

Universidade Federal de Minas Gerais

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROPULSÃO II - TT2

## **RELATÓRIO TÉCNICO**

**SOFTWARE PARA PROJETO CONCEITUAL DE MOTOR  
FOGUETE SÓLIDO**

Sarah Rodi Thomaz

Professor: Lucas Alves Ribeiro

Belo Horizonte

Janeiro de 2025

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Lógica de Operação</b>	<b>2</b>
3.0.1	Inputs . . . . .	2
3.0.2	Parâmetros . . . . .	2
3.0.3	Outputs . . . . .	3
3.0.4	Funções . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Instruções para execução</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>10</b>
5.1	Motor 1 . . . . .	10
5.2	Motor 2 . . . . .	12
5.3	Motor 3 . . . . .	14
5.4	Motor 4 . . . . .	16
5.5	Motor 5 . . . . .	18

# 1 Objetivos

O software desenvolvido tem como objetivo melhorar a eficiência da etapa conceitual de projetos de motor foguete sólido.

# 2 Metodologia

A partir de dados de entrada básicos da geometria do motor e massa do foguete, o software calcula os parâmetros de desempenho do motor e estima o apogeu do foguete. Adicionalmente, o código faz o cálculo estrutural do tubo e quantidade de parafusos.

O script é executado na interface do Fusion 360, programa de CAD da Autodesk.

Para a primeira versão do código, as seguintes simplificações foram realizadas para facilitar debugging e reduzir o tempo de processamento:

- A pressão é igual em todos os pontos dentro da câmara de combustão;
- A tubeira é convergente-divergente cônica com ângulo de 30 graus no convergente e 12 graus no divergente;
- O foguete é lançado na vertical, sem inclinação nenhuma, eliminando a análise de estabilidade;
- Considera-se propelente KNDX para cálculo dos parâmetros de desempenho;
- Para o cálculo estrutural, considera-se que o tubo de alumínio falha por compressão antes que o parafuso de aço falhe por cisalhamento;
- Considera-se regime subsônico em toda a trajetória;
- Considera-se que o motor possui isolamento térmico e a temperatura dos gases não compromete o comportamento mecânico do material da estrutura;
- A variação de pressão, temperatura e densidade do ar que ocorre como consequência da variação de altitude é desprezada;

- A variação de massa que ocorre com a queima do propelente é desprezada.

## 3 Lógica de Operação

### 3.0.1 Inputs

- Diâmetro interno da câmara de combustão;
- Diâmetro da garganta da tubeira;
- Quantidade de grãos;
- Fator de segurança estrutural;
- Limite de escoamento;
- Massa do foguete.

### 3.0.2 Parâmetros

- $T_0 = 1710 \text{ \# K}$  (temperatura ideal de combustão)
- $M = 42.39 \text{ \# kg/kmol}$  (massa molar dos produtos)
- $\gamma = 1.131 \text{ \#}$  Razão entre capacidades caloríficas ( $C_p/C_v$ ) para o KNDX
- $\rho = 0.00000188 \text{ \#}$  Densidade do propelente real em  $\text{kg/mm}^3$  para o KNDX
- $P_a = 101325 \text{ \# Pa}$  (pressão atmosférica)
- $R = 196.1 \text{ \# J/kg-K}$  (constante específica dos gases)
- $R_{\text{script\_universal}} = 8314 \text{ \# J/kmol-K}$  (constante universal dos gases)
- $\text{densidade\_script\_ar} = 1.225 \text{ \# kg/m}^3$  (Densidade do ar)

### 3.0.3 Outputs

- Pressão da câmara de combustão;
- Velocidade dos gases na saída da tubeira;
- Pressão na saída da tubeira;
- Fluxo de massa;
- Área de queima;
- Taxa de queima;
- Massa de propelente;
- Comprimento do grão para queima constante;
- Diâmetro do core do grão;
- Espessura do tubo do motor;
- Quantidade de parafusos para fixação do cabeçote e tubeira;
- Empuxo médio;
- Impulso total;
- Aceleração máxima;
- Velocidade máxima;
- Apogeu;
- CAD 3D do cabeçote, tubo, tubeira e grãos propelente.

### 3.0.4 Funções

- `create_nozzle`

Cria um modelo 3D da tubeira a partir de um esboço revolucionado. As dimensões são parametrizadas em função do diâmetro da câmara de combustão e da garganta

da tubeira de forma a manter integridade estrutural e viabilidade de fabricação. A otimização de desempenho não será considerada no momento.

O código traça o esboço da tubeira partindo da extremidade inferior externa e segue um sentido antihorário, como indica a Figura 1

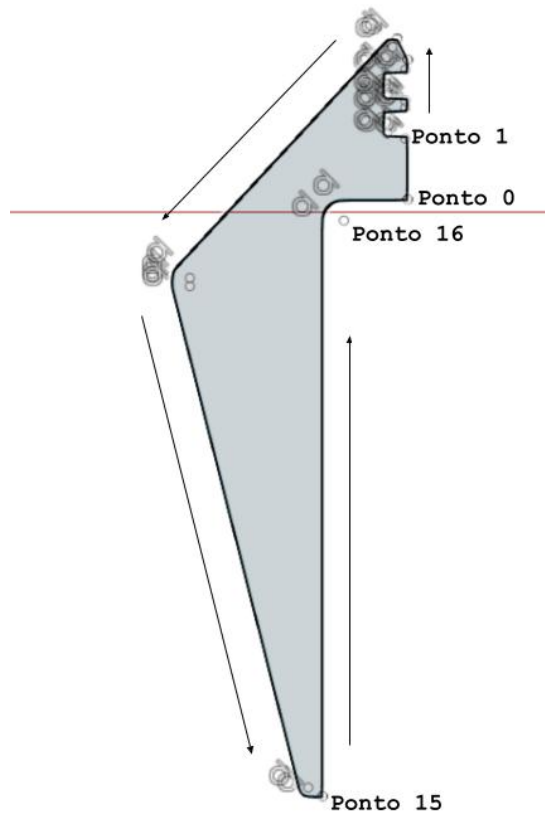


Figura 1: Esboço da tubeira gerado pelo código.

