

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Simulação Numérica de um Modelo Idealizado de um Motor
a Jato *RAMJET***

Sandro Saorin da Silva

São Paulo
2017

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação Numérica de um Modelo Idealizado de um Motor a Jato *RAMJET*

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia

Autor: Sandro Saorin da Silva

Orientador: Prof. Dr. Ernani Vitillo Volpe

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

São Paulo
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

da Silva, Sandro Saorin

Simulação Numérica de um Modelo Idealizado de um Motor a Jato *RAMJET*, por Sandro Saorin da Silva. São Paulo, 2017- 104 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Escoamento Compressível. 2. Escoamento Supersônico. 3. *Ramjets*. 4. Expansão de Prandtl-Meyer. 5. Escoamento de Rayleigh. 6. Bocal Divergente.

RESUMO

Esse trabalho visa estudar o funcionamento de um motor a jato *Ramjet* através de um modelo idealizado considerando a associação de regimes de escoamentos conhecidos: Ondas de Choque Oblíquas, Expansão de Prandtl-Meyer, Escoamento de Rayleigh e um Bocal Divergente. À partir desse modelo, analisar algumas características como impulso gerado, rendimento entre outras variáveis, de acordo com a velocidade de entrada do escoamento.

Palavras-chave: *Escoamento Compressível. Escoamento Supersônico. Ramjets. Expansão de Prandtl-Meyer. Escoamento de Rayleigh. Bocal Divergente.*

ABSTRACT

This paper studies the operation a *Ramjet* through an idealized model that considers the association of known flows: Oblique shockwaves, Prandtl-Meyer expansion fans, Rayleigh flow and divergent nozzle. This model will analyze some features as generated thrust, efficiency and other variables, according to the input airspeed.

Keywords: *Compressible Flow. Supersonic Flow. Ramjets. Oblique Shockwaves. Prandtl-Meyer Expansion Theory. Rayleigh Flow. Divergent Nozzle.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Lockheed SR-71 Blackbird	1
Figura 2 – Associação Motor Convencional e <i>Ramjet</i>	2
Figura 3 – Ângulo de Mach	4
Figura 4 – Diagrama de funcionamento do modelo	7
Figura 5 – Onda de Choque Oblíqua	8
Figura 6 – Decomposição das Velocidades	9
Figura 7 – Relação θ - β - M	11
Figura 8 – Resultados para Ondas de Choque 1	12
Figura 9 – Resultados para Ondas de Choque 1	13
Figura 10 – Escoamento ao redor de um aerofólio.	14
Figura 11 – Escoamento através de uma área variável.	15
Figura 12 – Ângulo de Choque x Densidade	16
Figura 13 – Ângulo de Choque x Pressão	17
Figura 14 – Ângulo de Choque x Temperatura	17
Figura 15 – Ângulo de Choque x Número de Mach M_2	18
Figura 16 – Expansão de Prandtl-Meyer	20
Figura 17 – Modelagem do Prandtl-Meyer	21
Figura 18 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 2$	22
Figura 19 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 3$	23
Figura 20 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 4$	23
Figura 21 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 2$	24
Figura 22 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 3$	24
Figura 23 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 4$	25
Figura 24 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 2$	25
Figura 25 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 3$	26
Figura 26 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 4$	26
Figura 27 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 2$	27
Figura 28 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 3$	27
Figura 29 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$	28
Figura 30 – Escoamento de Rayleigh	30
Figura 31 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 2$	33
Figura 32 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 3$	33
Figura 33 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 4$	34
Figura 34 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 2$	34
Figura 35 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 3$	35
Figura 36 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 4$	35

Figura 37 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 2$	36
Figura 38 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 3$	36
Figura 39 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 4$	37
Figura 40 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$	37
Figura 41 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$	38
Figura 42 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$	38
Figura 43 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 2$	41
Figura 44 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 3$	42
Figura 45 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 4$	42
Figura 46 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 2$	43
Figura 47 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 3$	43
Figura 48 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 4$	44
Figura 49 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 2$	44
Figura 50 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 3$	45
Figura 51 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 4$	45
Figura 52 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 2$	46
Figura 53 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 3$	46
Figura 54 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$	47
Figura 55 – Ângulo de Declive x Empuxo	50
Figura 56 – Ângulo de Declive x Rendimento de Carnot	51
Figura 57 – Ângulo de Declive x Rendimento Real	52

Lista de tabelas

Tabela 1 – Solução para Exemplo 1 - Modelo	14
Tabela 2 – Solução para Exemplo 2 - Modelo	19
Tabela 3 – Solução para Exemplo 3 - Modelo	29
Tabela 4 – Tabela de Combustíveis	31
Tabela 5 – Correções do C_{p0} para o Ar.	31
Tabela 6 – Solução para Exemplo 4 - Modelo	40
Tabela 7 – Solução para Exemplo 5 - Modelo	48

Lista de símbolos

a	Velocidade de propagação de onda no meio, m/s
V	Velocidade do fluido, m/s
M	Número de Mach
M_n	Componente normal do número de Mach
M_t	Componente tangencial do número de Mach
μ	Ângulo de Mach, rad
β	Ângulo da onda de choque, rad
θ	Ângulo de deflexão, rad
λ	Ângulo de Declive, rad
ρ	Densidade, kg/m^3
ρ_O	Densidade de estagnação, kg/m^3
p	Pressão, Pa
p_{cruz}	Pressão de cruzeiro, Pa
p_O	Pressão de estagnação, Pa
T	Temperatura, K
T_m	Temperatura média de cruzeiro, K
T_O	Temperatura de estagnação, K
h	Entalpia específica, kJ/kg
h_O	Entalpia específica de estagnação, kJ/kg
s	Entropia específica, kJ/kgK
s_O	Entropia específica de estagnação, kJ/kgK
C_p	Calor específico a pressão constante, kJ/kgK
C_v	Calor específico a volume constante, kJ/kgK
k	Razão entre os calores específico,

R	Constante dos gases, kJ/kgK
\dot{m}	Vazão mássica, kg/s
A	Área da seção, m^2
Q	Calor transferido, kJ
z	Altitude de cruzeiro, m
g	Gravidade, m/s^2
v	Função de Prandtl-Meyer
H_v	Entalpia de Combustão, MJ/kg
\dot{m}	Fluxo de massa, kg/s
F	Empuxo, N
f	Empuxo específico, N/kg
RAC	Relação ar-combustível

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Funcionamento do Ramjet	2
2.1.1 Admissão de Ar	2
2.1.2 Combustão de Ar e Bocal Convergente Divergente	2
2.2 Escoamento Compressível e Supersônico	3
2.2.1 Velocidade de Propagação da Onda no Meio	3
2.2.2 Número de Mach	4
2.2.3 Ângulo de Mach	4
2.2.4 Estado de Estagnação	5
2.2.5 Equações dos Gases Perfeitos em função do Número de Mach	5
2.2.6 Estado Crítico	6
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	7
4 ONDAS DE CHOQUES OBLÍQUAS	8
4.1 Base Teórica	8
4.2 Relações da Onda de Choque	8
4.3 Modelo e Simulações	10
4.3.1 Condições Iniciais do Ar	10
4.3.2 Simulação	11
4.3.3 Resultados	11
4.3.4 Verificação	13
5 ESCOAMENTO ATRAVÉS DE ÁREA VARIÁVEL	15
5.1 Base Teórica	15
5.2 Modelo e Simulação	15
5.3 Resultados	16
5.3.1 Verificação	18
6 EXPANSÃO DE PRANDTL-MEYER	20

6.1	Base Teórica	20
6.2	Equacionamento e Função de Prandtl	20
6.3	Modelo e Simulações	21
6.3.1	Modelo	21
6.3.2	Simulação	22
6.3.3	Resultados	22
6.3.4	Verificação	28
7	ESCOAMENTO DE RAYLEIGH	30
7.1	Base Teórica	30
7.2	Modelo e Simulações	30
7.2.1	Definição do Combustível	30
7.2.2	Cálculo do Calor Específico	31
7.2.3	Equacionamentos e Simulações	32
7.3	Resultados	33
7.3.1	Verificação	39
8	BOCAL DIVERGENTE	41
8.1	Modelo e Simulação	41
8.2	Resultados	41
8.2.1	Verificação	47
9	ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	49
9.1	Empuxo Específico	49
9.2	Rendimento de Carnot	50
9.3	Rendimento Real	51
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
A	SIMULAÇÃO DO MATLAB	55

1 INTRODUÇÃO

O *Ramjet* é um modelo de motor a jato criado para trabalhar em escoamento supersônico. Apesar de haver registros anteriores, o seu desenvolvimento intensivo começou nos primórdios da Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de melhorar o alcance de mísseis e artilharia intercontinental. Hoje, o *ramjet* é largamente pesquisado e tem algumas aplicações em mísseis, aviões de combate (por exemplo o Lockheed SR-71 Blackbird da Figura 1) e aviões não tripulados (VANT).



Figura 1 – Lockheed SR-71 Blackbird

Fonte: MigFlug, 2016.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Funcionamento do Ramjet

Diferente dos motores a jato convencionais no mercado, que trabalham no regime subsônico, o motor *Ramjet* não possui partes móveis, pois a pressão do ar na entrada é suficiente para comprimi-lo. Esse motor constitui essencialmente de 3 partes: admissão de ar, câmara de combustão e um bocal e por trabalhar exclusivamente em escoamento supersônico, normalmente é associado a um motor a jato convencional, para ser aplicado na região de regime subsônico.

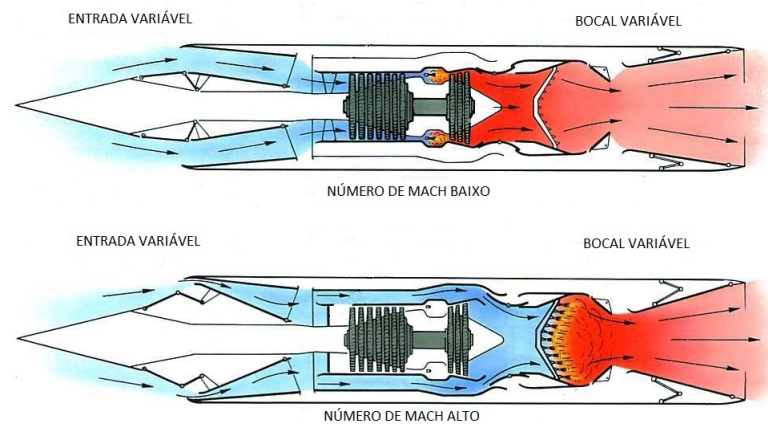


Figura 2 – Associação Motor Convencional e *Ramjet*

Fonte: Aeroflap, 2016.

2.1.1 Admissão de Ar

Na admissão de ar, com a ausência do conjunto compressor/turbina, o aumento da pressão do ar ocorre devido a formação de uma onda de choque oblíqua na entrada de ar. Em seguida, o ar aquecido pela onda de choque, é acelerado devido a formação de ondas de expansão de Prandtl-Meyer, direcionando o ar para a câmara de combustão.

2.1.2 Combustão de Ar e Bocal Convergente Divergente

O ar segue pela câmara de combustão onde formará uma mistura com o combustível injetado e ocorrerá a queima. Por fim, os gases residuais da queima serão acelerados quando transportados através do bocal convergente-divergente. A velocidade de saída dos gases assim como variáveis qualitativas do modelo (rendimento, impulso gerado, exergia entre outros) desse processo, são fatores a serem estudados de acordo com as condições iniciais do ar de entrada adotados ao modelo, objetivo a ser desenvolvido ao longo desse trabalho.

2.2 Escoamento Compressível e Supersônico

Em escoamentos, quando trabalhamos com fluídos ou gases em velocidades próximas a velocidade de propagação da onda no meio (também nomeado como velocidade do som no meio), estes se comportam como fluídos compressíveis, onde pequenas perturbações na pressão do meio causam variações significativas na densidade do fluído ao longo do escoamento. Esse fato é essencial para estudo dos escoamentos a velocidades supersônicas, onde a velocidade do fluído é maior do que a velocidade do som. Nos tópicos a seguir, serão lembrados alguns conceitos e equações relevantes para a modelagem posterior do funcionamento do *Ramjet*. Para isso, iremos adotar algumas hipóteses considerando os regimes de escoamento que serão tratados por esse trabalho:

- Escoamento Unidimensional;
- Regime Permanente;
- Ar comporta-se como gás perfeito;
- Variação de energia potencial desprezível;
- Escoamento sem atrito.

2.2.1 Velocidade de Propagação da Onda no Meio

Define-se a velocidade de propagação da onda no meio como sendo a variação infinitesimal da pressão pela densidade para um processo isentrópico, pois como trata-se de um processo infinitesimal pode ser considerado como adiabático e reversível. A fórmula é apresentada na equação 2.1:

$$a = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \quad (2.1)$$

No caso dos gases perfeitos, temos que esta velocidade depende apenas da temperatura do gás no escoamento, conforme mostrado na equação 2.2:

$$a = \sqrt{kRT} \quad (2.2)$$

Onde k é a razão entre os calores específico, R é a constante dos gases para o ar e T é a temperatura do ar.

2.2.2 Número de Mach

Define-se o número de Mach como a relação entre a velocidade do ar com a velocidade do som:

$$M = \frac{V}{a} \quad (2.3)$$

Onde V é a velocidade do ar e a é a velocidade do som através do ar. Percebe-se que o número de Mach é calculado localmente, ou seja, o número de Mach depende das condições de um mesmo ponto do sistema. Definido o valor de M na equação 2.3, pode-se classificar os diferentes regimes de escoamento:

- Velocidade Subsônica: $M < 1$;
- Velocidade Sônica: $M = 1$;
- Velocidade Supersônica: $M > 1$.

2.2.3 Ângulo de Mach

Segundo ZUCKER (2002), quando analisamos as frentes de onda emitida por um ponto, cuja velocidade da perturbação é maior que a velocidade do som, tem-se que as posições das frentes de onda a cada instante de tempo formam um cone, sendo no vértice localizado a perturbação. Essa forma é conhecida como Cone de Mach.

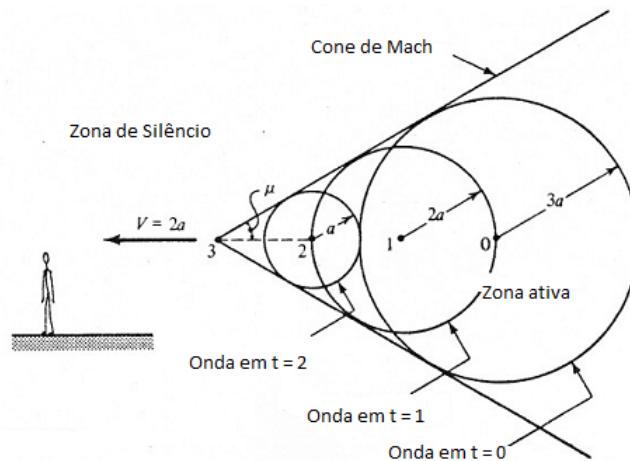


Figura 3 – Ângulo de Mach

Fonte: ZUCKER, 2002.

O ângulo de abertura das frentes de onda, é chamado de ângulo de Mach e depende exclusivamente do Número de Mach da perturbação, conforme a equação 2.4 a seguir:

$$\mu = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) \quad (2.4)$$

2.2.4 Estado de Estagnação

O estado de estagnação é um estado de referência onde o fluido é levado ao ponto de repouso ($V = 0$), sem nenhuma troca de energia e sem perdas durante o escoamento, ou seja, através de um processo isentrópico. Segundo BORGNAKKE (2009), à partir da primeira lei da termodinâmica aplicada a volume de controle, conforme a equação 2.5, e da equação para a entalpia total na equação 2.6, em um processo isoentrópico qualquer:

$$q + h_{tot,e} = w + h_{tot,s} \quad (2.5)$$

$$h_{tot} = h + \frac{V^2}{2} \quad (2.6)$$

Temos então que a variação de entalpia entre um ponto qualquer do processo e o ponto de estagnação é representada pela equação 2.7 a seguir:

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} \quad (2.7)$$

Além da entalpia, no estado de estagnação podemos também definir outras propriedades importantes como temperatura T_0 , densidade ρ_0 , pressão p_0 e entropia s_0 , a partir de relações conhecidas da termodinâmica para os gases ideais, conforme mostrado nas equações de 2.8 à 2.11:

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad (2.8)$$

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} \quad (2.9)$$

$$p_0 = p + \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.10)$$

$$s_0 - s = C_p \ln\left(\frac{T_0}{T}\right) - R \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad (2.11)$$

2.2.5 Equações dos Gases Perfeitos em função do Número de Mach

Como definido nas hipóteses, que o ar se comporta como um gás perfeito, vamos definir algumas equações em função do número de Mach. Primeiramente tiramos uma relação de V^2 com M e k , a partir das equações 2.2 e 2.3:

$$V^2 = M^2 k R T \quad (2.12)$$

Aplicando a equação 2.12 a equação da continuidade, definida na equação 2.12,

$$\dot{m} = \rho AV \quad (2.13)$$

Obtemos uma equação para a vazão mássica para o escoamento supersônico, conforme a seguir:

$$\dot{m} = \rho AM \sqrt{\frac{k}{RT}} \quad (2.14)$$

Aplicando a mesma equação 2.12 na equação 2.7 da entalpia de estagnação, com o auxílio de algumas equações conhecidas da termodinâmica,

$$h = C_p T \quad (2.15)$$

$$C_p = \frac{kR}{R-1} \quad (2.16)$$

Obtemos também as equações para a entalpia e temperatura de estagnação em função de M :

$$h_0 = h \left(1 + \frac{(k-1)M^2}{2} \right) \quad (2.17)$$

$$T_0 = T \left(1 + \frac{(k-1)M^2}{2} \right) \quad (2.18)$$

Por fim, como o estado de estagnação é um processo isentrópico, a partir da relação para processos:

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.19)$$

Obtemos a equação 2.19 a seguir:

$$p_0 = p \left(1 + \frac{(k-1)M^2}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.20)$$

2.2.6 Estado Crítico

É o estado termodinâmico em um processo particular onde o fluido estudado apresentasse o número de Mach 1 (M^*). Assim como o ponto de estagnação, cada ponto do escoamento tem um estado crítico, e este processo também é definido que ocorra de forma adiabática e reversível, ou seja, processo isentrópico. Tanto o estado de estagnação como o estado crítico são referências importantes para o estudo de escoamentos compressíveis, pois existem tabelas denominadas tabelas isentrópicas, onde são definidos valores das propriedades termodinâmicas em relação a esses estados para diferentes valores de razão k com a variação do número de Mach, auxiliando nos cálculos dos estados entre dois pontos quaisquer.

3 Desenvolvimento do Trabalho

O objetivo do trabalho é modelar no MATLAB o funcionamento de um *Ramjet* através de um modelo idealizado. Relembrado os conceitos fundamentais para o estudo de escoamentos compressíveis, iremos desenvolver os conceitos e modelar cada um dos regimes de escoamento conhecidos que compõem o funcionamento desse motor a jato:

- Ondas de Choques Oblíquas;
- Escoamento através de Área Variável;
- Expansão de Prandtl-Meyer;
- Escoamento de Rayleigh;
- Bocal Divergente.

Estudando de início, os modelos separadamente nas condições de escoamento usuais para motores a jato supersônico, e posteriormente associar os 4 regimes, de forma a aproximar-se do funcionamento de um *Ramjet*, onde os dados de saída de um caso específico será de entrada em outro trecho do modelo, conforme mostrado na figura 4.

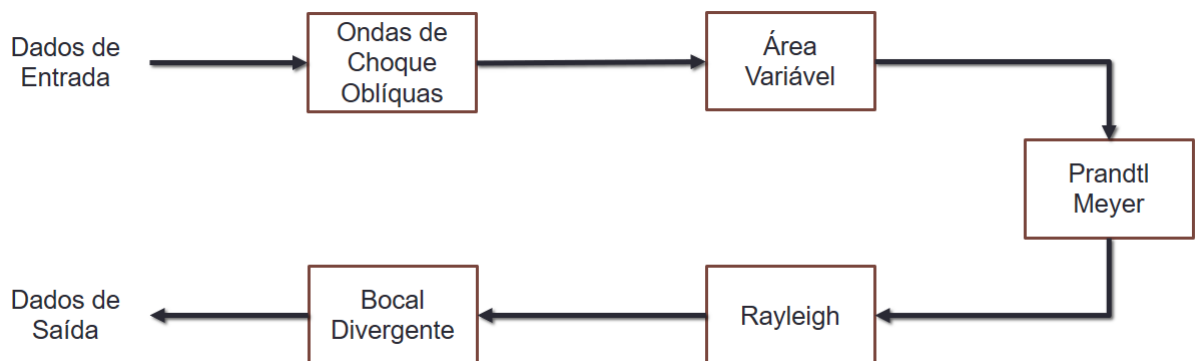


Figura 4 – Diagrama de funcionamento do modelo

Partindo desse modelo, vamos analisar parâmetros característicos para diferentes velocidades no regime supersônico e determinar o empuxo específico além dos rendimentos de Carnot correspondente e real do *Ramjet*.

4 Ondas de Choques Oblíquas

4.1 Base Teórica

Segundo ANDERSON (2002), a onda de choque oblíqua é o caso mais geral para o estudo desse fenômeno em escoamentos supersônicos, pois considera-se mais de uma componente de velocidade atravessando a onda de choque. Para o caso bidimensional, considerando um escoamento supersônico horizontal, ou seja $M_{x1} > 1$ e $M_{y1} = 0$, a formação da onda de choque ocorre quando o escoamento passa por um afixe, defletindo de um ângulo θ na direção do mesmo. Quando o escoamento atravessa a onda de choque, têm-se um decréscimo no número de Mach e um aumento nas propriedades termodinâmicas do ar (densidade, pressão e temperatura).

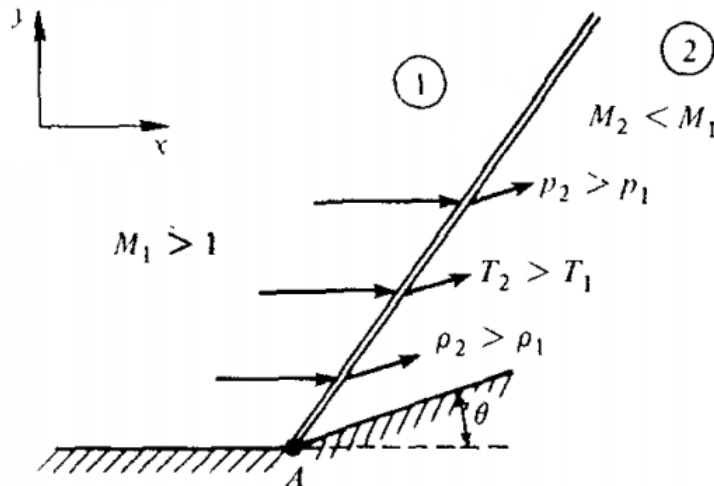


Figura 5 – Onda de Choque Oblíqua

Fonte: ANDERSON, 2002.

4.2 Relações da Onda de Choque

A onda de choque oblíqua forma um ângulo de onda β com o referencial horizontal do escoamento. Para a análise das condições do escoamento antes e depois da onda de choque, deve-se decompor as velocidades em componentes normais e tangenciais a onda, e assim utilizar as relações conhecidas para ondas de choque normais. Para que sejam válidas essas relações, temos como condição que a componente tangencial de velocidade se conserve ao atravessar a onda de choque oblíqua.

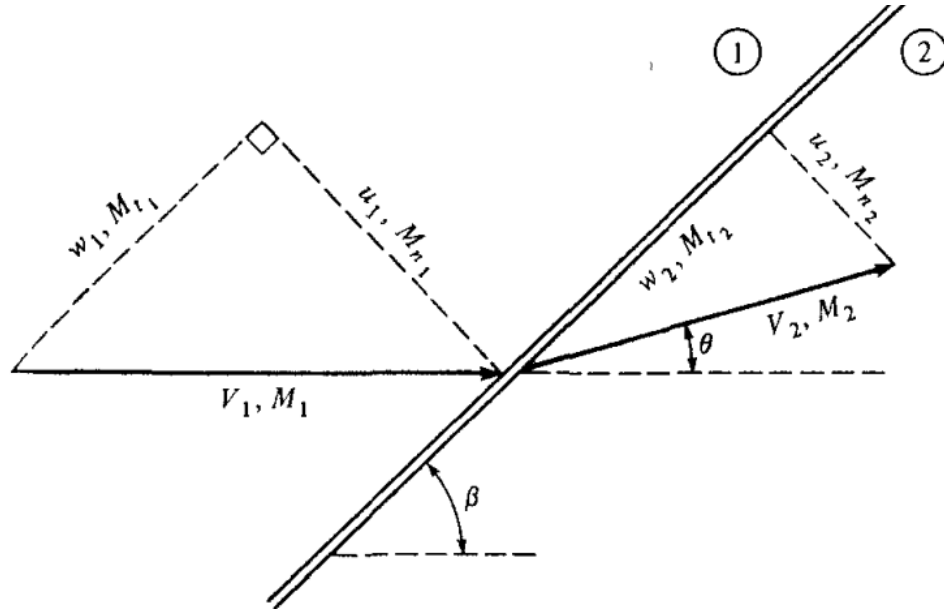


Figura 6 – Decomposição das Velocidades

Fonte: ANDERSON, 2002.

Dessa forma, pode-se utilizar as equações 4.1 a 4.4 para determinar as condições do escoamento após o choque, indicadas a seguir:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(k+1)M_{n1}^2}{(k-1)M_{n1}^2 + 2} \quad (4.1)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2k}{k+1}(M_{n1}^2 - 1) \quad (4.2)$$

$$M_{n2}^2 = \frac{M_{n1}^2 + \frac{2}{k-1}}{\frac{2k}{k-1}M_{n1}^2 - 1} \quad (4.3)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (4.4)$$

Onde os números de Mach M_1 e M_2 podem ser determinados a partir de suas componentes normais, sabendo os ângulos θ e β , conforme as equações 4.5 e 4.6:

$$M_{n1} = M_1 \sin(\beta) \quad (4.5)$$

$$M_2 = \frac{M_{n_2}}{\cos(\beta - \theta)} \quad (4.6)$$

Além dessas equações, uma relação importante para o desenvolver do modelo e a simulação na seção a seguir, onde variando a velocidade de entrada M_1 e o ângulo de deflexão θ consegue-se determinar o ângulo de choque β . Essa relação é conhecida como relação de $\theta - \beta - M$, e é representada na equação 4.7:

$$\tan(\theta) = 2 \cot(\beta) \left[\frac{M_1^2 \sin^2(\beta) - 1}{M_1^2 (k + \cos(2\beta)) + 2} \right] \quad (4.7)$$

4.3 Modelo e Simulações

4.3.1 Condições Iniciais do Ar

Para determinar as condições iniciais do ar, foi usado como premissa que o *Ramjet* trabalharia nas condições do padrão internacional de voo. Dessa forma, temos a princípio que:

- Altitude de cruzeiro de 40 mil pés = 12192 m;
- Temperatura média de cruzeiro $T_m = -55^\circ\text{C}$ (218,15 K);

A partir da altitude e temperatura média, consegue-se determinar a pressão e a densidade do ar nas condições de voo. Sabendo que a pressão atmosférica cai conforme se aumenta a altitude, utilizando alguns conceitos básicos de termodinâmica, temos como determinar uma pressão de cruzeiro p_{cruz} da seguinte forma:

$$p_{cruz} = p_1 \exp\left(\frac{-zg}{RT_m}\right) \quad (4.8)$$

Onde adotaram-se os seguintes valores para as constantes:

- Pressão a nível do mar $p_1 = 101,325 \text{ kPa}$;
- Gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- Constante dos gases para o ar $R = 287 \text{ J/kgK}$

Por fim, para se determinar a densidade do ar nas mesmas condições, utilizou-se a equação 4.9, para os gases ideais:

$$\rho_1 = \frac{p_{cruz}}{RT_m} \quad (4.9)$$

Como resultado para pressão e densidade na altitude padrão de cruzeiro, teve-se os seguintes valores:

- $p_{cruz} = 15 \text{ kPa}$;
- $\rho_1 = 0,239 \text{ kg/m}^3$;

4.3.2 Simulação

Definida todas as condições iniciais necessárias para o escoamento, o próximo passo é simular qual seria o valor do ângulo de deflexão θ , variando o ângulo da onda de choque β a partir da equação 4.10, uma forma alternativa para a equação 4.7 para um β variável:

$$\theta = \arctan(2 \cot(\beta) \left[\frac{M_1^2 \sin^2(\beta) - 1}{M_1^2 (k + \cos(2\beta)) + 2} \right]) \quad (4.10)$$

Essa equação 4.10 foi simulada em um programa simples de MATLAB, apresentando os resultados encontrados no tópico a seguir.

4.3.3 Resultados

Os resultados da simulação foram obtidos, variando o número de Mach M_1 de 2 a 4, e com isso foi simulado variando gradativamente o β , formando uma curva onde o ângulo θ varia até o chamado ângulo de deflexão máximo θ_{max} . Para valores onde $\theta > \theta_{max}$, tem-se o desprendimento da onda de choque com o ângulo de deflexão, caso que não será abordado nesse trabalho.

Calculado o ângulo de choque β , foram definidas todas as condições após a onda de acordo com a variação do mesmo, valores esses importantes para as próximas simulações.

