



Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Aeroespacial

# **Análise Numérica Conjugada e Acoplada de Motores Estato-Reatores**

Autor: Alexandre Ponte Carvalho  
Orientador: PhD. Olexiy Shynkarenko

Brasília, DF  
2023



Alexandre Ponte Carvalho

# **Análise Numérica Conjugada e Acoplada de Motores Estado-Reatores**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: PhD. Olexiy Shynkarenko

Brasília, DF

2023

---

Alexandre Ponte Carvalho

Análise Numérica Conjugada e Acoplada de Motores Estado-Reatores/ Alexandre Ponte Carvalho. – Brasília, DF, 2023-  
78 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: PhD. Olexiy Shynkarenko

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Cargas Térmicas. 2. Motor Ramjet. I. PhD. Olexiy Shynkarenko. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise Numérica Conjugada e Acoplada de Motores Estado-Reatores

CDU 02:141:005.6

---

Alexandre Ponte Carvalho

## **Análise Numérica Conjugada e Acoplada de Motores Estado-Reatores**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 16 de Fevereiro de 2023:

---

**PhD. Olexiy Shynkarenko**  
Orientador

---

**PhD. Paolo Gessini**  
Convidado 1

---

**PhD. Rafael Castilho Faria Mendes**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as oportunidades que recebi na vida, aos meus pais Cristiano Viveiros de Carvalho e Silvia Cavalcante Ponte, por terem me passado os ensinamentos mais valiosos que já recebi, nunca esperando nada em troca. E às minhas irmãs Luciana, Mariana e Gabriela por terem, com toda a minha família, feito dessa jornada uma experiência inigualável, com tanto carinho e apoio.

Agradeço também ao professor PhD. Olexiy Shynkarenko por me conceder a oportunidade de fazer parte do desenvolvimento deste projeto e por todo o conhecimento que me passou ao longo dos anos na Universidade de Brasília, por meio de aulas, projetos e convivência, contribuindo para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço a todos os funcionários, colaboradores e professores da FGA, por fazerem da universidade um lugar agradável e repleto de aprendizados, em especial aos professores da banca examinadora PhD. Paolo Gessini e PhD. Rafael Castilho Faria Mendes; e a todos os meus colegas e amigos que, durante todo esse tempo, sempre me incentivaram e motivaram a alcançar meus objetivos.

*“All we have to decide is what to do  
with the time that is given us.”  
(J.R.R. Tolkien).*

# Resumo

Um estudo abrangendo os fatores imperantes no processo operacional de motores estato-reatores foi realizado, desde a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do caso estipulado, até a definição das condições necessárias para formulação analítica e numérica do problema. Este trabalho é fundamentado na necessidade de identificação das características de operação do motor ramjet mantido no Laboratório de Propulsão Química (CPL), como passo essencial para a determinação das margens de segurança operacional. A fundamentação teórica abordada aglutina um estudo dos princípios físicos regentes dos processos decorrentes da operação do motor no ambiente de laboratório, abrangendo o aquecedor, que simula o escoamento através do difusor, a câmara de combustão e o bocal, bem como o volume de controle interno. A partir dessa fundamentação, foi possível descrever a metodologia de resolução numérica para o fluxo de calor, adotada pelo software ANSYS tanto no meio sólido, abordado pela lei de Fourier, quanto pelo desenvolvimento do escoamento, explicitado pelas equações de Navier-Stokes. A obtenção de uma solução parte, inicialmente, de uma fundamentação teórica dos conceitos que abrangem o problema, de operação nominal do motor em regime permanente, até a concepção do estudo nos ambientes numéricos ANSYS Fluent e Mechanical. O estudo numérico foi dividido em uma simulação conjugada e uma simulação acoplada, ambas descrevendo o mesmo caso. As condições de contorno, malhas de simulação e condições de acoplamento foram estabelecidas e descritas, com a preparação de todos os subsistemas necessários para a realização da simulação acoplada, bem como o desenvolvimento da resolução conjugada no Fluent.

**Palavras-chaves:** Acoplamento. Ramjet. Simulação Conjugada. Métodos numéricos. Engenharia Assistida por Computador. Termodinâmica computacional. Fluidodinâmica computacional.

# Abstract

A study encompassing the prevailing factors in the operational process of ramjet engines was carried out, from the theoretical foundation necessary for the development of the stipulated case, up to the definition of the necessary conditions for analytical and numerical formulation of the problem. This work is based on the necessity to identify the operational characteristics of the ramjet engine maintained in the Chemical Propulsion Laboratory (CPL), as an essential step for the determination of the operational safety margins. The theoretical foundation addressed aggregates a study of the physical principles governing the processes resulting from the engine operation in the laboratory environment, surrounding the heater, which simulates the flow through the diffuser, the combustion chamber and the nozzle, as well as the internal control volume. From this foundation, it was possible to describe the numerical resolution methodology for heat flow, adopted by the ANSYS software both in the solid medium, explained by the Fourier law, and in the development of the flow, elucidated by the Navier-Stokes equations. The obtention of a solution starts, initially, from a theoretical foundation of the concepts that encompass the problem of the engine's nominal operation in the permanent regime, up to the conception of the study in the ANSYS Fluent and Mechanical environments. The numerical study was divided into a conjugate simulation and a coupled simulation, both describing the same case. The boundary conditions, simulation meshes and coupling conditions were established and described, with the preparation of all the necessary subsystems for the realization of the coupled simulation, as well as the development of the conjugate resolution in Fluent.

**Key-words:** Coupling. Ramjet. Conjugate simulation. Numerical methods. Computer-aided engineering. Computational thermodynamics. Computational fluid dynamics.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Seção longitudinal esquemática de um motor <i>Ramjet</i> . . . . .	18
Figura 2 – Modelos de escoamento através do método de volume de controle finito. (a) Volume de controle fixado; (b) Volume de controle em movimento. . . . .	29
Figura 3 – Modelos de escoamento através do método de volume de controle in- finitesimal. (a) Volume de controle infinitesimal fixado; (b) Volume de controle infinitesimal em movimento. . . . .	30
Figura 4 – Representação geométrica do cilindro e seus raios utilizados na resolu- ção analítica. . . . .	38
Figura 5 – Esquemático do sistema. . . . .	41
Figura 6 – Esquemático da tubulação conectada da bancada de teste. . . . .	42
Figura 7 – Exemplo de loop algébrico entre dois subsistemas. . . . .	44
Figura 8 – Relação da simetria de uma única face da malha de simulação numérica. . . . .	45
Figura 9 – Vetores utilizados no cálculo da qualidade ortogonal de uma célula. . . . .	45
Figura 10 – Relação da suavidade entre faces em uma malha de simulação numérica. . . . .	46
Figura 11 – Geometria de todo o motor, com as seções: (a) <i>Inlet</i> e injetor; (b) Segundo injetor e <i>flame holder</i> ; (c) Bocal. . . . .	48
Figura 12 – Geometria da seção posterior do motor (câmara de combustão e bocal) com injetor e <i>flameholder</i> . . . . .	49
Figura 13 – Ilustração do contato entre as superfícies da seção da câmara de com- bustão do motor com seu volume interno. . . . .	49
Figura 14 – Malha da simulação conjugada para o primeiro injetor. . . . .	51
Figura 15 – Malha da simulação conjugada para o porta-chamas. . . . .	51
Figura 16 – Malha da simulação conjugada na região do bocal. . . . .	51
Figura 17 – Geometria completa do sistema simulado no Fluent. . . . .	52
Figura 18 – Definição de <i>inlet</i> , <i>injector</i> , <i>wall</i> e <i>symmetry</i> na entrada do volume de controle e no primeiro injetor. . . . .	52
Figura 19 – Definição de <i>outlet</i> e <i>symmetry</i> na saída do volume de controle. . . . .	53
Figura 20 – Malha da simulação acoplada na seção do primeiro injetor. . . . .	53
Figura 21 – Malha da simulação acoplada na seção do primeiro <i>flame holder</i> . . . . .	54
Figura 22 – Indicação das condições de contorno de convecção e de acoplamento para a seção do aquecedor. . . . .	54
Figura 23 – Indicação das condições de contorno de convecção e de acoplamento para a seção da câmara de combustão. . . . .	55
Figura 24 – Indicação das condições de contorno de convecção e de acoplamento para a seção do bocal e do suporte. . . . .	55
Figura 25 – Malha da estrutura entre a seção do aquecedor e da câmara de combustão. . . . .	56

Figura 26 – Malha da seção do bocal convergente-divergente. . . . .	56
Figura 27 – Temperatura, velocidade e fração mássica de $C_3H_8$ no sistema após 30 segundos de operação. . . . .	60
Figura 28 – Contornos no sistema após 60 segundos de operação em regime transiente. . . . .	61
Figura 29 – Distribuição de temperatura e de fração média de mistura no sistema após a simulação em regime permanente. . . . .	62
Figura 30 – Temperatura ( $K$ ) no eixo de simetria (centro do volume de controle) comparando resultados da simulação puramente transiente (inicial) e da simulação com regime permanente posterior. . . . .	63
Figura 31 – Entalpia ( $J/kg$ ) no eixo longitudinal do motor ( $m$ ) comparando resultados da simulação puramente transiente (inicial) e da simulação com regime permanente posterior. . . . .	63
Figura 32 – Distribuição de temperaturas próximas à parede interna do motor para simulação transiente (cinza), transiente-permanente com 500 iterações (vermelha) e validada analiticamente (azul). . . . .	64
Figura 33 – Distribuição de temperaturas próximas à parede interna do motor para simulação transiente-permanente com <i>Flow Time</i> reduzido (cinza) e validada analiticamente (vermelho). . . . .	65
Figura 34 – Contornos de temperatura após a realização de todas as iterações (transientes e permanentes) para o injetor e bocal. . . . .	73
Figura 35 – Geometria estrutural e do volume de controle de cada seção do sistema estudado. . . . .	74

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Regimes de voo validados para simulação. . . . .	42
Tabela 2 – Dados quantitativos da malha e condições de contorno adotadas para a simulação conjugada. . . . .	50
Tabela 3 – Discretizações Espaciais. . . . .	58
Tabela 4 – Dados quantitativos de número de nós e elementos da malha para a simulação acoplada, e condições de voo já validadas por outras simulações. . . . .	72

# Lista de abreviaturas e siglas

AMG	<i>Algebraic Multigrid</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
cil	Cilindro
cond	Condução
conv	Convecção
CPL	<i>Chemical Propulsion Laboratory</i>
efet	Efetiva
<i>ox</i>	Oxidante
PDF	<i>Probability Density Function</i>
<i>sec</i>	Secundário

# Lista de símbolos

$a$	Aceleração
$A$	Área da seção normal à transferência de calor
$A_s$	Área da superfície de transferência de calor
$Bi$	Número de Biot
$C_p$	Calor específico da mistura
$E$	Energia
$f$	<i>Mixture fraction</i> (Fração de mistura)
$\vec{F}$	Força externa
$F$	Força
$h$	Coefficiente de transferência de calor
$H$	Entalpia
$I$	Tensor unitário
$J_0$	Função de Bessel de primeira ordem
$\vec{J}_j$	Fluxo de difusão de espécies reagentes
$k$	Condutividade térmica
$k$	Energia cinética turbulenta
$k_{efet}$	Condutividade efetiva
$k_l$	Condutividade térmica laminar da mistura
$k_t$	Condutividade térmica turbulenta
$L$	Comprimento
$m$	Massa
$\mathcal{N}$	Operador de Navier-Stokes
$p$	Pressão

$p$	Pressão estática
$Pr$	Número de Prandtl
$q$	Fluxo de calor
$\dot{Q}_{cond}$	Taxa de transferência de calor por condução
$\dot{Q}_{conv}$	Taxa de transferência de calor por convecção
$r$	Coordenada radial
$r$	Raio
$r_a$	Raio interno
$r_b$	Raio externo
$Re$	Número de Reynolds
$S_m$	Massa adicionada à fase contínua
$S_{m2}$	<i>Source term</i> (Termo fonte)
$S_{user}$	<i>User-defined source term</i> (Termo fonte definido pelo usuário)
$v_r$	Velocidade radial
$v_x$	Velocidade axial
$T$	Temperatura
$T_s$	Temperatura da superfície
$T_\infty$	Temperatura do fluido distante
$t$	Tempo
$\mathbf{t}$	Tempo adimensional
$X$	Distância adimensional
$x$	Coordenada axial
$\alpha$	Difusividade térmica
$\epsilon$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
$\lambda_n$	Autovalor função do número de Biot
$\mu$	Viscosidade molecular

$\mu_t$	Viscosidade turbulenta
$\rho$	Densidade
$\sigma_t$	Número de Prandtl do modelo de combustão sem pré-mistura
$\theta$	Temperatura adimensional
$\tau$	Tensor tensão
$\bar{\bar{\tau}}$	Tensor tensão de segunda ordem

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Contexto	17
1.2	Motivação e Metodologia	19
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivo geral	20
1.3.2	Objetivos específicos	21
<b>I</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
2.1	Equações Fundamentais	23
2.1.1	Continuidade, Momento e Energia	23
2.1.2	Combustão Sem Pré-mistura	25
2.1.3	Modelo de Turbulência	26
2.1.4	Condução de Calor	27
2.1.5	Convecção de Calor	27
2.1.5.1	Convecção Livre	28
2.1.5.2	Convecção Forçada	28
2.2	Metodologia Numérica	28
2.2.1	Volume de Controle Finito	29
2.2.2	Elemento Fluido Infinitesimal	29
<b>3</b>	<b>RESOLUÇÃO NUMÉRICA</b>	<b>31</b>
3.1	Ansys Fluent	31
3.1.1	Formulação Numérica da Continuidade e Momento	31
3.1.2	Formulação Numérica da Conservação de Energia	32
3.1.3	Formulação Numérica do Transporte das Frações de Mistura	33
3.1.4	Formulação Numérica do Modelo de Turbulência $k-\epsilon$ Realizable	33
3.2	Ansys Mechanical	34
3.2.1	Elaboração Numérica da Condução e Convecção	34
<b>4</b>	<b>RESOLUÇÃO ANALÍTICA</b>	<b>36</b>
4.1	Problema Transiente	36
4.2	Adimensionalização	36
4.3	Validação Analítica	38

<b>II</b>	<b>ASPECTOS GERAIS</b>	<b>40</b>
5	ASPECTOS GERAIS . . . . .	41
5.1	Motor Ramjet . . . . .	41
5.2	Parâmetros de Funcionamento . . . . .	42
5.3	Conjugação . . . . .	43
5.4	Acoplamento Bidirecional ( <i>Two-Way Coupling</i> ) . . . . .	43
5.5	Malha de Simulação . . . . .	44
5.5.1	<i>Skewness</i> . . . . .	44
5.5.2	<i>Orthogonal Quality</i> . . . . .	45
5.5.3	<i>Smoothness</i> . . . . .	46
<b>III</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>47</b>
6	DESENVOLVIMENTO . . . . .	48
6.1	Parâmetros Gerais da Simulação Conjugada . . . . .	50
6.2	Parâmetros do Volume de Controle na Simulação Acoplada . . . . .	52
6.3	Parâmetros do Motor na Simulação Acoplada . . . . .	54
6.4	Configuração . . . . .	56
<b>IV</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>59</b>
7	RESULTADOS . . . . .	60
8	CONCLUSÃO . . . . .	67
	REFERÊNCIAS . . . . .	68
	<b>APÊNDICES</b>	<b>71</b>
	APÊNDICE A – PRIMEIRO APÊNDICE . . . . .	72
	APÊNDICE B – SEGUNDO APÊNDICE . . . . .	73
	APÊNDICE C – TERCEIRO APÊNDICE . . . . .	74
	APÊNDICE D – QUARTO APÊNDICE . . . . .	76

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto

Desde os primeiros dias de voo de máquinas mais pesadas que o ar, isto é, de veículos cuja densidade total é superior à densidade atmosférica local, os sistemas propulsivos são parte indispensável da aviação. O voo nada mais é do que o equilíbrio entre forças divididas em pares opostos, como peso, sustentação, arrasto e empuxo; forças desejáveis e indesejáveis, porém todas essenciais ao processo. A propulsão, como analisado por [Duncan \(2016\)](#), é o mecanismo da engenharia que viabiliza a adição de energia neste sistema, que pode ser convertida em suas mais diversas formas (cinética, potencial, elétrica).