- `create_tube`

Cria um modelo 3D do tubo do motor a partir de um esboço revolucionado. As dimensões são parametrizadas em função do diâmetro da câmara de combustão e espessura do tubo de forma a manter o fator de segurança da estrutura sempre acima do informado pelo usuário.

O código traça o esboço do tubo partindo da extremidade inferior interna e segue um sentido antihorário, como indica a Figura 2

- `create_bulkhead`

Cria um modelo 3D do cabeçote do motor a partir de um esboço revolucionado. As dimensões são parametrizadas em função do diâmetro da câmara de combustão de

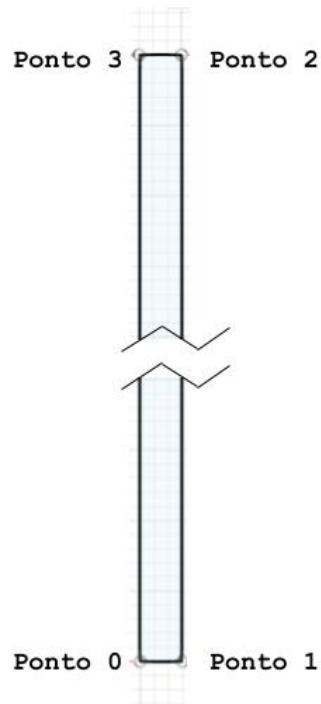


Figura 2: Esboço do tubo gerado pelo código.

forma a manter o fator de segurança da estrutura sempre acima do informado pelo usuário.

O código traça o esboço do tubo partindo da extremidade superior interna e segue um sentido horário, como indica a Figura 3

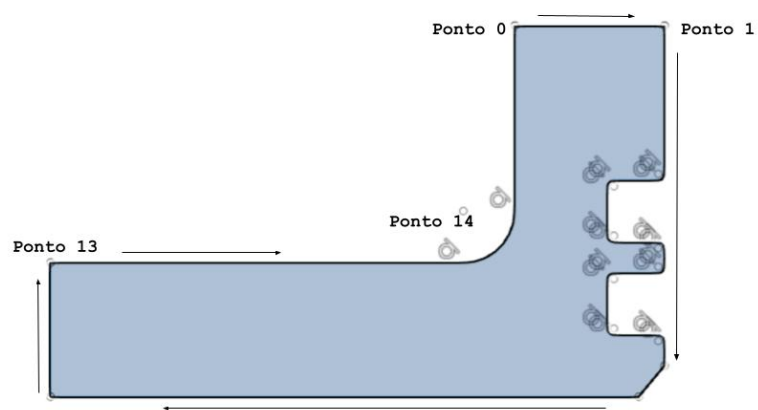


Figura 3: Esboço do cabeçote gerado pelo código.

- create\_grain

Cria um modelo 3D dos grãos do motor a partir de um esboço revolucionado. As

dimensões são parametrizadas em função do diâmetro da câmara de combustão e da garganta da tubeira de forma a manter a área de queima constante e alocar o máximo de combustível possível.

O código traça o esboço dos grãos a partir de um círculo estrudado e então cria um padrão linear para multiplicar os grãos.

- `calcular_m_ponto;`

Calcula o fluxo de massa em função da área de queima, taxa de queima e densidade do propelente.

- `calcular_mach;`

Calcula a velocidade dos gases na saída da tubeira em função da velocidade do som.

- `calcular_ve;`

Calcula a velocidade dos gases na saída da tubeira em m/s.

- `calcular_pe;`

Calcula a pressão do fluxo na saída da tubeira em função da pressão da câmara de combustão e da velocidade de saída.

- `calcular_empuxo;`

Calcula o empuxo do motor em função do fluxo de massa, velocidade de saída, pressão na saída da tubeira, pressão ambiente e área da garganta da tubeira.

- `calcular_taxa_queima;`

Calcula a taxa de queima em função da pressão dentro da câmara de combustão.

- `calcular_area_total;`

Calcula a área de queima em função do diâmetro da câmara de combustão, diâmetro do core do grão, comprimento do grão e quantidade de grãos.

- `calcular_area_nozzle;`

Calcula a área da garganta em função do diâmetro da garganta.



- calcular\_pressao;

Calcula a pressão da câmara de combustão em função da densidade do propelente, constante universal dos gases, temperatura de queima do propelente, área de queima e área da tubeira.

Essa seção realiza uma iteração já que a taxa de queima depende da pressão e a pressão depende da taxa de queima. Supõe-se um valor inicial de pressão de 6 MPa, então calcula-se a taxa de queima para essa pressão. No próximo passo, calcula-se a pressão para a taxa de queima calculada. Quando a diferença entre a pressão calculada em duas iterações seguidas for  $< 0.2$  MPa, o loop é interrompido e o valor de pressão é considerado válido.

- calcular\_forca\_parafusos;

Calcula a força atuante em cada parafuso em função da quantidade de parafusos, pressão interna e diâmetro da câmara de combustão.

- calcular\_tensao\_furo;

Calcula a tensão em cada furo devido à força atuante dos parafusos em função da força individual, diâmetro do parafuso e espessura do tubo.

