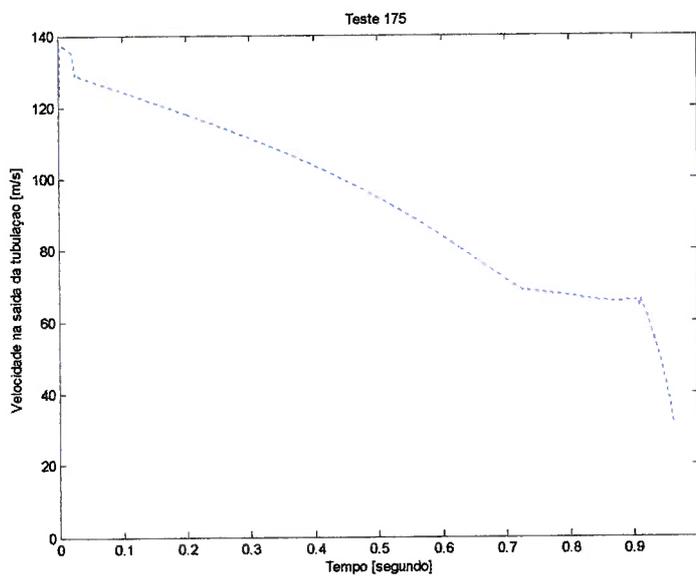


Figura A.42: Velocidade dos gases na saída da tubulação calculada do teste 175

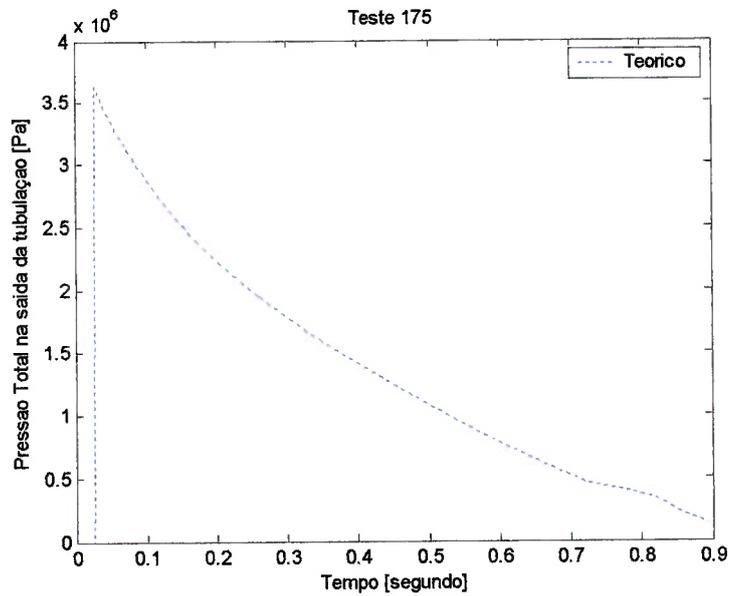


Figura A.43: Pressão total na saída da tubulação calculada do teste 175

ESTUDO DE CASO

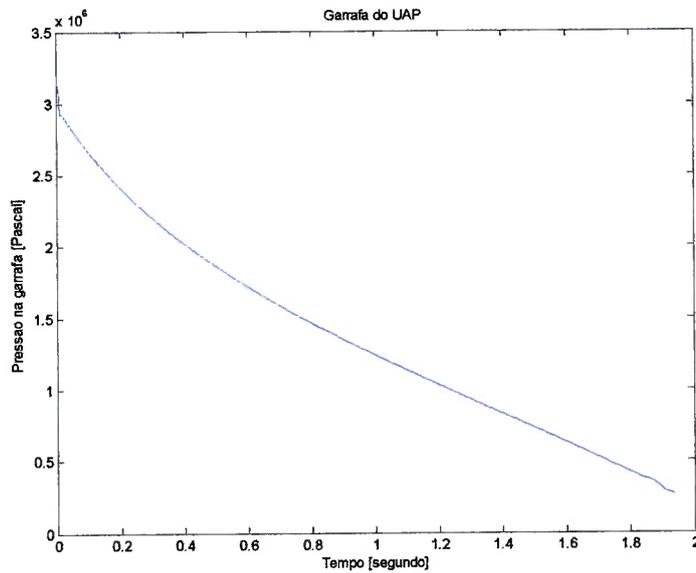


Figura A.44: Pressão na garrafa do estudo de caso

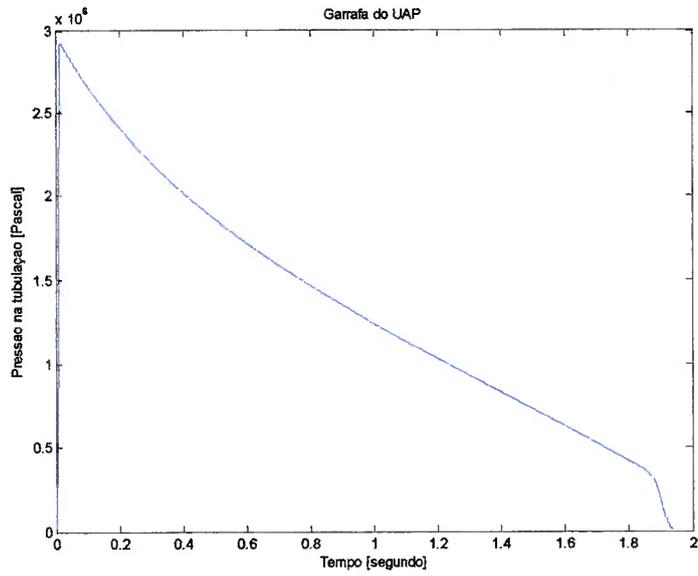


Figura A.45: Pressão na tubulação do estudo de caso

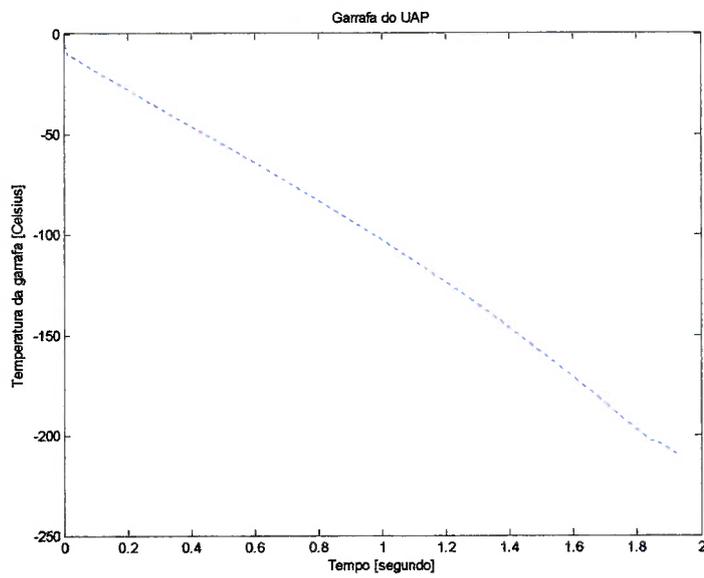


Figura A.46: Temperatura da garrafa do estudo de caso