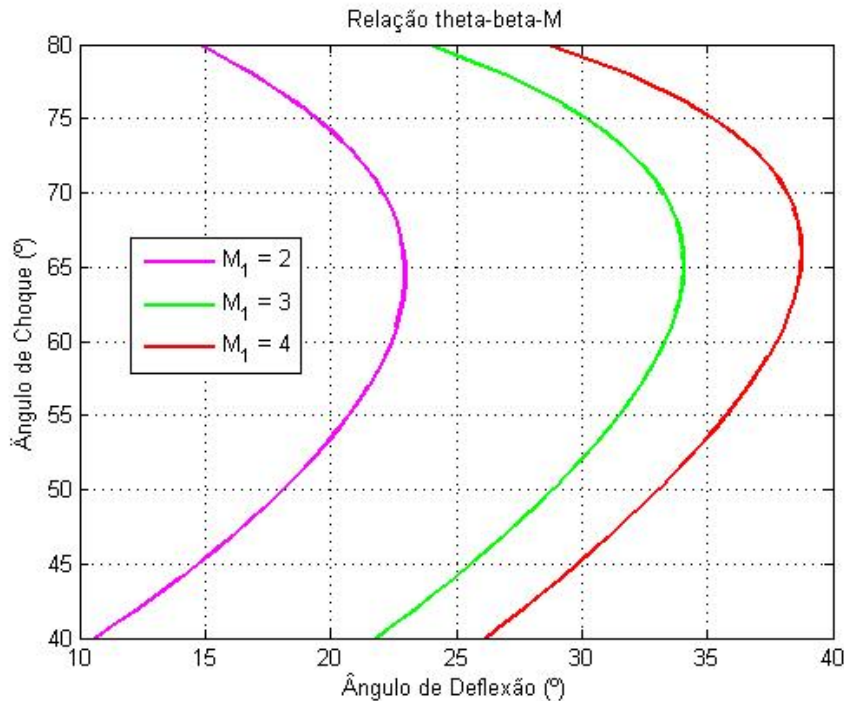


Figura 7 – Relação θ - β - M

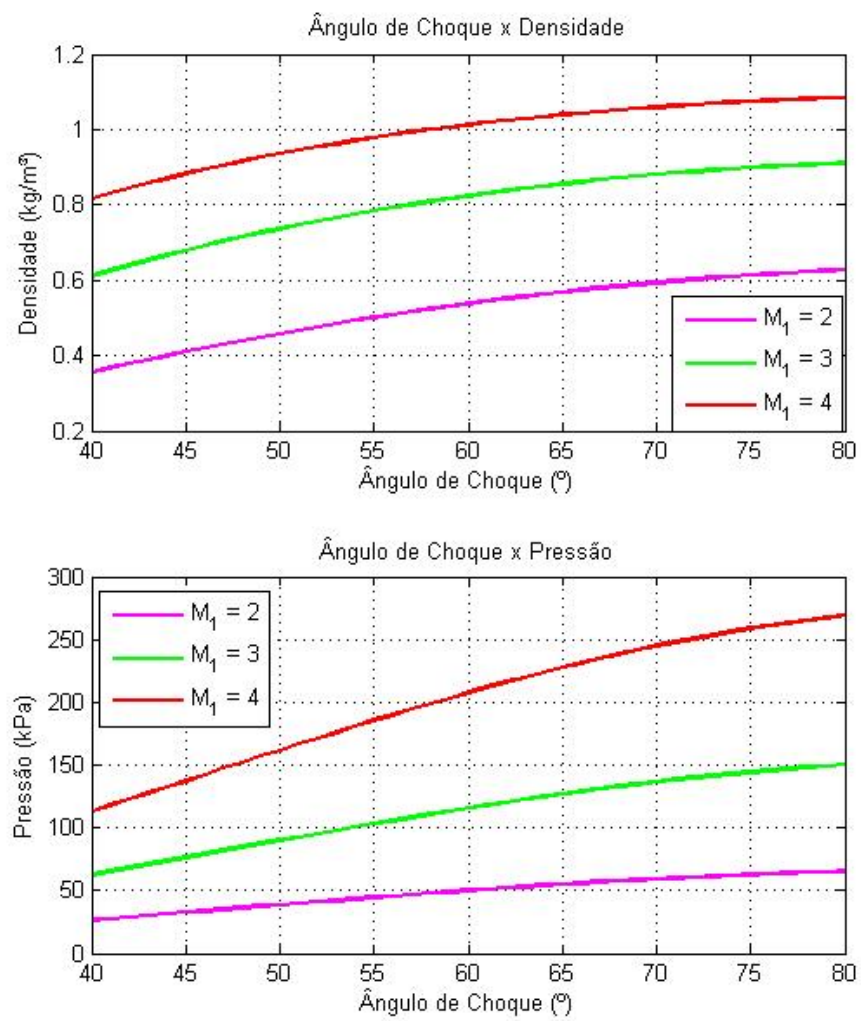


Figura 8 – Resultados para Ondas de Choque 1

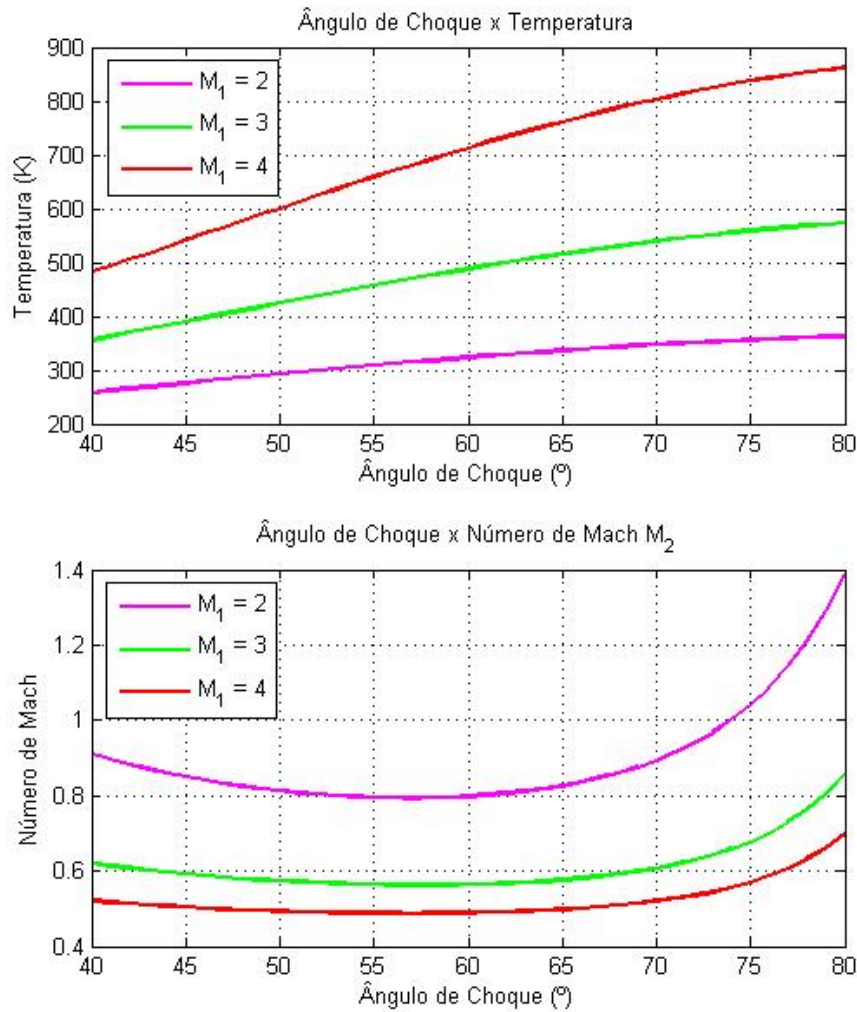


Figura 9 – Resultados para Ondas de Choque 1

4.3.4 Verificação

Cada uma das etapas do modelo será verificada a partir de exemplos específicos para cada área desenvolvida, exemplos esses retirados das referências bibliográficas onde já são conhecidas as soluções ou as soluções foram feitas manualmente. No caso da Onda de Choque Oblíqua e Expansão de Prandtl-Meyer, será a resolução de um escoamento ao redor de um aerofólio segundo ZUCKER (2002). A descrição do exercício é dada a seguir:

- Seja um aerólio segundo a figura 10, com ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$ e escoamento ao longe igual a $M_1 = 1.5$. Sabendo que a temperatura nesta altitude é $T_1 = -55^\circ\text{C}$ e pressão de $p_1 = 55.2\text{kPa}$, deve ser calculado as condições do escoamento após a onda de choque, considerando que o fluido é ar e que o ângulo de declive $\delta < \theta_{max}$.

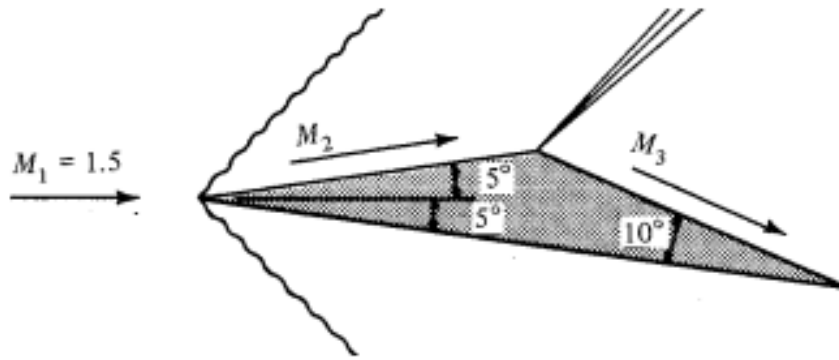


Figura 10 – Escoamento ao redor de um aerofólio.

Solução: Sabendo que $\alpha = 5^\circ$ e o ângulo de abertura da geometria do aerofólio é $\varepsilon = 10^\circ$, define-se o ângulo de aclave como $\delta = \varepsilon - \alpha = 5^\circ$. Com o ângulo de declive e número de Mach do escoamento, através das curvas de onda de choque oblíqua, define-se o ângulo de choque como $\theta = 48^\circ$, para a solução onde $\delta < \theta_{max}$. A partir desses dados, consegue-se determinar todas as condições antes e depois do escoamento:

$$M_{n1} = M_1 \sin \theta = 1.5 \sin 48 = 1.12$$

Tabelas de Onda de Choque Normal: $M_{n2} = 0.9$ e $\frac{p_2}{p_1} = 1.2838$

$$M_2 = \frac{M_{n2}}{\cos(\theta - \delta)} = \frac{0.9}{\cos(48 - 5)} = 1.23$$

$$p_2 = p_1 \frac{p_2}{p_1} = 70.9 \text{ kPa}$$

Solução Numérica: Os resultados obtidos do modelo estão na tabela 1 a seguir:

Resultados	
M_1	1.5000
p_1	55.2000
δ	5.0000
θ	47.8915
M_{n1}	1.1128
M_{n2}	0.9019
M_2	1.2311
$\frac{p_2}{p_1}$	1.2781
p_2	70.5511

Tabela 1 – Solução para Exemplo 1 - Modelo

5 Escoamento através de Área Variável

5.1 Base Teórica

Este tópico visa estudar como o escoamento compressível se comporta ao longo de seu trajeto, quando é submetido a uma variação de área em um escoamento sem perdas, conforme a figura 11 a seguir.

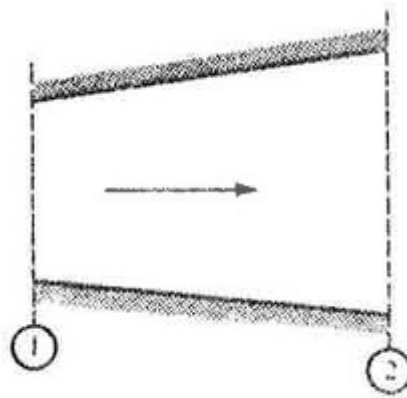


Figura 11 – Escoamento através de uma área variável.

PIMENTA, 1998.

A relação da variação de área com os números de Mach de entrada e saída de um dado escoamento hipotético, pode ser calculada pela equação 5.1:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{M_1}{M_2} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} e^{\frac{s_1 - s_2}{R}} \quad (5.1)$$

Lembrando que não há perdas durante o escoamento, ou seja ele é isoentrópico, tem se que o fator referente a variação de entropia na equação 5.1 será igual a 1, obtendo a equação 5.2 a seguir:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{M_1}{M_2} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (5.2)$$

5.2 Modelo e Simulação

Para o modelo do *Ramjet*, adotou-se um valor para a relação de áreas de saída pela de entrada como 1.5. Sabendo a relação de áreas e utilizando do conceito de estado crítico, obteve-se a

equação 5.3, onde por meio de interpolações nas tabelas isoentrópicas, determina-se todas as condições do escoamento após a variação de área.

$$\frac{A_2}{A^*} = \frac{A_2}{A_1} \frac{A_1}{A^*} \quad (5.3)$$

5.3 Resultados

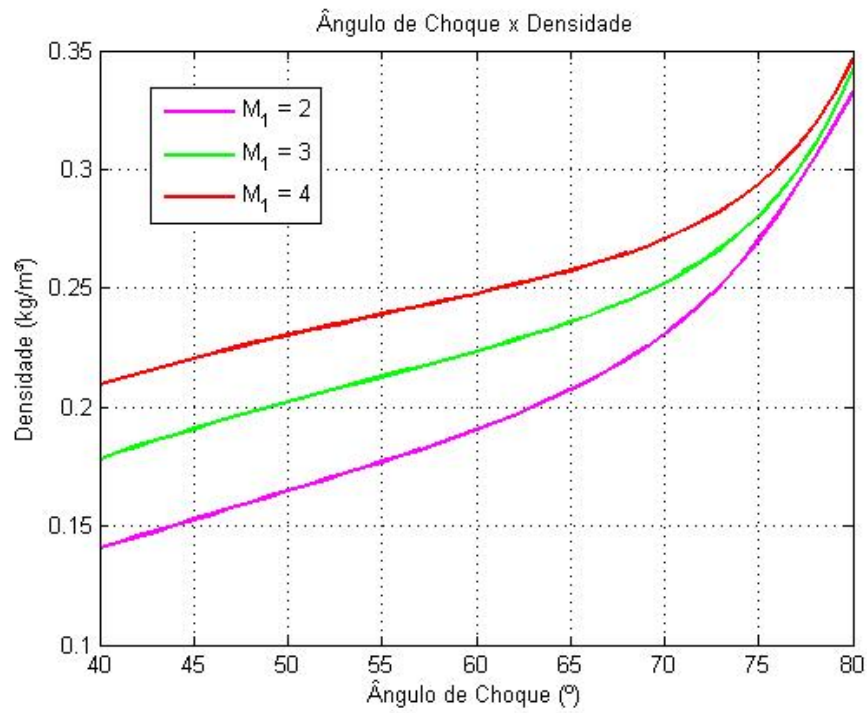


Figura 12 – Ângulo de Choque x Densidade

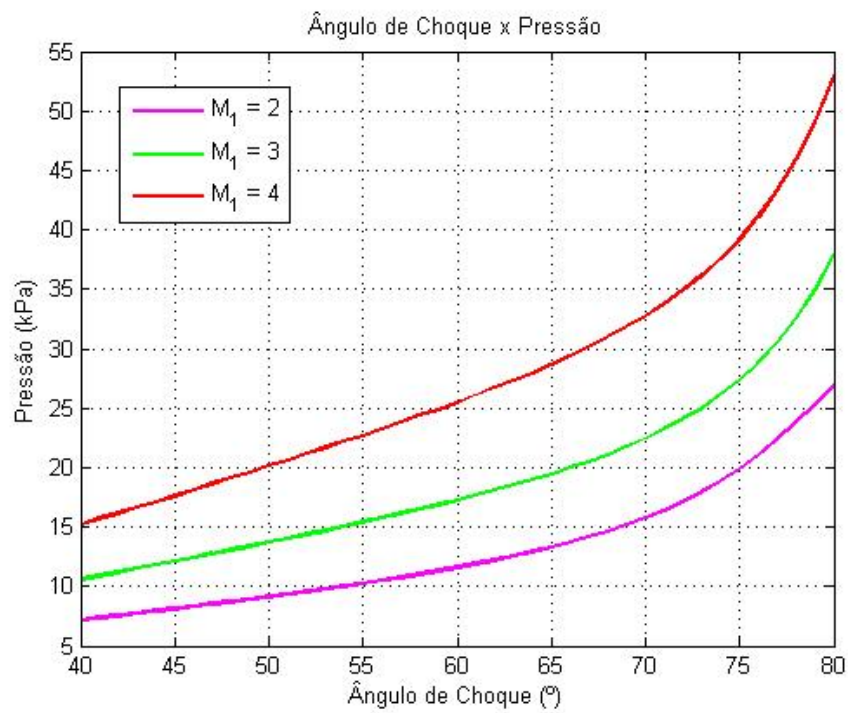


Figura 13 – Ângulo de Choque x Pressão

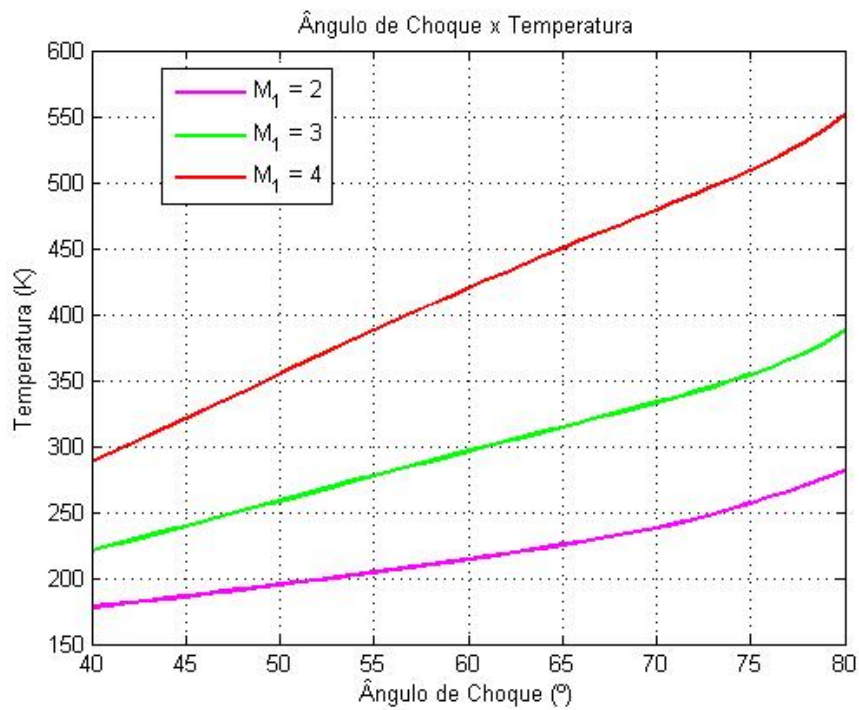
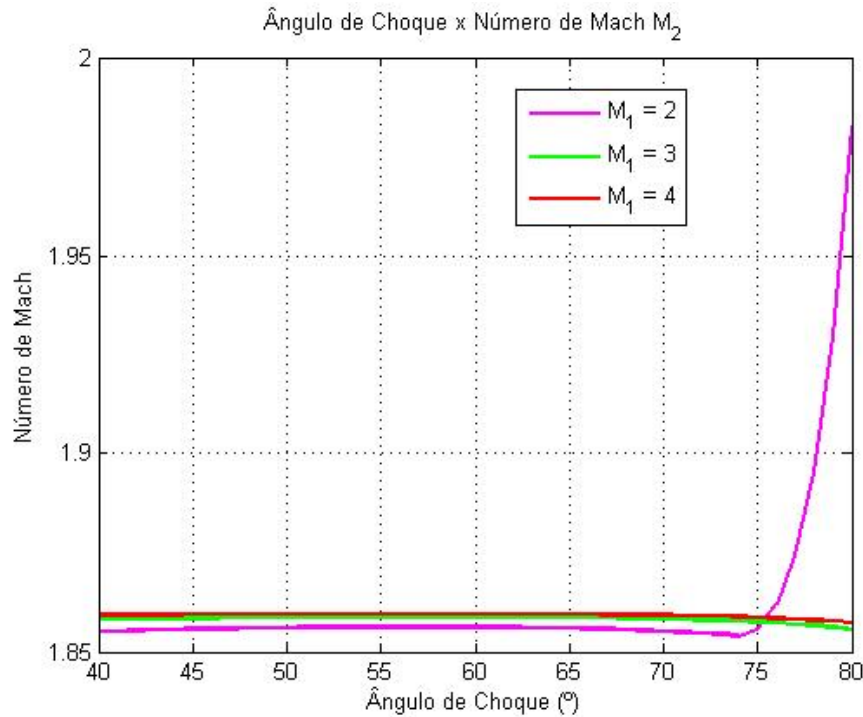


Figura 14 – Ângulo de Choque x Temperatura

Figura 15 – Ângulo de Choque x Número de Mach M_2

5.3.1 Verificação

Para o próximo exemplo, o exercício abordado servirá tanto para o exemplo de área variável, como também para o bocal divergente, utilizando os resultados obtidos na verificação para o modelo de bocal:

- Oxigênio é transportado através de um difusor com velocidade $V_1 = 195 \text{ m/s}$, como a figura 11, onde as áreas de entrada e saída são respectivamente $A_1 = 0.56 \text{ m}^2$ e $A_2 = 0.407 \text{ m}^2$ e temperatura e pressão de $T_1 = 416 \text{ K}$ e $p_1 = 0.2 \text{ MPa}$. Deve ser calculado a densidade do oxigênio ρ_1 e todas as propriedades após a passagem pelo difusor.

Solução: A partir dos dados e conhecidas as equações para fluidos compressíveis, calcula-se as propriedades antes e depois do difusor:

$$a_1 = \sqrt{kRT_1} = \sqrt{(1.4)(287)(416)} = 408.8 \text{ m/s}$$

$$M_1 = \frac{V_1}{a_1} = \frac{195}{408.8} = 0.47$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{200000}{(287)(416)} = 1.68 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T_{o1} = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right) = 416 \left(1 + \frac{1.4-1}{2} (0.47)^2\right) = 434.4K$$

$$p_{o1} = p_1 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right]^{\frac{k}{k-1}} = 0.2 \left[1 + \frac{1.4-1}{2} (0.47)^2\right]^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 0.23MPa$$

Tabela para escoamento com $k = 1.4$: $\frac{A_1}{A_*} = 1.3801$, $\frac{T_{o1}}{T_1} = 1.0423$ e $\frac{p_{o1}}{p_1} = 1.1561$

$$\frac{A_2}{A_*} = \frac{A_2}{A_1} \frac{A_1}{A_*} = \frac{0.407}{0.56} (1.3801) = 1.003$$

Interpolando na tabela para escoamento com $k = 1.4$ com o $\frac{A_2}{A_*}$: $M_2 = 1.1$, $\frac{T_{o2}}{T_2} = 1.242$ e $\frac{p_{o2}}{p_2} = 2.1352$

$$T_2 = \frac{T_2}{T_{o2}} \frac{T_{o2}}{T_{o1}} \frac{T_{o1}}{T_1} T_1 = \frac{1}{1.242} (1) (1.0423) (416) = 349K$$

$$p_2 = \frac{p_2}{p_{o2}} \frac{p_{o2}}{p_{o1}} \frac{p_{o1}}{p_1} p_1 = \frac{1}{2.1352} (1) (1.1561) (0.2) = 0.11MPa$$

Solução Numérica: Os resultados obtidos do modelo estão na tabela 2 a seguir:

Resultados	
M_1	0.4770
p_1	0.2000
T_1	416.0000
A_1	0.5600
A_2	0.4070
$\frac{A_2}{A_1}$	0.7268
T_{o1}	434.9273
p_{o1}	0.2337
$\frac{A_1}{A_*}$	1.3867
$\frac{T_{o1}}{T_1}$	1.0455
$\frac{p_{o1}}{p_1}$	1.1685
$\frac{A_2}{A_*}$	1.0078
M_2	1.0993
$\frac{T_{o2}}{T_2}$	1.2417
$\frac{p_{o2}}{p_2}$	2.1334
T_2	350.2682
p_2	0.1095

Tabela 2 – Solução para Exemplo 2 - Modelo

6 Expansão de Prandtl-Meyer

6.1 Base Teórica

As ondas de expansão de Prandtl-Meyer ou Expansões de Prandtl-Meyer, são o caso contrário das ondas de choque, onde seu objetivo principal seja acelerar o fluido devido a presença de um declive no percurso do escoamento. Esse processo ocorre de forma contínua e suave, onde conforme o escoamento passa pelo canto com declive, vão se formando sucessivas e contínuas ondas de Mach, caracterizando o processo como isentrópico.

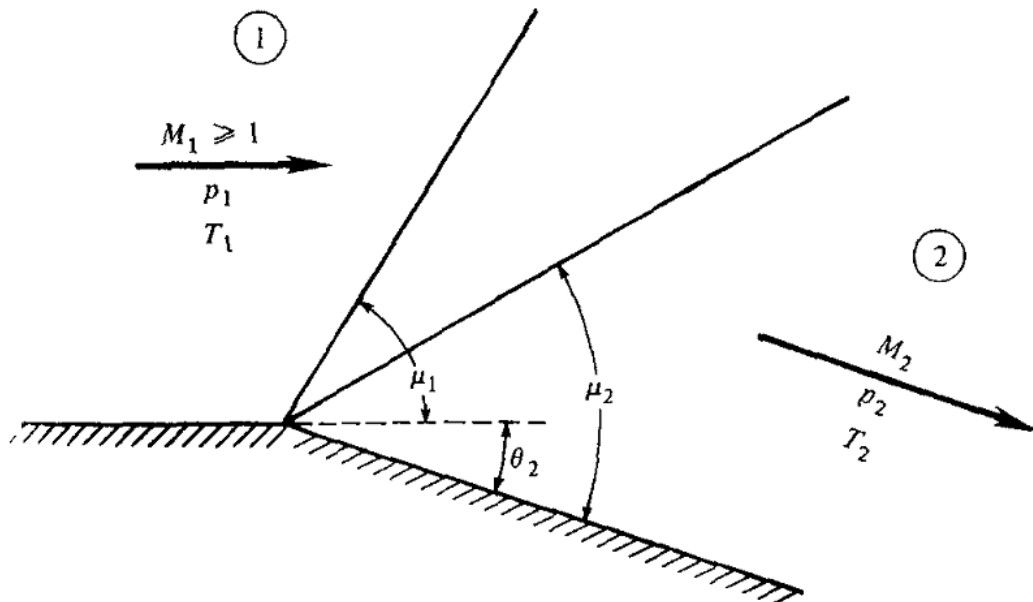


Figura 16 – Expansão de Prandtl-Meyer

Fonte: ANDERSON, 2002.

6.2 Equacionamento e Função de Prandtl

Do ANDERSON (2002), sabe-se que com as condições precedentes do escoamento M_1 , T_1 e p_1 junto com o ângulo de declive θ_2 (para o desenvolvimento da simulação foi nomeado como λ), é possível calcular as condições após o processo de expansão do escoamento (M_2 , T_2 e p_2). Partindo de variações infinitesimais do ângulo de declive $d\theta$ e utilizando de relações geométricas, pode-se demonstrar que a variação do ângulo de declive depende apenas

da variação da velocidade do escoamento, conforme indicado na equação 6.1 a seguir:

$$d\theta = \sqrt{M^2 - 1} \frac{dV}{V} \quad (6.1)$$

Integrando a equação de ambos os lados e com mais algumas manipulações e substituições matemáticas, obtém-se a conhecida *Função de Prandtl-Meyer*, indicada pela letra grega ν na equação 6.2:

$$\nu(M) = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \arctan \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1} (M^2 - 1)} - \arctan \sqrt{M^2 - 1} \quad (6.2)$$

Onde pode-se determinar o ângulo de declive θ_2 pela diferença do valor da função de Prandtl-Meyer antes e após o declive, conforme a equação 6.3 a seguir:

$$\theta_2 = \nu(M_2) - \nu(M_1) \quad (6.3)$$

Partindo das condições do estado precedente a expansão (estado 1), junto com as equações 6.2 e 6.3 e sabendo que o processo de expansão é isentrópico, determina-se as condições após a expansão (estado 2) a partir das relações fundamentais para fluidos compressíveis.

6.3 Modelo e Simulações

6.3.1 Modelo

Para o modelo da onda de expansão, será analisado como varia a número de Mach e as condições de saída do escoamento de acordo com diferentes combinações de θ e λ como demonstrado na figura 17, não necessariamente sendo iguais os valores dos ângulos.

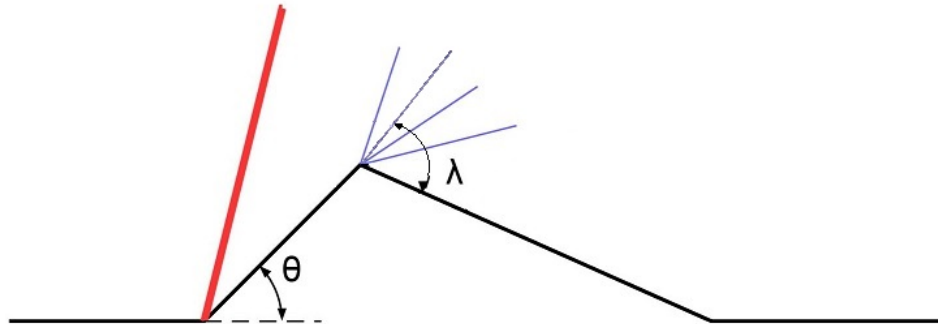


Figura 17 – Modelagem do Prandtl-Meyer

Considerando as condições após a onda de choque como estado 1, e as condições de escoamento após as ondas de expansão de estado 2, pode-se modelar segundo a equação 6.4 a seguir:

$$v(M_2) = \lambda + v(M_1) \quad (6.4)$$

Estudando as diferentes combinações de ângulos para a modelagem, consegue-se avaliar a velocidade do escoamento de entrada para a câmara de combustão, que será tratado no capítulo a seguir.

6.3.2 Simulação

Para essa simulação, calcula-se basicamente a função de Prandtl-Meyer com a equação 6.2 no escoamento após a onda de choque (estado 1), soma-se com o ângulo de declive λ para determinar a função de Prandtl-Meyer de saída (estado 2).

Com isso, interpola-se os resultados com uma tabela de *Número de Mach M x função de Prandtl-Meyer v*, montada com o auxílio da equação 6.2, para se determinar então o número de Mach de saída M_2 . A partir da velocidade de saída, determinam-se todas as condições do escoamento partindo do pressuposto que as ondas de expansão são isentrópicas.