- calcular\_espessura\_tubo;

Calcula a espessura do tubo utilizando as equações de vaso de pressão, em função da pressão interna, diâmetro da câmara de combustão, limite de escoamento do material e fator de segurança desejado. Caso a espessura calculada seja inferior a 2 mm, considera-se uma espessura de 2 mm.

- calcular\_massa\_total\_propelente;

Calcula a massa total de propelente em função da quantidade de grãos, área superficial, comprimento do cilindro e densidade do propelente.

- calcular\_forca\_total;

Calcula a força total atuante sobre o foguete durante a trajetória em função da força de empuxo, massa inicial do foguete, diâmetro da câmara de combustão, espessura do tubo, coeficiente de arrasto, tempo de queima e densidade do ar.

Considera-se um CD constante de 0.6.

Calcula também a aceleração em  $\text{m/s}^2$  e em função de g; a velocidade em  $\text{m/s}$  e em função de mach e o apogeu.

Considera-se que o empuxo é zero após o tempo de queima.

- `run_script_combined`.

Solicita os inputs ao usuário e converte as entradas se necessário.

Define o diâmetro dos parafusos em função do diâmetro do foguete.

Calcula o comprimento do grão para manter a área de queima constante.

Calcula a quantidade de parafusos necessária para que o fator de segurança estrutural fique acima do fornecido pelo usuário.

Executa as funções declaradas ao longo do código.

Exibe os resultados na interface do Fusion 360.

## 4 Instruções para execução

Acesse o menu de Scripts e Complementos na aba Utilidades do Fusion 360. Crie um novo Script em Python com o nome desejado. Edite o script criado e substitua o conteúdo pelo código em anexo. Será necessária a instalação do VSCode ou outro compilador. Salve as alterações, retorne ao menu de Scripts e Complementos e execute o script. Forneça os dados de input e tire print das janelas de resultados para salvar as informações.

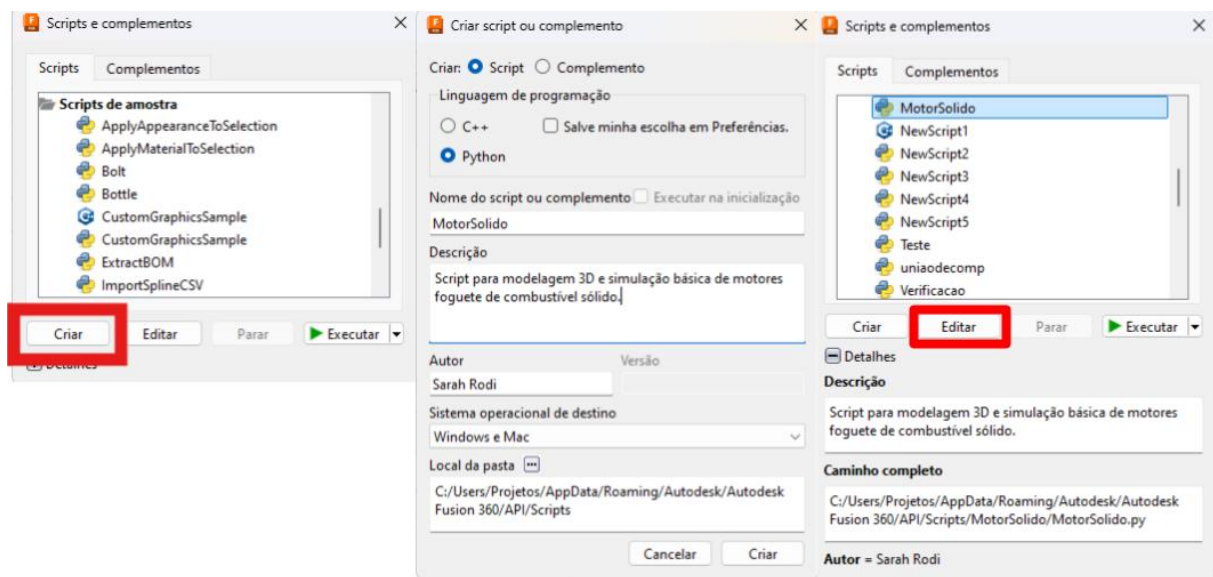


Figura 4: Passo a passo para instalação do Script.

## 5 Resultados

A seguir serão apresentados cinco motores projetados com auxílio do software desenvolvido para exemplificação.

### 5.1 Motor 1

#### Inputs

- Diâmetro interno da câmara de combustão: 100 mm
- Diâmetro da garganta da tubeira: 20 mm
- Número de grãos: 5
- Fator de Segurança: 2.5
- Limite de Escoamento do material do tubo: 250 MPa
- Massa do foguete: 15 kg