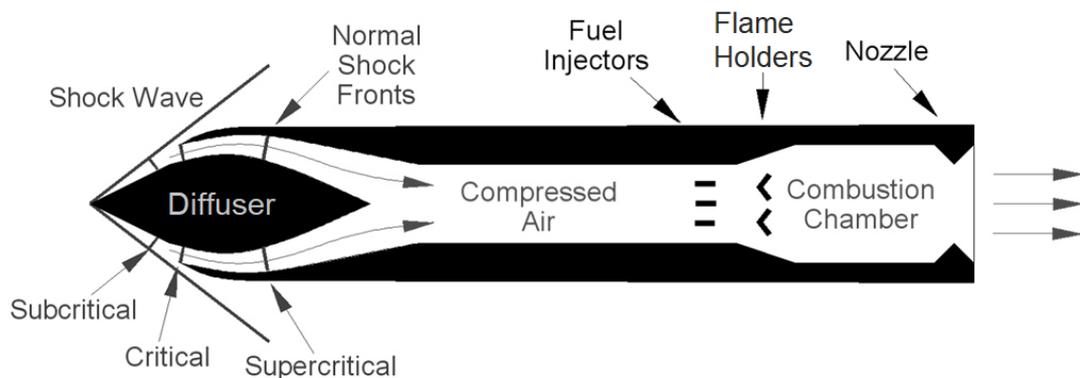
Atualmente, existem diferentes tipos de motores aeronáuticos, que atendem a necessidades diferentes no escopo dos projetos, tais quais:

1. *Turboprop*: São motores que operam a partir de uma turbina a gás, que funcionam rotacionando um eixo e através de uma caixa de redução, a hélice, que é externa ao motor ([BAXTER; EHRICH, 2015](#)).
2. *Turbofan*: Também operam a partir de uma turbina, porém a rotação gerada movimentam um ventilador dentro do motor, que puxa parte do ar para os compressores. A parte do ar que não é levada para os compressores gera a maior parte do empuxo do motor, enquanto a fração comprimida é utilizada na turbina para dar continuidade ao ciclo. Pode ser feita uma razão de desvio (*bypass ratio*) entre estas duas quantidades, como elucidado por [Baxter e Ehrich \(2015\)](#).
3. *Turbojet*: Este motor opera da mesma forma que o anterior, porém o *bypass ratio* é nulo, ou seja, todo o ar que passa pelo ventilador frontal é levado para os compressores. Esta característica permite uma grande potência, porém com elevado gasto de combustível ([SKYBRARY, 2022](#)).
4. *Ramjet*: São motores estáticos e mecanicamente simples. Diferentemente dos anteriores, estes motores possuem uma velocidade mínima de operação, e são mais eficientes dentro do regime supersônico de voo, visto que utilizam a velocidade do próprio veículo para gerar a compressão ([INGENITO, 2021](#)).
5. *Scramjet*: Operam de maneira similar ao anterior, porém, como desenvolvido por [Barzegar Gerdroodbary \(2020\)](#), os motores *Scramjet* são, por definição, capazes de realizar a combustão em regime supersônico.

Os motores *Ramjet*, apesar de mecanicamente simples, utilizam os conceitos e propriedades físicas de maneira muito refinada permitindo, por exemplo, a definição do posicionamento das ondas de choque geradas com o intuito de alterar as propriedades do escoamento, de forma a reduzir sua velocidade e deixá-lo compatível com a combustão e a realização da compressão do fluido a partir do movimento do próprio veículo no qual o motor se encontra.

É evidente, também, que existem diversas variáveis que influenciam diretamente o desempenho do motor, algumas controláveis, outras não. Fatores como o posicionamento dos porta-chamas (*flameholders*), dos injetores (*injectors*), a geometria do difusor (*diffuser*), da câmara de combustão (*combustion chamber*), e do bocal (*nozzle*), mostrados na Figura 1, bem como os materiais a serem escolhidos para cada seção, abrangem algumas das variáveis que podem ser alteradas, e são alguns dos fatores que geram a complexidade destes sistemas. Portanto, é imprescindível que haja um domínio das variáveis que abrangem a fluidodinâmica e a termodinâmica, principalmente em projetos que envolvem condições operacionais extremas como as destes motores.

Figura 1 – Seção longitudinal esquemática de um motor *Ramjet*.



Fonte: (OKIEBOAT, 2017) (Adaptado).

Os motores *Ramjet* operam com maior eficiência quanto maior for a velocidade do veículo, até que as perdas aerodinâmicas se tornem um fator dominante. Apesar dos veículos que possuem motores *Ramjet* se moverem a velocidades supersônicas, o processo de combustão nestes motores ocorre em regime subsônico, portanto, o ar que entra no motor deve ser desacelerado no difusor antes que chegue à câmara de combustão – a baixa velocidade e alta temperatura proporcionam, segundo Falempin (2008), condições favoráveis para a injeção, mistura e queima do combustível. Este fato torna o motor extremamente ineficiente em velocidades superiores a Mach 5, já que as perdas aerodinâmicas se tornam imperantes durante o processo de redução da velocidade do ar para velocidades muito elevadas, como esclarecido por Hall (2021b). A velocidade mínima operacional também é um fator importante na concepção de um projeto que utilizará um motor *Ramjet*. Estes

veículos precisam de um método de propulsão alternativo para gerar empuxo, até que a velocidade esteja dentro do envelope de operação do motor estático. Os métodos para contornar essa condição englobam desde a utilização de foguetes para providenciar a aceleração inicial, até o desenvolvimento de um motor específico como o *Pratt & Whitney J58*, utilizado em modelos como o SR-71, que atuam como “*Turboramjets*”. Este motor, particularmente, realiza o *bypass* dos compressores até os *afterburners*, quando a velocidade do veículo é suficientemente elevada, viabilizando a compressão do ar de entrada apenas na geometria do difusor, enquanto opera como um *turbojet* convencional nos estágios iniciais do voo. Diferentemente dos *Ramjets* convencionais, este motor possui um envelope operacional muito mais versátil, porém a custo de elevada complexidade, como explicado por [Ricco \(2002\)](#).

## 1.2 Motivação e Metodologia

O fluxo de calor permeia toda a matéria, e é ativo em todos os cenários do universo. Desde a radiação Solar que possibilita a vida humana, a convecção que um forno elétrico realiza, esquentando o meio, e a condução térmica que ocorre dentro de paredes e estruturas. O único cenário de ausência de fluxo de calor concebível envolveria uma condição isotérmica e perfeitamente isolada. Seria algo morto no sentido completo da palavra - desprovido de qualquer tipo de processo. A força motriz para o fluxo de calor parte do nivelamento dos gradientes térmicos, e a vida no planeta Terra necessariamente se adaptou à magnitude dos fluxos de energia naturais, provenientes do Sol, do núcleo terrestre e de todos os seus processos. Porém, enquanto a maioria dos animais se mantêm em equilíbrio com estas transferências de calor, os seres humanos se dedicaram ao controle e manipulação de fluxos de energia muito mais intensos do que os experienciados naturalmente ([LIENHARD IV](#); [LIENHARD V, 2019](#)).

O presente estudo de distribuição de cargas térmicas surge de um compilado de estudos anteriores, cuja finalidade comum é de aprimorar e reforçar o conhecimento das propriedades e características de operação do motor *Ramjet*, mantido no Laboratório de Propulsão Química (CPL), através de uma metodologia que incorpora a dinamicidade viabilizada pelas resoluções numéricas computacionais e o alicerce teórico proveniente das resoluções analíticas. O comportamento do motor ainda não foi determinado com experimentos, visto que ainda não foi realizado o teste com todos os componentes operantes, isto é, realizando a queima do combustível no aquecedor e na câmara de combustão. Portanto, é essencial realizar a validação de todos os componentes estruturais como forma de garantir a segurança durante os experimentos que serão realizados.

A partir desta motivação, bem como do objetivo de buscar uma melhor compreensão das características operacionais nominais do motor, este trabalho almeja desde a

fundamentação de casos analíticos, embasados na literatura abrangida na fundamentação teórica, a revisão de estudos precedentes a este, que serão utilizados como validação, até o desenvolvimento da simulação conjugada e, futuramente, da simulação acoplada, que irão elucidar o comportamento interativo entre os componentes do motor, e seu volume de controle interno. Ao longo do desenvolvimento numérico, as condições de contorno serão explicitadas para o caso conjugado, juntamente com as definições utilizadas para o acoplamento, e o desenvolvimento da malha de simulação será realizado com o intuito de otimizar para o problema proposto. A presente análise exhibe apenas os resultados da simulação conjugada com simetria axial, uma vez que a simulação acoplada ainda necessita de um aperfeiçoamento mais extenso. Entretanto, ambos os casos serão desenvolvidos no decorrer deste trabalho. Os resultados de estudos anteriores serão, então, contrastados com os resultados numéricos atuais para a verificação de convergência.

Uma simulação conjugada considera a transferência de calor entre dois domínios físicos diferentes, como entre um sólido e um fluido. Nesse tipo de simulação, a temperatura e a transferência de calor são calculadas simultaneamente em ambos os domínios para que seja possível identificar a troca de calor entre eles.

Por outro lado, uma simulação acoplada se refere à solução numérica de múltiplas equações ou submodelos que descrevem diferentes aspectos do problema de transferência de calor. Por exemplo, uma simulação acoplada pode envolver a resolução da equação de energia, da equação de fluxo do fluido e da equação de transferência de calor simultaneamente, a fim de prever de maneira precisa o comportamento geral da transferência de calor do sistema.

Conseqüentemente, as simulações conjugadas geralmente são ideais quando há uma forte interação relacionada à transferência de calor nos domínios sólido e fluido, ao passo que as simulações acopladas são superiores quando múltiplos aspectos interdependentes do problema de transferência de calor devem ser considerados simultaneamente para a obtenção de resultados precisos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

- Compreender as características dos processos fluidodinâmicos e de transferência de calor durante a operação do motor *Ramjet* através do desenvolvimento de uma simulação conjugada entre o volume de controle e o motor, bem como do acoplamento bidirecional em simulação CFD e *Mechanical*.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica da fundamentação teórica que abrange o problema;
- Definir a geometria e a malha de simulação do motor, para ambas as simulações;
- Definir as propriedades e parâmetros que serão utilizados em cada simulação;
- Definir as condições de contorno da simulação conjugada e acoplada;
- Modelar o fluxo, a combustão e as interfaces de transferência de dados;
- Resolver a simulação conjugada para o caso otimizado do motor;
- Obter os resultados pertinentes (contornos de temperatura, pressão, etc.) para a análise de operação do sistema;
- Obter a distribuição de temperatura na parede (*wall temperature*) do motor, para validação; e
- Definir procedimentos e uma margem preliminar de segurança para a operação do motor.

Parte I

Fundamentação Teórica

## 2 Fundamentação Teórica

A literatura referente à termofluidodinâmica abrange todos os cálculos analíticos necessários para a validação das simulações numéricas. Estas, por sua vez, serão desenvolvidas a partir de uma aliança de estudos de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e *Thermal Analysis*, possibilitando a extensão de um modelo que abarca tanto o volume interno do motor, representado pelo escoamento interno, quanto as superfícies sólidas, correspondidas pela estrutura do motor *Ramjet*. O modelo utilizado na simulação representa idealmente a geometria do próprio motor presente no laboratório, com algumas simplificações, que foram realizadas para possibilitar o desenvolvimento de uma malha refinada e devidamente otimizada para o objetivo do estudo. Também foram definidos os parâmetros necessários para a realização da simulação de transferência de calor, tanto no ambiente de estudo fluidodinâmico, quanto no ambiente mecânico.

### 2.1 Equações Fundamentais

Além das leis gerais da física, também existem diversas relações constitutivas, que se aplicam em problemas específicos, como a equação de estado para gases ideais e a lei de viscosidade de Newton para certos fluidos viscosos. Ademais, para escoamentos em alta velocidade, outros atributos do escoamento compressível devem ser governados por relações de fluxo isentrópico, de Rayleigh e de Fanno, juntamente com as relações do ondas de choque oblíquas e e normais. A termodinâmica comporta tanto propriedades extensivas, cuja medida depende da quantidade de massa da substância, quanto propriedades intensivas, que são independentes da quantidade de massa da substância. E como esclarecido por [El-Sayed \(2016\)](#), as propriedades extensivas abrangem peso, momento, volume e energia, enquanto temperatura e pressão aludem às propriedades intensivas.

#### 2.1.1 Continuidade, Momento e Energia

Todos os métodos adotados pelo estudo da dinâmica dos fluidos para obtenção das equações básicas do movimento fluido devem, segundo [Anderson \(1995\)](#), partir da seguinte filosofia:

- Determinação dos princípios que fundamentarão a análise, a partir das leis da física, tais quais:
  1. Conservação de Massa (Equação da Continuidade).
  2.  $\mathbf{F} = \mathbf{ma}$  (Segunda lei de Newton).

### 3. Conservação de energia (Primeira lei da termodinâmica).

- Aplicação destes conceitos em um modelo adequado.
- A partir da aplicação, extrair as equações matemáticas que incorporam estes princípios.

As equações de Navier-Stokes aglutinam uma equação dependente do tempo de continuidade para conservação de massa, duas equações de conservação de momento dependentes do tempo, para o caso bidimensional, e uma equação de conservação de energia dependente do tempo. Para o caso 2D (utilizado na simulação conjugada), as equações de Navier-Stokes são apresentadas por [Hall \(2021a\)](#), adaptadas ao cenário em duas dimensões:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (2.1)$$

Equações de momento (em  $X$  e  $Y$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) = \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2 + p) = \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (2.3)$$

onde, para as equações acima descritas,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $u$  e  $v$  são as componentes de velocidade no eixo  $x$  e  $y$  respectivamente,  $p$  é a pressão, e  $\mu$  é a viscosidade do fluido. Estas equações descrevem a dinâmica do fluido em um sistema cartesiano, sendo a primeira equação, de conservação de massa, enquanto as outras duas equações são as de conservação de momento para o escoamento compressível.

Equação de energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u(E + p)) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v(E + p)) = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_x u + f_y v \quad (2.4)$$

onde  $E$  é a energia total por unidade de volume,  $(u, v)$  são os componentes da velocidade nas direções  $x$  e  $y$ ,  $p$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica,  $(q_x, q_y)$  são os componentes de fluxo de calor nas direções  $x$  e  $y$ , e  $(f_x, f_y)$  são as forças externas, também nas direções  $x$  e  $y$ .

### 2.1.2 Combustão Sem Pré-mistura

O modelo de combustão sem pré-mistura é utilizado para simular a combustão em simulações numéricas. Neste modelo, o combustível e o oxidante entram na zona de reação em fluxos distintos, diferentemente dos sistemas pré misturados, nos quais os reagentes são misturados ao nível molecular antes de queimar (FLUENT, 2009).

Este modelo envolve a solução das equações de transporte para um ou dois escalares conservados (as frações de mistura). As concentrações das espécies são derivadas a partir dos campos previstos de fração de mistura, enquanto a interação turbulenta e química é levada em conta, de forma presumida, com uma Função Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function*), comumente chamada de tabela PDF.

O enfoque de modelagem de combustão sem pré-mistura é que, sob um certo conjunto de suposições simplificadoras, o estado termoquímico instantâneo do fluido está relacionado a uma quantidade escalar conservada conhecida como a fração de mistura ( $f$ ). A fração de mistura pode ser escrita em termos da fração de massa atômica como:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (2.5)$$

onde  $Z$  é a fração mássica elementar para o elemento  $i$ . O subscrito "ox" denota o valor na entrada do fluxo de oxidante e o subscrito "fuel" denota o valor na entrada da corrente de combustível. Se os coeficientes de difusão para todas as espécies são iguais, a equação acima torna-se idêntica para todos os elementos, e a definição de fração de mistura é única. A fração de mistura, denominada *Mixture Fraction* é, portanto, a fração de massa elementar que originou da corrente de combustível (ANSYS, 2022a).

Se um fluxo secundário (outro combustível, oxidante ou espécie não-reativa) é incluído, as frações de mistura de combustível e secundária tornam-se, simplesmente, as frações mássicas elementares do fluxo de combustível e secundária, respectivamente. A soma de todas as frações de mistura no sistema (combustível, fluxo secundário e oxidante) sempre é igual a 1:

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1 \quad (2.6)$$

### 2.1.3 Modelo de Turbulência

Um modelo de turbulência para simulações numéricas é uma representação matemática utilizada para prever o comportamento do fluxo turbulento em simulações CFD. O objetivo do modelamento de turbulência é de aproximar o comportamento complexo e variante no tempo, computacionalmente intensivo de ser solucionado, em uma forma simplificada que possa ser tratada com maior agilidade.

O desenvolvimento de uma simulação cujo fluxo não é laminar requer, portanto, uma definição para o modelo de turbulência do escoamento. O modelo  $k - \epsilon$ , utilizado no presente trabalho, está dentre os modelos de turbulência mais comuns, que inclui duas equações de transporte para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Este modelo já foi amplamente validado para as características do fluxo que será estudado. A variável  $k$  representa a energia cinética turbulenta, enquanto a variável  $\epsilon$  identifica a sua taxa de dissipação. Ambas podem ser obtidas a partir das seguintes equações de transporte (ANSYS, 2022a):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2.7)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.8)$$

Nestas equações,  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devida aos gradientes médios de velocidade,  $G_b$  é a geração de energia cinética turbulenta devida à flutuabilidade (*Buoyancy*).  $Y_M$  representa a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa geral de dissipação.  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  e  $C_{3\epsilon}$  são constantes.  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\epsilon$ , respectivamente.  $S_k$  e  $S_\epsilon$  são termos-fonte definidos pelo usuário (ANSYS, 2022a).