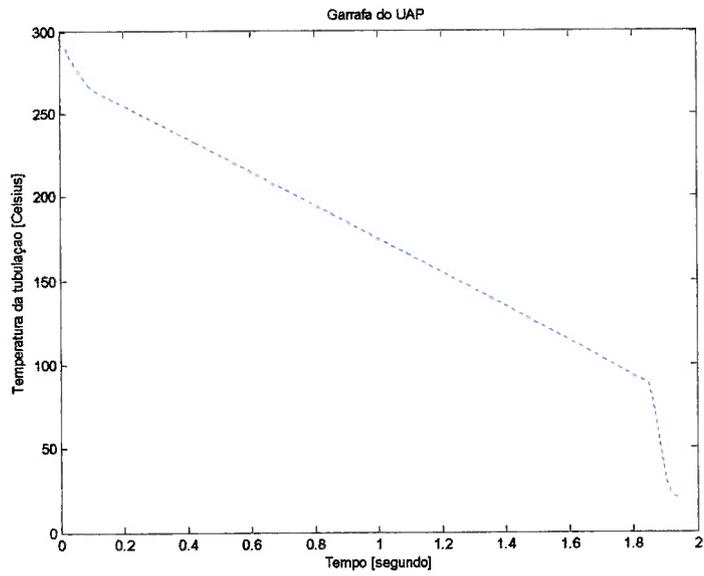


Figura A.47: Temperatura da tubulação do estudo de caso

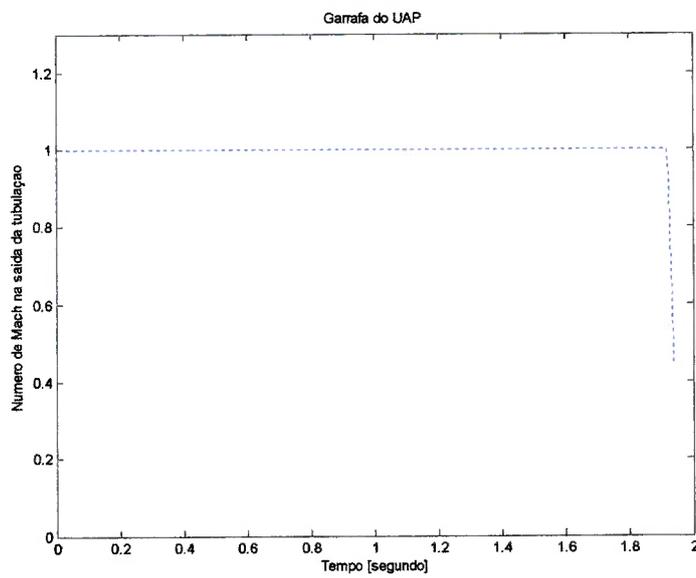


Figura A.48: Número de Mach na saída da tubulação do estudo de caso

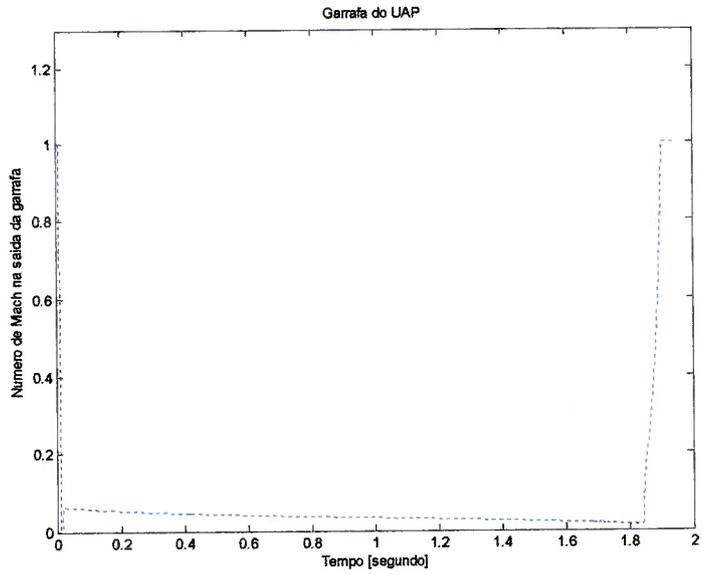


Figura A.49: Número de Mach na saída da garrafa do estudo de caso

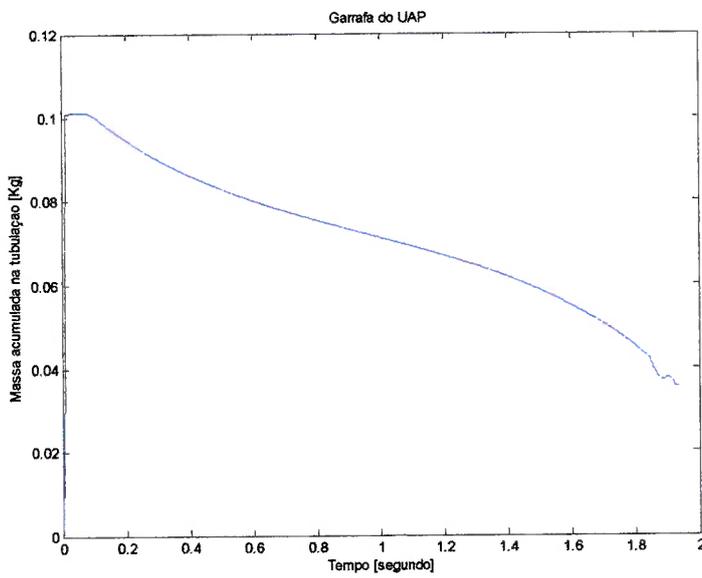


Figura A.50: Massa acumulada na tubulação do estudo de caso

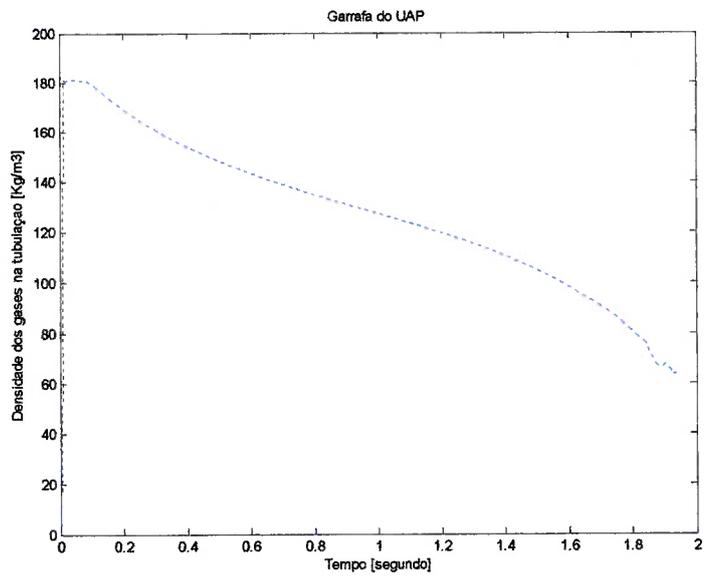


Figura A.51: Densidade dos gases na tubulação do estudo de caso

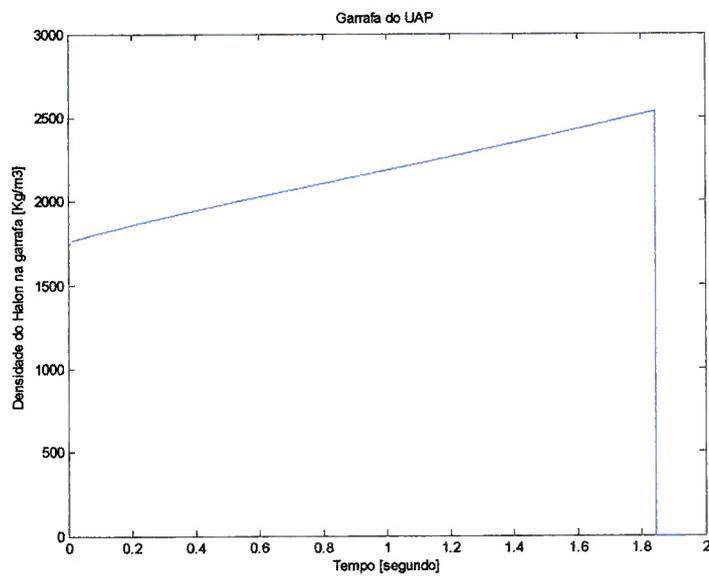