6.3.3 Resultados

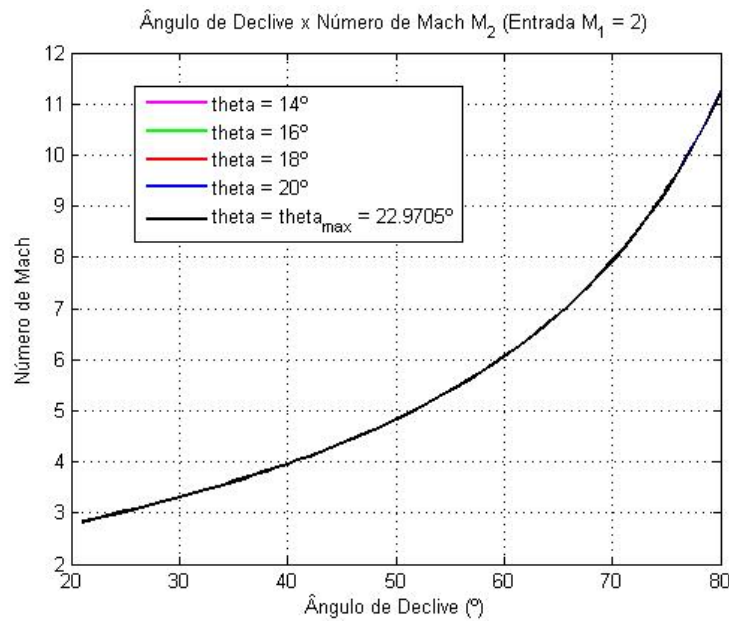
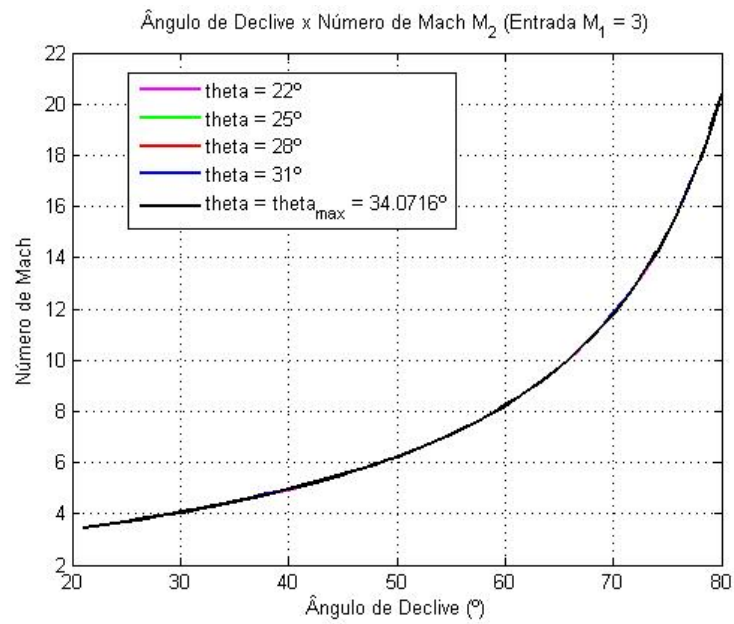
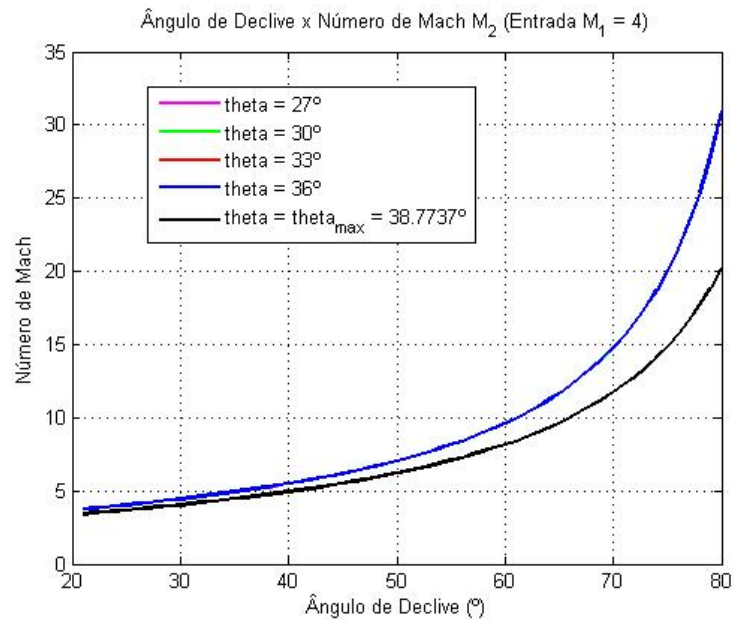
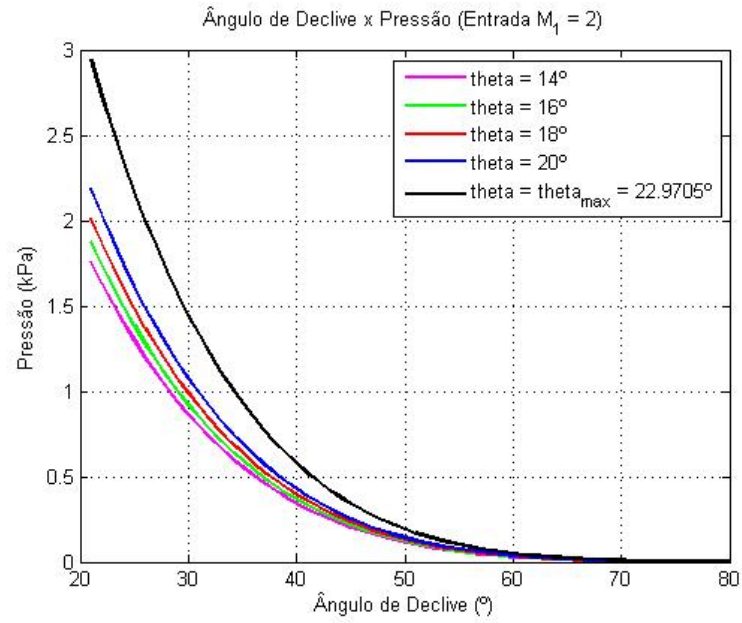
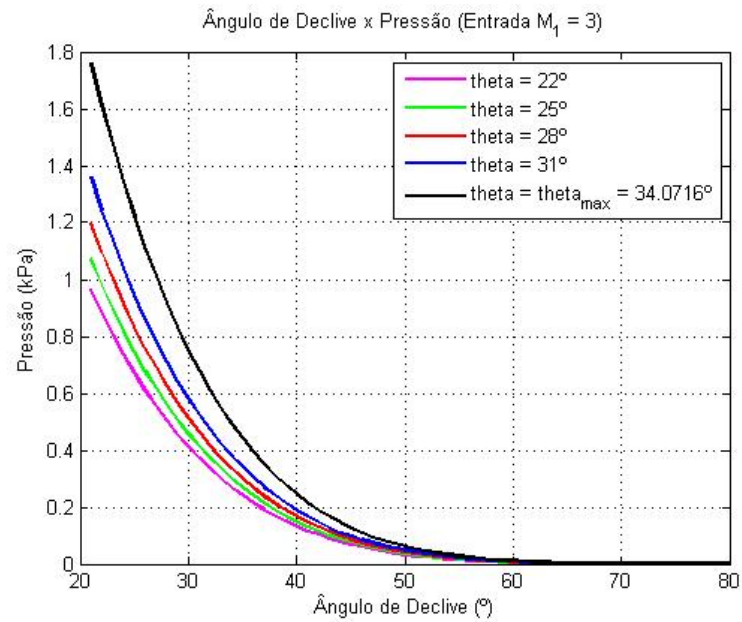
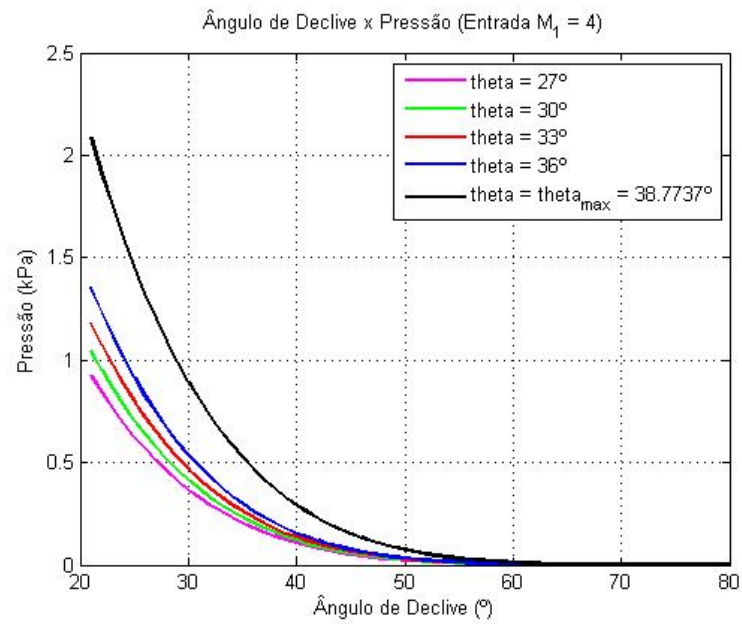
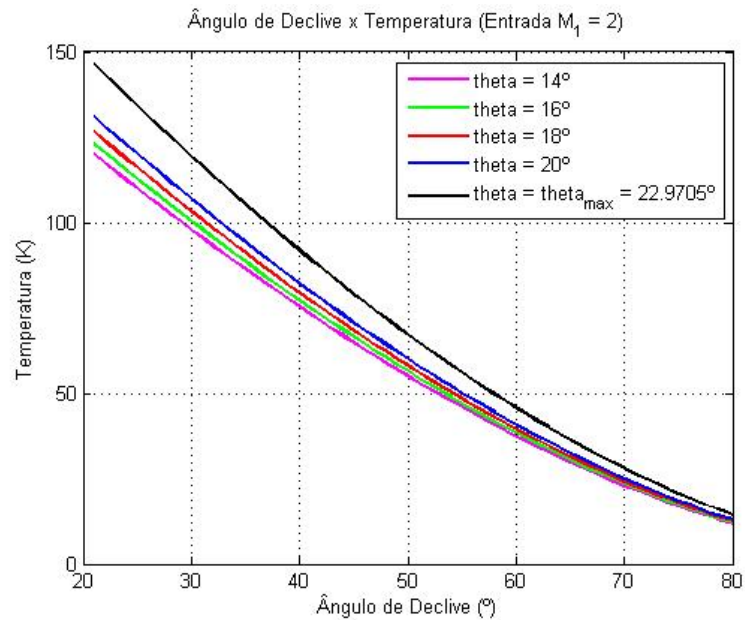
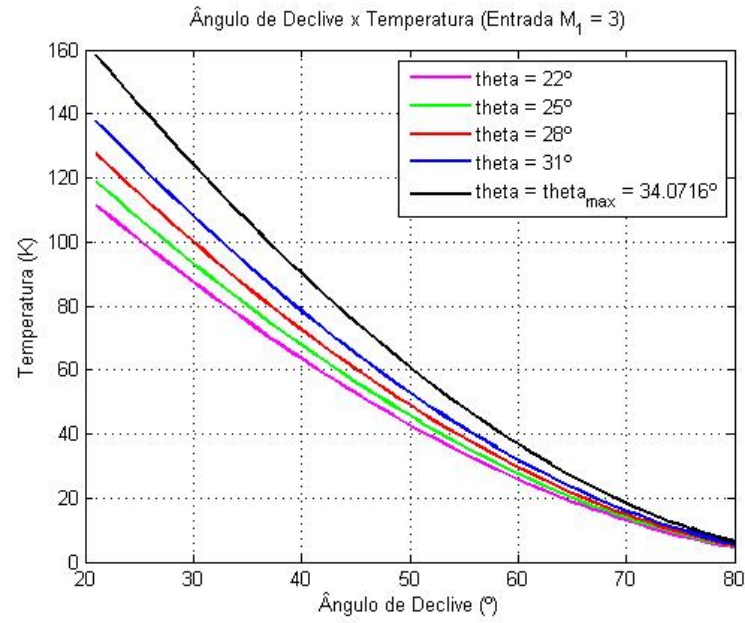
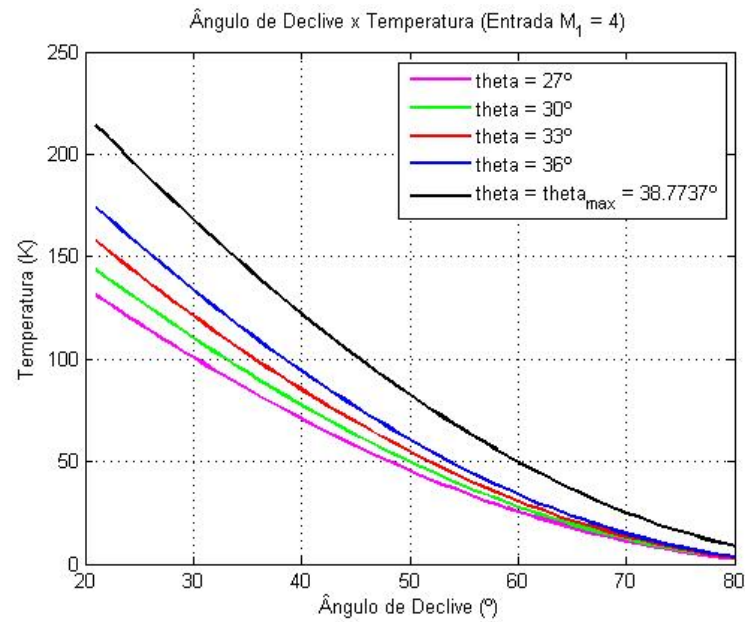


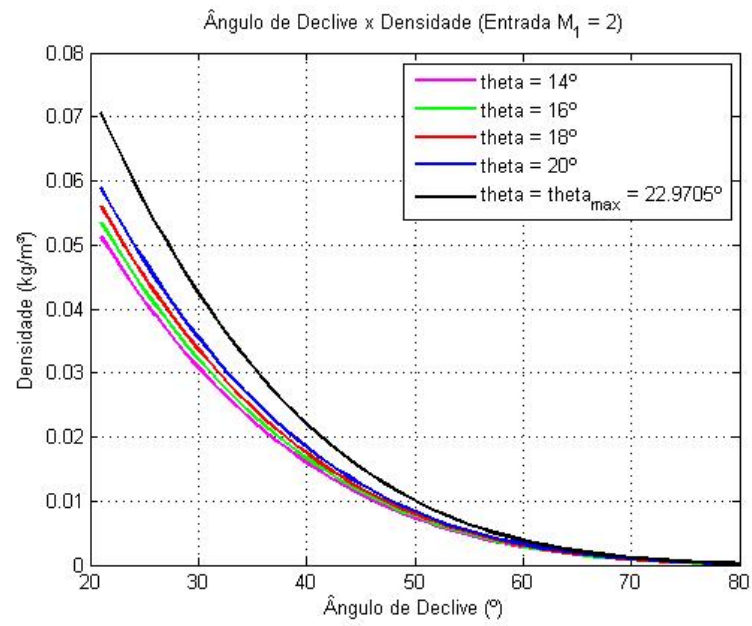
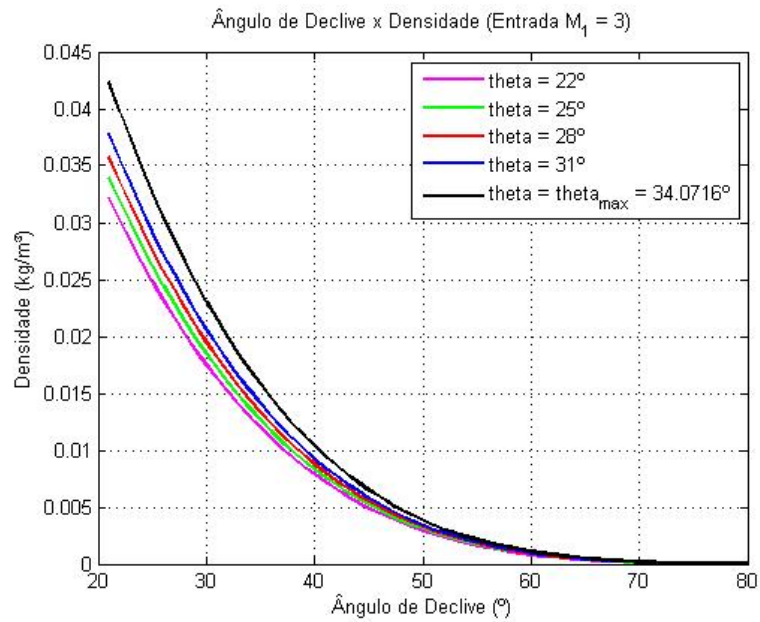
Figura 18 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 2$

Figura 19 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 3$ Figura 20 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 4$

Figura 21 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 2$ Figura 22 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 3$

Figura 23 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 4$ Figura 24 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 2$

Figura 25 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 3$ Figura 26 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 4$

Figura 27 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 2$ Figura 28 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 3$

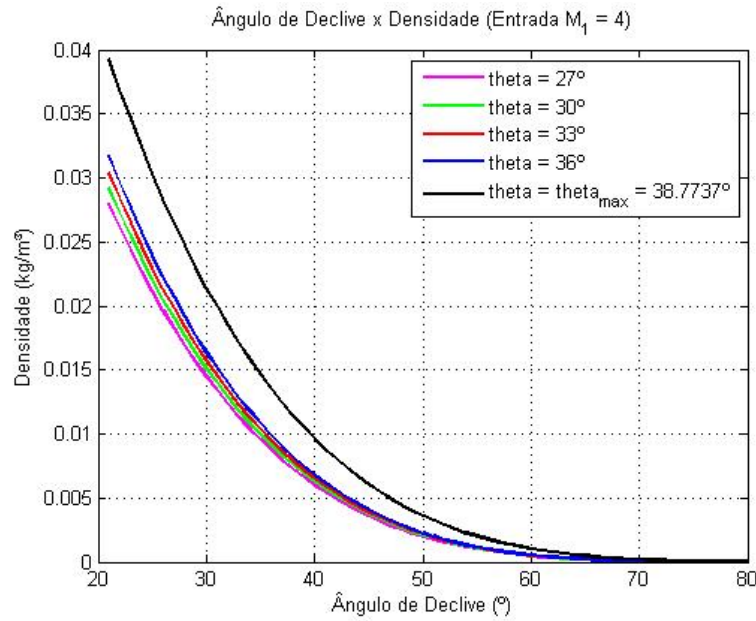


Figura 29 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$

Importante ressaltar que para os próximos modelos, será levado em conta as variações de propriedades termodinâmicas de acordo com a variação do λ do Prandtl-Meyer, dessa forma levando em consideração as diferentes combinações de geometria para o modelo do *Ramjet*.

6.3.4 Verificação

O exemplo tratado para a Expansão de Prandtl-Meyer é a continuidade do exemplo do aerofólio segundo ZUCKER (2002), descrito a seguir:

- Considerando o aerofólio segundo a figura 10, agora deve ser calculado o número de Mach M_3 após a expansão de Prandtl-Meyer.

Solução: Através das tabelas de Prandtl-Meyer define-se o valor de v_2 e assim com a diferença de ângulatura ou ângulo de declive $\Delta v = 20^\circ$, é possível determinar as condições do escoamento na região 3:

Das Tabelas de Prandtl-Meyer: $v_2 = 4.31173$

$$v_3 = \Delta v + v_2 = 20 + 4.31173 = 24.31173$$

Com esse resultado, interpolando nas Tabelas de Prandtl-Meyer: $M_3 = 1.9257$

Solução Numérica: Os resultados obtidos do modelo estão na tabela 3 a seguir:

Resultados	
M_2	1.2311
nu_2	4.3396
Δv	20.0000
nu_3	24.3396
M_3	1.9267

Tabela 3 – Solução para Exemplo 3 - Modelo

7 Escoamento de Rayleigh

7.1 Base Teórica

Segundo HODGE (1995), o escoamento de Rayleigh consiste em avaliar o comportamento do fluido sob uma troca de calor através das fronteiras do sistema. Para isso deve-se assumir hipóteses como: a troca de calor ocorrerá no sistema com seção constante A , sem atrito e considerando adição de massa desprezível.

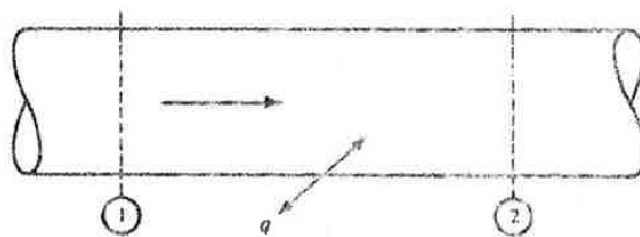


Figura 30 – Escoamento de Rayleigh

PIMENTA, 1998.

Para o equacionamento, será primordial a avaliação do escoamento de Rayleigh conhecendo as condições de entrada e a troca de calor, analisando dessa forma as condições de saída da combustão, conforme a equação 7.1. Os desenvolvimentos e métodos utilizados serão discutidos no tópico a seguir.

$$Q_{1-2} = \dot{m}C_p(T_{o2} - T_{o1}) \quad (7.1)$$

7.2 Modelo e Simulações

7.2.1 Definição do Combustível

Para aeronaves com motores a jato, existem classes de combustíveis específicos de acordo com as exigências de voo (altitude, clima e etc) e seguem normas segundo especificações internacionais. Alguns dos combustíveis mais utilizados, assim como a densidade ρ e a entalpia de combustão H_v estão indicados na Tabela 4 a seguir:

Densidade e Entalpia de Combustão				
Combustível	(kg/l)	(lbm/gal)	(MJ/kg)	(Btu/lbm)
Jet A/A-1	0.775-0.830	6.47-6.93	42.8	18400
JP4/Jet B	0.751-0.802	6.27-6.69	42.8	18400
JP5	0.787-0.845	6.57-7.05	42.6	18315

Tabela 4 – Tabela de Combustíveis

Fonte: HODGE, 1995.

Para esse trabalho será utilizado como base o combustível JET A-1. No HODGE (1995), ressalta ainda que para poder considerar desprezível o efeito de adição de massa na combustão, alguns critérios devem ser respeitados e avaliados na simulação:

- Razão $\dot{m}_{comb}/\dot{m}_{ar} \leq 0.02$;
- Temperatura de Entrada $T_1 = 245 - 945 \text{ K}$;
- Pressão de Entrada $p_1 = 20 - 4000 \text{ kPa}$;

7.2.2 Cálculo do Calor Específico

Quando trata-se com grandes variações de temperatura, é necessário fazer uma pequena correção pois a hipótese que o calor específico a pressão constante mantenha estável, não é válida. Dessa forma, utiliza-se a equações 7.2 e 7.3 sugeridas no BORGNAKKE (2007):

$$C_{p0} = C_0 + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3 \quad (7.2)$$

$$\theta = \frac{T}{1000} \quad (7.3)$$

Onde os valores das correções para a equação 7.2, considerando o ar como gás perfeito, estão indicadas na Tabela 5.

Correções para o Ar	
C_0	1.05
C_1	-0.365
C_2	0.85
C_3	-0.39

Tabela 5 – Correções do C_{p0} para o Ar.

Fonte: BORGNAKKE, 2007.

7.2.3 Equacionamentos e Simulações

Para as simulações, serão utilizadas as equações 7.4 a 7.8, equações essas conhecidas das referências para um caso típico de escoamento de Rayleigh. As equações estão indicadas abaixo:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left[\frac{1 + kM_1^2}{1 + kM_2^2} \right]^2 \frac{M_2^2}{M_1^2} \quad (7.4)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{M_1^2}{M_2^2} \left[\frac{1 + kM_2^2}{1 + kM_1^2} \right] \quad (7.5)$$

$$\frac{T_{o2}}{T_{o1}} = \left[\frac{1 + kM_1^2}{1 + kM_2^2} \right]^2 \frac{M_2^2}{M_1^2} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2}M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2}M_1^2} \right] \quad (7.6)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + kM_1^2}{1 + kM_2^2} \quad (7.7)$$

$$\frac{p_{o2}}{p_{o1}} = \frac{1 + kM_1^2}{1 + kM_2^2} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2}M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2}M_1^2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (7.8)$$

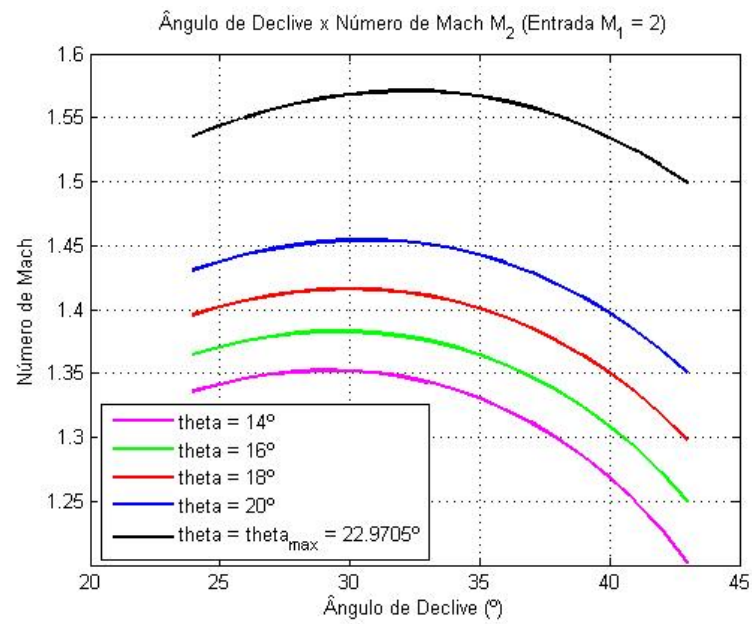
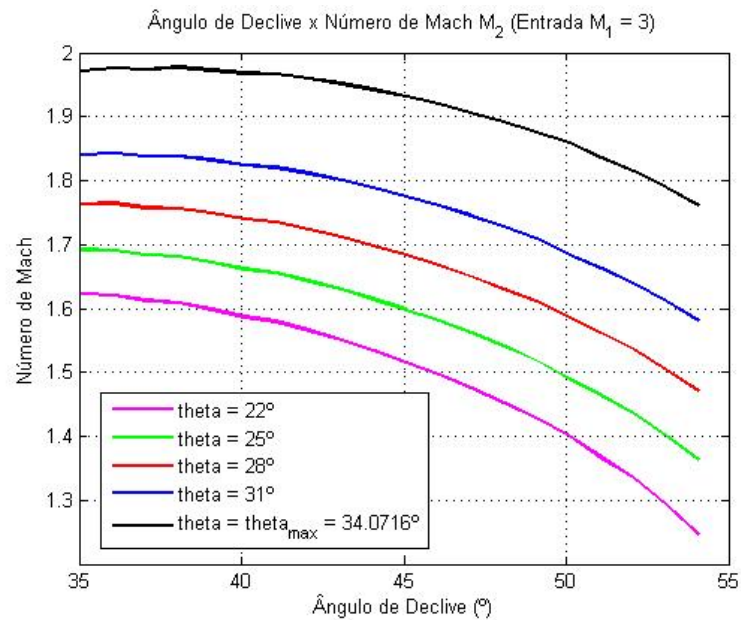
Considerando que todo o calor gerado na queima do combustível, seja utilizado na variação de temperatura do ar, sem ter perdas nas fronteiras do sistema. Pode-se definir a temperatura e estagnação na saída (estado 2) de acordo com as equações 7.9 e 7.10.