A modelagem da viscosidade turbulenta  $\mu_t$  parte da expressão

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.9)$$

onde  $C_\mu$  é constante; as constantes demonstradas nas Equações 2.7, 2.8 e 2.9, possuem os seguintes valores:

$$C_{1\epsilon} = 1,44, C_{2\epsilon} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\epsilon = 1,3 \quad (2.10)$$

Que foram determinados, segundo [Ansys \(2022a\)](#), a partir de experimentos para fluxos turbulentos fundamentais, na presença de fluxos cisalhantes como os de camada limite, camadas de mistura (*mixing layer*) e jatos.

### 2.1.4 Condução de Calor

Condução é a transferência de energia de partículas mais energéticas para as partículas adjacentes com menor energia, como resultado das interações intermoleculares. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. Em materiais sólidos, esta transferência é produto da combinação de vibração das partículas, que se organizam em formato de treliça ou malha, com a transferência de calor ocorrendo a partir dos elétrons livres. Em gases e líquidos, a condução acontece a partir das colisões e difusões nas moléculas durante seu movimento aleatório. A taxa de transferência de calor por condução através de uma determinada seção plana é proporcional à diferença de temperatura e área de transferência, e inversamente proporcional à espessura da seção ([ÇENGEL; GHAJAR, 2009](#)).

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (2.11)$$

Onde  $\dot{Q}_{cond}$  é a taxa de transferência de calor, a constante de proporcionalidade  $k$  é a condutividade térmica do material, a área  $A$  é a seção normal à transferência de calor que está sendo avaliada,  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre os dois pontos onde está ocorrendo a transferência de calor, e  $\Delta x$  ou  $L$  é a espessura do material na qual a transferência de calor ocorre. Para o caso limite onde  $\Delta x \rightarrow 0$ , a equação acima pode ser reduzida à sua forma diferencial

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2.12)$$

que representa a Lei de Fourier de condução de calor, onde  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura, ou seja, o ângulo da rampa da temperatura em um diagrama  $T - x$  ou a taxa de variação da temperatura ( $T$ ) em relação à posição ( $x$ ), conforme explicado por [Çengel \(2003\)](#).

### 2.1.5 Convecção de Calor

A convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido adjacente (líquido ou gás) em movimento. Este modo de transferência envolve uma combinação dos efeitos de condução e movimento. Neste caso específico a condução ocorre na camada limite, onde a superfície do sólido está em contato direto com as partículas do fluido, possibilitando o fluxo de calor. [Çengel \(2003\)](#) aponta que a transferência de calor

para este caso também é proporcional ao movimento, portanto, quanto mais rápido um fluido se desloca, maior é a sua taxa de transferência de calor por convecção.

### 2.1.5.1 Convecção Livre

Existem duas formas principais de caracterizar a convecção de calor com base no movimento do fluido que circunda a superfície sólida. Convecção livre é a convecção que ocorre sem interferência externa no movimento relativo entre o fluido e o sólido, e o movimento do fluido se dá pela relação entre sua temperatura e densidade, já que alterar a densidade de um volume de fluido em seu meio faz com que a força peso atuante diminua (ou aumente), de forma que quando o fluido aquece, sua tendência é de ficar menos denso, e movimentar-se no meio, já que a força de empuxo atuante sob o fluido permanece constante para um determinado volume de fluido, desde que sua vizinhança mantenha suas propriedades inalteradas.

### 2.1.5.2 Convecção Forçada

A convecção forçada trata da convecção que ocorre através de um movimento forçado do fluido sobre a superfície, causado por fatores externos, como um ventilador, bomba pressurizadora, ou fluxo dentro de uma câmara de combustão

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2.13)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção em  $W/m^2 \cdot K$ , também chamado de *film coefficient*,  $A_s$  é a área de superfície na qual a convecção ocorre,  $T_s$  é a temperatura na superfície e  $T_\infty$  é a temperatura do fluido distante da superfície (vizinhança). Alguns autores não consideram a convecção um mecanismo fundamental da transferência de calor, visto que ela é, essencialmente, uma forma de condução de calor com a presença de um fluido em movimento. Portanto o nome "convecção", segundo Çengel e Ghajar (2009), é dado para um caso específico de condução de calor onde há um fluido em movimento.

## 2.2 Metodologia Numérica

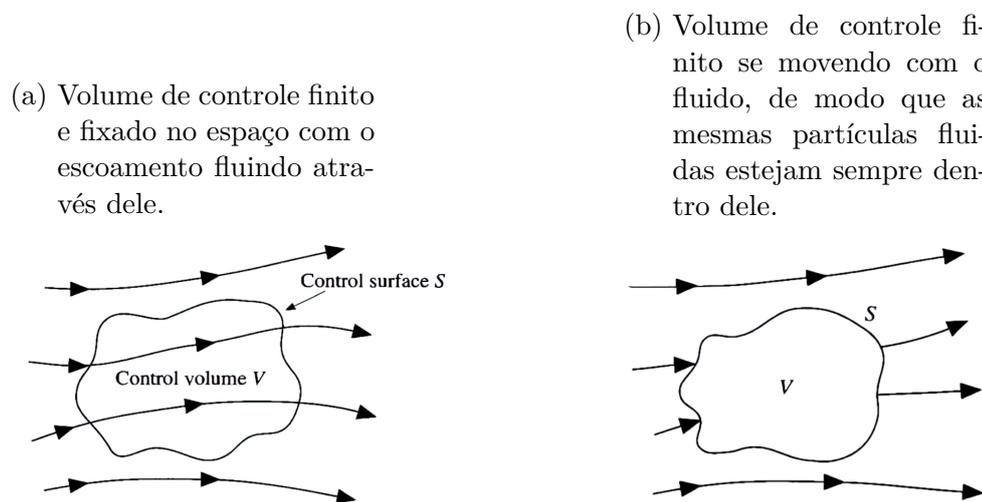
A particularidade da metodologia por trás destas resoluções, bem como a correta definição do modelo a ser utilizado não é uma questão trivial, visto que, ao contrário dos sólidos, que são de fáceis de se observar e definir, os fluidos são substâncias sem formato definido, de difícil (ou impossível) visualização e definição. Concomitantemente, se um sólido está em movimento translativo, a velocidade de todos os seus componentes é a mesma, na medida que um movimento fluido é caracterizado pela variação na velocidade de cada um dos componentes. Haja vista as propriedades supracitadas, torna-se imprescindível a construção de um modelo apropriado para o estudo fluidodinâmico. Para um

fluido contínuo, os modelos seguintes, descritos por [El-Sayed \(2016\)](#), podem ser utilizados para a visualização e aplicação dos princípios físicos fundamentais:

### 2.2.1 Volume de Controle Finito

Considerando um campo geral de escoamento, como representado pelas linhas de fluxo na Figura 2, é possível identificar, a partir do volume fechado, um volume de controle e uma superfície de controle ( $V$ ) e ( $S$ ), definida como a superfície fechada que envolve o volume. Dentre as formas de visualização do campo de escoamento, o volume de controle pode permanecer fixo no espaço, com o fluido se movendo através dele, como apresentado na Figura 2a (esquerda). Alternativamente, o volume de controle pode se mover no fluido de modo que as mesmas partículas fluidas estejam sempre dentro dele, como demonstrado na Figura 2b à direita. De qualquer forma, o volume de controle é uma região razoavelmente grande, porém finita, do escoamento. Os princípios físicos são aplicados ao fluido dentro do volume de controle e ao fluido que atravessa este volume (se o volume de controle permanecer fixo). Portanto, ao invés de observar o escoamento inteiro como um corpo único, o volume de controle possibilita a visualização do fluido apenas na própria região definida, conforme demonstrado por [Anderson \(1995\)](#).

Figura 2 – Modelos de escoamento através do método de volume de controle finito.  
(a) Volume de controle fixado; (b) Volume de controle em movimento.



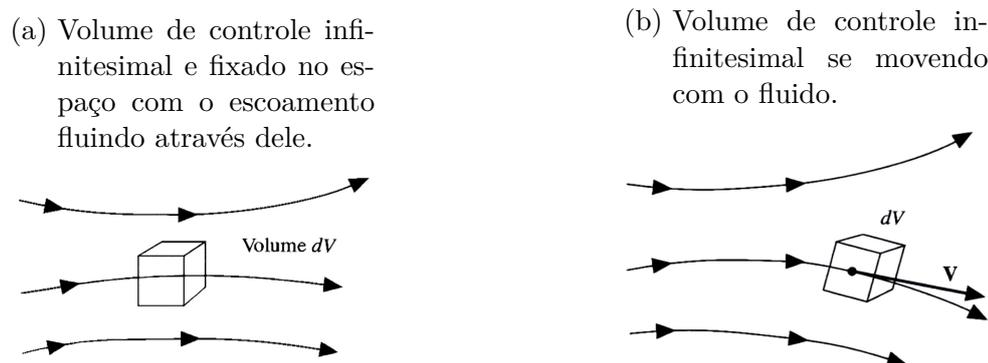
Fonte: [Anderson \(1995\)](#).

### 2.2.2 Elemento Fluido Infinitesimal

Considerando outro campo de escoamento, também representado pelas linhas de fluxo, e imaginando um elemento de volume infinitesimal, como ilustrado na Figura 3,

é possível aplicar os princípios físicos apenas para o elemento infinitesimal considerado, adotando que este elemento comporta uma grande quantidade de moléculas do fluido. Esta forma de consideração do campo, analogamente à discutida na seção anterior, viabiliza a aplicação das equações fundamentais, porém na forma diferencial parcial.

Figura 3 – Modelos de escoamento através do método de volume de controle infinitesimal. (a) Volume de controle infinitesimal fixado; (b) Volume de controle infinitesimal em movimento.



Fonte: Anderson (1995).

As representações de ambas as seções por meio de elementos, comportam o método de volumes finitos, amplamente utilizado na obtenção de soluções numéricas através da decomposição do domínio estudado em seus volumes de controle, bem como da formulação dos devidos equacionamentos e resolução dos sistemas algébricos obtidos. A metodologia padrão de resolução numérica através do Ansys Workbench geralmente utiliza-se da definição de um volume de controle finito e fixado no espaço e esta definição, quando pertencente a um conjunto aglomerado, é chamada de malha. Portanto, a definição da malha é uma etapa fundamental no desenvolvimento da discretização, e eventual solução de um estudo numérico.

## 3 Resolução Numérica

### 3.1 Ansys Fluent

O Fluent, software de CFD do Ansys, viabiliza a resolução dos problemas relacionados a escoamento, turbulência, transferência de calor, e reações. Todas estas aplicações serão utilizadas no presente trabalho, visto que o objetivo da simulação fluidodinâmica é determinar a transferência de calor ocorrente em um escoamento não-laminar sob a injeção de combustíveis em diversas fases do processo.

#### 3.1.1 Formulação Numérica da Continuidade e Momento

O software ANSYS Fluent, que será utilizado para o desenvolvimento numérico deste estudo, resolve as equações de conservação de massa e momento para todos os escoamentos, e para escoamentos na presença de transferência de calor ou compressibilidade, uma equação de conservação de energia também é solucionada. A equação de conservação de massa, ou continuidade, como descrita por ANSYS (2013a), é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

Portanto, a forma geral da equação de conservação de massa, válida para fluidos compressíveis e incompressíveis para geometrias bidimensionais axissimétricas, é como descrita por ANSYS (2013a)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}(\rho \mathbf{v}_x) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}(\rho \mathbf{v}_r) + \frac{\rho \mathbf{v}_r}{\mathbf{r}} = S_m \quad (3.2)$$

onde  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{r}$  representam as coordenadas axial e radial, e  $\mathbf{v}_x$  e  $\mathbf{v}_r$  são as velocidades axial e radial, respectivamente. O termo de fonte  $S_m$  (*Source*) representa a massa adicionada à fase contínua que ocorre, por exemplo, na vaporização de gotículas líquidas no meio, bem como em outros eventos similares.

As equações de conservação de momento também são relevantes na resolução do CFD, e para um plano de referência inercial, podem ser descritas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.3)$$

Onde  $p$  é a pressão estática,  $\bar{\bar{\tau}}$  é o tensor tensão de segunda ordem,  $\rho \vec{g}$  são as forças gravitacionais atuantes no corpo, e  $\vec{F}$  abrange as forças externas ao corpo. O tensor tensão  $\bar{\bar{\tau}}$  pode ser descrito por

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.4)$$

tal que o termo à direita caracteriza o efeito da dilatação do volume,  $\mu$  é a viscosidade molecular e  $I$ , o tensor unitário. Estas equações também podem ser estabelecidas para geometrias bidimensionais axissimétricas, adotando:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Formulação Numérica da Conservação de Energia

A primeira lei da termodinâmica enuncia, para o âmbito macroscópico, que a energia deve ser sempre conservada. Consequentemente, podemos descrever a seguinte equação de energia, como utilizada pelo CFD (ANSYS, 2013a):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{efet} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{efet} \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.6)$$

onde  $k_{efet}$  representa a condutividade efetiva, estabelecida por  $k + k_t$ , sendo  $k_t$  a condutividade térmica turbulenta, que para o software ANSYS, é definida a partir do modelo de turbulência adotado;  $\vec{J}_j$  é o fluxo de difusão das espécies reagentes  $j$ , que sempre se dá do ponto de maior para o ponto de menor concentração.

Os três primeiros termos nos parênteses à direita da Equação 3.6 representam a transferência de energia proveniente da condução, difusão de espécies e da dissipação viscosa, respectivamente.

### 3.1.3 Formulação Numérica do Transporte das Frações de Mistura

Sob a hipótese de difusividades iguais, as equações das espécies podem ser reduzidas a uma única equação para a fração de mistura,  $f$ . Os termos-fonte da reação nas equações de espécies se cancelam (já que os elementos são conservados nas reações químicas) e, portanto,  $f$  é uma quantidade conservada. Embora a hipótese de difusividades iguais possa ser problemática para fluxos laminares, é geralmente aceitável para fluxos turbilhonantes onde a convecção turbulenta prevalece sobre a difusão molecular. A equação média de fração de mistura (densidade-média) de Favre é dado por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left( \left( \frac{k_l}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \bar{f} \right) + S_{m2} + S_{user} \quad (3.7)$$

onde  $k_l$  é a condutividade térmica laminar da mistura,  $C_p$  é o calor específico da mistura,  $\sigma_t$  é o número de Prandtl e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta. O termo-fonte (*Source term*) representado por  $S_{m2}$  é devido exclusivamente à transferência de massa para a fase gasosa a partir de gotículas de combustível líquido, ou partículas reagindo (carvão, por exemplo), enquanto  $S_{user}$  é qualquer termo de fonte definido pelo usuário (ANSYS, 2022a).

### 3.1.4 Formulação Numérica do Modelo de Turbulência $k$ - $\epsilon$ *Realizable*

O modelo  $k_\epsilon$  *Realizable* difere do modelo padrão na medida que o modelo *Realizable* (realizável) contém uma formulação alternativa para a viscosidade turbulenta, e possui uma equação de transporte modificada para a taxa de dissipação " $\epsilon$ ", derivada de uma equação exata para o transporte da flutuação de vorticidade média quadrática (*mean-square*). O termo "realizável" significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas nas tensões de Reynolds, consistentes com a física de fluxos turbulentos.

Portanto, a equação de transporte para  $k$  no modelo *Realizable* permanece igual à Equação 2.8, do modelo padrão, enquanto a equação de transporte para  $\epsilon$  no modelo *Realizable* é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (3.8)$$

onde

$$C_1 = \max \left[ 0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\epsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.9)$$

É evidente que o termo de produção da nova equação de  $\epsilon$ , não mais envolve a produção de  $k$ , portanto, não contém o mesmo  $G_k$ , de geração de energia cinética turbulenta. "Termo de produção" é uma representação matemática da taxa de transferência de energia do fluxo médio para a turbulência.

Este modelo foi amplamente validado para uma vasta gama de fluxos, como descrito por [Ansys \(2022a\)](#), incluindo fluxos cisalhantes homogêneos rotativos, fluxos livres, incluindo jatos e camadas de mistura, fluxos de canal e de camada limite e fluxos separados. Para todos estes casos, o desempenho do modelo *Realizable* foi avaliado ser substancialmente melhor do que o do modelo padrão. Destacam-se ainda o fato de que o modelo realizável resolve a anomalia do jato circular, isto é, ele prevê a taxa de espalhamento para jatos axissimétricos, bem como para jatos planares.

## 3.2 Ansys Mechanical

O Ansys Mechanical possibilita a resolução de problemas estruturais a partir da análise de elementos finitos comportando, também, os equacionamentos necessários para a resolução de problemas de transferência de calor em regime transiente.