Figura A.52: Densidade do Halon-1301 na garrafa do estudo de caso

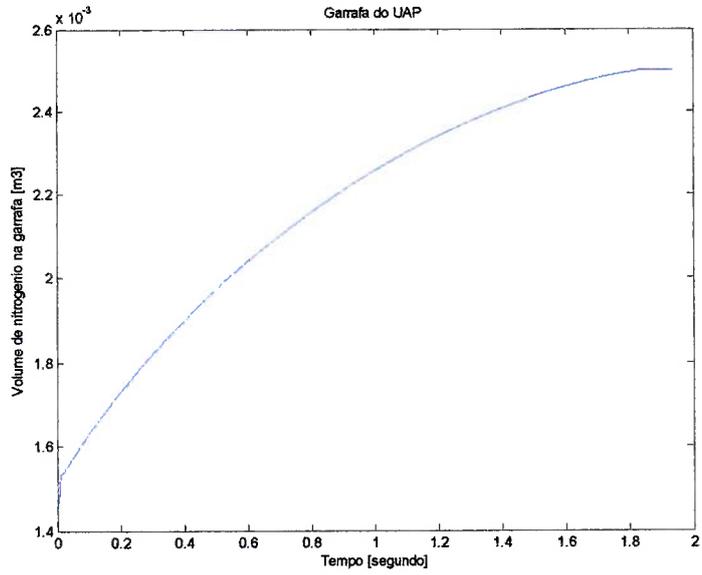


Figura A.53: Volume de nitrogênio na garrafa do estudo de caso

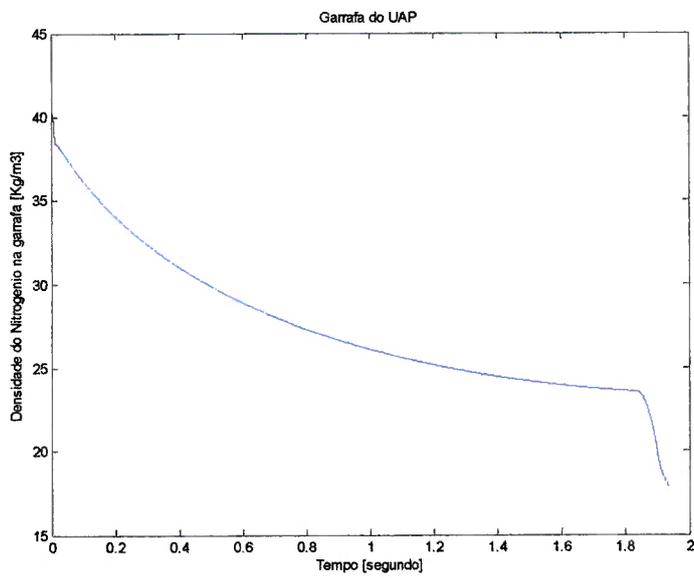


Figura A.54: Densidade do nitrogênio na garrafa do estudo de caso

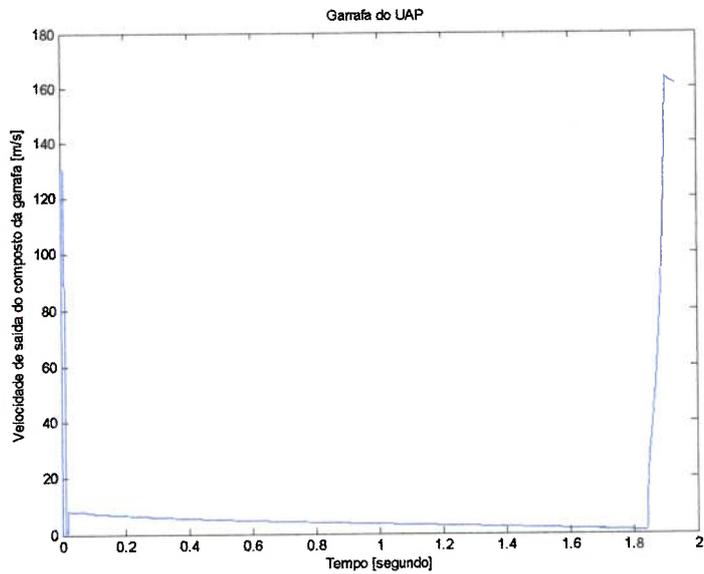


Figura A.55: Velocidade de saída dos gases da garrafa do estudo de caso

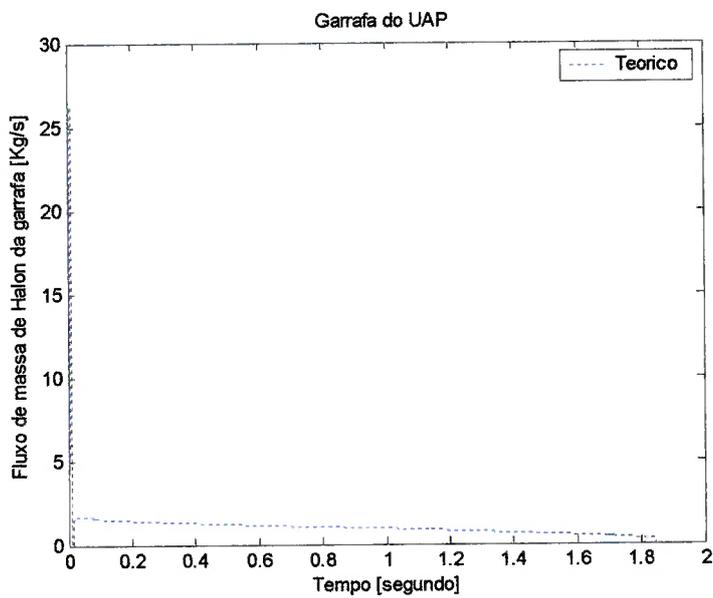


Figura A.56: Fluxo de massa de Halon-1301 da garrafa do estudo de caso

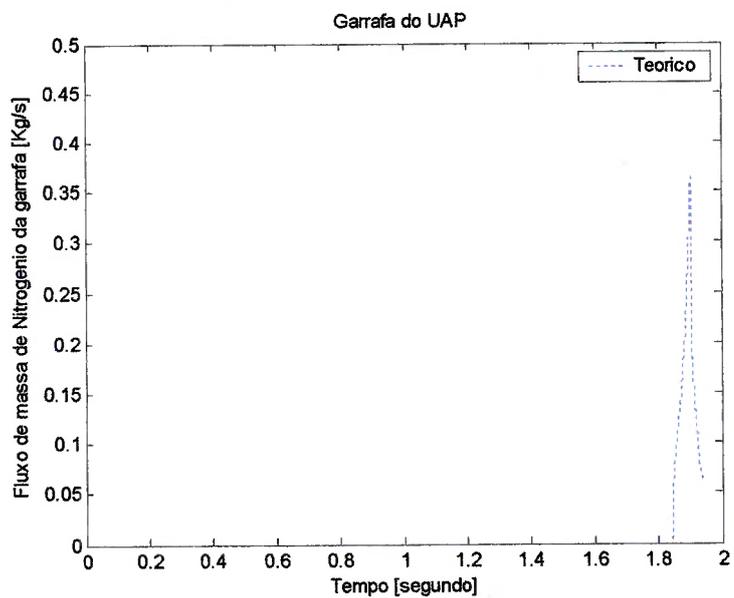