## Outputs

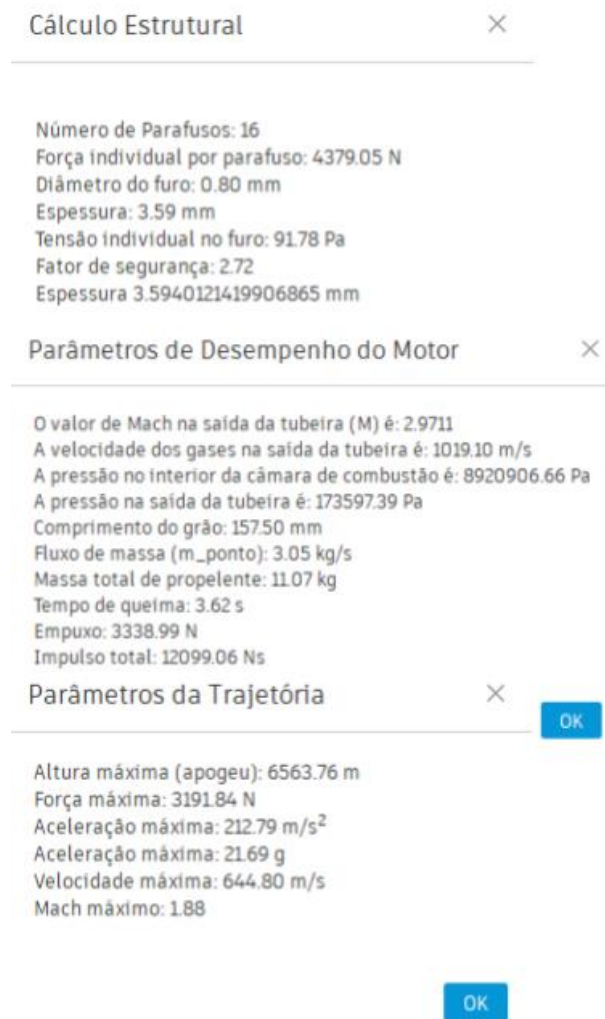


Figura 5: Resultados fornecidos pelo Script para o motor 1.

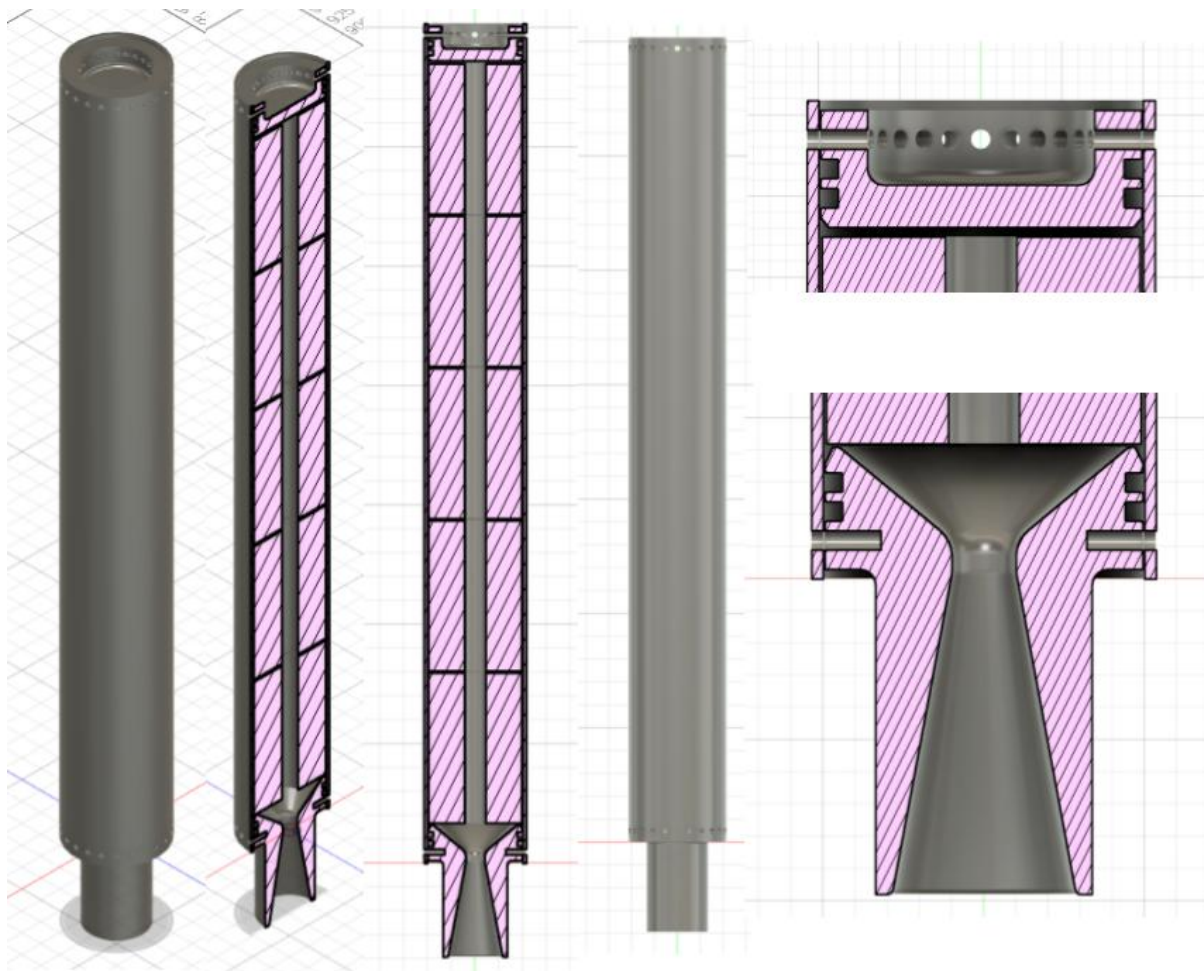


Figura 6: Imagens do modelo 3D editável criado no Fusion 360 para o motor 1.