### 3.2.1 Elaboração Numérica da Condução e Convecção

O Ansys Mechanical realiza os equacionamentos de conservação de energia específicas para o volume de controle diferencial:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad (3.10)$$

onde  $\rho$  é a densidade,  $c$  é o calor específico,  $T$  é a temperatura  $T(x, y, z, t)$ ,  $t$  é o tempo, e os vetores são dados por:

$$\{L\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{array} \right\} = \text{vetor operador}$$

$$\{v\} = \left\{ \begin{array}{c} V_x \\ V_y \\ V_z \end{array} \right\} = \begin{array}{l} \text{vetor velocidade para} \\ \text{transferência de calor por} \\ \text{transferência de massa} \end{array}$$

$\{q\}$  = Vetor de fluxo de calor

$\ddot{q}$  = Taxa de geração de calor  
por unidade de volume

Os termos  $\{L\}T$  e  $\{L\}^T\{q\}$  também podem ser interpretados como  $\nabla T$  e  $\nabla \cdot \{q\}$  respectivamente, onde  $\nabla$  representa o operador de gradiente e  $\nabla \cdot$  representa o operador de divergência (ANSYS, 2013b). A lei de Fourier relaciona o fluxo de calor com os gradientes térmicos:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (3.11)$$

Combinando a Equação 3.10 e a Equação 3.11,

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\}T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\}T) + \ddot{q} \quad (3.12)$$

e expandindo, assumindo todos os efeitos no sistema Cartesiano global:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \quad (3.13)$$

$$\ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

## 4 Resolução Analítica

### 4.1 Problema Transiente

Na transferência de calor em regime transiente, a energia térmica transferida não é constante ao longo do tempo. A taxa de fluxo de calor altera-se continuamente, tanto por consequência da oscilação das temperaturas envolvidas no sistema, quanto por conta de mudanças nas propriedades termodinâmicas do meio. O presente problema de transferência de calor possui tanto soluções numéricas quanto analíticas, desde que certas condições sejam estabelecidas. A resolução analítica pode ser simplificada de modo que não se perca qualidade considerável nos resultados. Esta simplificação envolve a adoção de um sistema de transferência de calor unidimensional, que ocorre radialmente na geometria do sistema. Isto se dá pois o gradiente de temperatura é máximo na direção radial, de dentro para fora do motor, enquanto as variações de temperatura ao longo da seção longitudinal têm módulos menores. Esta simplificação compreende, também, a utilização de um modelo bidimensional, visto que a geometria é praticamente axissimétrica. O modelo bidimensional é usado tanto na resolução analítica quanto na numérica.

Para corpos cuja distribuição de temperatura interna é idealizadamente uniforme durante um processo de transferência de calor, ou seja, a temperatura destes corpos é unicamente função do tempo  $T = T(t)$ , a análise de sistemas aglomerados pode ser utilizada. Segundo Çengel (2003), Peles (2017), esta aproximação, apesar de conveniente, necessita seguir a um rígido critério de aplicabilidade, já que para números de Biot acima de 0,1, as soluções por este método apresentam divergências significativas.

### 4.2 Adimensionalização

A formulação de problemas para determinação de distribuição de temperatura transiente e unidimensional para cilindros  $T(r, t)_{cil}$  resulta em uma equação diferencial parcial, cuja solução envolve séries infinitas. Entretanto, a solução envolve muitos parâmetros físicos, que tornam as representações gráficas e tabulares muito complexas. Portanto, com o intuito de reduzir o número de parâmetros e tornar os resultados mais facilmente observáveis, Çengel (2003) explicita que é possível transformar grande parte dessas variá-

veis em variáveis adimensionais, como as seguintes:

$$\text{Temperatura adimensional:} \quad \theta(r, t) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$\text{Distância adimensional até o centro:} \quad X = \frac{r}{r_0}$$

$$\text{Coef. de transferência de calor adimensional:} \quad Bi = \frac{h \cdot r_0}{k} \quad (\text{Número de Biot})$$

$$\text{Tempo adimensional:} \quad \tau = \frac{\alpha t}{r_0^2} \quad (\text{Número de Fourier})$$

Estas adimensionalizações permitem que a temperatura seja apresentada em termos de apenas três parâmetros:  $X$ ,  $Bi$  e  $\tau$ . A solução descrita pode ser resolvida com exatidão, porém apresenta um problema com séries infinitas, que são de difícil manipulação, contudo, os termos da solução convergem rapidamente conforme o tempo aumenta, e para  $\tau > 0,2$ , é possível manter o primeiro termo, descartando todos os outros termos da série, e obter um resultado com erro abaixo de 2 por cento. Haja vista a importância da obtenção de resultados com  $\tau > 0,2$ , é conveniente expressar esta solução com uma aproximação de termo único, dada por

$$\theta(r, t) = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0(\lambda_1 \cdot r/r_0), \quad \tau > 0,2 \quad (4.1)$$

onde as constantes  $A_1$  e  $\lambda_1$  são funções do número de Biot e a função  $J_0$  é uma função de Bessel de ordem nula do primeiro tipo, cujos valores são tabulares. Sabendo que  $\cos(0) = J_0(0) = 1$  e que o limite de  $(\sin x)/x$  também é 1, as relações podem ser simplificadas para o centro do cilindro:

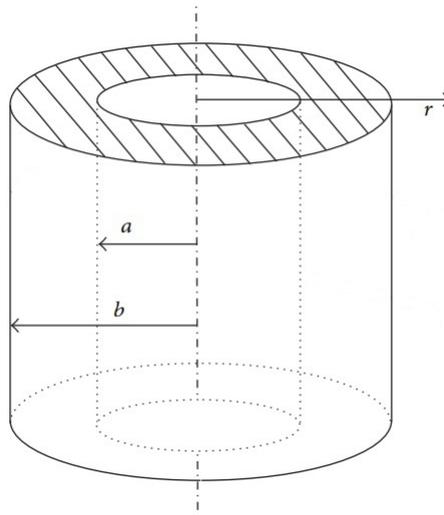
$$\theta_0 = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad (4.2)$$

Uma vez que o número de Biot é conhecido, as relações acima descritas podem ser utilizadas para determinar a temperatura em qualquer local no meio. A determinação correta das constantes  $A_1$  e  $\lambda_1$  frequentemente requer interpolações dos valores tabelados. A distribuição de temperatura em regime transiente para cilindros longos foi definida por M.P. Heisler, nas chamadas Cartas de Heisler. Estas cartas podem ser úteis para o entendimento do comportamento das cargas térmicas em regime transiente em cilindros, segundo Çengel (2003).

### 4.3 Validação Analítica

Para a finalidade de validação, e entendendo as limitações da resolução pela análise de sistemas aglomerados, previamente descrita, torna-se viável realizar uma análise a partir da lei de Fourier para condução de calor, que pode ser facilmente adotada para cilindros, e cujas condições de solução não interferem significativamente nos resultados obtidos, tais quais a ausência de geração de calor na camada cilíndrica, condutividade térmica constante e transferência unidimensional na direção radial. Esta solução pode ser realizada a partir da Equação 2.12 de Fourier, reduzida à forma diferencial, que deriva a temperatura em relação à posição, mas não aponta a transiência do problema podendo, portanto, ser utilizada somente para o caso de operação permanente do motor.

Figura 4 – Representação geométrica do cilindro e seus raios utilizados na resolução analítica.



Fonte: Tu e Lee (2015).

A adaptação da lei de Fourier para coordenadas cilíndricas pode ser descrita por

$$\dot{Q}_{\text{cond, cil}} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (W) \quad (4.3)$$

onde, para este caso,  $A = 2\pi rL$  é a área de transferência de calor para cada posição  $r$ . Visto que  $A$  é função de  $r$ , portanto, varia na direção da própria transferência de calor. Separando as variáveis na equação acima e integrando de  $r = r_1$ , onde  $T(r_1) = T_1$  a  $r = r_2$  onde  $T(r_2) = T_2$ , temos

$$\int_{r=r_a}^{r_b} \frac{\dot{Q}_{\text{cond, cil}}}{A} dr = - \int_{T=T_a}^{T_b} k dT \quad (4.4)$$

Substituindo  $A = 2\pi rL$  e realizando as integrações, obtemos

$$\dot{Q}_{\text{cond, cil}} = 2\pi Lk \frac{T_a - T_b}{\ln(r_b/r_a)} \quad (W) \quad (4.5)$$

e tendo  $\dot{Q}_{\text{cond, cil}} = \text{constante}$ , podemos reescrever a equação como

$$\dot{Q}_{\text{cond, cil}} = \frac{T_a - T_b}{R_{\text{cil}}} \quad (4.6)$$

onde

$$\mathbf{r}_{\text{cil}} = \frac{\ln(r_b/r_a)}{2\pi Lk} = \frac{\ln(\text{raio externo/raio interno})}{2\pi \times L(\text{comprimento}) \times k(\text{condutividade térmica})} \quad (4.7)$$

é a resistência térmica à condução de calor da camada, ou resistência à condução, como exposto por [Ghajar e Cengel \(2014\)](#), e representa o problema permanente em coordenadas cilíndricas.

A adoção do regime permanente na resolução analítica é adequada, pois é nesta condição que ocorre a máxima requisição estrutural proveniente das cargas térmicas, visto que as temperaturas serão mais elevadas no período em que o motor opera neste regime. Consequentemente, um resultado satisfatório no período de maior estresse térmico indica com clareza que as condições transientes anterior e posterior à permanente, também estariam dentro do envelope admissível. Caso o estudo numérico ou a validação analítica indiquem possibilidade de falha, de acordo com as propriedades físicas dos materiais, um estudo analítico transiente também será realizado, com o intuito de determinar o ponto onde ocorre a requisição térmica superior aos valores máximos que a estrutura poderia suportar.

Parte II

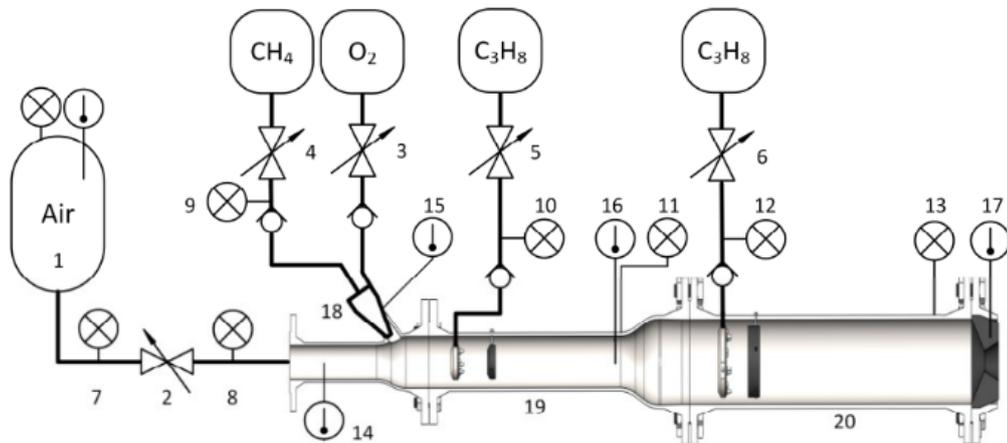
Aspectos Gerais

## 5 Aspectos Gerais

### 5.1 Motor Ramjet

Os motores ramjet, por definição, utilizam o conceito de *Ram air*, onde o movimento da aeronave em relação ao ar externo faz com que o ar seja forçado contra a entrada do motor. Este efeito aumenta o fluxo de ar para o motor, que por sua vez, aumenta o empuxo bruto. Entretanto, o motor da bancada de testes não se movimenta significativamente em relação ao meio externo, fazendo com que este conceito não seja aplicado a ele. Por conta disso o motor de laboratório conta com um compressor que fornece ar comprimido a 10 bar a um tanque de 5 m<sup>3</sup> que, juntamente com a seção do aquecedor, irá simular o escoamento ocorrente em uma operação nominal de voo. O esquemático da Figura 5 demonstra a operação do motor de testes, desde a aplicação do tanque de ar comprimido, até a injeção dos combustíveis metano (CH<sub>4</sub>) e propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), e do oxidante (O<sub>2</sub>) no sistema.

Figura 5 – Esquemático do sistema.



Fonte: Shynkarenko e Gontijo (2021).

O sistema conta com um compressor, que proverá o tanque com ar comprimido, tubulações, válvulas manuais de controle de fluxo, bem como o sistema de ignição, a seção do aquecedor e a câmara de combustão com um bocal convergente-divergente na extremidade. É possível observar cada etapa do processo geral. A Figura 6 esquematiza os processos em ordem cronológica, partindo do compressor até a saída, no bocal. A bancada também adota sensores de temperatura e pressão espalhados em seções importantes do motor para a aferição das propriedades de estagnação ao longo do sistema durante os testes.

Figura 6 – Esquemático da tubulação conectada da bancada de teste.



Fonte: Freitas e Shynkarenko (2020).

## 5.2 Parâmetros de Funcionamento

Para a simulação, foi adotado um modelo de combustão sem pré-mistura, onde os reagentes entram na zona de reação a partir de dois fluxos distintos, com um modelo de chama de difusão, a partir do modelo adotado por Cerbino e Shynkarenko (2022). As condições de contorno do ANSYS Fluent aplicadas nos limites do domínio utilizam entradas de fluxo de massa (*mass flow inlet*) tanto para a entrada do aquecedor, quanto para as entradas dos injetores, bem como uma saída de pressão (*pressure outlet*) ao final do bocal. Estas e outras definições estabelecidas serão aprofundadas na seção 6.2.

Para o Fluent, também foi definido o modelo de turbulência  $k - \epsilon$  *Realizable*, cujo modelo de função de parede escalável comporta os efeitos de viscosidade e interação com as paredes; também tendo o modelo de Cerbino e Shynkarenko (2022) como referência, foi adotado um sistema de *high-order term relaxation*.

A Tabela 1 apresenta três casos de regime de voo já validados através de simulações anteriores, indicando o número de Mach simulado, a altitude, o impulso específico do motor  $I_{sp}$ , a temperatura ao final do aquecedor  $T_h$  e a temperatura na saída da câmara de combustão  $T_{max}$  obtidos analiticamente, para cada caso estudado.

Tabela 1 – Regimes de voo validados para simulação.

Características do regime						
Caso	Mach	Altitude (km)	$I_{sp}$	$T_h$ (K)	$T_{max}$ (K)	
01	2,5	14	2133	483	1869	
02	2,75	16	1974	537,4	2009	
03	3,0	18	2009	597	2131	

Fonte: Cerbino e Shynkarenko (2022) (Adaptado).

### 5.3 Conjugação

A conjugação, ou seja, união na simulação numérica, infere que tanto o volume de controle fluido quanto a estrutura sólida são contemplados no mesmo ambiente de simulação, com a solução para ambos os componentes sendo realizada simultaneamente. No presente caso, não foi necessária a definição de uma interface de transferência de dados no Fluent, visto que a malha gerada é conforme (uma malha de simulação conforme é tal que cada face da malha na parede de um material possui uma face adjacente correspondente, no outro material, onde ocorre a transferência de dados).

A simulação conjugada possibilita a identificação da transferência de calor do fluido para o sólido, mas não comporta os efeitos da inércia térmica gerada pela estrutura do motor na realização da combustão. Portanto, entre os dois casos numéricos estudados, uma eventual divergência termodinâmica se daria de modo mais acentuado na fase transiente do problema, em virtude de que o regime permanente, para ambos os casos, não sofreria os efeitos oriundos da capacidade térmica volumétrica do motor.

### 5.4 Acoplamento Bidirecional (*Two-Way Coupling*)

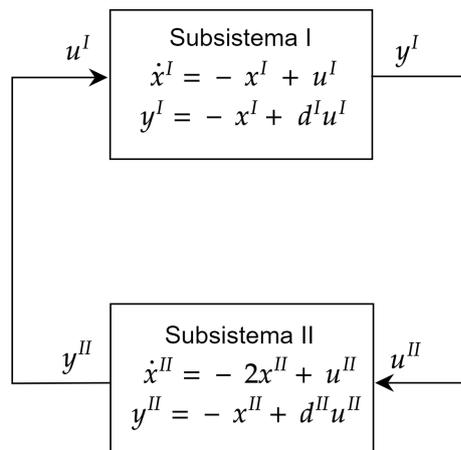
O acoplamento nas simulações serve diversos propósitos, desde a reutilização de simulações já construídas, facilitação da definição de processos complexos, até a configuração de simulações paralelas e de vários níveis (*multi-level*) e a união de softwares de especialidades distintas em um propósito comum.

Existem dois principais tipos de análise iterativa acoplada: por iteração de equações de saída *output* e por iteração da etapa de integração global (*iteration of global integration step*). Segundo Kubler e Schiehlen (2000), ambas as variantes levam a um sistema de equações algébricas não lineares para cada passo de tempo global que deve ser resolvido iterativamente.