Figura A.57: Fluxo de massa de nitrogênio da garrafa do estudo de caso

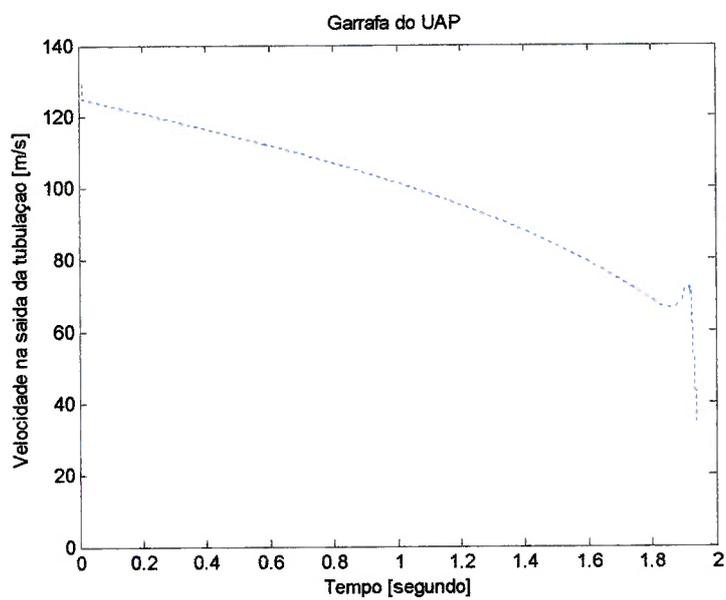


Figura A.58: Número de Reynolds na tubulação do estudo de caso

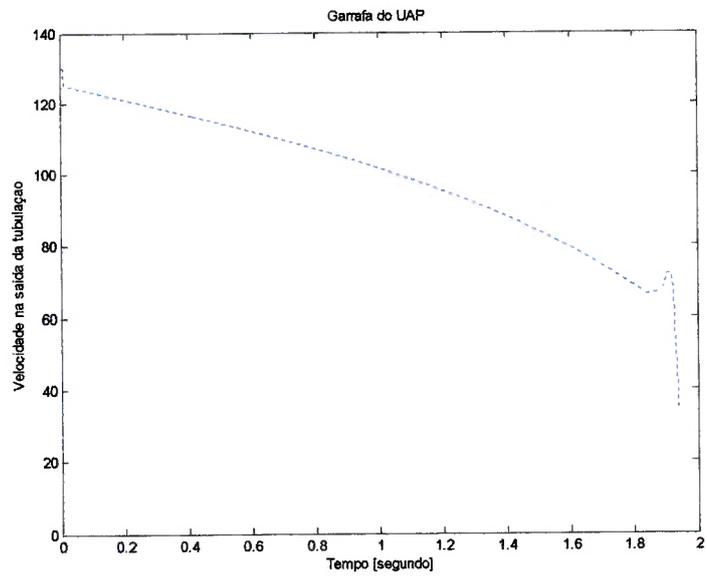


Figura A.59: Velocidade dos gases na saída da tubulação do estudo de caso

APÊNDICE B

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

	CF₃Br	N₂
M [g]	148,91	28,01
P _c [bar]	39,7	33,9
T _c [K]	340,2	126,2
Z _c	0,275	0,290
ω	0,171	0,039
μ _r [debye]	0,7	0,0
C _{pa}	21,88	31,15
C _{pb}	2,159 x 10 ⁻¹	-1,357 x 10 ⁻²
C _{pc}	-2,114 x 10 ⁻⁴	2,68 x 10 ⁻⁵
C _{pd}	7,464 x 10 ⁻⁸	-1,168 x 10 ⁻⁸

Tabela B.1: Constantes termodinâmicas

Sendo C_{pa}, C_{pb}, C_{pc} e C_{pd} constantes para o cálculo de C_p [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

1. EQUAÇÕES CÚBICAS DE ESTADO	137
2. EQUACÃO DE LEE-KESLER	138
3. ESCOLHA DA EQUACÃO DE ESTADO	140

1. EQUAÇÕES CÚBICAS DE ESTADO

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

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

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:

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

onde

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

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

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

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
β	0.65392	1.226
γ	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 serem 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 um range 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 ranges 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 substancia 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.