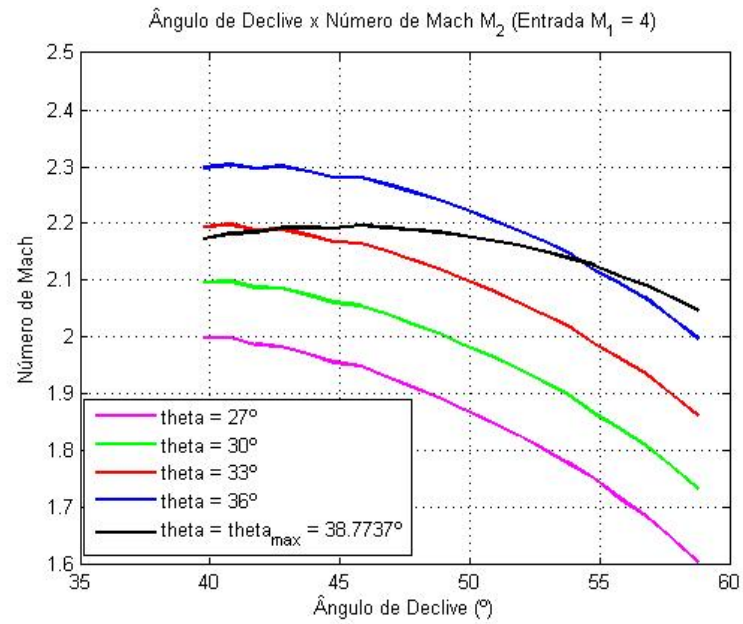
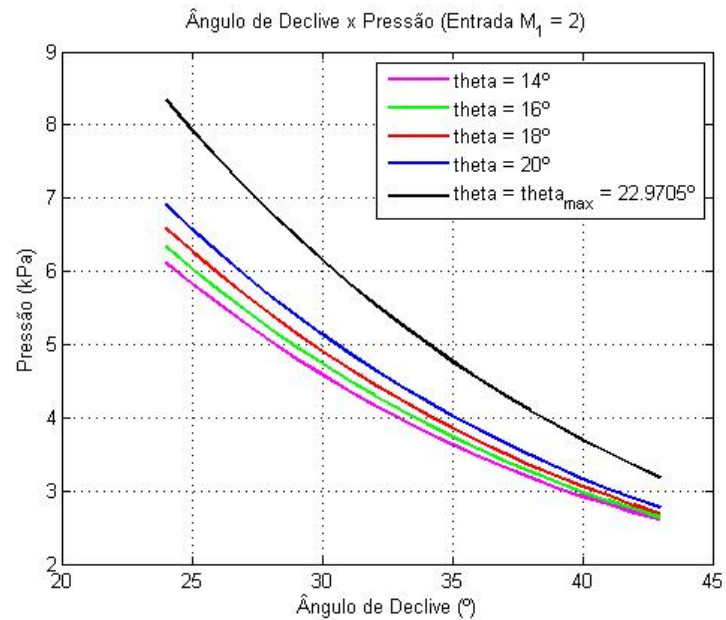
$$Q_{1-2} = \dot{m}_{ar} C_p (T_{o2} - T_{o1}) = \dot{m}_{comb} H_v \quad (7.9)$$

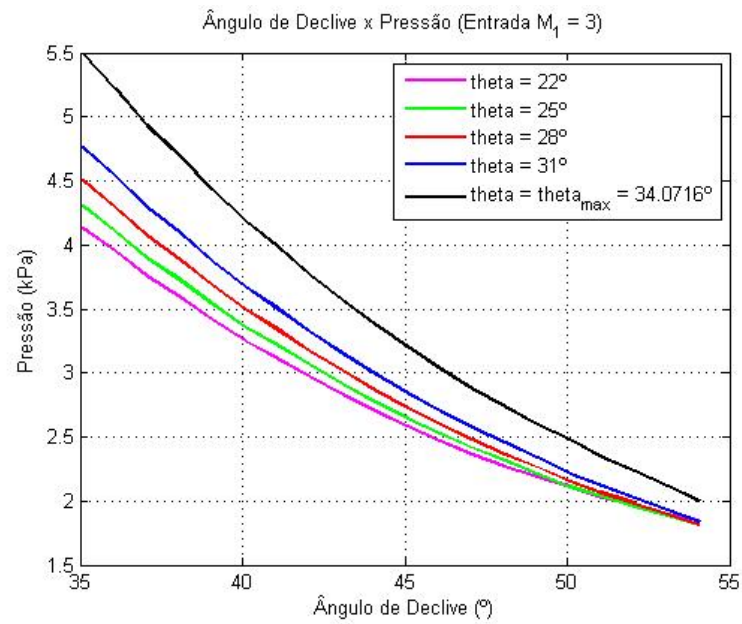
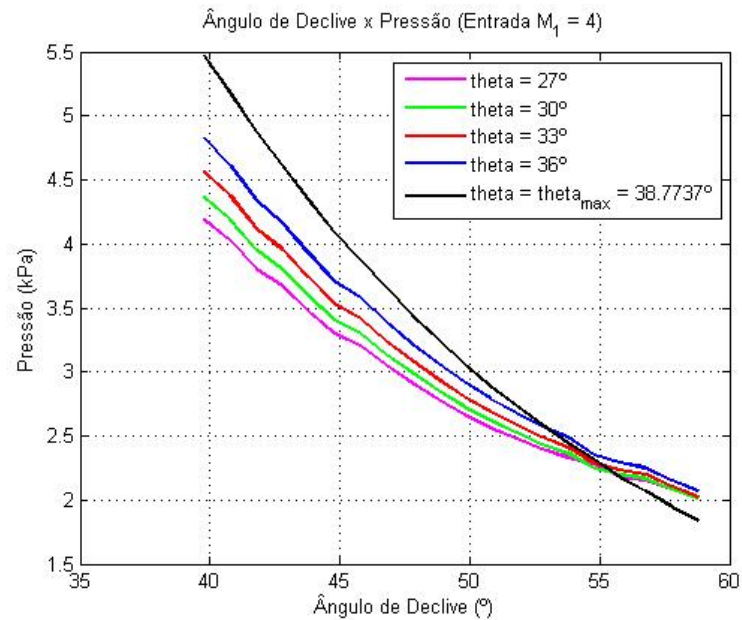
$$T_{o2} = T_{o1} + \frac{\dot{m}_{comb} H_v}{\dot{m}_{ar} C_p} \quad (7.10)$$

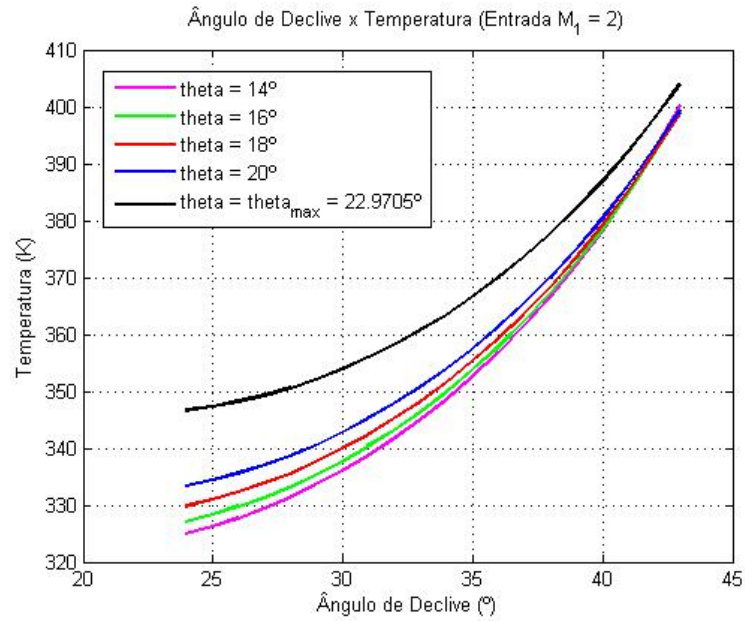
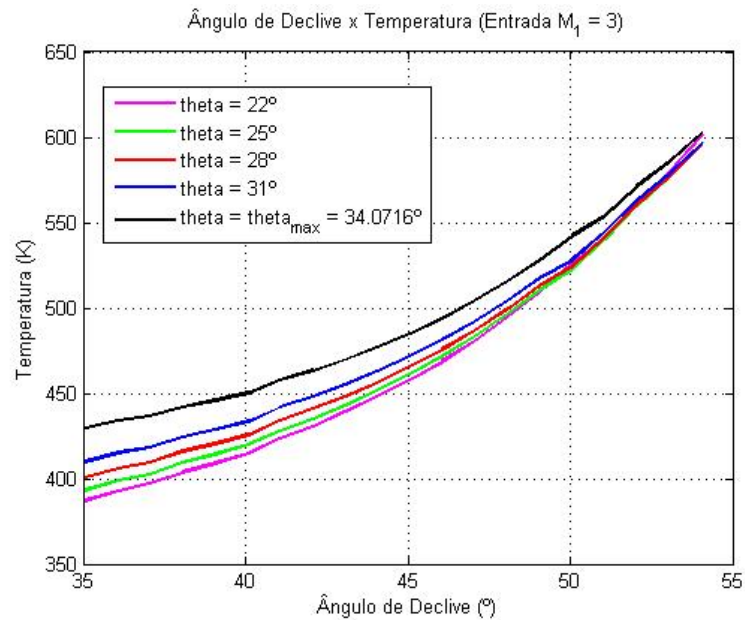
Determinada a temperatura de estagnação da saída, pode-se seguir por duas abordagens, para se determinar as demais variáveis: a partir do estado crítico como referência e Tabelas de Rayleigh ou por manipulação matemática. Utilizando pelas tabelas de Rayleigh, sabendo a temperatura de estagnação T_{o2} , determina-se a relação T_{o2}/T^* e por meio de interpolação, define-se todas as propriedades de saída do escoamento, conforme indicados nos resultados no próximo tópico.

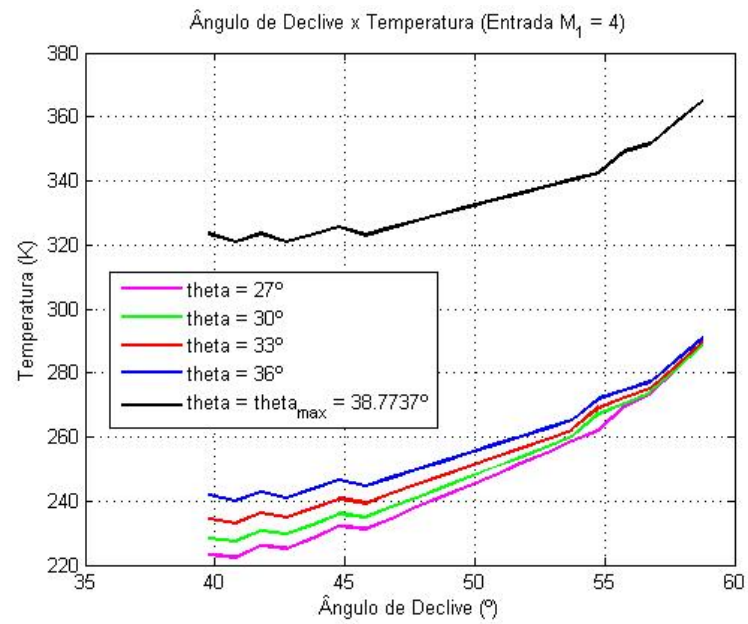
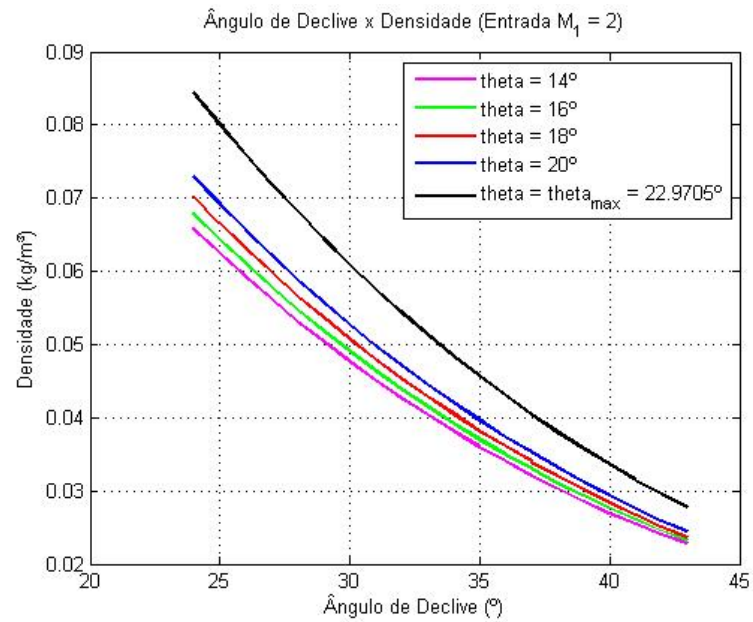
7.3 Resultados

Figura 31 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 2$ Figura 32 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 3$

Figura 33 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 4$ Figura 34 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 2$

Figura 35 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 3$ Figura 36 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 4$

Figura 37 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 2$ Figura 38 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 3$

Figura 39 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 4$ Figura 40 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$

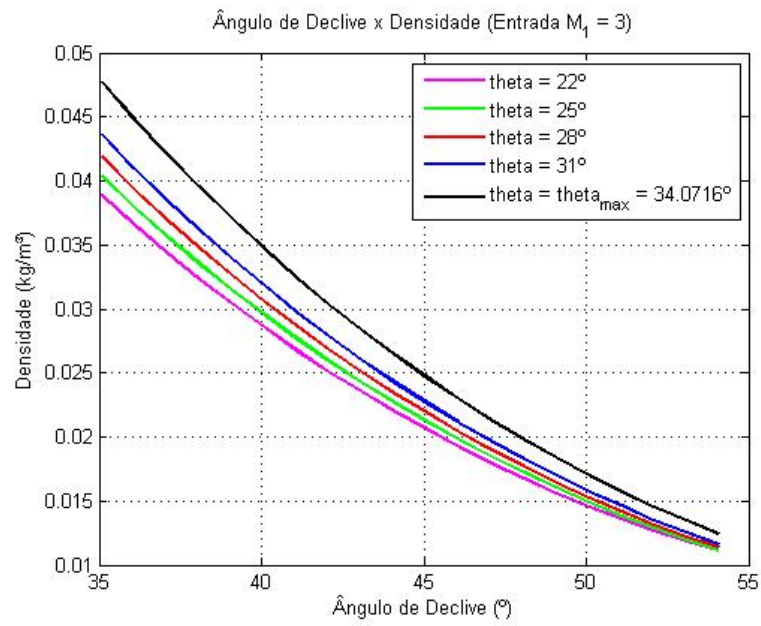


Figura 41 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$

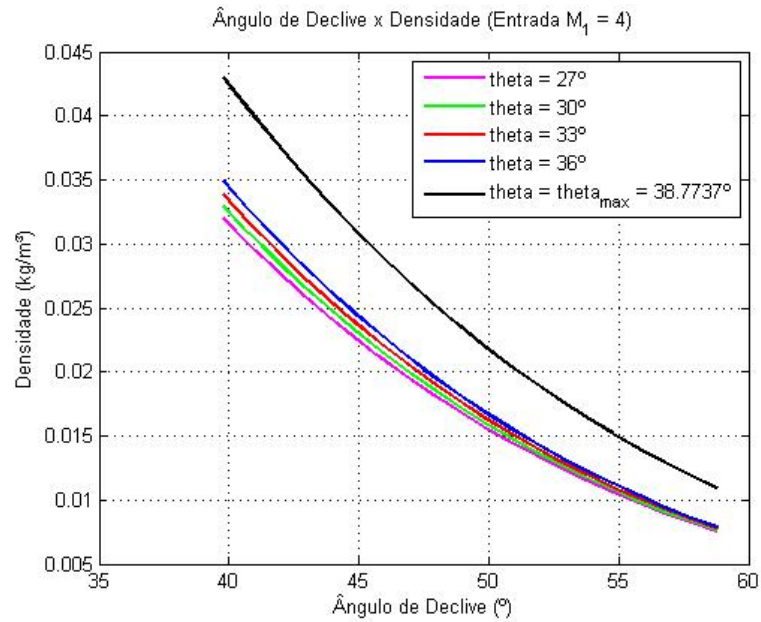


Figura 42 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$

7.3.1 Verificação

O exemplo tratado para o Escoamento de Rayleigh segue o esquema da figura 30, descrito a seguir:

- Considerando o escoamento de ar em um duto a uma velocidade de $V_1 = 448 \text{ m/s}$ e com condições do escoamento como $T_1 = 51^\circ\text{C} = 222\text{K}$ e $p_1 = 68 \text{ kPa}$. Com o calor sendo transferido para o duto numa relação de $q = 11,5 \text{ kJ/kg}$, deve ser calculado as condições do escoamento após a transferência de calor.

Solução: Calculando as condições anteriores do escoamento:

$$a_1 = \sqrt{kRT_1} = \sqrt{(1.4)(287)(222)} = 298.7 \text{ m/s}$$

$$M_1 = \frac{V_1}{a_1} = \frac{448}{298.7} = 1.5$$

$$T_{o1} = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right) = 222 \left(1 + \frac{1.4-1}{2} (1.5)^2\right) = 321.9 \text{ K}$$

$$p_{o1} = p_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2\right)^{\left(\frac{k}{k-1}\right)} = 68 \left(1 + \frac{1.4-1}{2} (1.5)^2\right)^{\left(\frac{1.4}{0.4}\right)} = 249.6 \text{ kPa}$$

$$\text{Dados da Tabela de Rayleigh para } M_1 = 1: \frac{T_{o1}}{T_{o1}^*} = 0.90928 \text{ e } \frac{p_{o1}}{p_{o1}^*} = 1.12155$$

Calculando o valor do C_p , pode-se determinar a temperatura de estagnação T_{o2} e assim as condições do escoamento:

$$\theta = \frac{T_1}{1000} = 0.222$$

$$C_p = C_{p0} + C_{p1}\theta + C_{p2}\theta^2 + C_{p3}\theta^3 = 1.007$$

$$T_{o2} = T_{o1} + \frac{q}{C_p} = 321.9 + \frac{11.5}{1.007} = 333.32 \text{ K}$$

Calculando a razão $\frac{T_{o2}}{T_{o2}^*}$ para poder interpolar os resultados nas tabelas de Rayleigh:

$$\frac{T_{o2}}{T_{o2}^*} = \frac{T_{o2}}{T_{o1}} \frac{T_{o1}}{T_{o1}^*} \frac{T_{o1}^*}{T_{o2}^*} = \frac{333.32}{321.9} (0.90928)(1) = 0.9415$$

Interpolando nas Tabelas de Rayleigh: $M_2 = 1.37$ e $\frac{p_{o2}}{p_{o2}^*} = 1.06642$

$$p_{o2} = \frac{p_{o2}}{p_{o2}^*} \frac{p_{o2}^*}{p_{o1}^*} \frac{p_{o1}^*}{p_{o1}} p_{o1} = \frac{(1.06642)(1)(249.6)}{1.12155} = 237.3 \text{ kPa}$$

$$p_2 = \frac{p_{o2}}{(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2)^{\frac{k}{k-1}}} = \frac{237.3}{(1 + \frac{1.4-1}{2} (1.37)^2)^{\frac{1.4}{0.4}}} = 77.77 \text{ kPa}$$

$$T_2 = \frac{T_{o2}}{(1 + \frac{k-1}{2} M_2^2)} = \frac{333.32}{1 + \frac{1.4-1}{2} (1.37)^2} = 242.3 \text{ K}$$

Solução Numérica: Os resultados obtidos do modelo estão na tabela 6 a seguir:

Resultados	
M_1	1.5000
T_1	222.0000
p_1	68.0000
q	11.5000
T_{o1}	321.9000
p_{o1}	249.6301
$\frac{T_{o1}}{T_{o1}^*}$	0.9093
$\frac{p_{o1}}{p_{o1}^*}$	1.1215
C_p	1.0066
T_{o2}	333.3247
$\frac{T_{o2}}{T_{o2}^*}$	0.9415
M_2	1.3701
$\frac{p_{o2}}{p_{o2}^*}$	1.0665
p_{o2}	237.3879
p_2	77.7924
T_2	242.3485

Tabela 6 – Solução para Exemplo 4 - Modelo

8 Bocal Divergente

8.1 Modelo e Simulação

O escoamento através de um bocal funciona basicamente como um escoamento de área variável, conforme abordado em tópico anterior, onde a expansão da saída, faz com que o fluido seja acelerado. Assim com os resultados de saída do bocal, têm-se dados suficientes para calcular a dinâmica do *Ramjet*.

Para no bocal divergente, utilizou-se uma relação de áreas de saída e de entrada igual a 10, e calcularam-se as condições do escoamento na saída através do estado crítico e por interpolação nas tabelas isoentrópicas.

8.2 Resultados

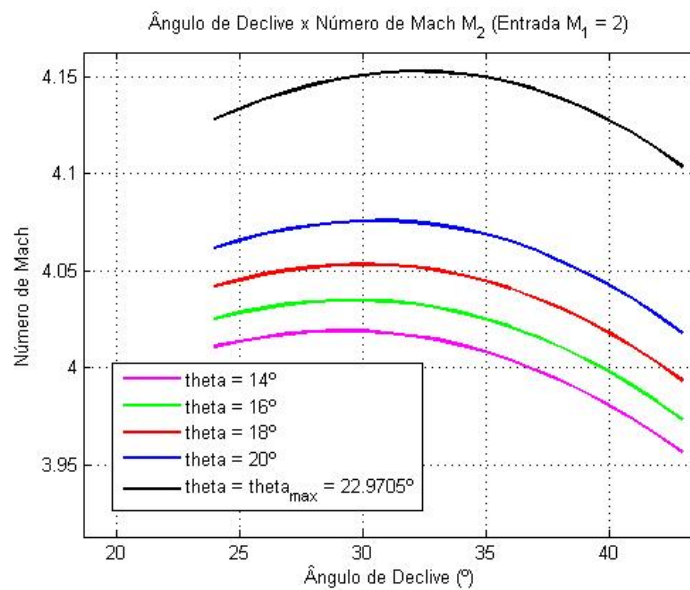
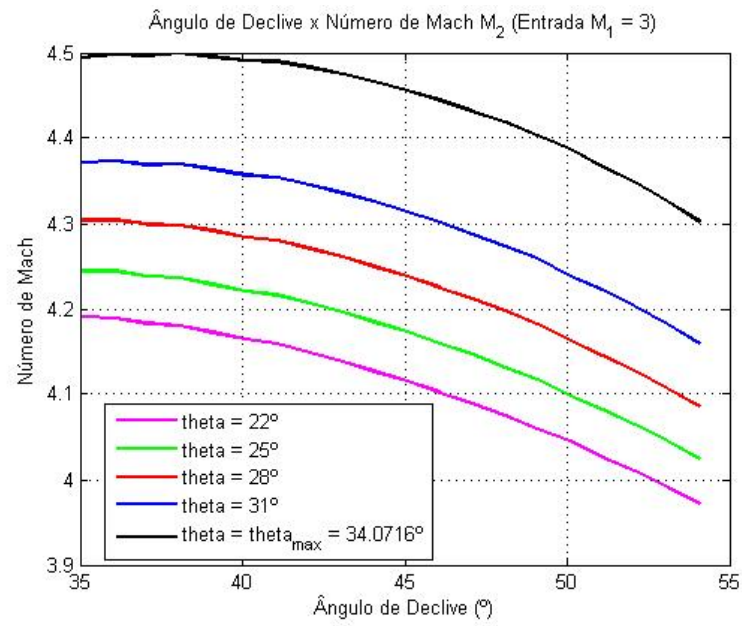
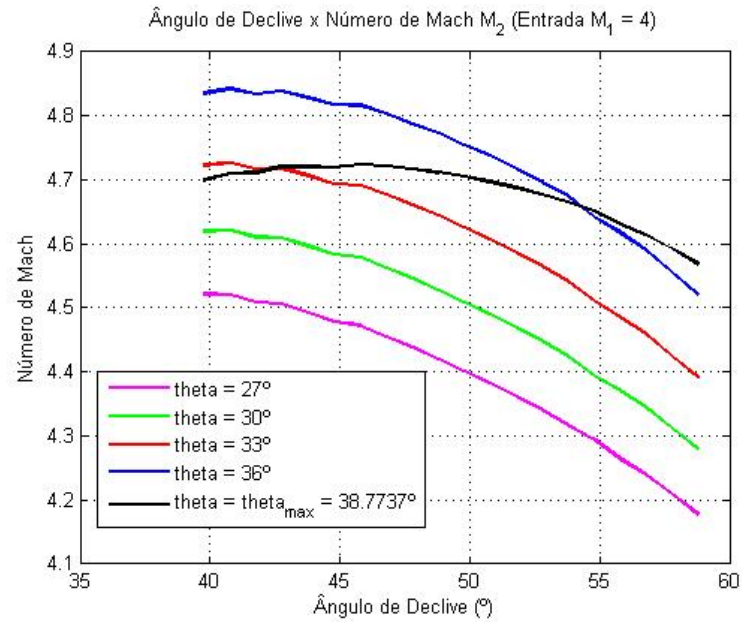
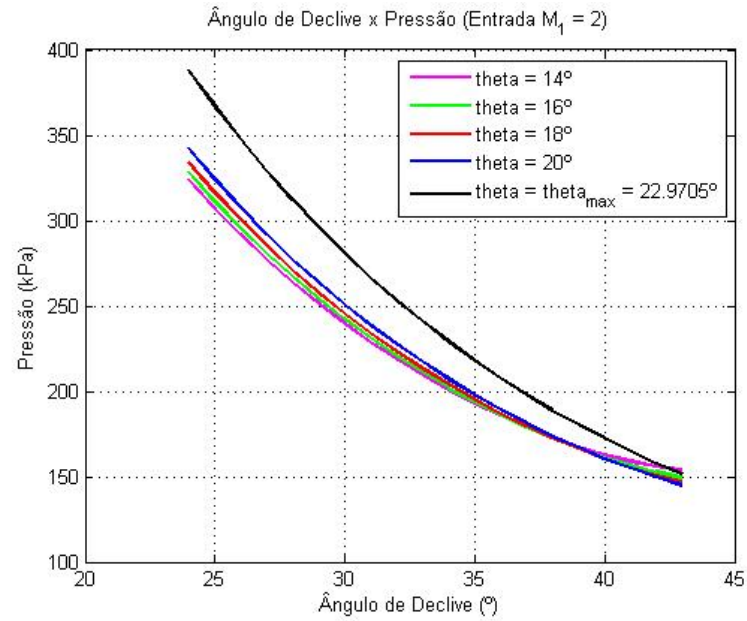
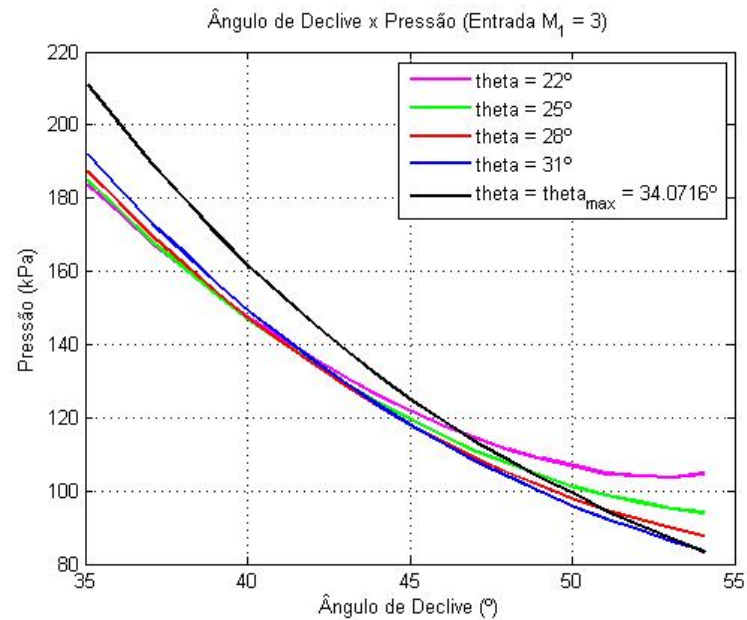
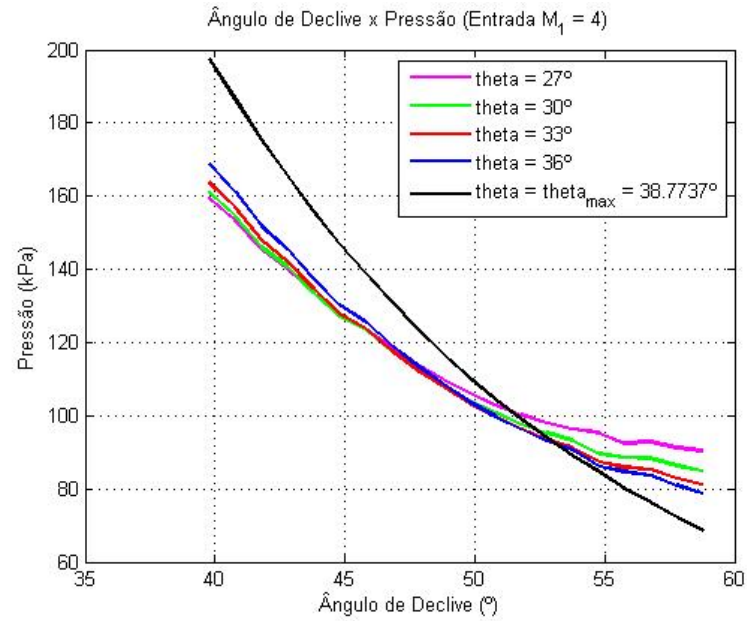
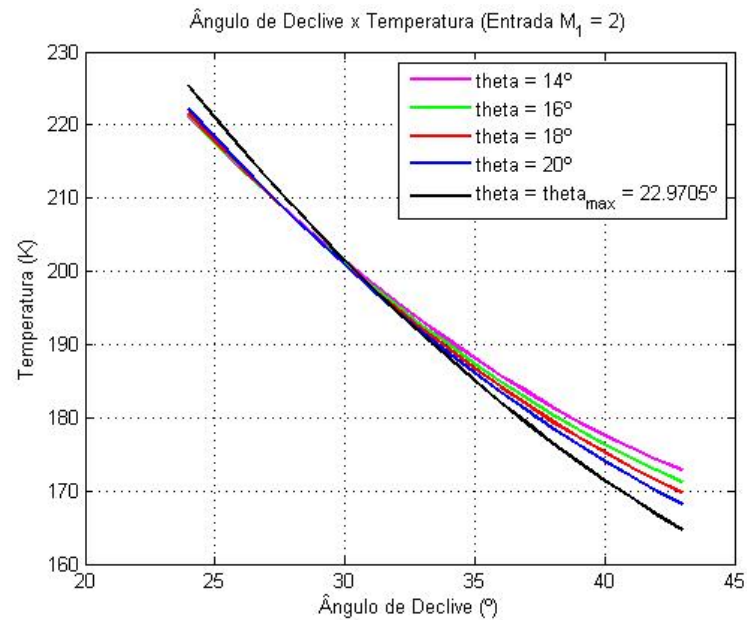
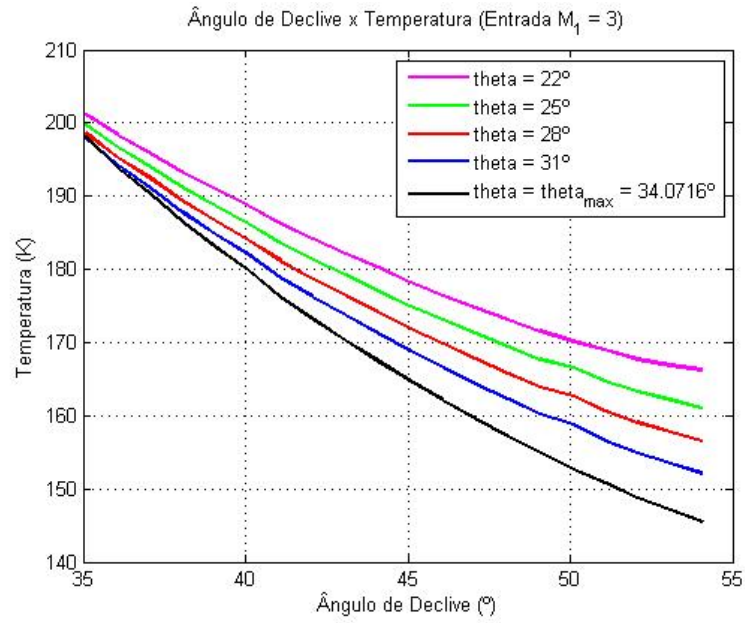
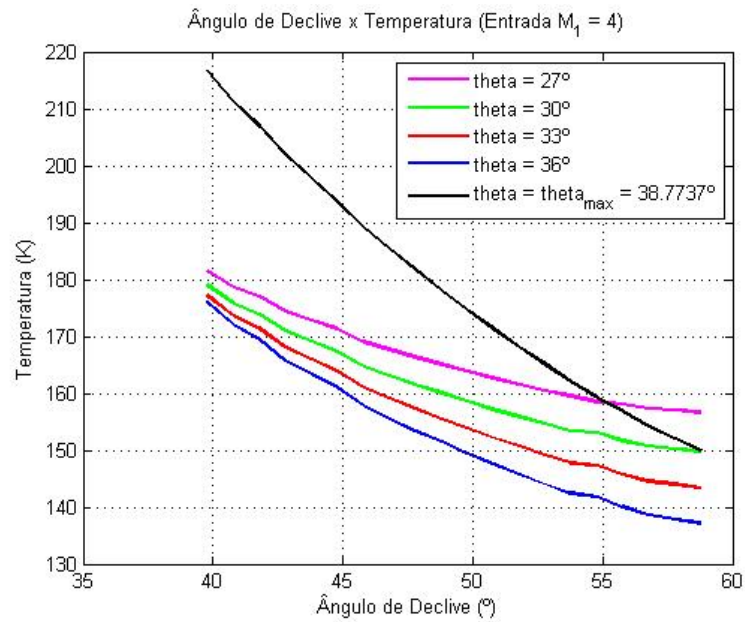