Para o cenário estudado, a simulação estrutural utiliza o solucionador Mechanical, através do sistema de análise *Thermal Transient*, para calcular o comportamento do motor em relação às cargas térmicas. Enquanto isso, a seção fluida utiliza o solucionador Fluent, para realizar os cálculos relacionados ao escoamento no volume de controle. A superfície externa do motor não é calculada através do Fluent visto que, para casos simples, o ambiente Mechanical viabiliza a definição de convecção livre. O acoplamento entre ambos os subsistemas de análise se dá a partir do componente *System Coupling*, que conecta as seções de *setup* de ambos os subsistemas. Esta conexão permite que as variáveis estudadas transladem entre os dois módulos para cada iteração, possibilitando que as interações entre fluido e sólido sejam descritas.

A estabilidade em simulações acopladas pode ser obtida desde que não existam *loops* algébricos entre os subsistemas estudados. Caso contrário, a instabilidade entre os módulos pode ocorrer devido à dinâmica da extrapolação de entradas (*inputs*) desconhecidas nas equações de saída (*outputs*).

Figura 7 – Exemplo de loop algébrico entre dois subsistemas.



Fonte: Kubler e Schiehlen (2000) (Adaptado).

A Figura 7 ilustra um exemplo de *loop* algébrico entre dois subsistemas. Em ambos os subsistemas, a saída é explicitamente dependente da entrada, como elucidado por Kubler e Schiehlen (2000), levando a uma relação algébrica entre eles. Se  $d^I = 0$  ou  $d^{II} = 0$ , o *loop* algébrico é eliminado.

## 5.5 Malha de Simulação

O desenvolvimento da malha é parte fundamental da simulação numérica, visto que comporta um dos aspectos mais importantes na obtenção de resultados precisos de simulações por análise de elementos finitos e dinâmica dos fluidos computacional (DASSAULT SYSTEMES, 2022). Portanto a qualidade da malha, incluindo a sua distribuição e resolução, afeta diretamente a precisão dos resultados da simulação.

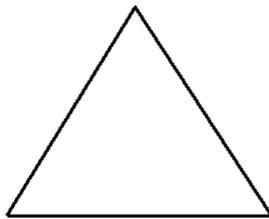
### 5.5.1 Skewness

A assimetria (*skewness*) da malha é uma das principais medidas de qualidade para uma malha, determinando a proximidade em que uma face ou célula está da equilateralidade. Partindo desta definição de assimetria, um valor de 0 indica uma célula equilátera,

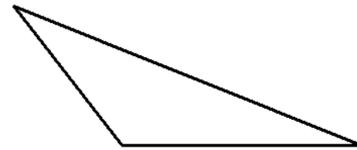
considerada ideal, enquanto um valor de 1 aponta células completamente degeneradas. Estas são, segundo [Ansys \(2008\)](#), caracterizadas por nós quase coplanares (ou colineares, para duas dimensões).

Figura 8 – Relação da simetria de uma única face da malha de simulação numérica.

(a) elemento de malha equi-  
látero:  $skewness = 0$



(b) Elemento de malha assi-  
métrico:  $skewness > 0$



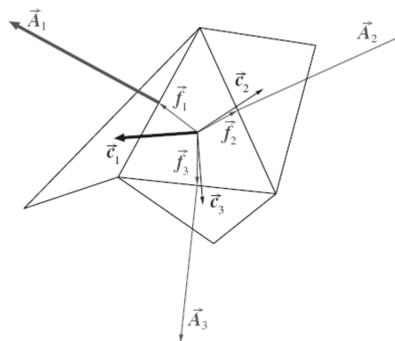
Fonte: [Ansys \(2008\)](#) (Adaptado).

Portanto, células e faces com grande assimetria ( $skewness$ ) são desvantajosas para as simulações numéricas, visto que as equações sendo solucionadas geralmente assumem células relativamente equiláteras/equiangulares. Evidentemente a região no caso da simulação onde ocorre a assimetria também é um fator notável na determinação da qualidade geral da malha, dada a variabilidade na importância de cada seção para o desenvolvimento numérico da solução.

### 5.5.2 Orthogonal Quality

A qualidade ortogonal ( $orthogonal\ quality$ ) das células é calculada através do vetor normal à face,  $\vec{A}_i$  para cada face, do vetor do centróide da célula até o centróide de cada célula adjacente,  $\vec{c}_i$ ; e do vetor do centróide da célula até cada face,  $\vec{f}_i$ .

Figura 9 – Vetores utilizados no cálculo da qualidade ortogonal de uma célula.



Fonte: [Ansys \(2022b\)](#) (Adaptado).

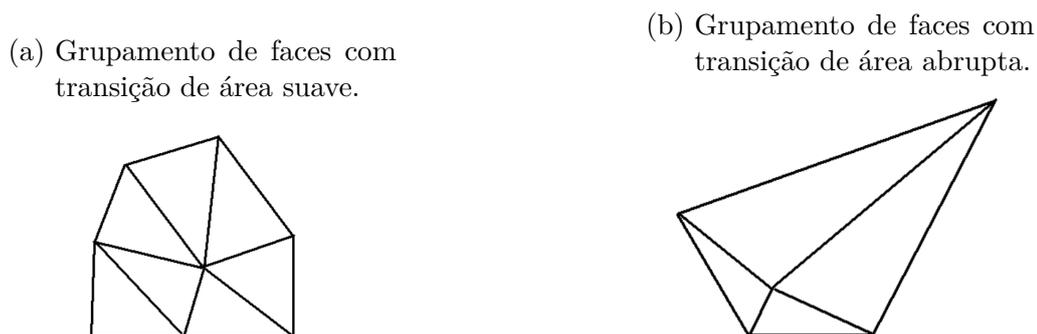
Para cada uma das faces, os cossenos do ângulo entre  $\vec{A}_i$  e  $\vec{c}_i$ , e entre  $\vec{A}_i$  e  $\vec{f}_i$ , são calculados. O menor valor de cosseno obtido é adotado como a ortogonalidade da célula (ANSYS, 2022b). Consequentemente, é perceptível que a qualidade ortogonal da célula é indiretamente relacionada com sua assimetria (*skewness*), discutida anteriormente.

Uma malha de células com elevada qualidade ortogonal viabiliza que as variações de propriedades físicas, como velocidade e pressão, sejam representadas de forma precisa. Essa precisão é particularmente importante em simulações fluidodinâmicas, onde o comportamento do fluido é diretamente modelado através destas variáveis. A qualidade ortogonal, paralelamente às outras características de malha discutidas, também assegura que as equações pertinentes sejam resolvidas de forma estável, restringindo problemas de convergência e erros numéricos.

### 5.5.3 Smoothness

A suavidade (*smoothness*) é o termo que relaciona a uniformidade na distribuição de células adjacentes, expressando que, para malhas de alta qualidade, a variação de tamanho entre uma face ou célula para a próxima deve ser gradual. Diferenças abruptas no tamanho entre células ou faces adjacentes resultam em uma malha computacional falha, uma vez que as equações diferenciais que nelas serão solucionadas assumem a suavidade no crescimento ou diminuição de seu tamanho (ANSYS, 2008).

Figura 10 – Relação da suavidade entre faces em uma malha de simulação numérica.



Fonte: Ansys (2008) (Adaptado).

O desenvolvimento do caso estudado esclarecerá a malha gerada para a simulação numérica, tanto do caso conjugado quanto do acoplado. Será possível observar uma mudança sutil entre ambas as malhas, principalmente na Razão de Aspecto (*Aspect Ratio*), em virtude da malha de simulação acoplada ter sido gerada com o objetivo de melhor resolução radial, sem geração excessiva de elementos. Portanto, a razão de aspecto da malha no acoplamento é maior, enquanto a malha do caso conjugado adota, idealmente, elementos equiláteros e uniformes.

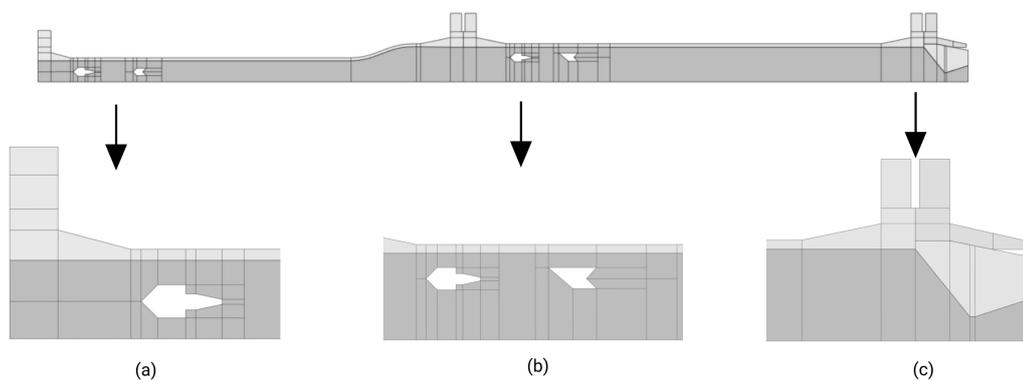
## Parte III

### Desenvolvimento

## 6 Desenvolvimento

A geometria do motor ramjet foi preparada para a simulação numérica através de uma alteração da geometria para sua equivalência pseudo-bidimensional, para a simulação acoplada, e da simplificação de características geométricas que não são fundamentais para a simulação e poderiam gerar inconsistências na geração da malha (orifícios para os sensores, parafusos, entre outros). O caso conjugado, por sua vez, trata toda a geometria de forma única e bidimensional axissimétrica, no ambiente Fluent, onde é possível diferenciar os componentes sólidos do volume de controle, viabilizando a interação de transferência de calor do fluido, onde de fato ocorre a combustão, para o sólido. A Figura 11 ilustra o motor completo, em sua versão simplificada, e apresenta nas três imagens inferiores, as suas respectivas seções ampliadas e com melhor definição.

Figura 11 – Geometria de todo o motor, com as seções: (a) *Inlet* e injetor; (b) Segundo injetor e *flame holder*; (c) Bocal.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 12 abaixo, demonstra a parte posterior do motor simulado, também com as simplificações já realizadas. Por se tratar da definição geométrica de simulações acoplada e conjugada, tanto a estrutura quanto o volume de controle interno foram abordados. A característica de pseudo-bidimensionalidade se dá visto que a simulação acoplada necessita de superfícies de transferência de dados entre o regime sólido e fluido. Esta superfície foi obtida através de um *extrude* da geometria bidimensional, e possui um milímetro de profundidade, sendo apenas o suficiente para a geração da superfície onde ocorrerá a troca de dados entre os ambientes. A simulação conjugada, como explicado anteriormente, é bidimensional e possui um eixo para a definição axissimétrica, enquanto a simulação acoplada, pseudo-bidimensional, possui uma superfície de simetria planar.

Figura 12 – Geometria da seção posterior do motor (câmara de combustão e bocal) com injetor e *flameholder*.



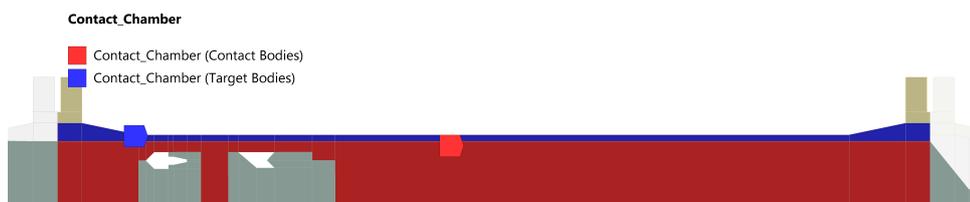
Fonte: Autorial Própria.

A figura 12 ilustra tanto a parede da câmara de combustão (bege), o bocal (azul) e o suporte (verde) quanto o volume interno do motor (rosa) e já conta com as divisões que serão utilizadas para a definição da malha. Portanto, para a simulação acoplada, quando a geometria for levada aos ambientes de simulação, as seções que não serão tratadas no respectivo subsistema serão suprimidas, para ambos os casos. Por exemplo: quando exportado ao Fluent, a geometria da estrutura da câmara de combustão será suprimida durante a formação da malha de simulação; este método é adotado reciprocamente no ambiente Mechanical, com a supressão do volume de controle. A geometria foi criada integralmente, com todas as suas seções devidamente conectadas.

Após as definições geométricas, é necessário inserir algumas condições essenciais para a simulação, como as interfaces de contato entre sólidos e fluidos (ou entre sólidos com diferentes propriedades físicas), a malha de simulação, e as condições de contorno de cada simulação.

A Figura 13 demonstra como os contatos foram realizados no Ansys. Estes contatos foram apontados tanto para as seções fluido/sólido, quanto para seções sólido/sólido onde há diferença de material, por exemplo, no bocal, que conta com o volume de controle interno, o bocal (grafite) e o suporte (aço).

Figura 13 – Ilustração do contato entre as superfícies da seção da câmara de combustão do motor com seu volume interno.



Fonte: Autorial Própria.

A geometria pôde, então, ser exportada para o Fluent para a realização da simulação conjugada, enquanto para a simulação acoplada, após as definições dos parâmetros

iniciais da simulação, a geometria do motor foi ramificada entre o ambiente de CFD e o ambiente Mechanical.

## 6.1 Parâmetros Gerais da Simulação Conjugada

Após a definição geométrica realizada no SpaceClaim o modelo foi levado ao ambiente de *meshing*, onde a malha de simulação foi gerada para o motor e seu volume de controle interno. As definições das *named surfaces* são análogas, tanto para a simulação conjugada quanto para a simulação acoplada, e foram definidas na seção 6.2, exceto para a definição da superfície "*Symmetry*", que para a simulação conjugada, foi denominada "*axis*".

Após a geração da malha do problema e definição das *Named Surfaces*, o problema foi integralmente levado ao Ansys Fluent, onde foram definidas as condições de contorno para cada superfície, também explicitadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados quantitativos da malha e condições de contorno adotadas para a simulação conjugada.

Malha			Condição de Contorno			
Região	Nós	Elementos	<i>Mass Flow Inlets</i> [kg/s]		<i>Pressure Outlet</i> [Pa]	
Fluido	365.102	361.229	<i>Inlet</i>	Injetor 1	Injetor 2	<i>Outlet</i>
Estrutura	83.198	82.844				
Total	448.300	444.073	1,26e-3	8,84e-6	2,79e-5	-9,8e4

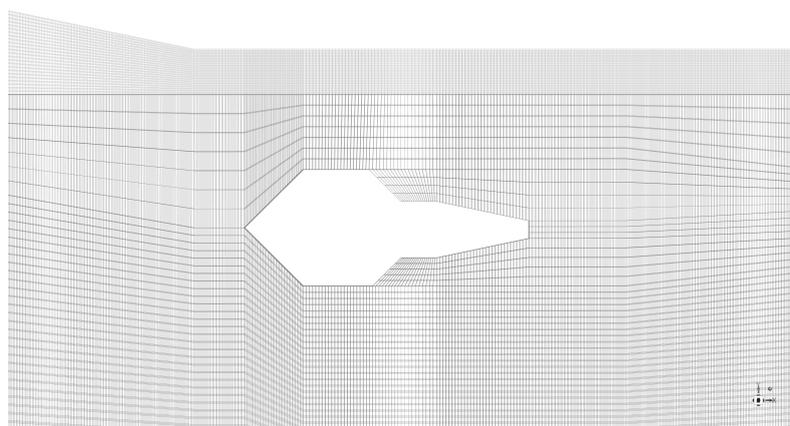
Fonte: Autoria Própria.

A malha, cujo número de nós e elementos é apresentado na Tabela 2, foi gerada de modo a atender aos parâmetros de qualidade ortogonal, simetria e suavidade percorridos nas seções anteriores, e possui, como retirado do Ansys *Meshing*, qualidade ortogonal média de 0,998, assimetria (*skewness*) média de 0,011 e qualidade de elemento (*element quality*) média de 0,990.

As Figuras 14, 15 e 16 ilustram, respectivamente, o injetor, porta-chamas e bocal da malha pseudo-bidimensional, e a Figura 17, o motor e seu volume de controle interno, como trazido para o Fluent, com a definição de simetria já realizada.

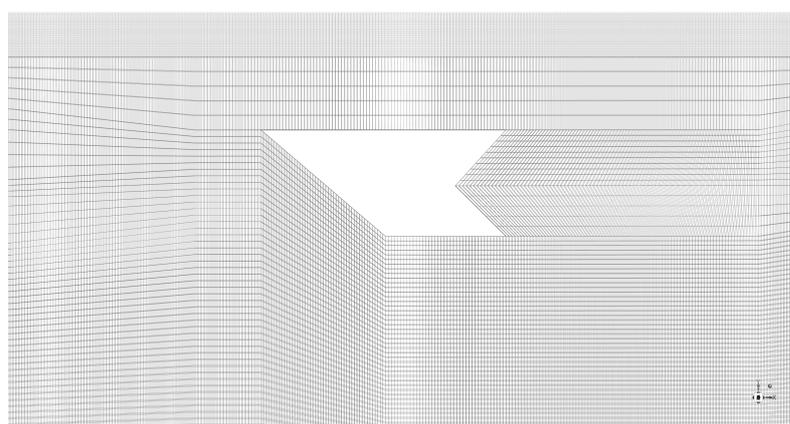
A malha gerada para a simulação conjugada está disposta a seguir:

Figura 14 – Malha da simulação conjugada para o primeiro injetor.