## 5.2 Motor 2

### Inputs

- Diâmetro interno da câmara de combustão: 50 mm
- Diâmetro da garganta da tubeira: 7 mm
- Número de grãos: 3
- Fator de Segurança: 2
- Limite de Escoamento do material do tubo: 250 MPa
- Massa do foguete: 10 kg

## Outputs

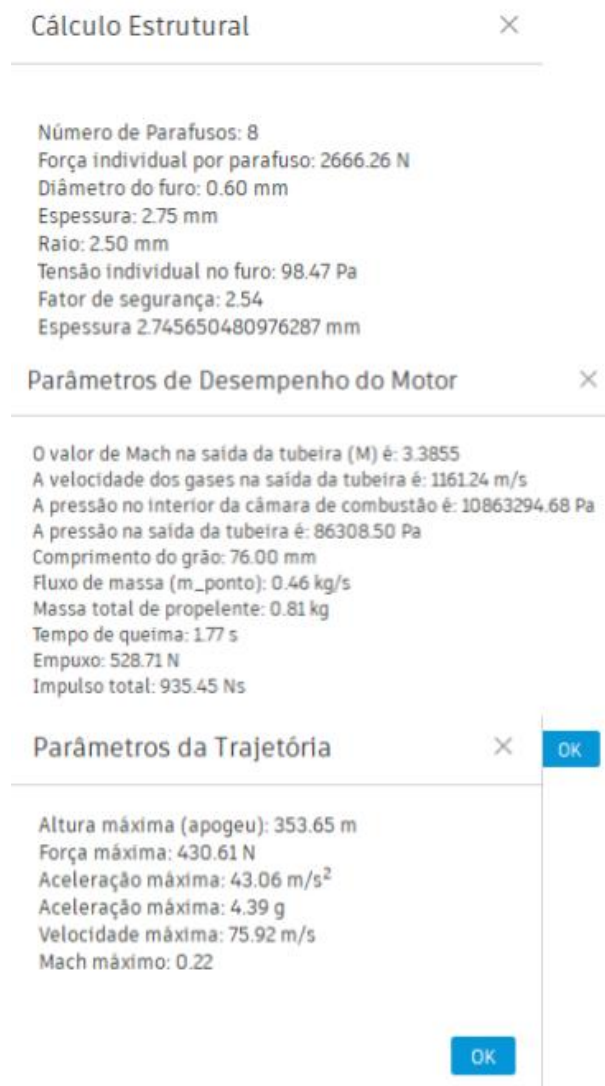


Figura 7: Resultados fornecidos pelo Script para o motor 2.

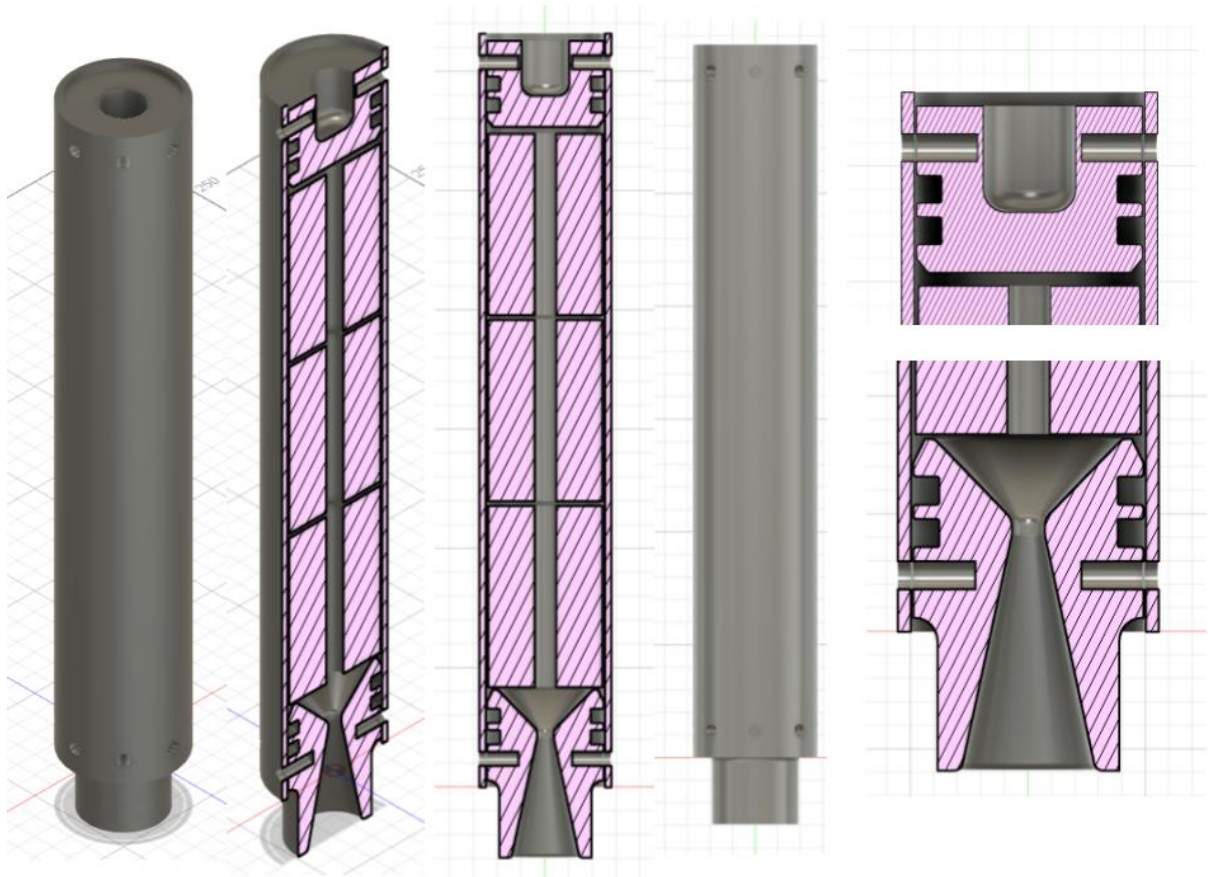


Figura 8: Imagens do modelo 3D editável criado no Fusion 360 para o motor 2.