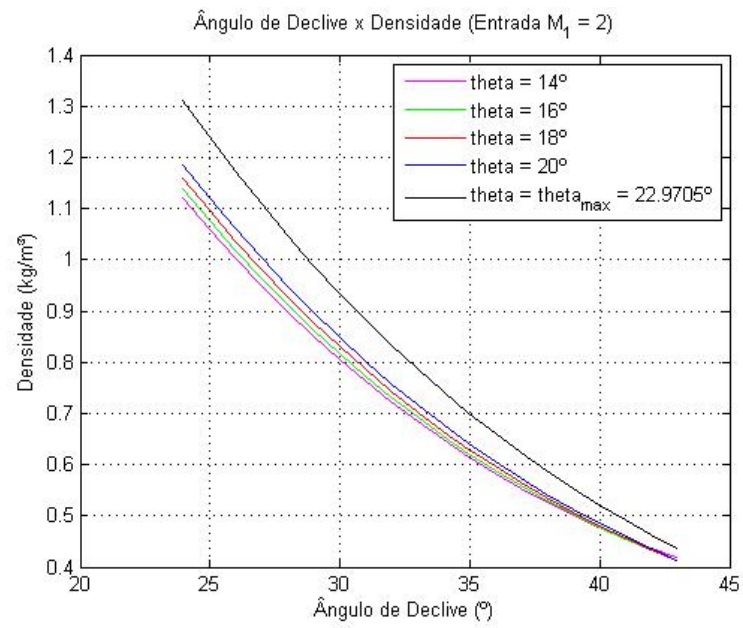
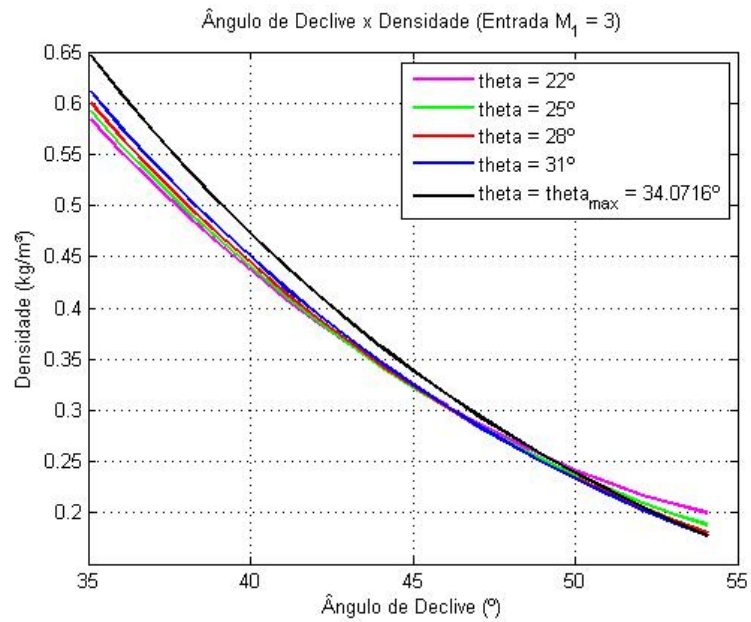
Figura 43 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 2$

Figura 44 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 3$ Figura 45 – Ângulo de Declive x Número de Mach M_2 , $M_1 = 4$

Figura 46 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 2$ Figura 47 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 3$

Figura 48 – Ângulo de Declive x Pressão, $M_1 = 4$ Figura 49 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 2$

Figura 50 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 3$ Figura 51 – Ângulo de Declive x Temperatura, $M_1 = 4$

Figura 52 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 2$ Figura 53 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 3$

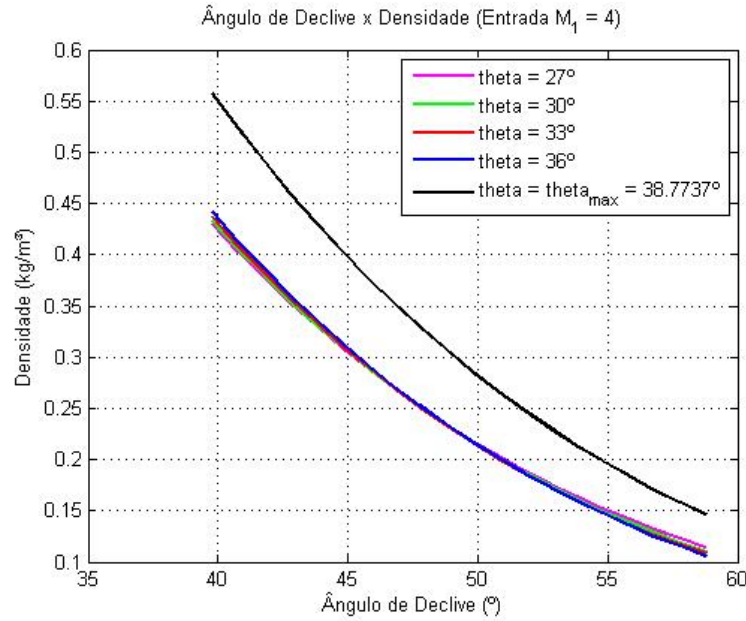


Figura 54 – Ângulo de Declive x Densidade, $M_1 = 4$

8.2.1 Verificação

Para esse último exemplo, o exercício abordado será a continuação do exercício do difusor que escoava oxigênio:

- Para as condições do escoamento do oxigênio após o difusor, calcular as condições de saída para uma área final $A_3 = 1.2 \text{ m}^2$.

Solução: A partir dos dados e conhecidas as equações para fluidos compressíveis, calcula-se as propriedades antes e depois do bocal:

Da tabela para escoamento com $k = 1.4$: $M_2 = 1.1$, $\frac{A_2}{A^*} = 1.003$, $\frac{T_{o2}}{T_2} = 1.242$ e $\frac{p_{o2}}{p_2} = 2.1352$

$$\frac{A_3}{A^*} = \frac{A_3 A_2}{A_2 A^*} = \frac{1.2}{0.407}(1.003) = 2.9572$$

Interpolando na tabela para escoamento com $k = 1.4$ com $\frac{A_3}{A^*}$: $M_3 = 2.62$, $\frac{T_{o3}}{T_3} = 2.3729$ e $\frac{p_{o3}}{p_3} = 20.5804$

$$T_3 = \frac{T_3}{T_{o3}} \frac{T_{o3}}{T_{o2}} \frac{T_{o2}}{T_2} T_2 = \frac{1}{2.3729}(1)(1.242)(349) = 182.7K$$

$$p_2 = \frac{p_3}{p_{o3}} \frac{p_{o3}}{p_{o2}} \frac{p_{o2}}{p_2} p_2 = \frac{1}{20.5804} (1)(2.1352)(0.11) = 11.41 kPa$$

Solução Numérica: Os resultados obtidos do modelo estão na tabela 7 a seguir:

Resultados	
M_2	1.0993
p_2	0.1095
T_2	350.2682
A_2	0.4070
A_3	1.2000
$\frac{A_3}{A_2}$	2.9484
$\frac{A_2}{A^*}$	1.0078
$\frac{T_{o2}}{T_2}$	1.2417
$\frac{p_{o2}}{p_2}$	2.1334
$\frac{A_3}{A^*}$	2.9715
M_3	2.6273
$\frac{T_{o3}}{T_3}$	2.3805
$\frac{p_{o3}}{p_3}$	20.8145
T_3	182.7045
p_3	11.2233

Tabela 7 – Solução para Exemplo 5 - Modelo

9 Análise dos Resultados e Conclusões

9.1 Empuxo Específico

Após o desenvolvimento completo do modelo, resta calcular a dinâmica do *Ramjet* e o seu rendimento termodinâmico. Para o cálculo do empuxo gerado durante o escoamento através do *Ramjet*, é importante conhecer as condições da entrada e saída do fluxo de massa e da pressão, conforme a equação 9.1 a seguir:

$$F = \dot{m}_s V_s - \dot{m}_e V_e + (p_s - p_e) A_e \quad (9.1)$$

Como trata-se de uma modelagem simplificada, o dimensionamento da geometria e áreas é desconhecida, dessa forma com o auxílio de equações fundamentais para fluido compressíveis, temos que:

$$\begin{aligned} F &= \dot{m}_s V_s - \dot{m}_e V_e + (p_s - p_e) A_e \\ &= \dot{m}_{gases} V_{gases} - \dot{m}_{ar} V_{ar} + (p_{gases} - p_{ar}) A_{entrada} \\ &= \frac{\dot{m}_{gases}}{\dot{m}_{ar}} V_{gases} - V_{ar} + (p_{gases} - p_{ar}) \frac{A_{entrada}}{\dot{m}_{ar}} \\ &= (1 + RAC) V_{gases} - V_{ar} + (p_{gases} - p_{ar}) \frac{A_{entrada}}{(\rho_{ar} V_{ar} A_{entrada})} \\ &= (1 + RAC) V_{gases} - V_{ar} + \frac{(p_{gases} - p_{ar})}{(\rho_{ar} V_{ar})} \\ &= (1 + RAC) M_{gases} a_{gases} - M_{ar} a_{ar} + \frac{(p_{gases} - p_{ar})}{(\rho_{ar} M_{ar} a_{ar})} \end{aligned}$$

Onde o *RAC* é a relação de ar-combustível, definida segundo a equação 9.2 a seguir:

$$RAC = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}} \quad (9.2)$$

Definindo dessa forma a equação para o empuxo específico *f* em 9.3:

$$f = (1 + RAC) M_{gases} a_{gases} - M_{ar} a_{ar} + \frac{(p_{gases} - p_{ar})}{(\rho_{ar} M_{ar} a_{ar})} \quad (9.3)$$

Os resultados a seguir, mostram como variam os valores de empuxo específico de acordo com as diversas combinações de ângulo de aclave na Onda de Choque Oblíqua com o ângulo de declive na expansão de Prandtl-Meyer, além da variação da velocidade de entrada.

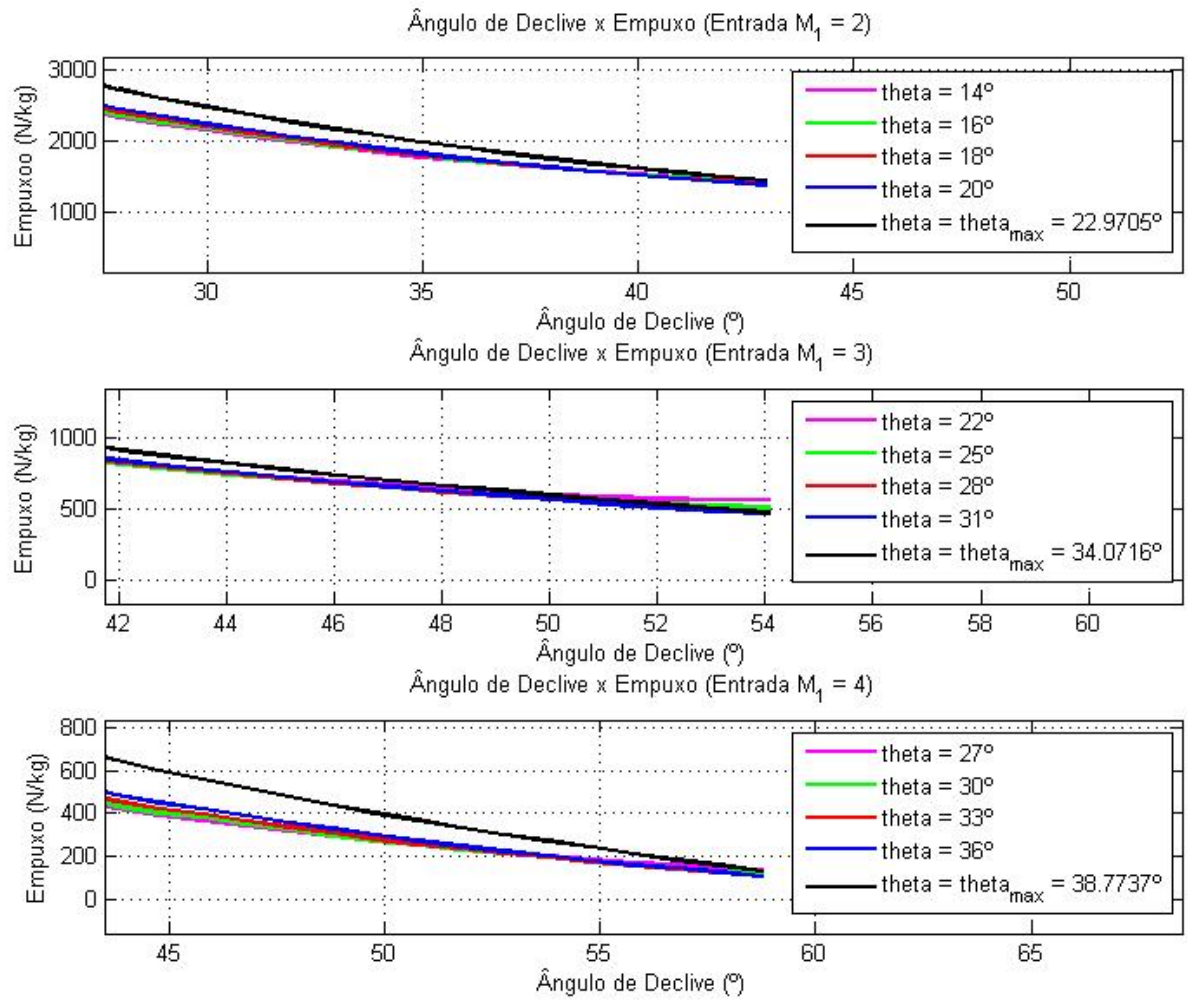


Figura 55 – Ângulo de Declive x Empuxo

9.2 Rendimento de Carnot

Para o modelo idealizado do *Ramjet*, o rendimento máximo teórico que pode ser determinado é um rendimento de Carnot correspondente para um ciclo ideal, conforme a equação 9.4:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (9.4)$$

Onde para o caso do modelo tratado como um Carnot, onde temos a diferença de calor de um reservatório mais quente para um mais frio, a temperatura T_f refere a temperatura no Prandtl-

Meyer e a temperatura T_q refere a temperatura após a combustão no escoamento de Rayleigh. Assim, tem-se a equação para o rendimento do modelo conforme visto em 9.5 a seguir:

$$\eta = 1 - \frac{T_{Prandtl-Meyer}}{T_{Rayleigh}} \quad (9.5)$$

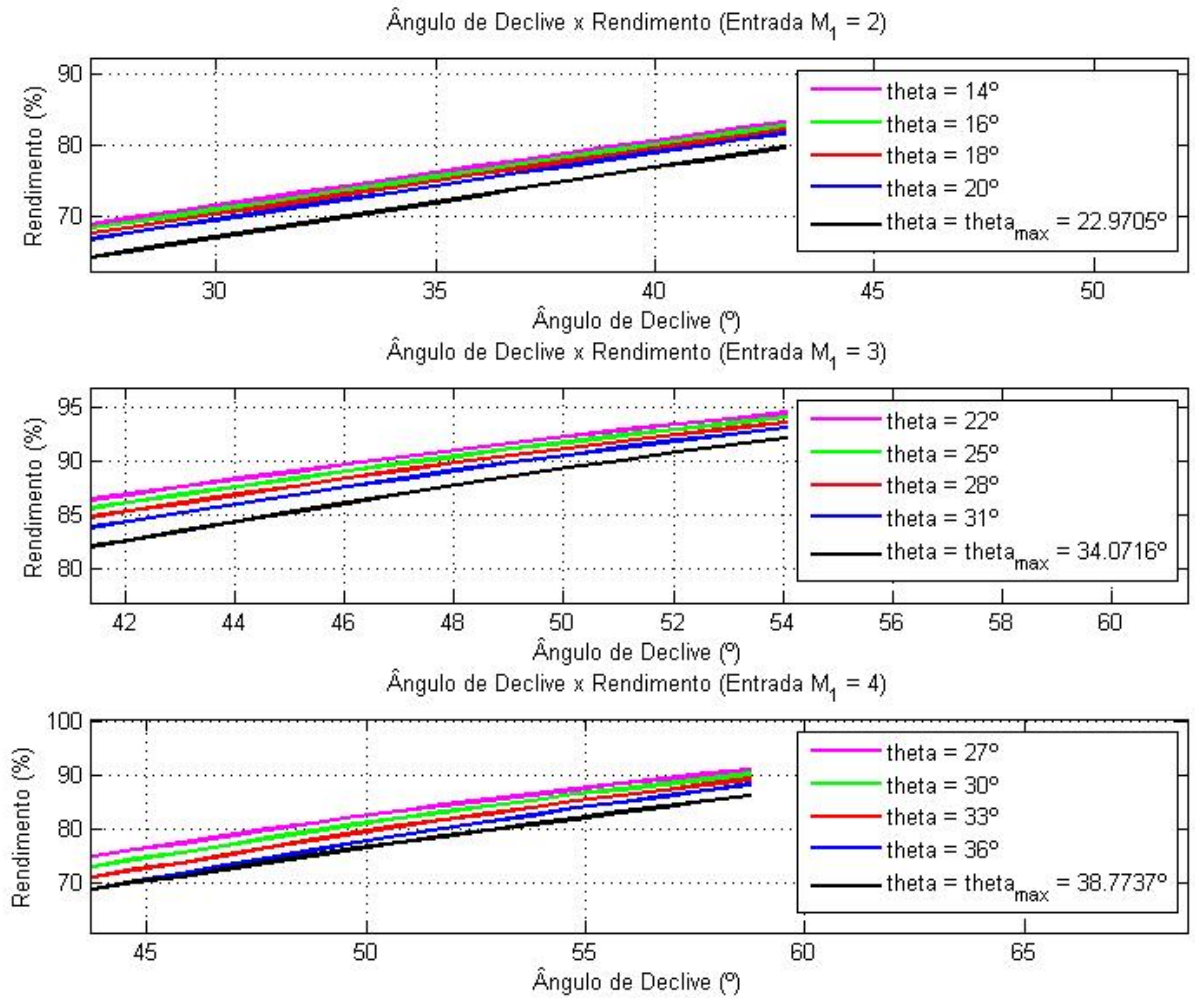


Figura 56 – Ângulo de Declive x Rendimento de Carnot

9.3 Rendimento Real

Para o rendimento real do *Ramjet*, deve-se avaliar a quantidade de trabalho gerado pelo motor a jato pela calor disponível através da combustão. Dessa forma, obteve-se a equação 9.6

a seguir:

$$\eta_{Ramjet} = \frac{fV_{in}}{H_v RAC} \quad (9.6)$$

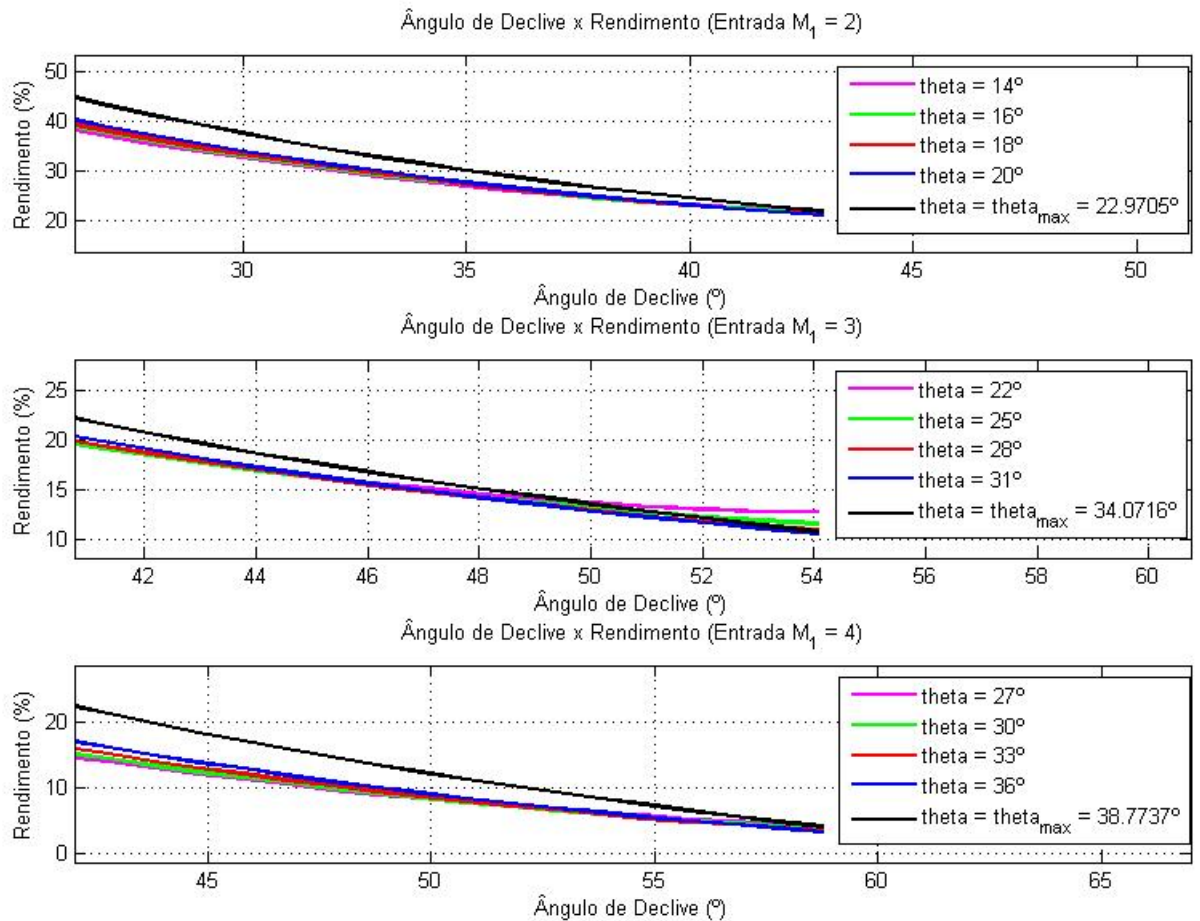


Figura 57 – Ângulo de Declive x Rendimento Real

Pelo resultados pode-se constatar que o rendimento η_{Ramjet} é bem menor que o η para o ciclo ideal, isto deve-se ao fato de levar em conta boa parte das perdas do motor a jato durante um ciclo.

Para um modelo idealizado inicial, os resultados apresentados são bem próximos as condições de operações para motores a jato desse porte. Dessa forma, pode ser determinado quais condições de ângulos iniciais deve-se ter o *Ramjet* para alcançar uma faixa de operação próxima a específica na saída. Esse modelo deve ser avaliado como uma aproximação inicial para o modela-

mento do *Ramjet*, pois não foram levados em conta um primeiro esboço para as geometrias do motor, etapa essa que pode ser iniciada a partir desse estudo preliminar.

10 Referências Bibliográficas

Aeroflap. Figura da Combinação de Propulsores, retirado de <http://www.aeroflap.com.br/propulsores-ramjet/> em 17/10/2016 às 10h10.

ANDERSON, John David. *Modern compressible flow: with historical perspective*. 3rd edition, McGraw-Hill, 2003

BADER, F. *Thermodynamics of Ramjet Flow Processes*. Edição Única, The Johns Hopkins University, 1960

BONDARYUK, M. N. *Ramjet Engines*. Edição Única, Technical Information Center, 1960

BORGNAKKE, C. Fundamentos da termodinâmica. Tradução da 7ª edição americana, Blucher, 2009

HODGE, B. K. *Compressible fluid dynamics with personal computer applications*. 1st edition, Prentice-Hall, 1995

Mig Flug. Figura do Lockheed SR-71 Blackbird, retirado de <http://www.migflug.com/jetflights/remarkable-airplanes-of-the-world-part-1-the-fastest.html> em 17/10/2016 às 9h59.