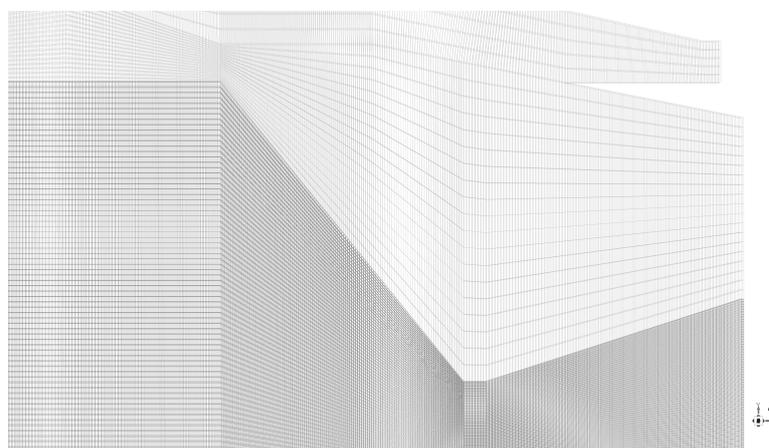
Fonte: Autoria Própria.

Figura 15 – Malha da simulação conjugada para o porta-chamas.



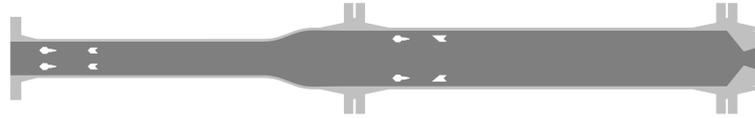
Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Malha da simulação conjugada na região do bocal.



Fonte: Autoria Própria.

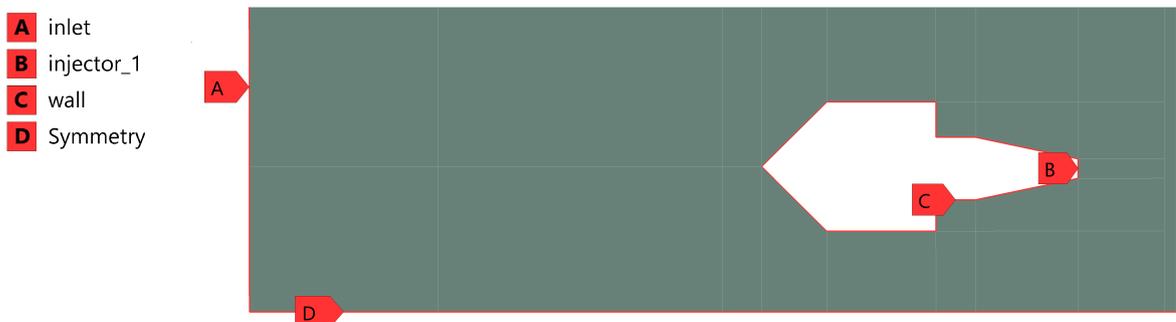
Figura 17 – Geometria completa do sistema simulado no Fluent.



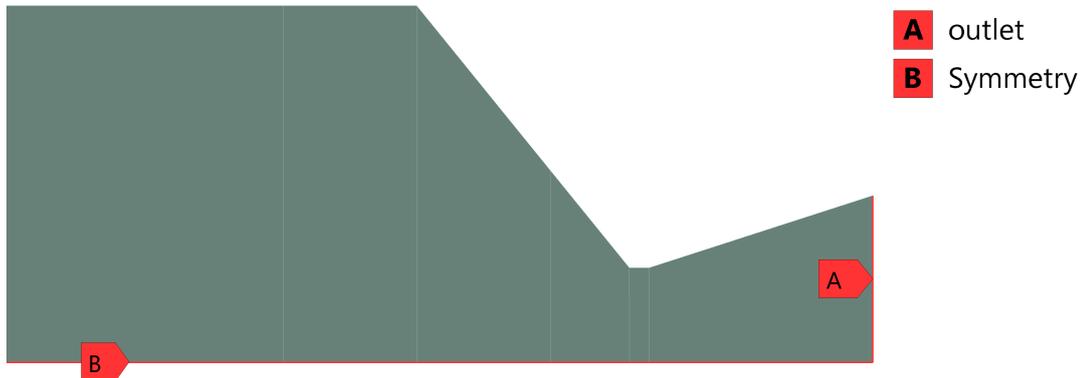
Fonte: Autoria Própria.

## 6.2 Parâmetros do Volume de Controle na Simulação Acoplada

Na simulação acoplada, a progressão do modelo de simulação se deu para o ambiente de pré processamento do CFD, onde as superfícies nomeadas (*named surfaces*) foram identificadas, para posterior definição das condições de contorno e determinações de funcionamento geral do escoamento. As Figuras 18 e 19 ilustram as superfícies nomeadas na seção de entrada e saída do escoamento.

Figura 18 – Definição de *inlet*, *injector*, *wall* e *symmetry* na entrada do volume de controle e no primeiro injetor.

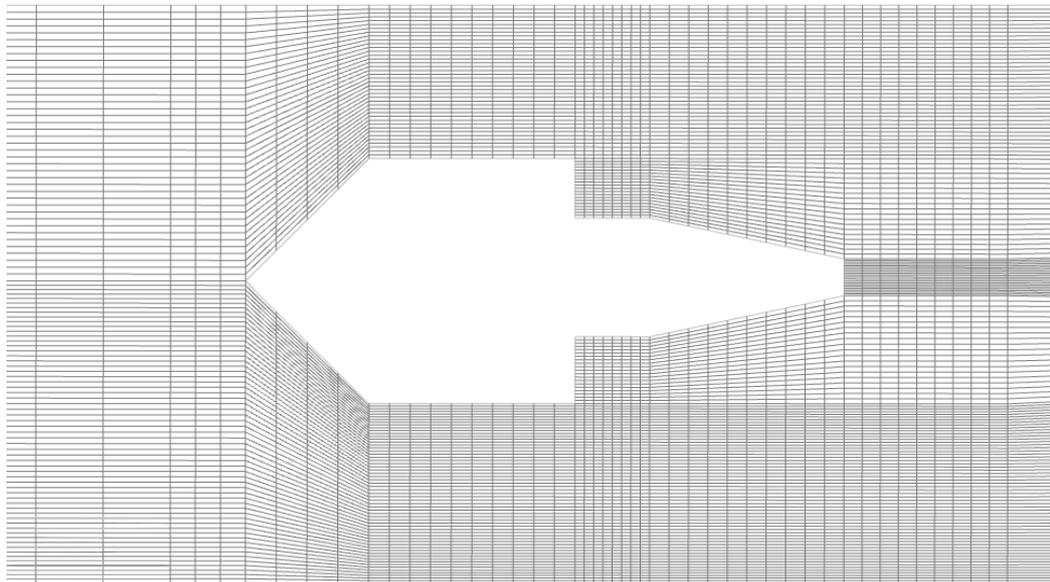
Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 – Definição de *outlet* e *symmetry* na saída do volume de controle.

Fonte: Autoria Própria.

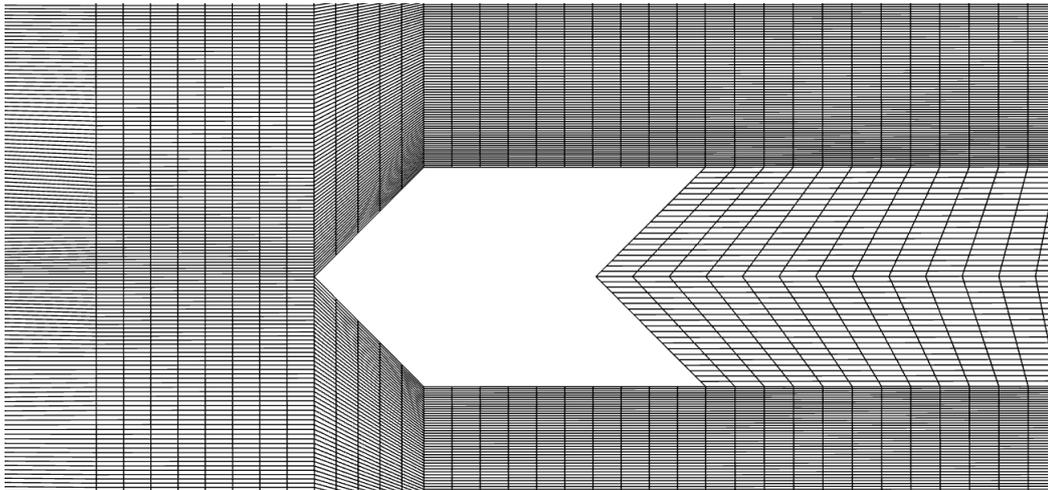
Também é possível observar, nas Figuras acima, as linhas de geometria (brancas) que serão utilizadas para a formulação da malha de simulação. A malha também foi obtida e é disponibilizada nas Figuras 20 e 21, abaixo.

Figura 20 – Malha da simulação acoplada na seção do primeiro injetor.



Fonte: Autoria Própria.

A malha gerada acima incorpora um alto grau de resolução radial, sendo otimizada em relação à camada limite para a capacidade de processamento do sistema que for realizar a simulação. A análise desta malha indica que foram criados 116.071 nós e 115.170 elementos, apenas na geometria do volume de controle.

Figura 21 – Malha da simulação acoplada na seção do primeiro *flame holder*.

Fonte: Autoria Própria.

### 6.3 Parâmetros do Motor na Simulação Acoplada

Após as primeiras definições da simulação no Ansys Fluent, as propriedades do motor foram estabelecidas, no Mechanical. Primeiramente, foram identificadas as zonas onde as condições de contorno se dariam, desde as superfícies externas, na presença de convecção livre definida no próprio Transient Thermal, até as zonas cujas condições de contorno participariam do acoplamento da simulação. As Figuras 22, 23 e 24 ilustram como estas propriedades foram assinaladas.

Figura 22 – Indicação das condições de contorno de convecção e de acoplamento para a seção do aquecedor.



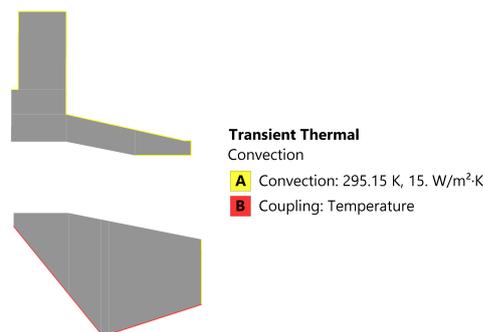
Fonte: Autoria Própria.

Figura 23 – Indicação das condições de contorno de convecção e de acoplamento para a seção da câmara de combustão.



Fonte: Autoria Própria.

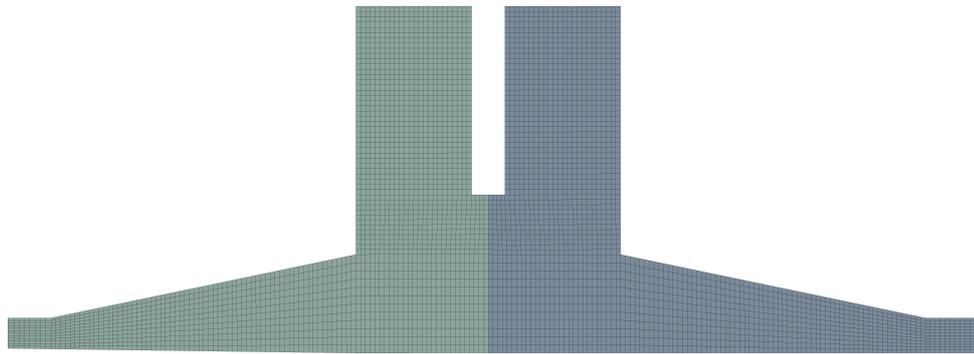
Figura 24 – Indicação das condições de contorno de convecção e de acoplamento para a seção do bocal e do suporte.



Fonte: Autoria Própria.

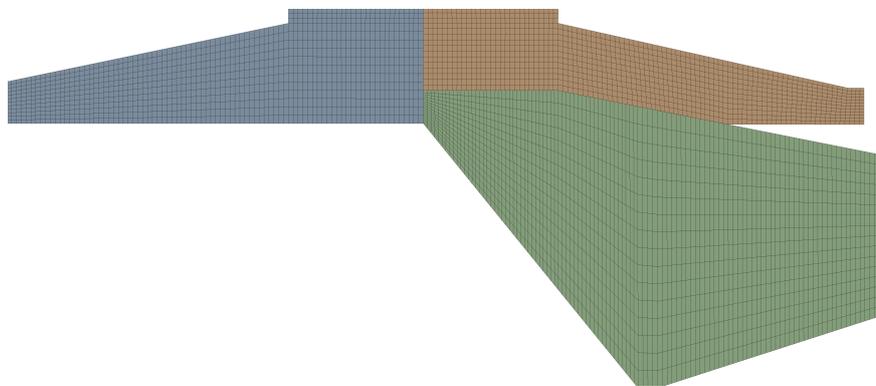
Novamente, após a designação das condições de contorno específicas às superfícies, a malha foi gerada para os componentes estruturais da simulação. A malha da estrutura foi realizada com as opções de *Face Meshing* e *Refinement*, e proveram resultados aceitáveis para a finalidade desta simulação, visto que a geometria do motor foi simplificada nos passos anteriores para a remoção de características que influenciariam negativamente o desenvolvimento da malha. A análise desta malha indica a presença de 33.236 nós e 30.912 elementos. Estes valores são menores do que os obtidos para o volume de controle, visto que o volume de controle possui uma área total consideravelmente maior, porém a qualidade de ambas as malhas é razoavelmente próxima.

Figura 25 – Malha da estrutura entre a seção do aquecedor e da câmara de combustão.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 26 – Malha da seção do bocal convergente-divergente.



Fonte: Autoria Própria.

Finalmente, após a determinação de todas as condições de contorno e malhas, tanto da região sólida quanto fluida do sistema, nas condições específicas para cada ambiente e acopladas, a simulação pode prosseguir. Evidentemente resta, para a simulação acoplada, designar quais variáveis serão acopladas e especificar a interface de acoplamento entre ambos os ambientes, bem como apontar o tamanho do passo que irá definir o *step size* do ambiente Mechanical, e sobrepor o *step size* do Fluent. Também é necessário especificar o número mínimo e máximo de iterações entre cada passo de troca de dados através do acoplamento, possibilitando que os dados de ambos os ambientes interajam e, eventualmente, convirjam.

## 6.4 Configuração

O setup de uma simulação abrange a especificação de cada condição de contorno, os modelos de resolução que serão adotados pelo software, bem como os métodos e controles utilizados, até a inicialização e iteração do caso estudado. Para o presente estudo conjugado, nas configurações gerais, a malha de simulação foi checada, sendo realizado um reporte de qualidade; o solucionador definido foi (*pressure-based*), necessário para o

modelo de combustão sem pré-mistura, com formulação de velocidade absoluta, tempo transiente e espaço 2D axissimétrico; posteriormente, após as iterações da fase inicial transiente do problema, foram realizadas iterações também no regime permanente. Na seção de modelos, a equação de energia foi habilitada; a viscosidade foi definida pelo modelo  $k - \epsilon$  *Realizable*, como discutido nas seções anteriores; o modelo de ordenadas discretas (*Discrete Ordinates*) foi utilizado para descrever a radiação e, por fim, foi gerada uma tabela PDF, que incorpora as espécies utilizadas na combustão sem pré-mistura, também definida, contendo o propano utilizado nos injetores e a mistura rudimentar dos principais gases componentes do ar atmosférico (nitrogênio e oxigênio), em suas respectivas frações.

Nos materiais definidos para o problema conjugado estão o aço (*steel 304L*), o grafite (*graphite-pure*), e a tabela PDF dos gases citada no parágrafo anterior. Cada material foi indicado no sistema, através das seleções nomeadas realizadas no ambiente de *meshing*, onde a geometria sólida foi segmentada de acordo com o material de cada seção.

Os métodos de solução estão dispostos na Tabela 3, com a utilização do algoritmo *Coupled*, que soluciona as equações de continuidade de momento e *pressure-based* juntas. Também segundo ANSYS (2009), o acoplamento implícito completo é obtido a partir de uma discretização implícita dos termos do gradiente de pressão nas equações de momento e de uma discretização implícita do fluxo mássico de face, incluindo os termos de dissipação de pressão de Rhie-Chow. A discretização temporal *Second Order Implicit* foi utilizada na formulação transiente, com a opção de *High Order Term Relaxation* habilitada.