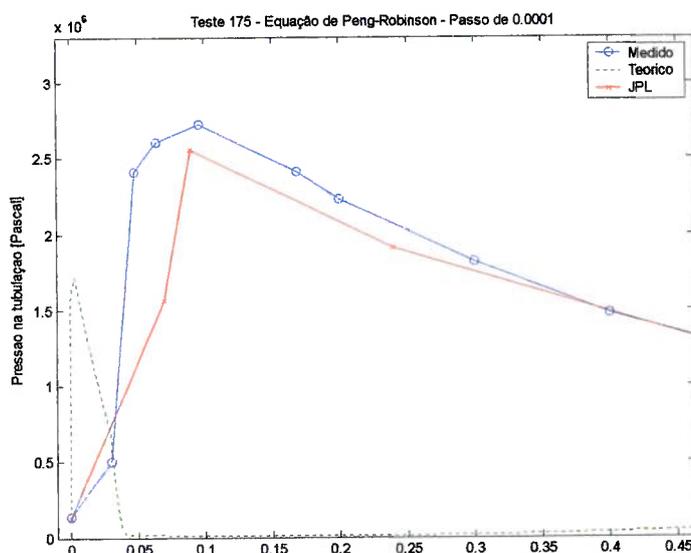


Figura C1: Pressão na tubulação calculada com a equação de Peng-Robinson

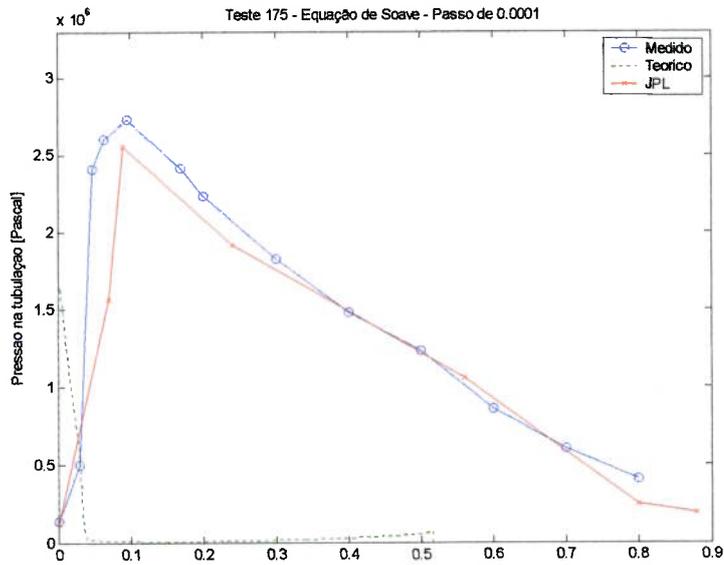


Figura C2: Pressão na tubulação calculada com a equação de Soave

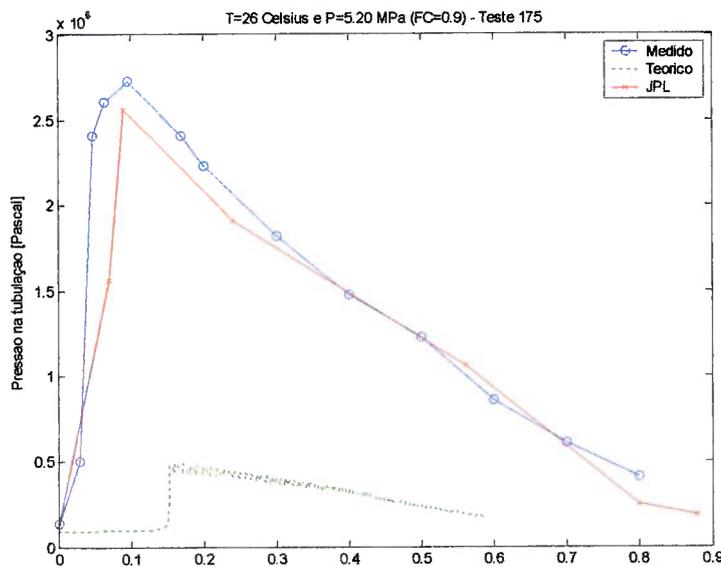


Figura C3: Pressão na tubulação calculada com a equação de Lee-Kesler

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

1. OS MÉTODOS DE CÁLCULO DA VISCOSIDADE	144
2. O MÉTODO DE LUCAS	145

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:

$$\begin{array}{ll} F_p^0 = 1 & 0 \leq \mu_r < 0.022 \\ F_p^0 = 1 + 30,55(0.292 - Z_c)^{1.72} & 0,022 \leq \mu_r < 0.075 \\ F_p^0 = 1 + 30,55(0.292 - Z_c)^{1.72} [0,96 + 0,1(T_r - 0,7)] & 0,075 \leq \mu_r \end{array}$$

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 η em poise.

Abaixo um exemplo da viscosidade calculada no Teste 175:

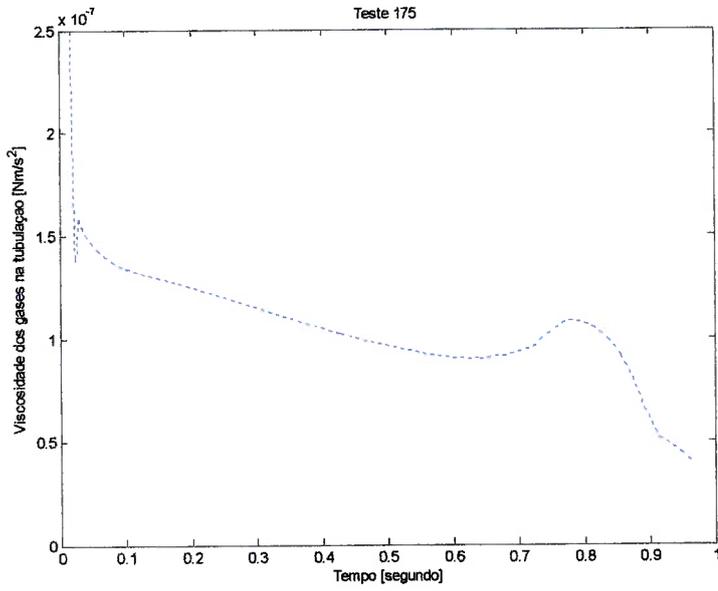


Figura D.1: Viscosidade calculada na tubulação do teste 175

APÊNDICE E

1. CÁLCULO DE DENSIDADES DE LÍQUIDOS 149

1.1. O MÉTODO DE RACKETT 149

1. CÁLCULO DE DENSIDADES DE LÍQUIDOS

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

O método de Hankinson-Brost-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-Brost-Thomson, e por isto foi escolhido.

1.1. O método de Rackett

A densidade do líquido é calculada por:

$$\rho = \frac{RT_c}{P_c} Z_{RA}^{[1+(1-T_r)^{2/7}]} \quad (\text{E.1})$$

onde Z_{RA} é dado por:

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dupont® Halon 1301 Fire Extinguishant bulletin, 1980.

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.

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.

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.

Pratt & Whitney, Aeronautical Vestpocket Handbook – 23rd edition, 1996.

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.

Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E., The properties of Gases & Liquids, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 1987.

Hodge, B.K., Koenig, K., Compressible Fluid Dynamics with Personal Computer Applications, Prentice Hall, 1995.

Anderson, J.D.Jr., Modern Compressible Flow with Historical Perspective, McGraw-Hill, second edition, 1990.

White, F.M., Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, second edition, 1991.

NFPA 12a, National Fire Protection Association

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.

Federal Aviation Regulation, site www.faa.gov

Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980

Nicolette, V.F., Tieszen, S.R., Gritzko, 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

Sanchez, I.C., Cho, J., A Universal Equation of State for polymer liquids, University of Texas at Austin, 1994.

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.

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.

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.

Gann, R., Fire Suppression System Performance of Alternative Agents in Aircraft Engine and Dry Bay, National Institute of standards and Technology, 1995.

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.

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.

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.

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.

Pratt & Whitney, Aeronautical Vestpocket Handbook, 23^a edição, 1996.

Tutorial do ICEM CFD, 2004

Wylen, G.J.V., Sonntag, R.E., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, 3ª edição 1993.

Ferziger, J.H., Peric, M., Computational Methods for Fluid Dynamics, 1996.

U.S. Environmental Protection Agency, 04 de Novembro de 2004, www.epa.gov

Fluent® User Guide, Fevereiro 2003

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Addison Wesley Longman Limited, 1998.