PIMENTA, M. M. Introdução a dinâmica de gases. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, 1987

ZUCKER, Robert D. *Fundamentals of gas dynamics*. 2nd edition, John Wiley & Sons Inc, 2002

A Simulação do MATLAB

```

1  %%% Programa MatLab – Ramjet
2  %%% Constantes
3  pi = 3.141592655359;
4  k = 1.4;
5  R = 287;
6  j = 1*pi/180;
7  beta_ini = 40*pi/180;
8  beta_fin = 80*pi/180;
9  beta = beta_ini:j:beta_fin;
10 beta_deg = 40:1:80;
11 H_v = 42800;
12 C_p0 = 1.05;
13 C_p1 = -0.365;
14 C_p2 = 0.85;
15 C_p3 = -0.39;
16 r_fuel_air = 0.002;
17 rA = 1.50;
18 rB = 10;
19
20 %%% Condições Iniciais
21 Min_1 = 2;
22 Min_2 = 3;
23 Min_3 = 4;
24 Mquad_1 = Min_1*Min_1;
25 Mquad_2 = Min_2*Min_2;
26 Mquad_3 = Min_3*Min_3;
27 p1 = 15;
28 rho1 = 0.239;
29 T1 = 218.15;
30 A = (k+1)/(k-1);
31 Vin_1 = Min_1*sqrt(k*R*T1);
32 Vin_2 = Min_2*sqrt(k*R*T1);
33 Vin_3 = Min_3*sqrt(k*R*T1);
34
35 %%% 1 – Ondas de Choque Obliquas

```

```

36 %%% 1.1 – Simulador
37 for i = 1:41
38     aux1 = Mquad_1*sin(beta(i))*sin(beta(i))-1;
39     aux2 = Mquad_2*sin(beta(i))*sin(beta(i))-1;
40     aux3 = Mquad_3*sin(beta(i))*sin(beta(i))-1;
41     aux4 = Mquad_1*(k+cos(2*beta(i)))+2;
42     aux5 = Mquad_2*(k+cos(2*beta(i)))+2;
43     aux6 = Mquad_3*(k+cos(2*beta(i)))+2;
44     tg1(i) = 2*cot(beta(i))*(aux1/aux4);
45     tg2(i) = 2*cot(beta(i))*(aux2/aux5);
46     tg3(i) = 2*cot(beta(i))*(aux3/aux6);
47     at1(i) = atan(tg1(i));
48     at2(i) = atan(tg2(i));
49     at3(i) = atan(tg3(i));
50     at_deg1(i) = at1(i)*180/pi;
51     at_deg2(i) = at2(i)*180/pi;
52     at_deg3(i) = at3(i)*180/pi;
53     Mn1_1(i) = Min_1*sin(beta(i));
54     Mn1_2(i) = Min_2*sin(beta(i));
55     Mn1_3(i) = Min_3*sin(beta(i));
56     AS = 2/(k-1);
57     SA = k*AS;
58     aux7(i) = Mn1_1(i)*Mn1_1(i);
59     aux8(i) = Mn1_2(i)*Mn1_2(i);
60     aux9(i) = Mn1_3(i)*Mn1_3(i);
61     aux10(i) = (aux7(i)+AS)/(SA*aux7(i)-1);
62     aux11(i) = (aux8(i)+AS)/(SA*aux8(i)-1);
63     aux12(i) = (aux9(i)+AS)/(SA*aux9(i)-1);
64     Mn2_1(i) = sqrt(aux10(i));
65     Mn2_2(i) = sqrt(aux11(i));
66     Mn2_3(i) = sqrt(aux12(i));
67     M2_1(i) = Mn2_1(i)/cos(beta(i)-at1(i));
68     M2_2(i) = Mn2_2(i)/cos(beta(i)-at2(i));
69     M2_3(i) = Mn2_3(i)/cos(beta(i)-at3(i));
70     aux13 = (k+1)*Mn1_1(i)*Mn1_1(i);
71     aux14 = (k+1)*Mn1_2(i)*Mn1_2(i);
72     aux15 = (k+1)*Mn1_3(i)*Mn1_3(i);
73     aux16 = Mn1_1(i)*Mn1_1(i)*(k-1)+2;
74     aux17 = Mn1_2(i)*Mn1_2(i)*(k-1)+2;

```

```

75     aux18 = Mn1_3(i)*Mn1_3(i)*(k-1)+2;
76     r_rho1(i) = aux13/aux16;
77     r_rho2(i) = aux14/aux17;
78     r_rho3(i) = aux15/aux18;
79     r_p1(i) = 1+(2*k/(k+1))*(Mn1_1(i)*Mn1_1(i)-1);
80     r_p2(i) = 1+(2*k/(k+1))*(Mn1_2(i)*Mn1_2(i)-1);
81     r_p3(i) = 1+(2*k/(k+1))*(Mn1_3(i)*Mn1_3(i)-1);
82     p2_1(i) = p1*r_p1(i);
83     p2_2(i) = p1*r_p2(i);
84     p2_3(i) = p1*r_p3(i);
85     rho2_1(i) = rho1*r_rho1(i);
86     rho2_2(i) = rho1*r_rho2(i);
87     rho2_3(i) = rho1*r_rho3(i);
88     T2_1(i) = T1*(r_p1(i)/r_rho1(i));
89     T2_2(i) = T1*(r_p2(i)/r_rho2(i));
90     T2_3(i) = T1*(r_p3(i)/r_rho3(i));
91 end
92
93 %%% 1.2 – Graficos
94 figure(1)
95 handle1=plot(at_deg1 , beta_deg , 'm' , at_deg2 , beta_deg , 'g' , at_deg3 ,
    beta_deg , 'r' );
96 set(handle1 , 'LineWidth' , 1.5);
97 title('theta-beta-M');
98 xlabel('Angulo de Deflexao ');
99 ylabel('Angulo de Choque ');
100 legend('M_1 = 2' , 'M_1 = 3' , 'M_1 = 4');
101 grid on;
102
103 figure(2)
104 handle2=plot(beta_deg , rho2_1 , 'm' , beta_deg , rho2_2 , 'g' , beta_deg ,
    rho2_3 , 'r' );
105 set(handle2 , 'LineWidth' , 1.5);
106 title('Angulo de Choque x Densidade');
107 ylabel('Densidade ');
108 xlabel('Angulo de Choque ');
109 legend('M_1 = 2' , 'M_1 = 3' , 'M_1 = 4');
110 grid on;
111

```

```
112 figure(3)
113 handle3=plot(beta_deg , p2_1 , 'm' , beta_deg , p2_2 , 'g' , beta_deg , p2_3 ,
    'r');
114 set(handle3 , 'LineWidth' , 1.5);
115 title('Angulo de Choque x Pressao');
116 ylabel('Pressao');
117 xlabel('Angulo de Choque');
118 legend('M_1 = 2' , 'M_1 = 3' , 'M_1 = 4');
119 grid on;
120
121 figure(4)
122 handle4=plot(beta_deg , T2_1 , 'm' , beta_deg , T2_2 , 'g' , beta_deg , T2_3 ,
    'r');
123 set(handle4 , 'LineWidth' , 1.5);
124 title('Angulo de Choque x Temperatura');
125 ylabel('Temperatura ');
126 xlabel('Angulo de Choque ');
127 legend('M_1 = 2' , 'M_1 = 3' , 'M_1 = 4');
128 grid on;
129
130 figure(5)
131 handle5=plot(beta_deg , M2_1 , 'm' , beta_deg , M2_2 , 'g' , beta_deg , M2_3 ,
    'r');
132 set(handle5 , 'LineWidth' , 1.5);
133 title('Angulo de Choque x Numero de Mach M_2');
134 ylabel('Numero de Mach');
135 xlabel('Angulo de Choque ');
136 legend('M_1 = 2' , 'M_1 = 3' , 'M_1 = 4');
137 grid on;
138
139 %%% 1.2 – Caso Particular
140 EX1_M1 = 1.5;
141 EX1_T1 = T1;
142 EX1_p1 = 8*6.89476;
143 EX1_rho1 = (EX1_p1*1000)/(R*EX1_T1);
144 EX1_M1_quad = EX1_M1*EX1_M1;
145 EX1_delta = 5;
146 EX1_delta_rad = EX1_delta*pi/180;
147
```

```

148 comp = 1:80;
149 for i=1:80
150     comp_rad(i) = comp(i)*pi/180;
151     parte1 = EX1_M1_quad*sin(comp_rad(i))*sin(comp_rad(i))-1;
152     parte2 = EX1_M1_quad*(k+cos(2*comp_rad(i)))+2;
153     tab_OC(i) = 2*cot(comp_rad(i))*(parte1/parte2);
154     EX1_theta(i) = atan(tab_OC(i));
155     EX1_theta_deg(i) = EX1_theta(i)*180/pi;
156 end
157
158     cont = 1;
159     while EX1_delta > EX1_theta_deg(cont)
160         cont = cont + 1;
161     end
162     parte3 = (comp(cont)-comp(cont-1))*(EX1_delta-EX1_theta_deg(
        cont-1));
163     parte4 = EX1_theta_deg(cont)-EX1_theta_deg(cont-1);
164     EX1_angchoque = comp(cont-1) + parte3/parte4;
165     EX1_angchoque_rad = EX1_angchoque*pi/180;
166     EX1_Mn1 = EX1_M1*sin(EX1_angchoque_rad);
167     AS = 2/(k-1);
168     SA = k*AS;
169     parte5 = EX1_Mn1*EX1_Mn1;
170     parte6 = (parte5+AS)/(SA*parte5-1);
171     EX1_Mn2 = sqrt(parte6);
172     EX1_M2 = EX1_Mn2/cos(EX1_angchoque_rad-EX1_delta_rad);
173     parte7 = (k+1)*EX1_Mn1*EX1_Mn1;
174     parte8 = EX1_Mn1*EX1_Mn1*(k-1)+2;
175     EX1_r_rho = parte7/parte8;
176     EX1_r_p = 1+(2*k/(k+1))*(EX1_Mn1*EX1_Mn1-1);
177     EX1_p2 = EX1_p1*EX1_r_p;
178     EX1_rho2 = EX1_rho1*EX1_r_rho;
179     EX1_T2 = EX1_T1*(EX1_r_p/EX1_r_rho);
180
181 %%% 2 – Variacao de Area
182 %%% 2.1 – Tabelas
183 M_est_in = 0.01;
184 M_est_fin = 10;
185 incl = 0.01;

```

```

186 IFT(1,:) = M_est_in:inc1:M_est_fin;
187 for i=1:1000
188     %%% T_0/T
189     IFT(2,i) = 1+((k-1)/2)*IFT(1,i)*IFT(1,i);
190     %%% p_0/p
191     IFT(3,i) = (IFT(2,i))^(k/(k-1));
192     %%% rho_0/rho
193     IFT(4,i) = (IFT(2,i))^(1/(k-1));
194     %%% A/A_cit
195     IFT(5,i) = (1/IFT(1,i))*((2+(k-1)*IFT(1,i)*IFT(1,i))/(k+1))
        ^((k+1)/(2*(k-1)));
196 end
197
198 %%% 2.2 – Simulador
199 for i=1:41
200     VA_M1_1(1,i) = M2_1(i);
201     VA_M1_2(1,i) = M2_2(i);
202     VA_M1_3(1,i) = M2_3(i);
203 end
204
205 for i=1:41
206     cont = 100;
207     while VA_M1_1(1,i) > IFT(1,cont)
208         cont = cont + 1;
209     end
210     for l=2:5
211         aux76 = (VA_M1_1(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
            cont-1));
212         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
213         VA_M1_1(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
214     end
215 end
216
217 for i=1:41
218     cont = 100;
219     while VA_M1_2(1,i) > IFT(1,cont)
220         cont = cont + 1;
221     end
222     for l=2:5

```



```

223     aux76 = (VA_M1_2(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
        cont-1));
224     aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
225     VA_M1_2(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
226     end
227 end
228
229 for i=1:41
230     cont = 100;
231     while VA_M1_3(1,i) > IFT(1,cont)
232         cont = cont + 1;
233     end
234     for l=2:5
235         aux76 = (VA_M1_3(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
            cont-1));
236         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
237         VA_M1_3(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
238     end
239 end
240
241 %%% 2.3 – Saida da Variacao de Area
242 for i=1:41
243     VA_M2_1(5,i) = rA*VA_M1_1(5,i);
244     VA_M2_2(5,i) = rA*VA_M1_2(5,i);
245     VA_M2_3(5,i) = rA*VA_M1_3(5,i);
246 end
247
248 for i=1:41
249     cont = 100;
250     while VA_M2_1(5,i) > IFT(5,cont)
251         cont = cont + 1;
252     end
253     for l=1:4
254         aux76 = (VA_M2_1(5,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
            cont-1));
255         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
256         VA_M2_1(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
257     end
258 end

```

```

259
260 for i=1:41
261     cont = 100;
262     while VA_M2.2(5,i) > IFT(5,cont)
263         cont = cont + 1;
264     end
265     for l=1:4
266         aux76 = (VA_M2.2(5,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
                cont-1));
267         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
268         VA_M2.2(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
269     end
270 end
271
272 for i=1:41
273     cont = 100;
274     while VA_M2.3(5,i) > IFT(5,cont)
275         cont = cont + 1;
276     end
277     for l=1:4
278         aux76 = (VA_M2.3(5,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
                cont-1));
279         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
280         VA_M2.3(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
281     end
282 end
283
284 for i=1:41
285     VA_T2.1(i) = T2.1(i)*(VA_M1.1(2,i)/VA_M2.1(2,i));
286     VA_T2.2(i) = T2.2(i)*(VA_M1.2(2,i)/VA_M2.2(2,i));
287     VA_T2.3(i) = T2.3(i)*(VA_M1.3(2,i)/VA_M2.3(2,i));
288     VA_p2.1(i) = p2.1(i)*(VA_M1.1(3,i)/VA_M2.1(3,i));
289     VA_p2.2(i) = p2.2(i)*(VA_M1.2(3,i)/VA_M2.2(3,i));
290     VA_p2.3(i) = p2.3(i)*(VA_M1.3(3,i)/VA_M2.3(3,i));
291     VA_rho2.1(i) = rho2.1(i)*(VA_M1.1(4,i)/VA_M2.1(4,i));
292     VA_rho2.2(i) = rho2.2(i)*(VA_M1.2(4,i)/VA_M2.2(4,i));
293     VA_rho2.3(i) = rho2.3(i)*(VA_M1.3(4,i)/VA_M2.3(4,i));
294 end
295

```

296 *%%% 2.4 – Graficos*

297 `figure(11)`

298 `handle11=plot(beta_deg,VA_rho2_1,'m',beta_deg,VA_rho2_2,'g',`
`beta_deg,VA_rho2_3,'r');`

299 `set(handle11,'LineWidth',1.5);`

300 `title('Angulo de Choque x Densidade');`

301 `ylabel('Densidade');`

302 `xlabel('Angulo de Choque');`

303 `legend('M_1 = 2','M_1 = 3','M_1 = 4');`

304 `grid on;`

305

306 `figure(12)`

307 `handle12=plot(beta_deg,VA_p2_1,'m',beta_deg,VA_p2_2,'g',`
`beta_deg,VA_p2_3,'r');`

308 `set(handle12,'LineWidth',1.5);`

309 `title('Angulo de Choque x Pressao');`

310 `ylabel('Pressao');`

311 `xlabel('Angulo de Choque');`

312 `legend('M_1 = 2','M_1 = 3','M_1 = 4');`

313 `grid on;`

314

315 `figure(13)`

316 `handle13=plot(beta_deg,VA_T2_1,'m',beta_deg,VA_T2_2,'g',`
`beta_deg,VA_T2_3,'r');`

317 `set(handle13,'LineWidth',1.5);`

318 `title('Angulo de Choque x Temperatura');`

319 `ylabel('Temperatura');`

320 `xlabel('Angulo de Choque');`

321 `legend('M_1 = 2','M_1 = 3','M_1 = 4');`

322 `grid on;`

323

324 `figure(14)`

325 `handle14=plot(beta_deg,VA_M2_1(1,:), 'm',beta_deg,VA_M2_2(1,:), 'g',`
`beta_deg,VA_M2_3(1,:), 'r');`

326 `set(handle14,'LineWidth',1.5);`

327 `title('Angulo de Choque x Numero de Mach M_2');`

328 `ylabel('Numero de Mach');`

329 `xlabel('Angulo de Choque');`

330 `legend('M_1 = 2','M_1 = 3','M_1 = 4');`

```

331 grid on;
332
333 %%% 2.5 – Caso Particular
334 EX2_A1 = 0.56;
335 EX2_A2 = 0.407;
336 EX2_A21 = EX2_A2/EX2_A1;
337 EX2_V1 = 195;
338 EX2_p1 = 0.2;
339 EX2_T1 = 416;
340 EX2_a1 = sqrt(k*R*EX2_T1);
341 EX2_M1 = EX2_V1/EX2_a1;
342 EX2_To1 = EX2_T1*(1+0.5*(k-1)*EX2_M1*EX2_M1);
343 EX2_Po1 = EX2_p1*(1+0.5*(k-1)*EX2_M1*EX2_M1)^(k/(k-1));
344
345 cont = 1;
346 while EX2_M1 > IFT(1,cont)
347     cont = cont + 1;
348 end
349 parte9 = (EX2_M1-IFT(1,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,cont-1));
350 parte10 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
351 EX2_rTo1 = IFT(2,cont-1) + parte9/parte10;
352 parte11 = (EX2_M1-IFT(1,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,cont-1));
353 parte12 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
354 EX2_rPo1 = IFT(3,cont-1) + parte11/parte12;
355 parte13 = (EX2_M1-IFT(1,cont-1))*(IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1));
356 parte14 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
357 EX2_rA1 = IFT(5,cont-1) + parte13/parte14;
358
359 EX2_rA2 = EX2_rA1*EX2_A21;
360 cont = 100;
361 while EX2_rA2 > IFT(5,cont)
362     cont = cont + 1;
363 end
364 parte15 = (EX2_rA2-IFT(5,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,cont-1));
365 parte16 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
366 EX2_rTo2 = IFT(2,cont-1) + parte15/parte16;
367 parte17 = (EX2_rA2-IFT(5,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,cont-1));
368 parte18 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
369 EX2_rPo2 = IFT(3,cont-1) + parte17/parte18;

```

```

370 parte19 = (EX2_rA2-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1));
371 parte20 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
372 EX2_M2 = IFT(1,cont-1) + parte19/parte20;
373 EX2_p2 = (EX2_p1*EX2_rPo2)/EX2_rPo1;
374 EX2_T2 = (EX2_T1*EX2_rTo2)/EX2_rTo1;
375 EX2_To2 = EX2_T2*(1+0.5*(k-1)*EX2_M2*EX2_M2);
376 EX2_Po2 = EX2_p2*(1+0.5*(k-1)*EX2_M2*EX2_M2)^(k/(k-1));
377
378 %%% 3 – Prandtl–Meyer
379 %%% 3.1 – Tabela de Prandtl Meyer
380 C_min = 1;
381 C_max = 180;
382 inc = 0.01;
383 C = C_min:inc:C_max;
384 for i = 1:17901
385     aux19 = C(1,i)*C(1,i) - 1;
386     C(2,i) = 180*(sqrt(A)*atan(sqrt(aux19/A))-atan(sqrt(aux19))
        )/pi;
387 end
388
389 %%% 3.2 – Simulador
390
391 PM_theta(1,:) = [14 16 18 20 at_deg1(26)];
392 PM_theta(2,:) = [22 25 28 31 at_deg2(26)];
393 PM_theta(3,:) = [27 30 33 36 at_deg3(27)];
394
395 for i=1:4
396     cont = 1;
397     while PM_theta(1,i) > at_deg1(cont)
398         cont = cont + 1;
399     end
400     s1 = (VA_T2_1(cont)-VA_T2_1(cont-1))*(PM_theta(1,i)-at_deg1
        (cont-1));
401     s2 = at_deg1(cont)-at_deg1(cont-1);
402     F1(1,i) = VA_T2_1(cont-1) + s1/s2;
403     s3 = (VA_p2_1(cont)-VA_p2_1(cont-1))*(PM_theta(1,i)-at_deg1
        (cont-1));
404     s4 = at_deg1(cont)-at_deg1(cont-1);
405     F1(2,i) = VA_p2_1(cont-1) + s3/s4;

```

```

406     s5 = (VA_rho2_1(cont)-VA_rho2_1(cont-1))*(PM_theta(1,i)-
        at_deg1(cont-1));
407     s6 = at_deg1(cont)-at_deg1(cont-1);
408     F1(3,i) = VA_rho2_1(cont-1) + s5/s6;
409     s7 = (VA_M2_1(1,cont)-VA_M2_1(1,cont-1))*(PM_theta(1,i)-
        at_deg1(cont-1));
410     s8 = at_deg1(cont)-at_deg1(cont-1);
411     F1(4,i) = VA_M2_1(1,cont-1) + s7/s8;
412     s9 = (beta_deg(cont)-beta_deg(cont-1))*(PM_theta(1,i)-
        at_deg1(cont-1));
413     s10 = at_deg1(cont)-at_deg1(cont-1);
414     F1(5,i) = beta_deg(cont-1) + s9/s10;
415     s11 = (beta(cont)-beta(cont-1))*(PM_theta(1,i)-at_deg1(cont
        -1));
416     s12 = at_deg1(cont)-at_deg1(cont-1);
417     F1(6,i) = beta(cont-1) + s11/s12;
418 end
419
420 for i=1:4
421     cont = 1;
422     while PM_theta(2,i) > at_deg2(cont)
423         cont = cont + 1;
424     end
425     s1 = (VA_T2_2(cont)-VA_T2_2(cont-1))*(PM_theta(2,i)-at_deg2
        (cont-1));
426     s2 = at_deg2(cont)-at_deg2(cont-1);
427     F2(1,i) = VA_T2_2(cont-1) + s1/s2;
428     s3 = (VA_p2_2(cont)-VA_p2_2(cont-1))*(PM_theta(2,i)-at_deg2
        (cont-1));
429     s4 = at_deg2(cont)-at_deg2(cont-1);
430     F2(2,i) = VA_p2_2(cont-1) + s3/s4;
431     s5 = (VA_rho2_2(cont)-VA_rho2_2(cont-1))*(PM_theta(2,i)-
        at_deg2(cont-1));
432     s6 = at_deg2(cont)-at_deg2(cont-1);
433     F2(3,i) = VA_rho2_2(cont-1) + s5/s6;
434     s7 = (VA_M2_2(1,cont)-VA_M2_2(1,cont-1))*(PM_theta(2,i)-
        at_deg2(cont-1));
435     s8 = at_deg2(cont)-at_deg2(cont-1);
436     F2(4,i) = VA_M2_2(1,cont-1) + s7/s8;

```

```

437     s9 = (beta_deg(cont)-beta_deg(cont-1))*(PM_theta(2,i)-
         at_deg2(cont-1));
438     s10 = at_deg2(cont)-at_deg2(cont-1);
439     F2(5,i) = beta_deg(cont-1) + s9/s10;
440     s11 = (beta(cont)-beta(cont-1))*(PM_theta(2,i)-at_deg2(cont
         -1));
441     s12 = at_deg2(cont)-at_deg2(cont-1);
442     F2(6,i) = beta(cont-1) + s11/s12;
443 end
444
445 for i=1:4
446     cont = 1;
447     while PM_theta(3,i) > at_deg3(cont)
448         cont = cont + 1;
449     end
450     s1 = (VA_T2_3(cont)-VA_T2_3(cont-1))*(PM_theta(3,i)-at_deg3
         (cont-1));
451     s2 = at_deg3(cont)-at_deg3(cont-1);
452     F3(1,i) = VA_T2_3(cont-1) + s1/s2;
453     s3 = (VA_p2_3(cont)-VA_p2_3(cont-1))*(PM_theta(3,i)-at_deg3
         (cont-1));
454     s4 = at_deg3(cont)-at_deg3(cont-1);
455     F3(2,i) = VA_p2_3(cont-1) + s3/s4;
456     s5 = (VA_rho2_3(cont)-VA_rho2_3(cont-1))*(PM_theta(3,i)-
         at_deg3(cont-1));
457     s6 = at_deg3(cont)-at_deg3(cont-1);
458     F3(3,i) = VA_rho2_3(cont-1) + s5/s6;
459     s7 = (VA_M2_3(1,cont)-VA_M2_3(1,cont-1))*(PM_theta(3,i)-
         at_deg3(cont-1));
460     s8 = at_deg3(cont)-at_deg3(cont-1);
461     F3(4,i) = VA_M2_3(1,cont-1) + s7/s8;
462     s9 = (beta_deg(cont)-beta_deg(cont-1))*(PM_theta(3,i)-
         at_deg3(cont-1));
463     s10 = at_deg3(cont)-at_deg3(cont-1);
464     F3(5,i) = beta_deg(cont-1) + s9/s10;
465     s11 = (beta(cont)-beta(cont-1))*(PM_theta(3,i)-at_deg3(cont
         -1));
466     s12 = at_deg3(cont)-at_deg3(cont-1);
467     F3(6,i) = beta(cont-1) + s11/s12;

```

```

468 end
469
470 PM_T1(1,:) = [F1(1,1) F1(1,2) F1(1,3) F1(1,4) VA_T2_1(26)];
471 PM_T1(2,:) = [F2(1,1) F2(1,2) F2(1,3) F2(1,4) VA_T2_2(26)];
472 PM_T1(3,:) = [F3(1,1) F3(1,2) F3(1,3) F3(1,4) VA_T2_3(27)];
473
474 PM_M1(1,:) = [F1(4,1) F1(4,2) F1(4,3) F1(4,4) VA_M2_1(26)];
475 PM_M1(2,:) = [F2(4,1) F2(4,2) F2(4,3) F2(4,4) VA_M2_2(26)];
476 PM_M1(3,:) = [F3(4,1) F3(4,2) F3(4,3) F3(4,4) VA_M2_3(27)];
477
478 PM_p1(1,:) = [F1(2,1) F1(2,2) F1(2,3) F1(2,4) VA_p2_1(26)];
479 PM_p1(2,:) = [F2(2,1) F2(2,2) F2(2,3) F2(2,4) VA_p2_2(26)];
480 PM_p1(3,:) = [F3(2,1) F3(2,2) F3(2,3) F3(2,4) VA_p2_3(27)];
481
482 PM_rho1(1,:) = [F1(3,1) F1(3,2) F1(3,3) F1(3,4) VA_rho2_1(26)];
483 PM_rho1(2,:) = [F2(3,1) F2(3,2) F2(3,3) F2(3,4) VA_rho2_2(26)];
484 PM_rho1(3,:) = [F3(3,1) F3(3,2) F3(3,3) F3(3,4) VA_rho2_3(27)];
485
486 PM_beta(1,:) = [F1(5,1) F1(5,2) F1(5,3) F1(6,4) beta_deg(26)];
487 PM_beta(2,:) = [F2(5,1) F2(5,2) F2(5,3) F2(6,4) beta_deg(26)];
488 PM_beta(3,:) = [F3(5,1) F3(5,2) F3(5,3) F3(6,4) beta_deg(27)];
489
490 PM_betar(1,:) = [F1(5,1) F1(5,2) F1(5,3) F1(6,4) beta(26)];
491 PM_betar(2,:) = [F2(5,1) F2(5,2) F2(5,3) F2(6,4) beta(26)];
492 PM_betar(3,:) = [F3(5,1) F3(5,2) F3(5,3) F3(6,4) beta(27)];
493
494 for i = 1:3
495     for l = 1:5
496         B = PM_M1(i,l)*PM_M1(i,l) - 1;
497         PM_nu1(i,l) = 180*(sqrt(A)*atan(sqrt(B/A))-atan(sqrt(B)
            ))/pi;
498     end
499 end
500
501 for i = 1:60
502     for l = 1:5
503         nu2_1(l,i) = PM_nu1(1,l)+PM_theta(1,5)+i;
504         nu2_2(l,i) = PM_nu1(2,l)+PM_theta(2,5)+i;
505         nu2_3(l,i) = PM_nu1(3,l)+PM_theta(3,5)+i;

```



```

506     end
507 end
508
509 for i = 1:20
510     lamb1(i) = PM_theta(1,5)+i;
511     lamb2(i) = PM_theta(2,5)+i;
512     lamb3(i) = PM_theta(3,5)+i;
513 end
514
515
516 for i = 1:5
517     for l = 1:60
518         cont = 1;
519         while nu2_1(i,l) > C(2,cont)
520             cont = cont + 1;
521         end
522         aux20 = (nu2_1(i,l)-C(2,cont-1))*(C(1,cont)-C(1,cont-1));
523         aux21 = C(2,cont)-C(2,cont-1);
524         PM_M2_1(i,l) = C(1,cont-1) + aux20/aux21;
525     end
526 end
527
528 for i = 1:5
529     for l = 1:60
530         cont = 1;
531         while nu2_2(i,l) > C(2,cont)
532             cont = cont + 1;
533         end
534         aux22 = (nu2_2(i,l)-C(2,cont-1))*(C(1,cont)-C(1,cont-1));
535         aux23 = C(2,cont)-C(2,cont-1);
536         PM_M2_2(i,l) = C(1,cont-1) + aux22/aux23;
537     end
538 end
539
540 for i = 1:5
541     for l = 1:60
542         cont = 1;
543         while nu2_3(i,l) > C(2,cont)
544             cont = cont + 1;

```

```

545         end
546         aux24 = (nu2_3(i,1)-C(2,cont-1))*(C(1,cont)-C(1,cont-1));
547         aux25 = C(2,cont)-C(2,cont-1);
548         PM_M2_3(i,1) = C(1,cont-1) + aux24/aux25;
549     end
550 end
551
552 for i = 1:5
553     for l = 1:60
554         PM_T2_1(i,1) = PM_T1(1,i)*((2+(k-1)*PM_M1(1,i)*PM_M1(1,i))
                    /(2+(k-1)*PM_M2_1(i,1)*PM_M2_1(i,1)));
555         PM_To2_1(i,1) = PM_T2_1(i,1)*(1+((k-1)/2)*PM_M1(1,i)*PM_M1
                    (1,i));
556         PM_p2_1(i,1) = PM_p1(1,i)/((((2+(k-1)*PM_M2_1(i,1)*PM_M2_1(i
                    ,1))/(2+(k-1)*PM_M1(1,i)*PM_M1(1,i)))^(k/(k-1))));
557         PM_rho2_1(i,1) = PM_rho1(1,i)*((2+(k-1)*PM_M1(1,i)*PM_M1(1,
                    i))/(2+(k-1)*PM_M2_1(i,1)*PM_M2_1(i,1)))^(1/(k-1));
558         PM_T2_2(i,1) = PM_T1(2,i)*((2+(k-1)*PM_M1(2,i)*PM_M1(2,i))
                    /(2+(k-1)*PM_M2_2(i,1)*PM_M2_2(i,1)));
559         PM_To2_2(i,1) = PM_T2_2(i,1)*(1+((k-1)/2)*PM_M1(2,i)*PM_M1
                    (2,i));
560         PM_p2_2(i,1) = PM_p1(2,i)/((((2+(k-1)*PM_M2_2(i,1)*PM_M2_2(i
                    ,1))/(2+(k-1)*PM_M1(2,i)*PM_M1(2,i)))^(k/(k-1))));
561         PM_rho2_2(i,1) = PM_rho1(2,i)*((2+(k-1)*PM_M1(2,i)*PM_M1(2,
                    i))/(2+(k-1)*PM_M2_2(i,1)*PM_M2_2(i,1)))^(1/(k-1));
562         PM_T2_3(i,1) = PM_T1(3,i)*((2+(k-1)*PM_M1(3,i)*PM_M1(3,i))
                    /(2+(k-1)*PM_M2_3(i,1)*PM_M2_3(i,1)));
563         PM_To2_3(i,1) = PM_T2_3(i,1)*(1+((k-1)/2)*PM_M1(3,i)*PM_M1
                    (3,i));
564         PM_p2_3(i,1) = PM_p1(3,i)/((((2+(k-1)*PM_M2_3(i,1)*PM_M2_3(i
                    ,1))/(2+(k-1)*PM_M1(3,i)*PM_M1(3,i)))^(k/(k-1))));
565         PM_rho2_3(i,1) = PM_rho1(3,i)*((2+(k-1)*PM_M1(3,i)*PM_M1(3,
                    i))/(2+(k-1)*PM_M2_3(i,1)*PM_M2_3(i,1)))^(1/(k-1));
566     end
567 end
568
569 lambda = 21:1:80;
570
571 %%% 3.3 – Graficos

```

```

572 figure(21)
573 handle21=plot(lambda,PM_M2_1(1,:), 'm',lambda,PM_M2_1(2,:), 'g',
    lambda,PM_M2_1(3,:), 'r',lambda,PM_M2_1(4,:), 'b',lambda,
    PM_M2_1(5,:), 'k');
574 set(handle21, 'LineWidth', 1.5);
575 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M.2 (Entrada M.1 = 2)
    ');
576 ylabel('Numero de Mach');
577 xlabel('Angulo de Declive ');
578 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
    theta = theta_m_a_x = 22.9705');
579 grid on;
580
581 figure(22)
582 handle22=plot(lambda,PM_M2_2(1,:), 'm',lambda,PM_M2_2(2,:), 'g',
    lambda,PM_M2_2(3,:), 'r',lambda,PM_M2_2(4,:), 'b',lambda,
    PM_M2_2(5,:), 'k');
583 set(handle22, 'LineWidth', 1.5);
584 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M.2 (Entrada M.1 = 3)
    ');
585 ylabel('Numero de Mach');
586 xlabel('Angulo de Declive ');
587 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
    theta = theta_m_a_x = 34.0716');
588 grid on;
589
590 figure(23)
591 handle23=plot(lambda,PM_M2_3(1,:), 'm',lambda,PM_M2_3(2,:), 'g',
    lambda,PM_M2_3(3,:), 'r',lambda,PM_M2_3(4,:), 'b',lambda,
    PM_M2_3(5,:), 'k');
592 set(handle23, 'LineWidth', 1.5);
593 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M.2 (Entrada M.1 = 4)
    ');
594 ylabel('Numero de Mach');
595 xlabel('Angulo de Declive ');
596 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
    theta = theta_m_a_x = 38.7737');
597 grid on;
598