Posteriormente, foram definidos os parâmetros do cálculo, com o avanço de tempo fixado. O número de *Time Steps* realizados no começo da simulação foi de 1.000, com um *Time Step Size* inicial de  $1 \cdot 10^{-6}$  segundo, e máximo de 30 Iterações/*Time Step*. Ao decorrer das iterações o *Time Step Size* foi incrementado até 0,06 segundos, com um máximo de 5 Iterações/*Time Step*; em ambos os casos, o *Solid Time Step* foi espelhado no *Time Step* do fluido.

Tabela 3 – Discretizações Espaciais.

<b>Simulação Conjugada</b>	
Variável	Esquema
<b>Gradiente</b>	<i>Least Squares Cell Based</i>
<b>Pressão</b>	<i>Second Order</i>
<b>Densidade</b>	<i>Second Order Upwind</i>
<b>Momento</b>	<i>Second Order Upwind</i>
<b>Energia Cinética Turbulenta</b>	<i>First Order Upwind</i>
<b>Taxa de Dissipação Turbulenta</b>	<i>First Order Upwind</i>
<b>Energia</b>	<i>Second Order Upwind</i>
<b>Ordenadas Discretas</b>	<i>First Order Upwind</i>
<b>Fração Média de Mistura</b>	<i>Second Order Upwind</i>
<b>Variância da Fração de Mistura</b>	<i>Second Order Upwind</i>

Fonte: Autoria Própria.

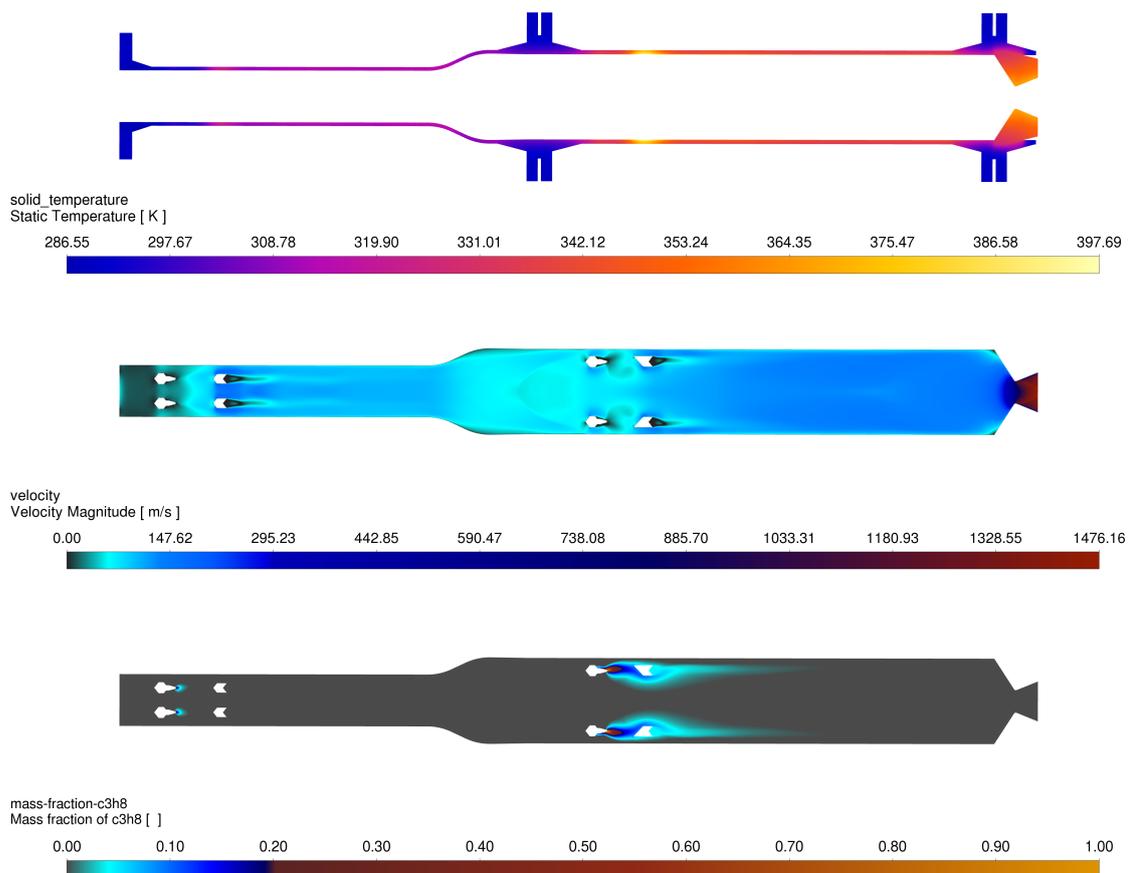
Parte IV

Resultados

## 7 Resultados

Após a realização da simulação conjugada foi possível obter dados do contorno de temperatura estática, tanto no volume de controle quanto no motor, bem como contornos de velocidade, pressão e fração mássica do escoamento, para os regimes transiente e permanente. Os dados foram obtidos para um tempo de fluxo de 30 segundos e 60 segundos durante a simulação transiente. Após a fase transiente inicial, a configuração geral da simulação foi alterada para tempo estacionário. A seguir, na Figura 27, estão dispostos os resultados de temperatura no sólido e velocidade do escoamento após um tempo de escoamento de 30 segundos na simulação transiente.

Figura 27 – Temperatura, velocidade e fração mássica de  $C_3H_8$  no sistema após 30 segundos de operação.



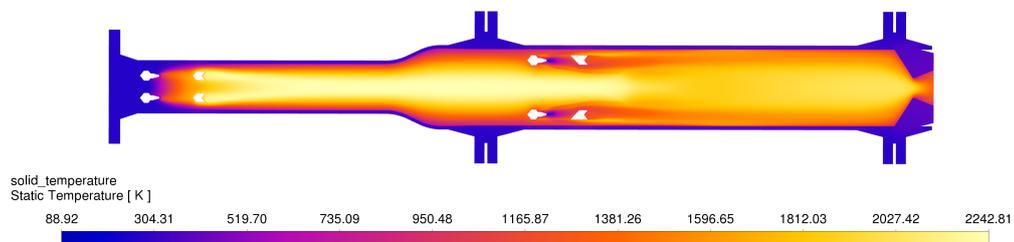
Fonte: Autoria Própria.

Os contornos também foram obtidos após 60 segundos de simulação transiente,

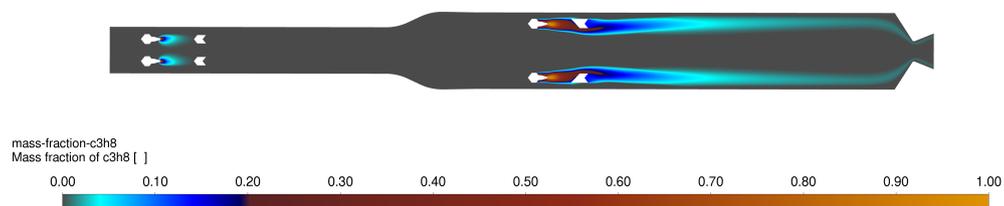
para temperatura, frações mássicas, pressão estática, velocidade.

Figura 28 – Contornos no sistema após 60 segundos de operação em regime transiente.

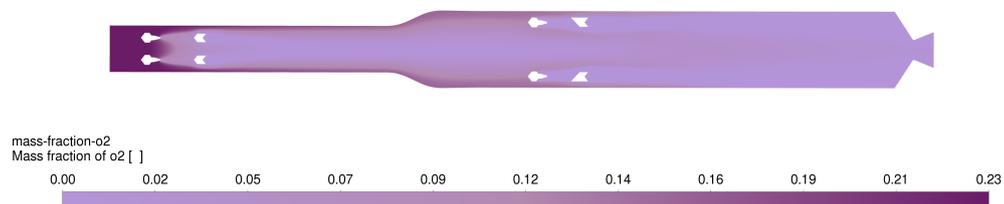
(a) Contorno de temperatura após 60 segundos.



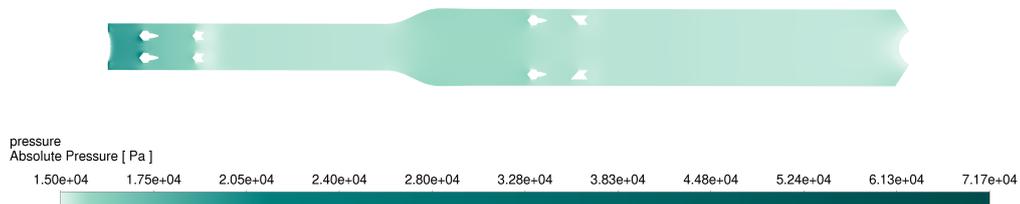
(b) Contorno de fração mássica de  $C_3H_8$ .



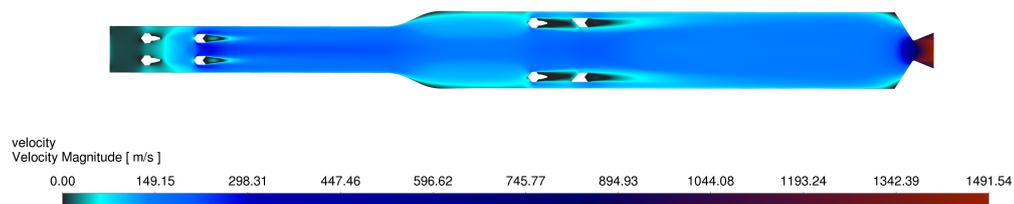
(c) Contorno de fração mássica de  $O_2$ .



(d) Contorno de pressão estática.



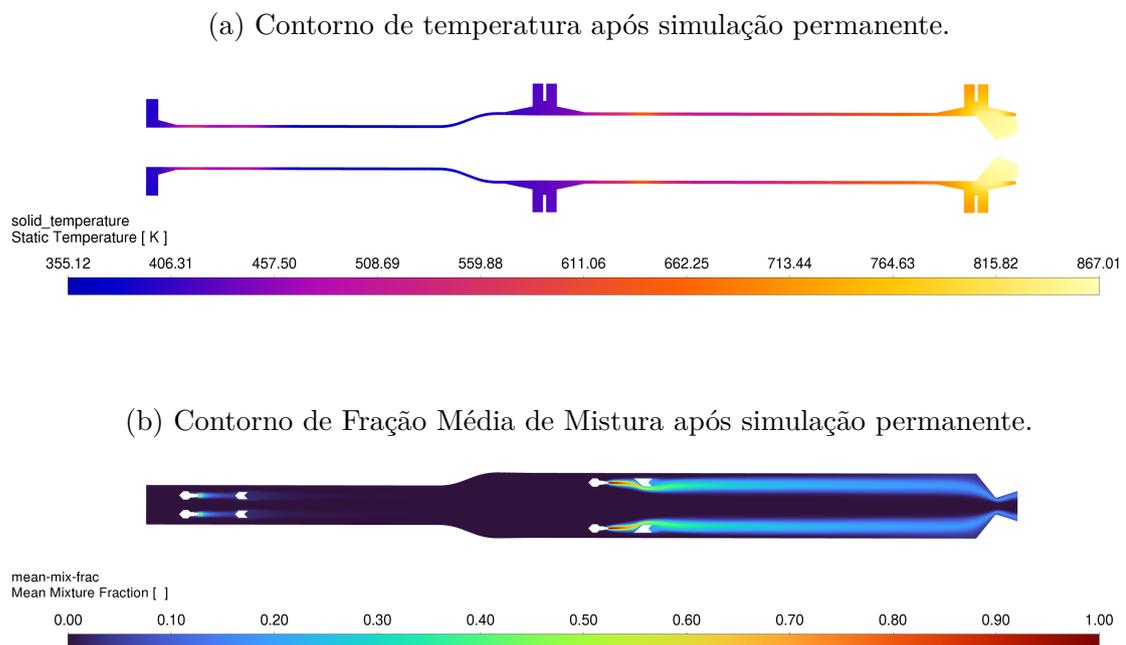
(e) Contorno da velocidade do escoamento.



Fonte: Autoria Própria.

Como a tendência do cenário transiente inicial da operação é de se estabilizar em regime estacionário, foi possível realizar uma simulação permanente após pouco mais de um minuto de tempo de escoamento transiente. O desenvolvimento da simulação em regime permanente só foi possível pois a parte transiente da simulação levou o cenário do sistema a um ponto em que o software Fluent podia considerar que as variáveis sofriam mudanças pequenas em relação ao tempo. Qualquer tentativa de iniciar a simulação já em regime permanente resultava em uma imediata divergência no solucionador AMG (*Algebraic Multigrid*), fato que pactua com a literatura, haja vista a imperante transiência inicial do problema. A Figura 29b apresenta os contornos obtidos para a Fração Média de Mistura (*Mean Mixture Fraction*) das espécies calculadas na tabela PDF e a distribuição de temperatura no motor após 300 iterações no regime estacionário, realizadas depois da simulação transiente por 60 segundos.

Figura 29 – Distribuição de temperatura e de fração média de mistura no sistema após a simulação em regime permanente.

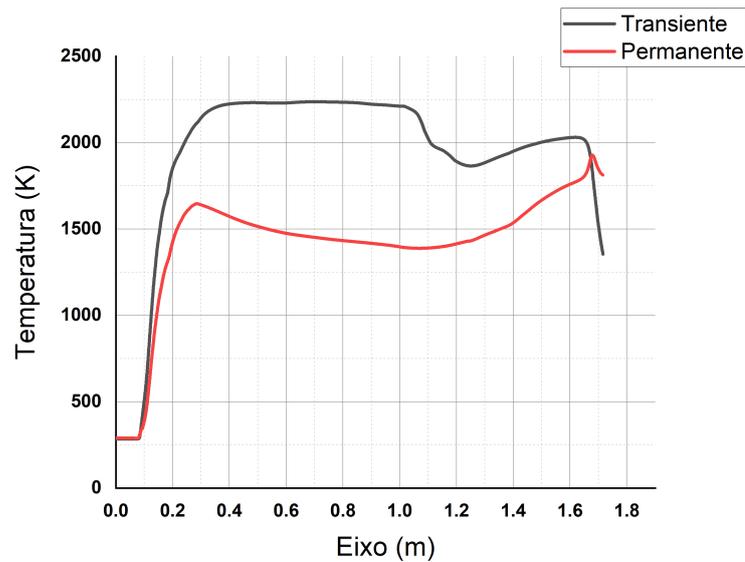


Fonte: Autoria Própria.

Com os dados obtidos foi possível plotar gráficos de distribuição de temperatura na parede do motor e no eixo de simetria, assim como o gráfico de entalpia. Todos os gráficos plotados nesta análise são dispostos em relação ao eixo longitudinal do motor (eixo X),

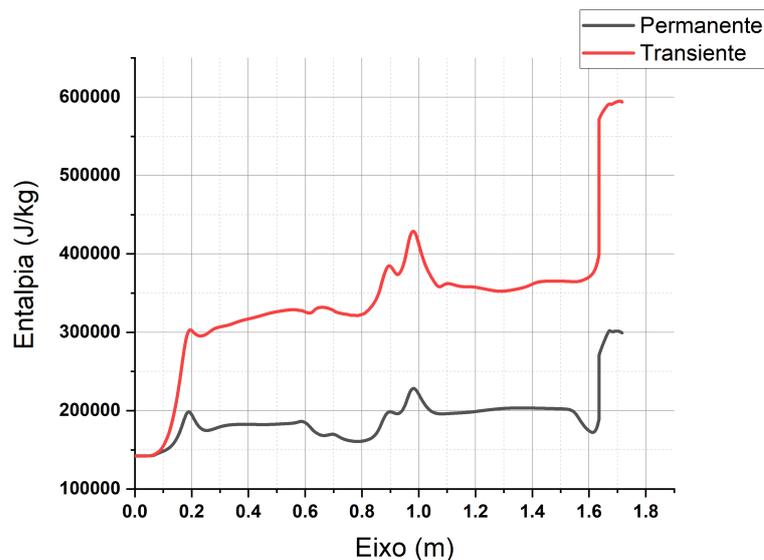
com o *inlet* à esquerda, como disponibilizado nas imagens anteriores. Os gráficos das Figuras 30 e 31 a seguir ilustram a diferença da temperatura no centro do volume de controle e da entalpia entre o caso transiente e o caso permanente da simulação.

Figura 30 – Temperatura ( $K$ ) no eixo de simetria (centro do volume de controle) comparando resultados da simulação puramente transiente (inicial) e da simulação com regime permanente posterior.



Fonte: Autoria Própria.