### 5.3 Motor 3

#### Inputs

- Diâmetro interno da câmara de combustão: 70 mm
- Diâmetro da garganta da tubeira: 15 mm
- Número de grãos: 6
- Fator de Segurança: 3
- Limite de Escoamento do material do tubo: 350 MPa
- Massa do foguete: 30 kg



## Outputs

Cálculo Estrutural

Número de Parafusos: 16  
Força individual por parafuso: 2439.47 N  
Diâmetro do furo: 0.60 mm  
Espessura: 2.00 mm  
Tensão individual no furo: 103.53 Pa  
Fator de segurança: 3.38  
Espessura 2.0 mm

Parâmetros de Desempenho do Motor

O valor de Mach na saída da tubeira (M) é: 2.8878  
A velocidade dos gases na saída da tubeira é: 990.53 m/s  
A pressão no interior da câmara de combustão é: 10142124.11 Pa  
A pressão na saída da tubeira é: 235494.59 Pa  
Comprimento do grão: 110.00 mm  
Fluxo de massa (m\_ponto): 1.97 kg/s  
Massa total de propelente: 4.49 kg  
Tempo de queima: 2.28 s  
Empuxo: 2187.71 N  
Impulso total: 4991.97 Ns

Parâmetros da Trajetória

Altura máxima (apogeu): 1163.09 m  
Força máxima: 1893.41 N  
Aceleração máxima: 63.11 m/s<sup>2</sup>  
Aceleração máxima: 6.43 g  
Velocidade máxima: 143.70 m/s  
Mach máximo: 0.42

OK

Figura 9: Resultados fornecidos pelo Script para o motor 3.

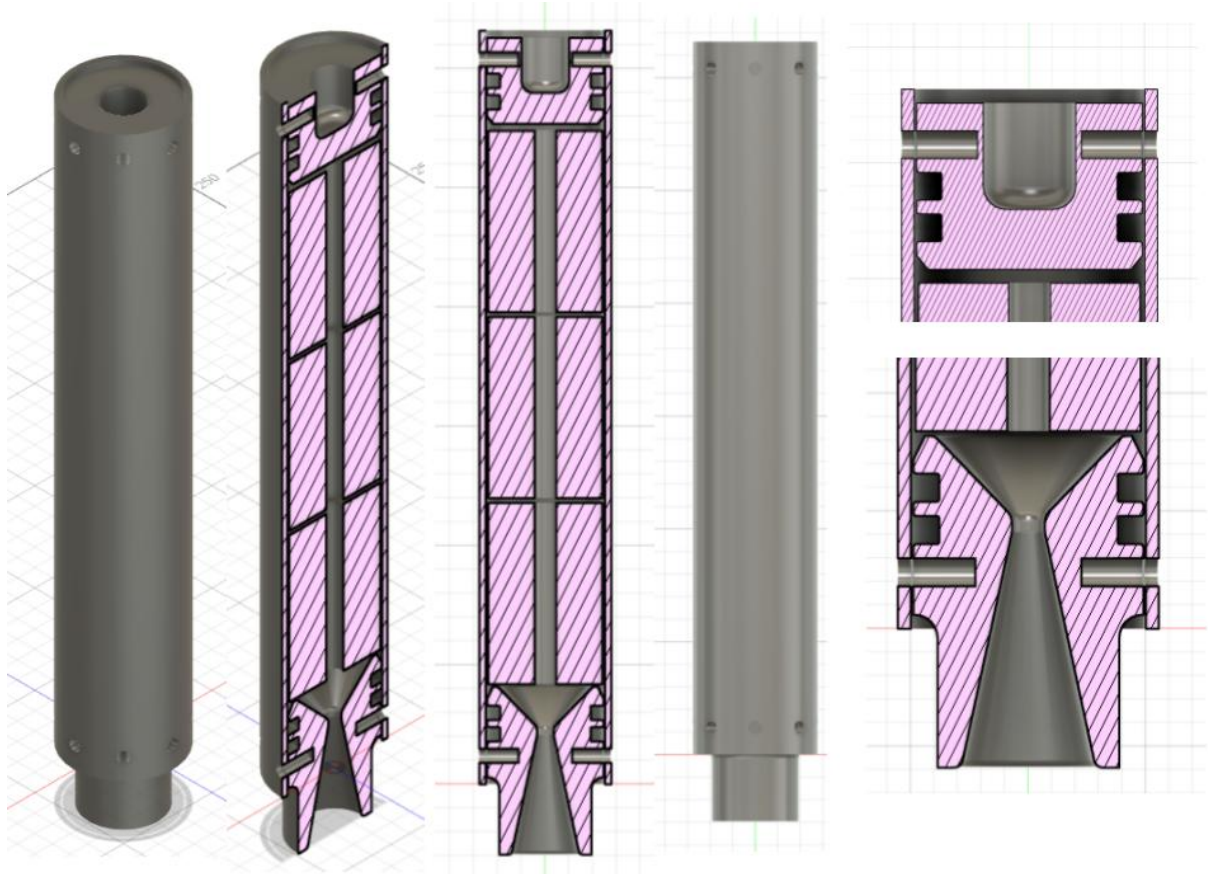


Figura 10: Imagens do modelo 3D editável criado no Fusion 360 para o motor 3.