```

```
599 figure (24)
600 handle24=plot(lambda,PM_p2_1(1,:), 'm',lambda,PM_p2_1(2,:), 'g',
    lambda,PM_p2_1(3,:), 'r',lambda,PM_p2_1(4,:), 'b',lambda,
    PM_p2_1(5,:), 'k');
601 set(handle24, 'LineWidth', 1.5);
602 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 2)');
603 ylabel('Pressao ');
604 xlabel('Angulo de Declive ');
605 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
    theta = theta_m_a_x = 22.9705');
606 grid on;
607
608 figure (25)
609 handle25=plot(lambda,PM_p2_2(1,:), 'm',lambda,PM_p2_2(2,:), 'g',
    lambda,PM_p2_2(3,:), 'r',lambda,PM_p2_2(4,:), 'b',lambda,
    PM_p2_2(5,:), 'k');
610 set(handle25, 'LineWidth', 1.5);
611 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 3)');
612 ylabel('Pressao ');
613 xlabel('Angulo de Declive ');
614 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
    theta = theta_m_a_x = 34.0716');
615 grid on;
616
617 figure (26)
618 handle26=plot(lambda,PM_p2_3(1,:), 'm',lambda,PM_p2_3(2,:), 'g',
    lambda,PM_p2_3(3,:), 'r',lambda,PM_p2_3(4,:), 'b',lambda,
    PM_p2_3(5,:), 'k');
619 set(handle26, 'LineWidth', 1.5);
620 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 4)');
621 ylabel('Pressao ');
622 xlabel('Angulo de Declive ');
623 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
    theta = theta_m_a_x = 38.7737');
624 grid on;
625
626 figure (27)
627 handle27=plot(lambda,PM_T2_1(1,:), 'm',lambda,PM_T2_1(2,:), 'g',
    lambda,PM_T2_1(3,:), 'r',lambda,PM_T2_1(4,:), 'b',lambda,
```

```

        PM_T2_1(5,:), 'k');
628 set(handle27, 'LineWidth', 1.5);
629 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 2)');
630 ylabel('Temperatura ');
631 xlabel('Angulo de Declive ');
632 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
633 grid on;
634
635 figure(28)
636 handle28=plot(lambda, PM_T2_2(1,:), 'm', lambda, PM_T2_2(2,:), 'g',
        lambda, PM_T2_2(3,:), 'r', lambda, PM_T2_2(4,:), 'b', lambda,
        PM_T2_2(5,:), 'k');
637 set(handle28, 'LineWidth', 1.5);
638 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 3)');
639 ylabel('Temperatura ');
640 xlabel('Angulo de Declive ');
641 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
642 grid on;
643
644 figure(29)
645 handle29=plot(lambda, PM_T2_3(1,:), 'm', lambda, PM_T2_3(2,:), 'g',
        lambda, PM_T2_3(3,:), 'r', lambda, PM_T2_3(4,:), 'b', lambda,
        PM_T2_3(5,:), 'k');
646 set(handle29, 'LineWidth', 1.5);
647 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 4)');
648 ylabel('Temperatura ');
649 xlabel('Angulo de Declive ');
650 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
651 grid on;
652
653 figure(210)
654 handle210=plot(lambda, PM_To2_1(1,:), 'm', lambda, PM_To2_1(2,:), 'g
        ', lambda, PM_To2_1(3,:), 'r', lambda, PM_To2_1(4,:), 'b', lambda,
        PM_To2_1(5,:), 'k');
655 set(handle210, 'LineWidth', 1.5);
656 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1

```

```

        = 2)');
657 ylabel('Temperatura ');
658 xlabel('Angulo de Declive ');
659 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
660 grid on;
661
662 figure(211)
663 handle211=plot(lambda,PM_To2_2(1,:), 'm',lambda,PM_To2_2(2,:), 'g
        ',lambda,PM_To2_2(3,:), 'r',lambda,PM_To2_2(4,:), 'b',lambda,
        PM_To2_2(5,:), 'k');
664 set(handle211, 'LineWidth', 1.5);
665 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
        = 3)');
666 ylabel('Temperatura ');
667 xlabel('Angulo de Declive ');
668 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
669 grid on;
670
671 figure(212)
672 handle212=plot(lambda,PM_To2_3(1,:), 'm',lambda,PM_To2_3(2,:), 'g
        ',lambda,PM_To2_3(3,:), 'r',lambda,PM_To2_3(4,:), 'b',lambda,
        PM_To2_3(5,:), 'k');
673 set(handle212, 'LineWidth', 1.5);
674 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
        = 4)');
675 ylabel('Temperatura ');
676 xlabel('Angulo de Declive ');
677 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
678 grid on;
679
680 figure(213)
681 handle213=plot(lambda,PM_rho2_1(1,:), 'm',lambda,PM_rho2_1(2,:),
        'g',lambda,PM_rho2_1(3,:), 'r',lambda,PM_rho2_1(4,:), 'b',
        lambda,PM_rho2_1(5,:), 'k');
682 set(handle213, 'LineWidth', 1.5);
683 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 2)');

```

```

684 ylabel('Densidade ');
685 xlabel('Angulo de Declive ');
686 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
687 grid on;
688
689 figure(214)
690 handle214=plot(lambda,PM_rho2_2(1,:), 'm',lambda,PM_rho2_2(2,:),
        'g',lambda,PM_rho2_2(3,:), 'r',lambda,PM_rho2_2(4,:), 'b',
        lambda,PM_rho2_2(5,:), 'k');
691 set(handle214, 'LineWidth',1.5);
692 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 3)');
693 ylabel('Densidade ');
694 xlabel('Angulo de Declive ');
695 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
696 grid on;
697
698 figure(215)
699 handle215=plot(lambda,PM_rho2_3(1,:), 'm',lambda,PM_rho2_3(2,:),
        'g',lambda,PM_rho2_3(3,:), 'r',lambda,PM_rho2_3(4,:), 'b',
        lambda,PM_rho2_3(5,:), 'k');
700 set(handle215, 'LineWidth',1.5);
701 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 4)');
702 ylabel('Densidade ');
703 xlabel('Angulo de Declive ');
704 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
705 grid on;
706
707 %%% 3.4 – Caso Particular
708 EX3_M1 = EX1_M2;
709 EX3_T1 = EX1_T2;
710 EX3_p1 = EX1_p2;
711 EX3_rho1 = EX1_rho2;
712 EX3_difnu = 20;
713
714 cont = 1;
715 while EX3_M1 > C(1,cont)

```

```

716     cont = cont + 1;
717 end
718 parte21 = (EX3_M1-C(1,cont-1))*(C(2,cont)-C(2,cont-1));
719 parte22 = C(1,cont)-C(1,cont-1);
720 EX3_nu1 = C(2,cont-1) + parte21/parte22;
721 EX3_nu2 = EX3_nu1 + EX3_difnu;
722
723 cont = 1;
724 while EX3_nu2 > C(2,cont)
725     cont = cont + 1;
726 end
727 parte23 = (EX3_nu2-C(2,cont-1))*(C(1,cont)-C(1,cont-1));
728 parte24 = C(2,cont)-C(2,cont-1);
729 EX3_M2 = C(1,cont-1) + parte23/parte24;
730 EX3_T2 = EX3_T1*((2+(k-1)*EX3_M1*EX3_M1)/(2+(k-1)*EX3_M2*EX3_M2
    ));
731 EX3_To2 = EX3_T2*(1+((k-1)/2)*EX3_M1*EX3_M1);
732 EX3_p2 = EX3_p1/(((2+(k-1)*EX3_M2*EX3_M2)/(2+(k-1)*EX3_M1*
    EX3_M1))^(k/(k-1)));
733 EX3_rho2 = EX3_rho1*((2+(k-1)*EX3_M1*EX3_M1)/(2+(k-1)*EX3_M2*
    EX3_M2))^(1/(k-1));
734
735 %%% 4 – Rayleigh
736 %%% 4.1 – Tabela de Rayleigh
737 Mmin = 1.02;
738 Mmax = 10;
739 inc2 = 0.02;
740 Maux = Mmin:inc2:Mmax;
741
742 for i = 1:450
743     psi = 1 + ((k-1)/2)*Maux(i)*Maux(i);
744     %To/To*
745     aux26 = 2*(k+1)*Maux(i)*Maux(i)*psi;
746     aux27 = (1+k*Maux(i)*Maux(i))^2;
747     RF(1,i) = aux26/aux27;
748     %rho/rho*
749     aux28 = 1+k*Maux(i)*Maux(i);
750     aux29 = (k+1)*Maux(i)*Maux(i);
751     RF(2,i) = aux28/aux29;

```



```

752     %T/T*
753     aux30 = (k+1)*(k+1)*Maux(i)*Maux(i);
754     RF(3,i) = aux30/aux27;
755     %Po/Po*
756     aux31 = (2/(k+1))*psi;
757     aux32 = aux31^(k/(k-1));
758     aux33 = (k+1)*aux32;
759     RF(4,i) = aux33/aux28;
760     %P/P*
761     RF(5,i) = (k+1)/aux28;
762     %delta s/Cp*
763     aux34 = RF(5,i)^((k+1)/k);
764     aux35 = Maux(i)*Maux(i)*aux34;
765     RF(6,i) = log(aux35);
766 end
767
768 %%% 4.2 – Simulador
769 for l=1:20
770     for i=1:5
771         cont = 1;
772         while PM_M2_1(i,l) > Maux(cont)
773             cont = cont + 1;
774         end
775         aux36 = (PM_M2_1(i,l)-Maux(cont-1))*(RF(1,cont)-RF(1,cont-1));
776         aux37 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
777         RF_rTo1_1(i,l) = RF(1,cont-1)+(aux36/aux37);
778         aux38 = (PM_M2_1(i,l)-Maux(cont-1))*(RF(2,cont)-RF(2,cont-1));
779         aux39 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
780         RF_rrho1_1(i,l) = RF(2,cont-1)+(aux38/aux39);
781         aux40 = (PM_M2_1(i,l)-Maux(cont-1))*(RF(3,cont)-RF(3,cont-1));
782         aux41 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
783         RF_rT1_1(i,l) = RF(3,cont-1)+(aux40/aux41);
784         aux42 = (PM_M2_1(i,l)-Maux(cont-1))*(RF(4,cont)-RF(4,cont-1));
785         aux43 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
786         RF_rPo1_1(i,l) = RF(4,cont-1)+(aux42/aux43);

```

```

787     aux44 = (PM_M2_1(i, l) - Maux(cont - 1)) * (RF(5, cont) - RF(5, cont
       - 1));
788     aux45 = Maux(cont) - Maux(cont - 1);
789     RF_rP1_1(i, l) = RF(5, cont - 1) + (aux44 / aux45);
790     end
791 end
792
793 for i = 1:5
794     for l = 1:20
795         cont = 1;
796         while PM_M2_1(i, l) > Maux(cont)
797             cont = cont + 1;
798         end
799         aux46 = (PM_M2_2(i, l) - Maux(cont - 1)) * (RF(1, cont) - RF(1, cont
       - 1));
800         aux47 = Maux(cont) - Maux(cont - 1);
801         RF_rTol_2(i, l) = RF(1, cont - 1) + (aux46 / aux47);
802         aux48 = (PM_M2_2(i, l) - Maux(cont - 1)) * (RF(2, cont) - RF(2, cont
       - 1));
803         aux49 = Maux(cont) - Maux(cont - 1);
804         RF_rrho1_2(i, l) = RF(2, cont - 1) + (aux48 / aux49);
805         aux50 = (PM_M2_2(i, l) - Maux(cont - 1)) * (RF(3, cont) - RF(3, cont
       - 1));
806         aux51 = Maux(cont) - Maux(cont - 1);
807         RF_rT1_2(i, l) = RF(3, cont - 1) + (aux50 / aux51);
808         aux52 = (PM_M2_2(i, l) - Maux(cont - 1)) * (RF(4, cont) - RF(4, cont
       - 1));
809         aux53 = Maux(cont) - Maux(cont - 1);
810         RF_rPol_2(i, l) = RF(4, cont - 1) + (aux52 / aux53);
811         aux54 = (PM_M2_2(i, l) - Maux(cont - 1)) * (RF(5, cont) - RF(5, cont
       - 1));
812         aux55 = Maux(cont) - Maux(cont - 1);
813         RF_rP1_2(i, l) = RF(5, cont - 1) + (aux54 / aux55);
814     end
815 end
816
817 for i = 1:5
818     for l = 1:20
819         cont = 1;

```

```

820     while PM_M2_1(i,1) > Maux(cont)
821         cont = cont + 1;
822     end
823     aux56 = (PM_M2_3(i,1)-Maux(cont-1))*(RF(1,cont)-RF(1,cont
        -1));
824     aux57 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
825     RF_rTo1_3(i,1) = RF(1,cont-1)+(aux56/aux57);
826     aux58 = (PM_M2_3(i,1)-Maux(cont-1))*(RF(2,cont)-RF(2,cont
        -1));
827     aux59 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
828     RF_rrho1_3(i,1) = RF(2,cont-1)+(aux58/aux59);
829     aux60 = (PM_M2_3(i,1)-Maux(cont-1))*(RF(3,cont)-RF(3,cont
        -1));
830     aux61 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
831     RF_rT1_3(i,1) = RF(3,cont-1)+(aux40/aux41);
832     aux62 = (PM_M2_3(i,1)-Maux(cont-1))*(RF(4,cont)-RF(4,cont
        -1));
833     aux63 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
834     RF_rPo1_3(i,1) = RF(4,cont-1)+(aux62/aux63);
835     aux64 = (PM_M2_3(i,1)-Maux(cont-1))*(RF(5,cont)-RF(5,cont
        -1));
836     aux65 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
837     RF_rP1_3(i,1) = RF(5,cont-1)+(aux64/aux65);
838     end
839 end
840
841 %%% 4.3 – Calculo do Cp
842 for i = 1:5
843     for l = 1:20
844         TH_T2_1(i,1) = PM_T2_1(i,1)/1000;
845         TH_T2_2(i,1) = PM_T2_1(i,1)/1000;
846         TH_T2_3(i,1) = PM_T2_1(i,1)/1000;
847         Cp_1(i,1) = C_p0+C_p1*TH_T2_1(i,1)+C_p2*TH_T2_1(i,1)^2+
            C_p3*TH_T2_1(i,1)^3;
848         Cp_2(i,1) = C_p0+C_p1*TH_T2_2(i,1)+C_p2*TH_T2_2(i,1)^2+
            C_p3*TH_T2_2(i,1)^3;
849         Cp_3(i,1) = C_p0+C_p1*TH_T2_3(i,1)+C_p2*TH_T2_3(i,1)^2+
            C_p3*TH_T2_3(i,1)^3;
850     end

```

```

851 end
852
853 %%% 4.4 – Calculo da Combustao
854 for i = 1:5
855     for l = 1:20
856         RF_To2_1(i,l) = ((r_fuel_air*H_v)/Cp_1(i,l)) + PM_To2_1(i,l)
            );
857         RF_To2_2(i,l) = ((r_fuel_air*H_v)/Cp_2(i,l)) + PM_To2_2(i,l)
            );
858         RF_To2_3(i,l) = ((r_fuel_air*H_v)/Cp_3(i,l)) + PM_To2_3(i,l)
            );
859     end
860 end
861
862 %%% 4.5 – Calculo do To2/To*
863 for i = 1:5
864     for l = 1:20
865         RF_rTo2_1(i,l) = (RF_To2_1(i,l)/PM_To2_1(i,l))*RF_rTo1_1(i,
            l);
866         RF_rTo2_2(i,l) = (RF_To2_2(i,l)/PM_To2_2(i,l))*RF_rTo1_2(i,
            l);
867         RF_rTo2_3(i,l) = (RF_To2_3(i,l)/PM_To2_3(i,l))*RF_rTo1_3(i,
            l);
868     end
869 end
870
871 %%% 4.6 – Calculo das outras propriedades
872 for i = 1:5
873     for l = 1:20
874         cont = 1;
875         while RF_rTo2_1(i,l) < RF(1,cont)
876             cont = cont + 1;
877         end
878         aux66 = (RF_rTo2_1(i,l)-RF(1,cont-1))*(Maux(cont)-Maux(cont-1));
879         aux67 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
880         RF_M2_1(i,l) = Maux(cont-1)+(aux66/aux67);
881         aux68 = (RF_rTo2_1(i,l)-RF(1,cont-1))*(RF(2,cont)-RF(2,cont-1));

```

```

882     aux69 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
883     RF_rrho2_1(i,1) = RF(2,cont-1)+(aux68/aux69);
884     aux70 = (RF_rTo2_1(i,1)-RF(1,cont-1))*(RF(3,cont)-RF(3,cont
      -1));
885     aux71 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
886     RF_rT2_1(i,1) = RF(3,cont-1)+(aux70/aux71);
887     aux72 = (RF_rTo2_1(i,1)-RF(1,cont-1))*(RF(4,cont)-RF(4,cont
      -1));
888     aux73 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
889     RF_rPo2_1(i,1) = RF(4,cont-1)+(aux72/aux73);
890     aux74 = (RF_rTo2_1(i,1)-RF(1,cont-1))*(RF(5,cont)-RF(5,cont
      -1));
891     aux75 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
892     RF_rP2_1(i,1) = RF(5,cont-1)+(aux74/aux75);
893     end
894 end
895
896 for i = 1:5
897     for l = 1:20
898         cont = 1;
899         while RF_rTo2_2(i,l) < RF(1,cont)
900             cont = cont + 1;
901         end
902         aux66 = (RF_rTo2_2(i,l)-RF(1,cont-1))*(Maux(cont)-Maux(cont
      -1));
903         aux67 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
904         RF_M2_2(i,l) = Maux(cont-1)+(aux66/aux67);
905         aux68 = (RF_rTo2_2(i,l)-RF(1,cont-1))*(RF(2,cont)-RF(2,cont
      -1));
906         aux69 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
907         RF_rrho2_2(i,l) = RF(2,cont-1)+(aux68/aux69);
908         aux70 = (RF_rTo2_2(i,l)-RF(1,cont-1))*(RF(3,cont)-RF(3,cont
      -1));
909         aux71 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
910         RF_rT2_2(i,l) = RF(3,cont-1)+(aux70/aux71);
911         aux72 = (RF_rTo2_2(i,l)-RF(1,cont-1))*(RF(4,cont)-RF(4,cont
      -1));
912         aux73 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
913         RF_rPo2_2(i,l) = RF(4,cont-1)+(aux72/aux73);

```

```

914     aux74 = (RF_rTo2_2(i, l) - RF(1, cont - 1)) * (RF(5, cont) - RF(5, cont
        - 1));
915     aux75 = RF(1, cont) - RF(1, cont - 1);
916     RF_rP2_2(i, l) = RF(5, cont - 1) + (aux74 / aux75);
917     end
918 end
919
920 for i = 1:5
921     for l = 1:20
922         cont = 1;
923         while RF_rTo2_3(i, l) < RF(1, cont)
924             cont = cont + 1;
925         end
926         aux66 = (RF_rTo2_3(i, l) - RF(1, cont - 1)) * (Maux(cont) - Maux(cont
            - 1));
927         aux67 = RF(1, cont) - RF(1, cont - 1);
928         RF_M2_3(i, l) = Maux(cont - 1) + (aux66 / aux67);
929         aux68 = (RF_rTo2_3(i, l) - RF(1, cont - 1)) * (RF(2, cont) - RF(2, cont
            - 1));
930         aux69 = RF(1, cont) - RF(1, cont - 1);
931         RF_rrho2_3(i, l) = RF(2, cont - 1) + (aux68 / aux69);
932         aux70 = (RF_rTo2_3(i, l) - RF(1, cont - 1)) * (RF(3, cont) - RF(3, cont
            - 1));
933         aux71 = RF(1, cont) - RF(1, cont - 1);
934         RF_rT2_3(i, l) = RF(3, cont - 1) + (aux70 / aux71);
935         aux72 = (RF_rTo2_3(i, l) - RF(1, cont - 1)) * (RF(4, cont) - RF(4, cont
            - 1));
936         aux73 = RF(1, cont) - RF(1, cont - 1);
937         RF_rPo2_3(i, l) = RF(4, cont - 1) + (aux72 / aux73);
938         aux74 = (RF_rTo2_3(i, l) - RF(1, cont - 1)) * (RF(5, cont) - RF(5, cont
            - 1));
939         aux75 = RF(1, cont) - RF(1, cont - 1);
940         RF_rP2_3(i, l) = RF(5, cont - 1) + (aux74 / aux75);
941     end
942 end
943
944 for i = 1:5
945     for l = 1:20
946         RF_rho2_1(i, l) = (RF_rrho2_1(i, l) * PM_rho2_1(i, l)) / RF_rrho1_1

```

```

        (i,1);
947     RF_P2_1(i,1) = (RF_rP2_1(i,1)*PM_p2_1(i,1))/RF_rP1_1(i,1);
948     RF_T2_1(i,1) = (RF_rT2_1(i,1)*PM_T2_1(i,1))/RF_rT1_1(i,1);
949     RF_rho2_2(i,1) = (RF_rrho2_2(i,1)*PM_rho2_2(i,1))/RF_rrho1_2
        (i,1);
950     RF_P2_2(i,1) = (RF_rP2_2(i,1)*PM_p2_2(i,1))/RF_rP1_2(i,1);
951     RF_T2_2(i,1) = (RF_rT2_2(i,1)*PM_T2_2(i,1))/RF_rT1_2(i,1);
952     RF_rho2_3(i,1) = (RF_rrho2_3(i,1)*PM_rho2_3(i,1))/RF_rrho1_3
        (i,1);
953     RF_P2_3(i,1) = (RF_rP2_3(i,1)*PM_p2_3(i,1))/RF_rP1_3(i,1);
954     RF_T2_3(i,1) = (RF_rT2_3(i,1)*PM_T2_3(i,1))/RF_rT1_3(i,1);
955     end
956 end
957
958 %%% 4.7 – Graficos
959 figure(31)
960 handle31=plot(lamb1,RF_M2_1(1,:), 'm', lamb1,RF_M2_1(2,:), 'g',
        lamb1,RF_M2_1(3,:), 'r', lamb1,RF_M2_1(4,:), 'b', lamb1,RF_M2_1
        (5,:), 'k');
961 set(handle31, 'LineWidth', 1.5);
962 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M.2 (Entrada M.1 = 2)
        ');
963 ylabel('Numero de Mach');
964 xlabel('Angulo de Declive ');
965 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
966 grid on;
967
968 figure(32)
969 handle32=plot(lamb2,RF_M2_2(1,:), 'm', lamb2,RF_M2_2(2,:), 'g',
        lamb2,RF_M2_2(3,:), 'r', lamb2,RF_M2_2(4,:), 'b', lamb2,RF_M2_2
        (5,:), 'k');
970 set(handle32, 'LineWidth', 1.5);
971 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M.2 (Entrada M.1 = 3)
        ');
972 ylabel('Numero de Mach');
973 xlabel('Angulo de Declive ');
974 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');

```

```

975 grid on;
976
977 figure(33)
978 handle33=plot(lamb3,RF_M2_3(1,:), 'm',lamb3,RF_M2_3(2,:), 'g',
               lamb3,RF_M2_3(3,:), 'r',lamb3,RF_M2_3(4,:), 'b',lamb3,RF_M2_3
               (5,:), 'k');
979 set(handle33, 'LineWidth', 1.5);
980 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M.2 (Entrada M.1 = 4)
        ');
981 ylabel('Numero de Mach');
982 xlabel('Angulo de Declive ');
983 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
984 grid on;
985
986 figure(34)
987 handle34=plot(lamb1,RF_P2_1(1,:), 'm',lamb1,RF_P2_1(2,:), 'g',
               lamb1,RF_P2_1(3,:), 'r',lamb1,RF_P2_1(4,:), 'b',lamb1,RF_P2_1
               (5,:), 'k');
988 set(handle34, 'LineWidth', 1.5);
989 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M.1 = 2)');
990 ylabel('Pressao ');
991 xlabel('Angulo de Declive ');
992 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
993 grid on;
994
995 figure(35)
996 handle35=plot(lamb2,RF_P2_2(1,:), 'm',lamb2,RF_P2_2(2,:), 'g',
               lamb2,RF_P2_2(3,:), 'r',lamb2,RF_P2_2(4,:), 'b',lamb2,RF_P2_2
               (5,:), 'k');
997 set(handle35, 'LineWidth', 1.5);
998 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M.1 = 3)');
999 ylabel('Pressao ');
1000 xlabel('Angulo de Declive ');
1001 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1002 grid on;
1003

```



```

1004 figure(36)
1005 handle36=plot(lamb3,RF_P2_3(1,:), 'm',lamb3,RF_P2_3(2,:), 'g',
               lamb3,RF_P2_3(3,:), 'r',lamb3,RF_P2_3(4,:), 'b',lamb3,RF_P2_3
               (5,:), 'k');
1006 set(handle36, 'LineWidth',1.5);
1007 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 4)');
1008 ylabel('Pressao');
1009 xlabel('Angulo de Declive ');
1010 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
         theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1011 grid on;
1012
1013 figure(37)
1014 handle37=plot(lamb1,RF_T2_1(1,:), 'm',lamb1,RF_T2_1(2,:), 'g',
               lamb1,RF_T2_1(3,:), 'r',lamb1,RF_T2_1(4,:), 'b',lamb1,RF_T2_1
               (5,:), 'k');
1015 set(handle37, 'LineWidth',1.5);
1016 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 2)');
1017 ylabel('Temperatura ');
1018 xlabel('Angulo de Declive ');
1019 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
         theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1020 grid on;
1021
1022 figure(38)
1023 handle38=plot(lamb2,RF_T2_2(1,:), 'm',lamb2,RF_T2_2(2,:), 'g',
               lamb2,RF_T2_2(3,:), 'r',lamb2,RF_T2_2(4,:), 'b',lamb2,RF_T2_2
               (5,:), 'k');
1024 set(handle38, 'LineWidth',1.5);
1025 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 3)');
1026 ylabel('Temperatura ');
1027 xlabel('Angulo de Declive ');
1028 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
         theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1029 grid on;
1030
1031 figure(39)
1032 handle39=plot(lamb3,RF_T2_3(1,:), 'm',lamb3,RF_T2_3(2,:), 'g',
               lamb3,RF_T2_3(3,:), 'r',lamb3,RF_T2_3(4,:), 'b',lamb3,RF_T2_3

```

```

        (5,:), 'k');
1033 set(handle39, 'LineWidth', 1.5);
1034 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 4)');
1035 ylabel('Temperatura ');
1036 xlabel('Angulo de Declive ');
1037 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1038 grid on;
1039
1040 figure(310)
1041 handle310=plot(lamb1, RF_To2_1(1,:), 'm', lamb1, RF_To2_1(2,:), 'g',
        lamb1, RF_To2_1(3,:), 'r', lamb1, RF_To2_1(4,:), 'b', lamb1,
        RF_To2_1(5,:), 'k');
1042 set(handle310, 'LineWidth', 1.5);
1043 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
        = 2)');
1044 ylabel('Temperatura ');
1045 xlabel('Angulo de Declive ');
1046 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1047 grid on;
1048
1049 figure(311)
1050 handle311=plot(lamb2, RF_To2_2(1,:), 'm', lamb2, RF_To2_2(2,:), 'g',
        lamb2, RF_To2_2(3,:), 'r', lamb2, RF_To2_2(4,:), 'b', lamb2,
        RF_To2_2(5,:), 'k');
1051 set(handle311, 'LineWidth', 1.5);
1052 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
        = 3)');
1053 ylabel('Temperatura ');
1054 xlabel('Angulo de Declive ');
1055 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1056 grid on;
1057
1058 figure(312)
1059 handle312=plot(lamb3, RF_To2_3(1,:), 'm', lamb3, RF_To2_3(2,:), 'g',
        lamb3, RF_To2_3(3,:), 'r', lamb3, RF_To2_3(4,:), 'b', lamb3,
        RF_To2_3(5,:), 'k');

```

```

1060 set(handle312,'LineWidth',1.5);
1061 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
      = 4)');
1062 ylabel('Temperatura ');
1063 xlabel('Angulo de Declive ');
1064 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
      theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1065 grid on;
1066
1067 figure(313)
1068 handle313=plot(lamb1,RF_rho2_1(1,:), 'm',lamb1,RF_rho2_1(2,:), 'g
      ',lamb1,RF_rho2_1(3,:), 'r',lamb1,RF_rho2_1(4,:), 'b',lamb1,
      RF_rho2_1(5,:), 'k');
1069 set(handle313,'LineWidth',1.5);
1070 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 2)');
1071 ylabel('Densidade ');
1072 xlabel('Angulo de Declive ');
1073 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
      theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1074 grid on;
1075
1076 figure(314)
1077 handle314=plot(lamb2,RF_rho2_2(1,:), 'm',lamb2,RF_rho2_2(2,:), 'g
      ',lamb2,RF_rho2_2(3,:), 'r',lamb2,RF_rho2_2(4,:), 'b',lamb2,
      RF_rho2_2(5,:), 'k');
1078 set(handle314,'LineWidth',1.5);
1079 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 3)');
1080 ylabel('Densidade ');
1081 xlabel('Angulo de Declive');
1082 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
      theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1083 grid on;
1084
1085 figure(315)
1086 handle315=plot(lamb3,RF_rho2_3(1,:), 'm',lamb3,RF_rho2_3(2,:), 'g
      ',lamb3,RF_rho2_3(3,:), 'r',lamb3,RF_rho2_3(4,:), 'b',lamb3,
      RF_rho2_3(5,:), 'k');
1087 set(handle315,'LineWidth',1.5);
1088 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 4)');