## 5.4 Motor 4

### Inputs

- Diâmetro interno da câmara de combustão: 70 mm
- Diâmetro da garganta da tubeira: 12 mm
- Número de grãos: 4
- Fator de Segurança: 3
- Limite de Escoamento do material do tubo: 350 MPa
- Massa do foguete: 30 kg

## Outputs

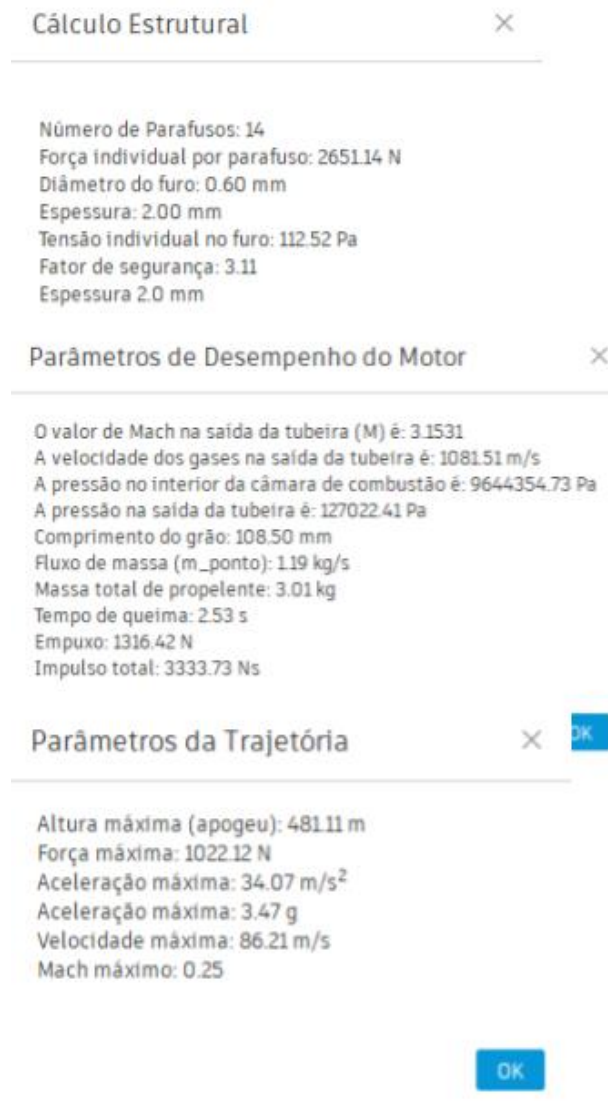


Figura 11: Resultados fornecidos pelo Script para o motor 4.

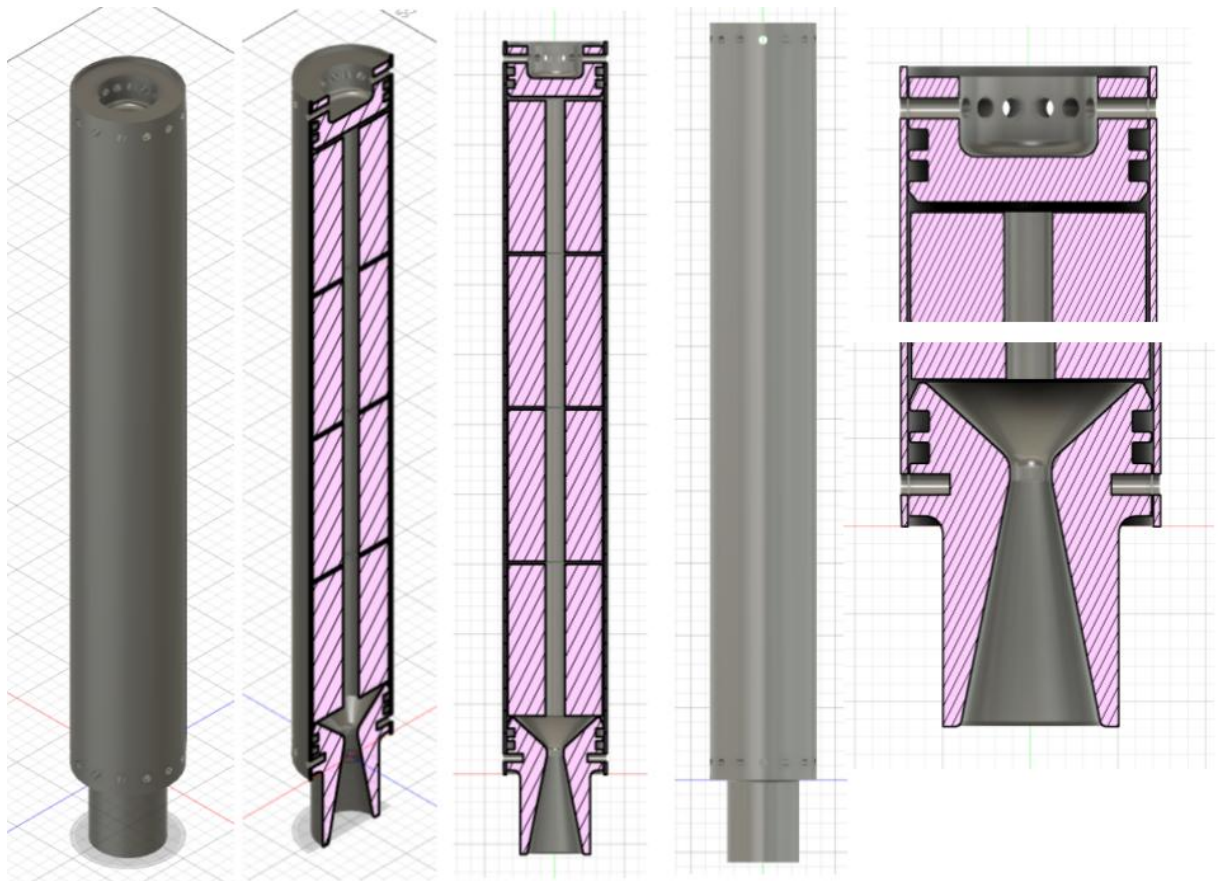


Figura 12: Imagens do modelo 3D editável criado no Fusion 360 para o motor 4.