```

```

1089 ylabel( 'Densidade ' );
1090 xlabel( 'Angulo de Declive ' );
1091 legend( 'theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
        theta = theta_m_a_x = 38.7737' );
1092 grid on;
1093
1094 %%% 4.8 – Caso Particular
1095 EX4_M1 = 1.5;
1096 EX4_p1 = 68;
1097 EX4_T1 = 222;
1098 EX4_q = 11.5;
1099 EX4_To1 = EX4_T1*(1+0.5*(k-1)*EX4_M1*EX4_M1);
1100 EX4_Po1 = EX4_p1*(1+0.5*(k-1)*EX4_M1*EX4_M1)^(k/(k-1));
1101
1102 cont = 1;
1103 while EX4_M1 > Maux(cont)
1104     cont = cont + 1;
1105 end
1106 parte25 = (EX4_M1-Maux(cont-1))*(RF(1,cont)-RF(1,cont-1));
1107 parte26 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
1108 EX4_rTo1 = RF(1,cont-1)+(parte25/parte26);
1109 parte27 = (EX4_M1-Maux(cont-1))*(RF(2,cont)-RF(2,cont-1));
1110 parte28 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
1111 EX4_rrho1 = RF(2,cont-1)+(parte27/parte28);
1112 parte29 = (EX4_M1-Maux(cont-1))*(RF(3,cont)-RF(3,cont-1));
1113 parte30 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
1114 EX4_rT1 = RF(3,cont-1)+(parte29/parte30);
1115 parte31 = (EX4_M1-Maux(cont-1))*(RF(4,cont)-RF(4,cont-1));
1116 parte32 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
1117 EX4_rPo1 = RF(4,cont-1)+(parte31/parte32);
1118 parte33 = (EX4_M1-Maux(cont-1))*(RF(5,cont)-RF(5,cont-1));
1119 parte34 = Maux(cont)-Maux(cont-1);
1120 EX4_rP1 = RF(5,cont-1)+(parte33/parte34);
1121
1122 %%% 4.3 – Calculo do Cp
1123 EX4_TH = EX4_T1/1000;
1124 EX4_Cp = C_p0+C_p1*EX4_TH+C_p2*EX4_TH^2+C_p3*EX4_TH^3;
1125
1126 %%% 4.4 – Calculo da Combustao

```

```

1127 EX4_To2 = (EX4_q/EX4_Cp) + EX4_To1;
1128
1129 %%% 4.5 – Calculo do To2/To*
1130 EX4_rTo2 = (EX4_To2/EX4_To1)*EX4_rTo1;
1131
1132 cont = 1;
1133 while EX4_rTo2 < RF(1,cont)
1134     cont = cont + 1;
1135 end
1136 parte35 = (EX4_rTo2-RF(1,cont-1))*(Maux(cont)-Maux(cont-1));
1137 parte36 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
1138 EX4_M2 = Maux(cont-1)+(parte35 / parte36);
1139 parte37 = (EX4_rTo2-RF(1,cont-1))*(RF(2,cont)-RF(2,cont-1));
1140 parte38 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
1141 EX4_rrho2 = RF(2,cont-1)+(parte37 / parte38);
1142 parte39 = (EX4_rTo2-RF(1,cont-1))*(RF(3,cont)-RF(3,cont-1));
1143 parte40 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
1144 EX4_rT2 = RF(3,cont-1)+(parte39 / parte40);
1145 parte41 = (EX4_rTo2-RF(1,cont-1))*(RF(4,cont)-RF(4,cont-1));
1146 parte42 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
1147 EX4_rPo2 = RF(4,cont-1)+(parte41 / parte42);
1148 parte43 = (EX4_rTo2-RF(1,cont-1))*(RF(5,cont)-RF(5,cont-1));
1149 parte44 = RF(1,cont)-RF(1,cont-1);
1150 EX4_rP2 = RF(5,cont-1)+(parte43 / parte44);
1151 EX4_p2 = (EX4_rP2*EX4_p1)/EX4_rP1;
1152 EX4_T2 = (EX4_rT2*EX4_T1)/EX4_rT1;
1153
1154 %%% 5 – Bocal
1155 %%% 5.1 – Simulador
1156 for i=1:20
1157     for l=1:5
1158         BC_M1_1(l,i) = RF_M2_1(l,i);
1159         BC_M1_2(l,i) = RF_M2_2(l,i);
1160         BC_M1_3(l,i) = RF_M2_3(l,i);
1161     end
1162 end
1163
1164 for i=1:20
1165     for l=1:5

```

```

1166     cont = 100;
1167     while BC_M1_1(1,i) > IFT(1,cont)
1168         cont = cont + 1;
1169     end
1170     aux76 = (BC_M1_1(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,
1171         cont-1));
1172     aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1173     BC_rTo1_1(1,i) = IFT(2,cont-1) + aux76/aux77;
1174     aux76 = (BC_M1_1(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,
1175         cont-1));
1176     aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1177     BC_rPo1_1(1,i) = IFT(3,cont-1) + aux76/aux77;
1178     aux76 = (BC_M1_1(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(4,cont)-IFT(4,
1179         cont-1));
1180     aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1181     BC_rA1_1(1,i) = IFT(5,cont-1) + aux76/aux77;
1182     end
1183 end
1184
1185 for i=1:20
1186     for l=1:5
1187         cont = 100;
1188         while BC_M1_2(1,i) > IFT(1,cont)
1189             cont = cont + 1;
1190         end
1191         aux76 = (BC_M1_2(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,
1192             cont-1));
1193         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1194         BC_rTo1_2(1,i) = IFT(2,cont-1) + aux76/aux77;
1195         aux76 = (BC_M1_2(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,
1196             cont-1));
1197         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1198         BC_rPo1_2(1,i) = IFT(3,cont-1) + aux76/aux77;
1199         aux76 = (BC_M1_2(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(4,cont)-IFT(4,
1200             cont-1));

```

```

1198     aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1199     BC_rrho1_2(1,i) = IFT(4,cont-1) + aux76/aux77;
1200     aux76 = (BC_M1_2(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(5,cont)-IFT(5,
        cont-1));
1201     aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1202     BC_rA1_2(1,i) = IFT(5,cont-1) + aux76/aux77;
1203     end
1204 end
1205
1206 for i=1:20
1207     for l=1:5
1208         cont = 100;
1209         while BC_M1_3(1,i) > IFT(1,cont)
1210             cont = cont + 1;
1211         end
1212         aux76 = (BC_M1_3(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,
            cont-1));
1213         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1214         BC_rTo1_3(1,i) = IFT(2,cont-1) + aux76/aux77;
1215         aux76 = (BC_M1_3(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,
            cont-1));
1216         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1217         BC_rPo1_3(1,i) = IFT(3,cont-1) + aux76/aux77;
1218         aux76 = (BC_M1_3(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(4,cont)-IFT(4,
            cont-1));
1219         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1220         BC_rrho1_3(1,i) = IFT(4,cont-1) + aux76/aux77;
1221         aux76 = (BC_M1_3(1,i)-IFT(1,cont-1))*(IFT(5,cont)-IFT(5,
            cont-1));
1222         aux77 = IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1);
1223         BC_rA1_3(1,i) = IFT(5,cont-1) + aux76/aux77;
1224     end
1225 end
1226
1227 %%% 5.2 – Saida da Variacao de Area
1228 for i=1:20
1229     for l=1:5
1230         BC_rA2_1(1,i) = rB*BC_rA1_1(1,i);
1231         BC_rA2_2(1,i) = rB*BC_rA1_2(1,i);

```

```

1232     BC_rA2_3(1,i) = rB*BC_rA1_3(1,i);
1233     end
1234 end
1235
1236 for i=1:20
1237     for l=1:5
1238         cont = 100;
1239         while BC_rA2_1(1,i) > IFT(5,cont)
1240             cont = cont + 1;
1241         end
1242         aux76 = (BC_rA2_1(5,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,
            cont-1));
1243         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1244         BC_rTo2_1(1,i) = IFT(2,cont-1) + aux76/aux77;
1245         aux76 = (BC_rA2_1(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,
            cont-1));
1246         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1247         BC_rPo2_1(1,i) = IFT(3,cont-1) + aux76/aux77;
1248         aux76 = (BC_rA2_1(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(4,cont)-IFT(4,
            cont-1));
1249         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1250         BC_rrho2_1(1,i) = IFT(4,cont-1) + aux76/aux77;
1251         aux76 = (BC_rA2_1(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
            cont-1));
1252         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1253         BC_M2_1(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
1254     end
1255 end
1256
1257 for i=1:20
1258     for l=1:5
1259         cont = 100;
1260         while BC_rA2_2(1,i) > IFT(5,cont)
1261             cont = cont + 1;
1262         end
1263         aux76 = (BC_rA2_2(5,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,
            cont-1));
1264         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1265         BC_rTo2_2(1,i) = IFT(2,cont-1) + aux76/aux77;

```



```

1266     aux76 = (BC_rA2_2(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,
        cont-1));
1267     aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1268     BC_rPo2_2(1,i) = IFT(3,cont-1) + aux76/aux77;
1269     aux76 = (BC_rA2_2(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(4,cont)-IFT(4,
        cont-1));
1270     aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1271     BC_rrho2_2(1,i) = IFT(4,cont-1) + aux76/aux77;
1272     aux76 = (BC_rA2_2(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
        cont-1));
1273     aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1274     BC_M2_2(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
1275     end
1276 end
1277
1278 for i=1:20
1279     for l=1:5
1280         cont = 100;
1281         while BC_rA2_3(1,i) > IFT(5,cont)
1282             cont = cont + 1;
1283         end
1284         aux76 = (BC_rA2_3(5,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,
            cont-1));
1285         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1286         BC_rTo2_3(1,i) = IFT(2,cont-1) + aux76/aux77;
1287         aux76 = (BC_rA2_3(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,
            cont-1));
1288         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1289         BC_rPo2_3(1,i) = IFT(3,cont-1) + aux76/aux77;
1290         aux76 = (BC_rA2_3(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(4,cont)-IFT(4,
            cont-1));
1291         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1292         BC_rrho2_3(1,i) = IFT(4,cont-1) + aux76/aux77;
1293         aux76 = (BC_rA2_3(1,i)-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,
            cont-1));
1294         aux77 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1295         BC_M2_3(1,i) = IFT(1,cont-1) + aux76/aux77;
1296     end
1297 end

```

```

1298
1299 for i=1:20
1300     for l=1:5
1301         BC_p2_1(1,i) = RF_P2_1(1,i)*(BC_rPo2_1(1,i)/BC_rPo1_1(1,
            i));
1302         BC_To2_1(1,i) = RF_To2_1(1,i)*(BC_rTo2_1(1,i)/BC_rTo1_1(
            1,i));
1303         BC_rho2_1(1,i) = RF_rho2_1(1,i)*(BC_rrho2_1(1,i)/
            BC_rrho1_1(1,i));
1304         BC_T2_1(1,i) = BC_To2_1(1,i)/(1+0.5*(k-1)*BC_M2_1(1,i)*
            BC_M2_1(1,i));
1305
1306         BC_p2_2(1,i) = RF_P2_2(1,i)*(BC_rPo2_2(1,i)/BC_rPo1_2(1,
            i));
1307         BC_To2_2(1,i) = RF_To2_2(1,i)*(BC_rTo2_2(1,i)/BC_rTo1_2(
            1,i));
1308         BC_rho2_2(1,i) = RF_rho2_2(1,i)*(BC_rrho2_2(1,i)/
            BC_rrho1_2(1,i));
1309         BC_T2_2(1,i) = BC_To2_2(1,i)/(1+0.5*(k-1)*BC_M2_2(1,i)*
            BC_M2_2(1,i));
1310
1311         BC_p2_3(1,i) = RF_P2_3(1,i)*(BC_rPo2_3(1,i)/BC_rPo1_3(1,
            i));
1312         BC_To2_3(1,i) = RF_To2_3(1,i)*(BC_rTo2_3(1,i)/BC_rTo1_3(
            1,i));
1313         BC_rho2_3(1,i) = RF_rho2_3(1,i)*(BC_rrho2_3(1,i)/
            BC_rrho1_3(1,i));
1314         BC_T2_3(1,i) = BC_To2_3(1,i)/(1+0.5*(k-1)*BC_M2_3(1,i)*
            BC_M2_3(1,i));
1315     end
1316 end
1317
1318 %%% 5.3 – Graficos
1319 figure(41)
1320 handle41=plot(lamb1,BC_M2_1(1,:), 'm', lamb1,BC_M2_1(2,:), 'g',
            lamb1,BC_M2_1(3,:), 'r', lamb1,BC_M2_1(4,:), 'b', lamb1,BC_M2_1
            (5,:), 'k');
1321 set(handle41, 'LineWidth', 1.5);
1322 title( 'Angulo de Declive x Numero de Mach M_2 (Entrada M_1 = 2)

```

```

        ');
1323 ylabel('Numero de Mach');
1324 xlabel('Angulo de Declive ');
1325 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1326 grid on;
1327
1328 figure(42)
1329 handle42=plot(lamb2,BC_M2_2(1,:), 'm',lamb2,BC_M2_2(2,:), 'g',
        lamb2,BC_M2_2(3,:), 'r',lamb2,BC_M2_2(4,:), 'b',lamb2,BC_M2_2
        (5,:), 'k');
1330 set(handle42, 'LineWidth', 1.5);
1331 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M_2 (Entrada M_1 = 3)
        ');
1332 ylabel('Numero de Mach');
1333 xlabel('Angulo de Declive ');
1334 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1335 grid on;
1336
1337 figure(43)
1338 handle43=plot(lamb3,BC_M2_3(1,:), 'm',lamb3,BC_M2_3(2,:), 'g',
        lamb3,BC_M2_3(3,:), 'r',lamb3,BC_M2_3(4,:), 'b',lamb3,BC_M2_3
        (5,:), 'k');
1339 set(handle43, 'LineWidth', 1.5);
1340 title('Angulo de Declive x Numero de Mach M_2 (Entrada M_1 = 4)
        ');
1341 ylabel('Numero de Mach');
1342 xlabel('Angulo de Declive ');
1343 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1344 grid on;
1345
1346 figure(44)
1347 handle44=plot(lamb1,BC_p2_1(1,:), 'm',lamb1,BC_p2_1(2,:), 'g',
        lamb1,BC_p2_1(3,:), 'r',lamb1,BC_p2_1(4,:), 'b',lamb1,BC_p2_1
        (5,:), 'k');
1348 set(handle44, 'LineWidth', 1.5);
1349 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 2)');

```

```

1350 ylabel('Pressao');
1351 xlabel('Angulo de Declive');
1352 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1353 grid on;
1354
1355 figure(45)
1356 handle45=plot(lamb2,BC_p2_2(1,:), 'm',lamb2,BC_p2_2(2,:), 'g',
        lamb2,BC_p2_2(3,:), 'r',lamb2,BC_p2_2(4,:), 'b',lamb2,BC_p2_2
        (5,:), 'k');
1357 set(handle45, 'LineWidth', 1.5);
1358 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 3)');
1359 ylabel('Pressao');
1360 xlabel('Angulo de Declive');
1361 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1362 grid on;
1363
1364 figure(46)
1365 handle46=plot(lamb3,BC_p2_3(1,:), 'm',lamb3,BC_p2_3(2,:), 'g',
        lamb3,BC_p2_3(3,:), 'r',lamb3,BC_p2_3(4,:), 'b',lamb3,BC_p2_3
        (5,:), 'k');
1366 set(handle46, 'LineWidth', 1.5);
1367 title('Angulo de Declive x Pressao (Entrada M_1 = 4)');
1368 ylabel('Pressao');
1369 xlabel('Angulo de Declive');
1370 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1371 grid on;
1372
1373 figure(47)
1374 handle47=plot(lamb1,BC_T2_1(1,:), 'm',lamb1,BC_T2_1(2,:), 'g',
        lamb1,BC_T2_1(3,:), 'r',lamb1,BC_T2_1(4,:), 'b',lamb1,BC_T2_1
        (5,:), 'k');
1375 set(handle47, 'LineWidth', 1.5);
1376 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 2)');
1377 ylabel('Temperatura');
1378 xlabel('Angulo de Declive');
1379 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','

```

```

        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1380 grid on;
1381
1382 figure(48)
1383 handle48=plot(lamb2,BC_T2_2(1,:), 'm', lamb2, BC_T2_2(2,:), 'g',
               lamb2, BC_T2_2(3,:), 'r', lamb2, BC_T2_2(4,:), 'b', lamb2, BC_T2_2
               (5,:), 'k');
1384 set(handle48, 'LineWidth', 1.5);
1385 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 3)');
1386 ylabel('Temperatura ');
1387 xlabel('Angulo de Declive ');
1388 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1389 grid on;
1390
1391 figure(49)
1392 handle49=plot(lamb3, BC_T2_3(1,:), 'm', lamb3, BC_T2_3(2,:), 'g',
               lamb3, BC_T2_3(3,:), 'r', lamb3, BC_T2_3(4,:), 'b', lamb3, BC_T2_3
               (5,:), 'k');
1393 set(handle49, 'LineWidth', 1.5);
1394 title('Angulo de Declive x Temperatura (Entrada M_1 = 4)');
1395 ylabel('Temperatura ');
1396 xlabel('Angulo de Declive ');
1397 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1398 grid on;
1399
1400 figure(410)
1401 handle410=plot(lamb1, BC_To2_1(1,:), 'm', lamb1, BC_To2_1(2,:), 'g',
               lamb1, BC_To2_1(3,:), 'r', lamb1, BC_To2_1(4,:), 'b', lamb1,
               BC_To2_1(5,:), 'k');
1402 set(handle410, 'LineWidth', 1.5);
1403 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
        = 2)');
1404 ylabel('Temperatura ');
1405 xlabel('Angulo de Declive ');
1406 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1407 grid on;

```

```

1408
1409 figure(411)
1410 handle411=plot(lamb2,BC_To2_2(1,:), 'm',lamb2,BC_To2_2(2,:), 'g',
    lamb2,BC_To2_2(3,:), 'r',lamb2,BC_To2_2(4,:), 'b',lamb2,
    BC_To2_2(5,:), 'k');
1411 set(handle411, 'LineWidth',1.5);
1412 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
    = 3)');
1413 ylabel('Temperatura ');
1414 xlabel('Angulo de Declive ');
1415 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
    theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1416 grid on;
1417
1418 figure(412)
1419 handle412=plot(lamb3,BC_To2_3(1,:), 'm',lamb3,BC_To2_3(2,:), 'g',
    lamb3,BC_To2_3(3,:), 'r',lamb3,BC_To2_3(4,:), 'b',lamb3,
    BC_To2_3(5,:), 'k');
1420 set(handle412, 'LineWidth',1.5);
1421 title('Angulo de Declive x Temperatura Estagnacao (Entrada M_1
    = 4)');
1422 ylabel('Temperatura ');
1423 xlabel('Angulo de Declive ');
1424 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
    theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1425 grid on;
1426
1427 figure(413)
1428 handle413=plot(lamb1,BC_rho2_1(1,:), 'm',lamb1,BC_rho2_1(2,:), 'g
    ',lamb1,BC_rho2_1(3,:), 'r',lamb1,BC_rho2_1(4,:), 'b',lamb1,
    BC_rho2_1(5,:), 'k');
1429 set(handle413, 'LineWidth',1.5);
1430 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 2)');
1431 ylabel('Densidade ');
1432 xlabel('Angulo de Declive ');
1433 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
    theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1434 grid on;
1435

```

```

1436 figure(414)
1437 handle414=plot(lamb2,BC_rho2_2(1,:), 'm',lamb2,BC_rho2_2(2,:), 'g'
    ',lamb2,BC_rho2_2(3,:), 'r',lamb2,BC_rho2_2(4,:), 'b',lamb2,
    BC_rho2_2(5,:), 'k');
1438 set(handle414, 'LineWidth',1.5);
1439 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 3)');
1440 ylabel('Densidade ');
1441 xlabel('Angulo de Declive ');
1442 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
    theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1443 grid on;
1444
1445 figure(415)
1446 handle415=plot(lamb3,BC_rho2_3(1,:), 'm',lamb3,BC_rho2_3(2,:), 'g'
    ',lamb3,BC_rho2_3(3,:), 'r',lamb3,BC_rho2_3(4,:), 'b',lamb3,
    BC_rho2_3(5,:), 'k');
1447 set(handle415, 'LineWidth',1.5);
1448 title('Angulo de Declive x Densidade (Entrada M_1 = 4)');
1449 ylabel('Densidade ');
1450 xlabel('Angulo de Declive ');
1451 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
    theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1452 grid on;
1453
1454 %%% 5.4 – Caso Particular
1455 EX5_A1 = EX2_A2;
1456 EX5_A2 = 1.2;
1457 EX5_A21 = EX5_A2/EX5_A1;
1458 EX5_p1 = EX2_p2;
1459 EX5_T1 = EX2_T2;
1460 EX5_M1 = EX2_M2;
1461 EX5_To1 = EX2_To2;
1462 EX5_Po1 = EX2_Po2;
1463 EX5_rTo1 = EX2_rTo2;
1464 EX5_rPo1 = EX2_rPo2;
1465 EX5_rA1 = EX2_rA2;
1466 EX5_rA2 = EX5_A21*EX5_rA1;
1467
1468 cont = 100;

```

```

1469 while EX5_rA2 > IFT(5,cont)
1470     cont = cont + 1;
1471 end
1472 parte45 = (EX5_rA2-IFT(5,cont-1))*(IFT(2,cont)-IFT(2,cont-1));
1473 parte46 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1474 EX5_rTo2 = IFT(2,cont-1) + parte45/parte46;
1475 parte47 = (EX5_rA2-IFT(5,cont-1))*(IFT(3,cont)-IFT(3,cont-1));
1476 parte48 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1477 EX5_rPo2 = IFT(3,cont-1) + parte47/parte48;
1478 parte49 = (EX5_rA2-IFT(5,cont-1))*(IFT(1,cont)-IFT(1,cont-1));
1479 parte50 = IFT(5,cont)-IFT(5,cont-1);
1480 EX5_M2 = IFT(1,cont-1) + parte49/parte50;
1481 EX5_p2 = (EX5_p1*EX5_rPo2)/EX5_rPo1;
1482 EX5_T2 = (EX5_T1*EX5_rTo2)/EX5_rTo1;
1483 EX5_To2 = EX5_T2*(1+0.5*(k-1)*EX5_M2*EX5_M2);
1484 EX5_Po2 = EX5_p2*(1+0.5*(k-1)*EX5_M2*EX5_M2)^(k/(k-1));
1485
1486 %%% 6 – Dinamica do Ramjet
1487 %%% 6.1 – Impulso por kg
1488 Vin_1 = Min_1*sqrt(k*R*T1);
1489 Vin_2 = Min_2*sqrt(k*R*T1);
1490 Vin_3 = Min_3*sqrt(k*R*T1);
1491
1492 for l=1:5
1493     for i=1:20
1494         Vf_1(l,i) = BC_M2_1(l,i)*sqrt(k*R*BC_T2_1(l,i));
1495         Vf_2(l,i) = BC_M2_2(l,i)*sqrt(k*R*BC_T2_2(l,i));
1496         Vf_3(l,i) = BC_M2_3(l,i)*sqrt(k*R*BC_T2_3(l,i));
1497         Imp_1(l,i) = (1+r_fuel_air)*Vf_1(l,i) - Vin_1 + ((
            BC_p2_1(l,i)-p1)/(rho1*Vin_1))*1000;
1498         Imp_2(l,i) = (1+r_fuel_air)*Vf_2(l,i) - Vin_2 + ((
            BC_p2_2(l,i)-p1)/(rho1*Vin_2))*1000;
1499         Imp_3(l,i) = (1+r_fuel_air)*Vf_3(l,i) - Vin_3 + ((
            BC_p2_3(l,i)-p1)/(rho1*Vin_3))*1000;
1500     end
1501 end
1502
1503 %%% 6.2 – Rendimento Termodinamico
1504 for l=1:5

```



```

1505     for i=1:20
1506         rend_1 (1,i) = 100*(1 - (PM_T2_1(1,i+4)/RF_T2_1(1,i)));
1507         rend_2 (1,i) = 100*(1 - (PM_T2_2(1,i+15)/RF_T2_2(1,i)));
1508         ;
1509         rend_3 (1,i) = 100*(1 - (PM_T2_3(1,i+20)/RF_T2_3(1,i)));
1510         ;
1511     end
1512 end
1513 %%% 6.3 – Rendimento Real
1514 for l=1:5
1515     for i=1:20
1516         rendr_1 (1,i) = 100*(Imp_1(l,i)*Vin_1/(H_v/r_fuel_air/
1517             corr));
1518         rendr_2 (1,i) = 100*(Imp_2(l,i)*Vin_2/(H_v/r_fuel_air/
1519             corr));
1520         rendr_3 (1,i) = 100*(Imp_3(l,i)*Vin_3/(H_v/r_fuel_air/
1521             corr));
1522     end
1523 end
1524 %%% 6.4 – Graficos
1525 figure (61)
1526 handle61=plot(lamb1, Imp_1(1,:), 'm', lamb1, Imp_1(2,:), 'g', lamb1,
1527     Imp_1(3,:), 'r', lamb1, Imp_1(4,:), 'b', lamb1, Imp_1(5,:), 'k');
1528 set(handle61, 'LineWidth', 1.5);
1529 title('Angulo de Declive x Empuxo (Entrada M_1 = 2)');
1530 ylabel('Impulso ');
1531 xlabel('Angulo de Declive ');
1532 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
1533     theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1534 grid on;
1535 figure (62)
1536 handle62=plot(lamb2, Imp_2(1,:), 'm', lamb2, Imp_2(2,:), 'g', lamb2,
1537     Imp_2(3,:), 'r', lamb2, Imp_2(4,:), 'b', lamb2, Imp_2(5,:), 'k');
1538 set(handle62, 'LineWidth', 1.5);
1539 title('Angulo de Declive x Empuxo (Entrada M_1 = 3)');
1540 ylabel('Impulso ');

```

```

1536 xlabel('Angulo de Declive ');
1537 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1538 grid on;
1539
1540 figure(63)
1541 handle63=plot(lamb3,Imp_3(1,:), 'm',lamb3,Imp_3(2,:), 'g',lamb3,
        Imp_3(3,:), 'r',lamb3,Imp_3(4,:), 'b',lamb3,Imp_3(5,:), 'k');
1542 set(handle63, 'LineWidth', 1.5);
1543 title('Angulo de Declive x Empuxo (Entrada M_1 = 4)');
1544 ylabel('Impulso ');
1545 xlabel('Angulo de Declive ');
1546 legend('theta = 27','theta = 30','theta = 33','theta = 36','
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1547 grid on;
1548
1549 figure(64)
1550 handle64=plot(lamb1,rend_1(1,:), 'm',lamb1,rend_1(2,:), 'g',lamb1
        ,rend_1(3,:), 'r',lamb1,rend_1(4,:), 'b',lamb1,rend_1(5,:), 'k'
        );
1551 set(handle64, 'LineWidth', 1.5);
1552 title('Angulo de Declive x Rendimento (Entrada M_1 = 2)');
1553 ylabel('Rendimento ');
1554 xlabel('Angulo de Declive ');
1555 legend('theta = 14','theta = 16','theta = 18','theta = 20','
        theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1556 grid on;
1557
1558 figure(65)
1559 handle65=plot(lamb2,rend_2(1,:), 'm',lamb2,rend_2(2,:), 'g',lamb2
        ,rend_2(3,:), 'r',lamb2,rend_2(4,:), 'b',lamb2,rend_2(5,:), 'k'
        );
1560 set(handle65, 'LineWidth', 1.5);
1561 title('Angulo de Declive x Rendimento (Entrada M_1 = 3)');
1562 ylabel('Rendimento ');
1563 xlabel('Angulo de Declive ');
1564 legend('theta = 22','theta = 25','theta = 28','theta = 31','
        theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1565 grid on;

```

```
1566
1567 figure (66)
1568 handle66=plot(lamb3,rend_3(1,:), 'm',lamb3,rend_3(2,:), 'g',lamb3
    ,rend_3(3,:), 'r',lamb3,rend_3(4,:), 'b',lamb3,rend_3(5,:), 'k'
    );
1569 set(handle66, 'LineWidth', 1.5);
1570 title('Angulo de Declive x Rendimento (Entrada M_1 = 4)');
1571 ylabel('Rendimento ');
1572 xlabel('Angulo de Declive ');
1573 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '
    theta = theta_m_a_x = 38.7737');
1574 grid on;
1575
1576 figure (67)
1577 handle67=plot(lamb1,rendr_1(1,:), 'm',lamb1,rendr_1(2,:), 'g',
    lamb1,rendr_1(3,:), 'r',lamb1,rendr_1(4,:), 'b',lamb1,rendr_1
    (5,:), 'k');
1578 set(handle67, 'LineWidth', 1.5);
1579 title('Angulo de Declive x Rendimento (Entrada M_1 = 2)');
1580 ylabel('Rendimento ');
1581 xlabel('Angulo de Declive ');
1582 legend('theta = 14', 'theta = 16', 'theta = 18', 'theta = 20', '
    theta = theta_m_a_x = 22.9705');
1583 grid on;
1584
1585 figure (68)
1586 handle68=plot(lamb2,rendr_2(1,:), 'm',lamb2,rendr_2(2,:), 'g',
    lamb2,rendr_2(3,:), 'r',lamb2,rendr_2(4,:), 'b',lamb2,rendr_2
    (5,:), 'k');
1587 set(handle68, 'LineWidth', 1.5);
1588 title('Angulo de Declive x Rendimento (Entrada M_1 = 3)');
1589 ylabel('Rendimento ');
1590 xlabel('Angulo de Declive ');
1591 legend('theta = 22', 'theta = 25', 'theta = 28', 'theta = 31', '
    theta = theta_m_a_x = 34.0716');
1592 grid on;
1593
1594 figure (69)
1595 handle69=plot(lamb3,rendr_3(1,:), 'm',lamb3,rendr_3(2,:), 'g',
```

```
        lamb3,rendr_3(3,:), 'r',lamb3,rendr_3(4,:), 'b',lamb3,rendr_3  
        (5,:), 'k');  
1596 set(handle69, 'LineWidth', 1.5);  
1597 title('Angulo de Declive x Rendimento (Entrada M.1 = 4)');  
1598 ylabel('Rendimento ');  
1599 xlabel('Angulo de Declive ');  
1600 legend('theta = 27', 'theta = 30', 'theta = 33', 'theta = 36', '  
        theta = theta_m_a_x = 38.7737');  
1601 grid on;
```