## 5.5 Motor 5

### Inputs

- Diâmetro interno da câmara de combustão: 120 mm
- Diâmetro da garganta da tubeira: 24 mm
- Número de grãos: 5
- Fator de Segurança: 2
- Limite de Escoamento do material do tubo: 300 MPa
- Massa do foguete: 40 kg

## Outputs

Cálculo Estrutural

Número de Parafusos: 14  
Força individual por parafuso: 7154.80 N  
Diâmetro do furo: 0.80 mm  
Espessura: 4.46 mm  
Tensão individual no furo: 134.58 Pa  
Fator de segurança: 2.23  
Espessura 4.461278638913673 mm

Parâmetros de Desempenho do Motor

O valor de Mach na saída da tubeira (M) é: 2.9711  
A velocidade dos gases na saída da tubeira é: 1019.10 m/s  
A pressão no interior da câmara de combustão é: 8856703.57 Pa  
A pressão na saída da tubeira é: 172348.02 Pa  
Comprimento do grão: 189.50 mm  
Fluxo de massa (m\_ponto): 4.36 kg/s  
Massa total de propelente: 19.20 kg  
Tempo de queima: 4.40 s  
Empuxo: 4768.56 N  
Impulso total: 20980.58 Ns

Parâmetros da Trajetória

Altura máxima (apogeu): 6136.16 m  
Força máxima: 4376.16 N  
Aceleração máxima: 109.40 m/s<sup>2</sup>  
Aceleração máxima: 11.15 g  
Velocidade máxima: 444.48 m/s  
Mach máximo: 1.30

OK

OK

Figura 13: Resultados fornecidos pelo Script para o motor 5.

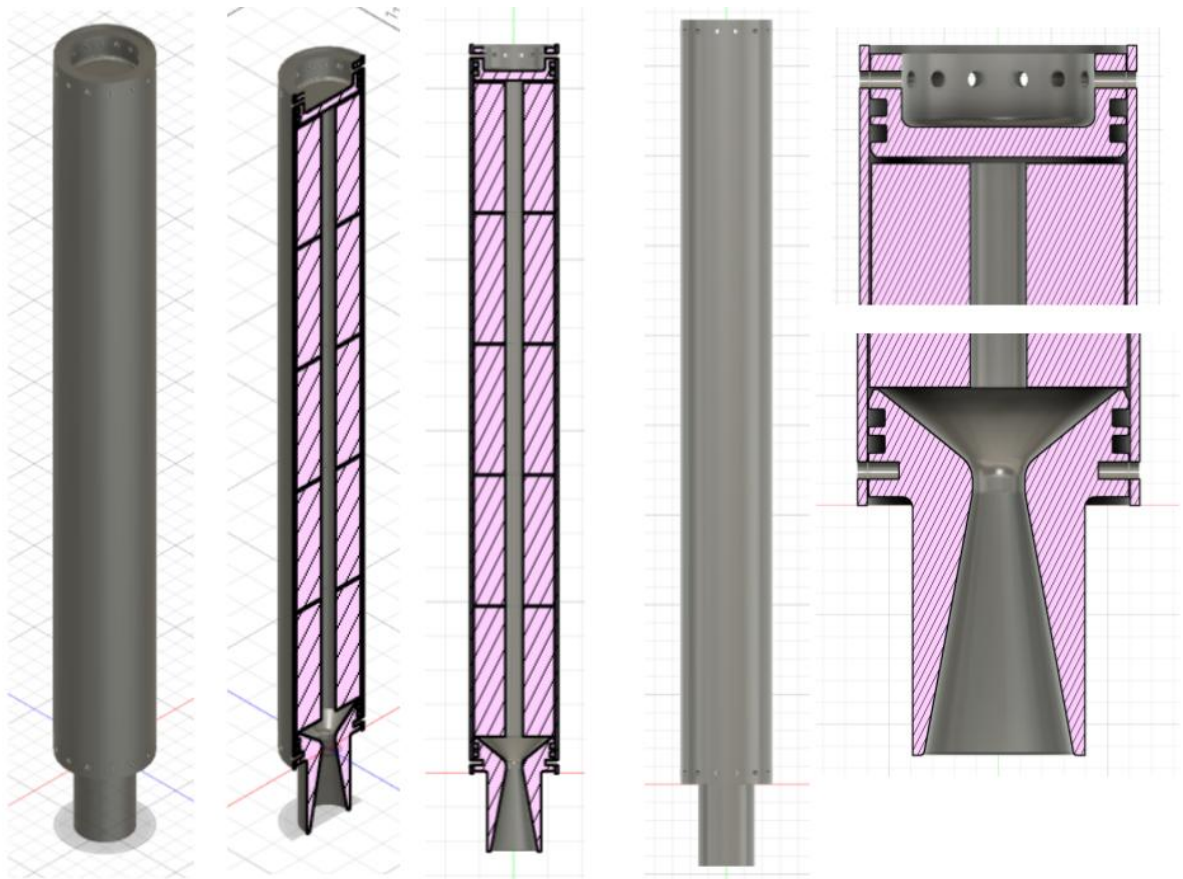


Figura 14: Imagens do modelo 3D editável criado no Fusion 360 para o motor 5.

<https://github.com/Sarah204/motor-solido>