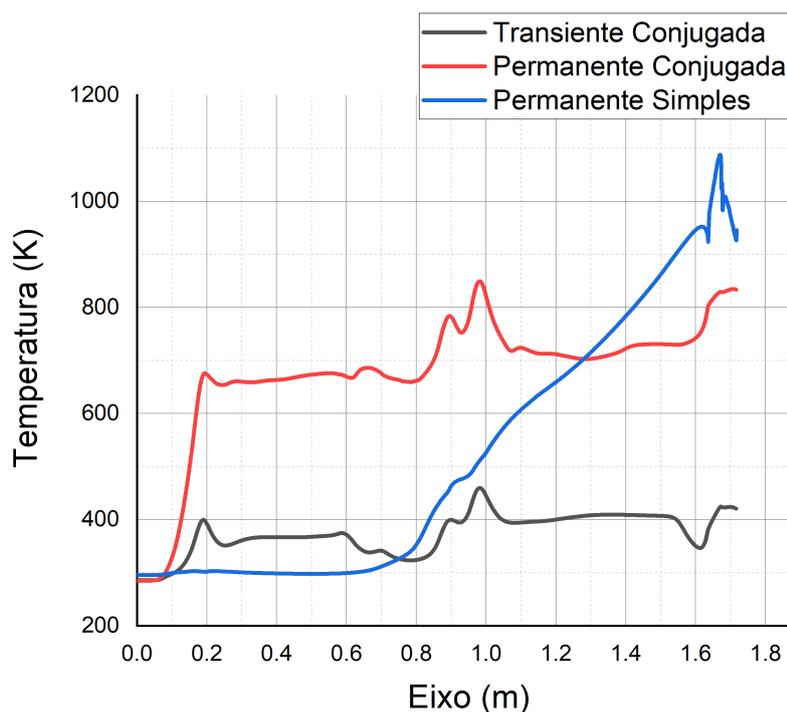
Figura 31 – Entalpia ( $J/kg$ ) no eixo longitudinal do motor ( $m$ ) comparando resultados da simulação puramente transiente (inicial) e da simulação com regime permanente posterior.



Fonte: Autoria Própria.

O gráfico da figura 32, de temperatura na parede, possibilita identificar a distribuição de temperatura próxima à parede logo após a simulação transiente (Transiente Conjugada), após 500 iterações da simulação permanente (Permanente Conjugada), e a distribuição validada em um estudo anterior em [Cerbino \(2021\)](#).

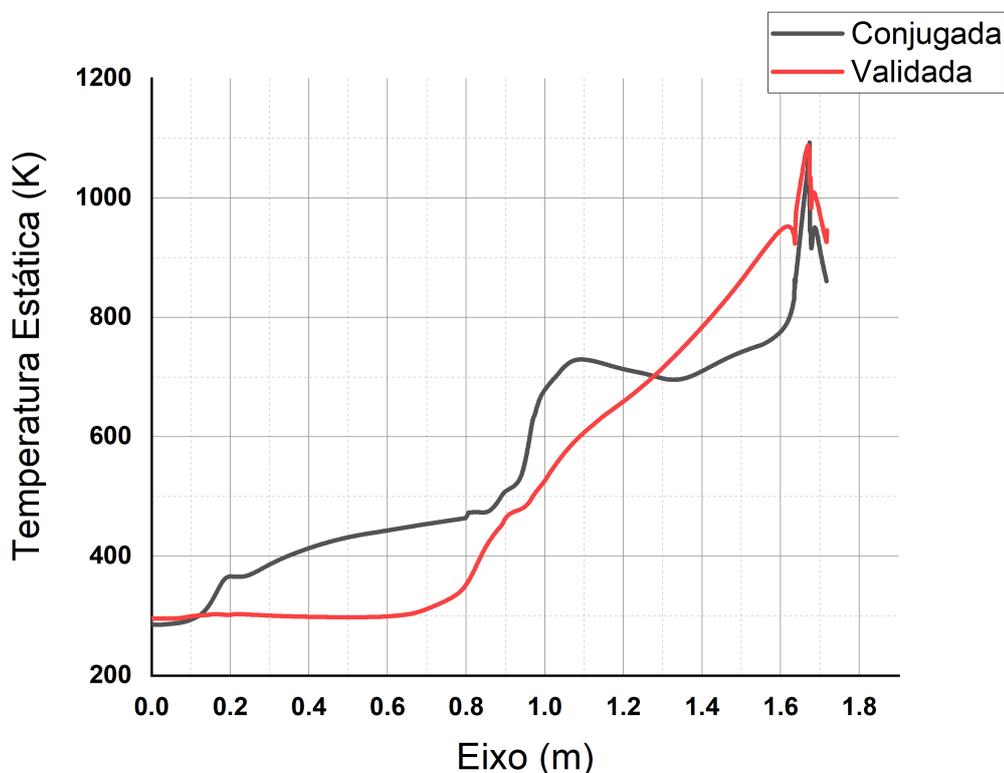
Figura 32 – Distribuição de temperaturas próximas à parede interna do motor para simulação transiente (cinza), transiente-permanente com 500 iterações (vermelha) e validada analiticamente (azul).



Fonte: Autoria Própria e [Cerbino \(2021\)](#).

É evidente que a simulação transiente-permanente se aproxima dos valores máximos da simulação de [Cerbino \(2021\)](#), quando comparada à simulação realizada apenas no regime transiente; entretanto, a distribuição térmica de ambas as simulações ainda possui diferenças significativas. Para a finalidade de validação, foi realizada outra simulação transiente-permanente, desta vez, utilizando somente os *Time Step Sizes* iniciais (pequenos), com o objetivo de não avançar o *Flow Time* da simulação significativamente. Após aproximadamente 2.000 iterações nos regimes transientes iniciais (*Flow Time Total* < 10 segundos), a simulação, que já apresentava oscilações residuais, foi adaptada para uma simulação permanente. A partir das iterações seguintes, foi possível obter o gráfico da Figura 33, que contrasta o resultado obtido com o resultado anteriormente validado.

Figura 33 – Distribuição de temperaturas próximas à parede interna do motor para simulação transiente-permanente com *Flow Time* reduzido (cinza) e validada analiticamente (vermelho).



Fonte: Autoria Própria e [Cerbino \(2021\)](#).

É possível observar que a simulação conjugada converge no bocal, porém apresenta algumas oscilações ao longo do comprimento do motor. A primeira variação significativa se dá por volta do ponto 0,2 m, onde o primeiro conjunto de injetores/porta-chamas fica localizado; a temperatura na parede após o injetor também aponta a presença da primeira chama. O segundo ponto, aproximadamente em 1,1 m, aponta a posição longitudinal do segundo conjunto de injetores/porta-chamas, porém, a temperatura não segue o desenvolvimento anterior, de continuar crescente até o bocal.

A partir desta análise, pode-se concluir que esta simulação relaciona de forma mais incisiva a presença dos injetores e porta-chamas no sistema. É interessante, também, verificar a possibilidade de um cenário análogo ocorrer no motor experimental, visto que os injetores e porta-chamas são, de fato, presos mecanicamente ao motor, indicando a existência de condução de calor, e conseqüentemente, uma provável taxa de fluxo de calor mais elevada do que a apresentada na simulação. Portanto, a presente simulação conjugada traz consigo um cenário mais conservador, explicitamente útil para a determinação de uma margem de segurança operacional em eventuais testes no Laboratório de Propulsão Química.

O aço 304L austenítico é um material inoxidável com baixo carbono, fortemente resistente à corrosão intergranular. Sua resistência à oxidação deriva da presença de 18 a 19% de cromo em sua formulação. Esta liga apresenta boa resistência em serviço intermitente de até 1.450 K e possui um ponto de fusão de aproximadamente 1.644 K (PSP, 2019).

A temperatura mais elevada tanto para o caso simulado quanto para o validado é de 1.100 K, e ocorre no bocal, onde o material é grafite, que poupa o aço destas condições térmicas. Ainda segundo as simulações, a temperatura próxima da parede mais elevada que estaria em contato direto com a liga de aço, não ultrapassa 950 K. Permanecendo, portanto, a aproximadamente 500 K da temperatura máxima recomendada para serviço intermitente do material. O grafite, por sua vez, é um material altamente resistente a temperaturas de até 2.500 K, mas sofre deterioração significativamente maior do que o aço, dado que a porosidade do grafite e suas características de oxidação afetam fortemente sua taxa de erosão (OLIVEIRA, 2013).

O controle de temperatura pelos termômetros deve, ainda assim, ser realizado de maneira cautelosa, uma vez que a temperatura da chama de propano (tendo ar atmosférico como oxidante) é de até 2.250 K.

## 8 Conclusão

Durante o desenvolvimento do presente estudo, fez-se evidente um esforço significativo para abranger toda a fundamentação teórica necessária e o desenvolvimento de uma simulação conjugada e acoplada, bem como para realizar a validação do caso estipulado. Portanto, tomando como base os objetivos designados na [seção 1.3](#), fica evidente que o objetivo geral deste projeto foi alcançado. Os objetivos específicos também foram majoritariamente concluídos, desde a realização da revisão bibliográfica necessária ao desenvolvimento do problema, as determinações de propriedades, geometrias, malhas, condições de contorno necessárias, até a obtenção dos resultados da simulação conjugada, com suas respectivas validações, restando apenas o refino da interface de simulação acoplada e os ajustes dos parâmetros de acoplamento no subsistema *System Coupling* para posterior análise por acoplamento.

No que concerne a operação do motor no laboratório, sua integridade estrutural não deve tornar-se um problema para experimentos de até 60 segundos, como demonstrado pelas simulações; o tempo máximo operacional do motor ainda deve ser determinado, idealmente, através da simulação acoplada, que especifica também a convecção livre na superfície externa do motor. Evidentemente, após cada experimento realizado, deve ser feita uma avaliação das condições operacionais de cada componente estrutural e de controle do experimento. É esperado, também, que o bocal e os porta-chamas de grafite devam ser trocados de maneira recorrente, haja vista suas características de erosão e oxidação.

Finalmente, conclui-se que o ponto desenvolvido até o momento é satisfatório para o encerramento da simulação conjugada, para que seja dada a continuidade do estudo na simulação acoplada, onde serão abordadas as características da convecção livre, ocorrente no meio externo, bem como a redefinição de quaisquer propriedades aqui definidas, para melhor adaptação aos cenários estudados. Caso o desenvolvimento do presente estudo seja levado adiante, o objetivo será, então, a realização das simulações acopladas, com suas respectivas validações e comparações com os trabalhos relacionados previamente descritos, com o intuito de definir o tempo máximo de operação do motor dentro das margens de segurança operacional, aprimorando e reforçando o conhecimento das propriedades e características de operação do motor *Ramjet* mantido no Laboratório de Propulsão Química.

# Referências

- ANDERSON, J. *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill Education, 1995. (Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications). ISBN 9780070016859. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=dJceAQAIAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 29 e 30.
- ANSYS. *Chapter 15. Reporting Mesh Statistics - univ-reims.fr*. ANSYS, 2008. Disponível em: <<https://romeo.univ-reims.fr/documents/fluent/tgrid/ug/chp15.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- ANSYS. Ansys, 2022. Disponível em: <<https://www.ansys.com/>>. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 27, 33 e 34.
- ANSYS. *Ansys User's Meshing Guide 2022 R2*. 2022. Disponível em: <<https://www.ansys.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- ANSYS, I. Ansys pressure-velocity coupling. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node373.htm>>. Citado na página 57.
- ANSYS, I. Ansys fluent theory guide. 2013. Disponível em: <<https://www.ansys.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ANSYS, I. Ansys mechanical apdl theory reference. 2013. Disponível em: <<https://www.ansys.com/>>. Citado na página 35.
- Scramjets - fuel mixing and injection systems. In: Barzegar Gerdroodbary, M. (Ed.). *Scramjets*. Butterworth-Heinemann, 2020. ISBN 978-0-12-821138-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128211380/scramjets>>. Citado na página 17.
- BAXTER, A. D.; EHRICH, F. F. Jet engine. 2015. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/jet-engine>>. Citado na página 17.
- ÇENGEL, Y. *Heat Transfer: A Practical Approach 2nd Edition*. McGraw-Hill, 2003. (McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780072458930. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=nrbfpSZTwsKC>>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 36 e 37.
- ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. *Transferência de Calor e Massa*. McGraw Hill Brasil, 2009. ISBN 9788580551280. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3L2kZCIcvvYC>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- CERBINO, D.; SHYNKARENKO, O. Numerical simulation of a connected-pipe test ramjet motor. 2022. Disponível em: <<https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/ciencias-exatas-e-da-terra-conhecimentos-didatico-pedagogicos-e-o-ensino-aprendizagem>>. Citado na página 42.

CERBINO, D. C. Simulação de fluxo dentro de um motor estato-reator. Universidade de Brasília, 2021. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/29337>>. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.

DASSAULT SYSTEMES, S. *Meshing definition: What is mesh generation*. Dassault Systèmes, 2022. Disponível em: <<https://www.spatial.com/resources/glossary/what-is-meshing>>. Citado na página 44.

DUNCAN, J. S. Aerodynamics of flight. *Federal Aviation Administration, FAA*, 2016. Disponível em: <[https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/phak/media/07\\_phak\\_ch5.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/07_phak_ch5.pdf)>. Citado na página 17.

EL-SAYED, A. *Fundamentals of Aircraft and Rocket Propulsion*. Springer London, 2016. ISBN 9781447167969. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=kWJBDAAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 29.

FALEMPIN, F. Ramjet and dual mode operation. *MBDA France, NATO*, p. 1–30, 2008. Disponível em: <<https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/RTO-EN-AVT-150/EN-AVT-150-07.pdf>>. Citado na página 18.

FLUENT, A. *Non-Premixed Combustion*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node142.htm>>. Citado na página 25.

FREITAS, L.; SHYNKARENKO, O. Experimental and analytical study of the cold flow inside a ramjet test engine. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5028/jatm.cab.1154>>. Citado na página 42.

GHAJAR, A.; CENGEL, D. Y. A. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780073398181. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=B89MnwEACAAJ>>. Citado na página 39.

HALL, N. Navier-stokes equations. *Glenn Research Center, NASA*, 2021. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html#:~:text=The%20Navier-Stokes%20equations%20consists,dependent%20conservation%20of%20energy%20equation.>> Citado na página 24.

HALL, N. Ramjet propulsion. *Glenn Research Center, NASA*, 2021. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/ramjet.html>>. Citado na página 18.

INGENITO, A. Fundamentals of ramjet engines. In: \_\_\_\_\_. *Subsonic Combustion Ramjet Design*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 5–7. ISBN 978-3-030-66881-5. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-030-66881-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66881-5_2)>. Citado na página 17.

KUBLER, R.; SCHIEHLEN, W. Two methods of simulator coupling, mathematical and computer modelling of dynamical systems. 2000. Disponível em: <[https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/1387-3954\(200006\)6:2;1-M;FT093](https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1076/1387-3954(200006)6:2;1-M;FT093)>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. *A Heat Transfer Textbook*. 5th. ed. Mineola, NY: Dover Publications, 2019. ISBN 9780486837352. Disponível em: <<http://ahtt.mit.edu>>. Citado na página 19.

OKIEBOAT. 2017. Disponível em: <<https://www.okieboat.com>>. Citado na página 18.

- OLIVEIRA, F. S. D. *ESTUDO DE MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE BOCAIS DE MOTOR DE FOGUETE A PROPELENTE HÍBRIDO*. 2013. Disponível em: <[https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/14083/1/2013\\_FabioSilvaOliveira.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/14083/1/2013_FabioSilvaOliveira.pdf)>. Citado na página 66.
- PELES, Y. *Transient Heat Conduction*. 2017. Disponível em: <<https://slideplayer.com/slide/11205287/>>. Citado na página 36.
- PSP. *304L stainless steel*. 2019. Disponível em: <<https://www.pennstainless.com/resources/product-information/stainless-grades/300-series/304l-stainless-steel>>. Citado na página 66.
- RICCO, P. The heart of the sr-71 "blackbird": The mighty j-58 engine. 2002. Disponível em: <[http://aerostories2.free.fr/acrobat/technique/J58/J58A\\_genesis\\_eng.pdf](http://aerostories2.free.fr/acrobat/technique/J58/J58A_genesis_eng.pdf)>. Citado na página 19.
- SHYNKARENKO, O.; GONTIJO, M. Implementation of the ramjet control algorithm in the connector-pipe test bench. 2021. Disponível em: <<https://iafastro.directory/iac/paper/id/62861/summary/>>. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 72.
- SKYBRARY. Turbojet engine. 2022. Disponível em: <<https://skybrary.aero/articles/turbojet-engine>>. Citado na página 17.
- TU, T.-W.; LEE, S.-Y. Analytical solution of heat conduction for hollow cylinders with time-dependent boundary condition and time-dependent heat transfer coefficient. *Journal of Applied Mathematics*, v. 2015, p. 1–9, 10 2015. Disponível em: <<https://projecteuclid.org/journals/journal-of-applied-mathematics/volume-2015/issue-SI6/Analytical-Solution-of-Heat-Conduction-for-Hollow-Cylinders-with-Time/10.1155/2015/203404.full>>. Citado na página 38.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Primeiro Apêndice

Tabela 4 – Dados quantitativos de número de nós e elementos da malha para a simulação acoplada, e condições de voo já validadas por outras simulações.

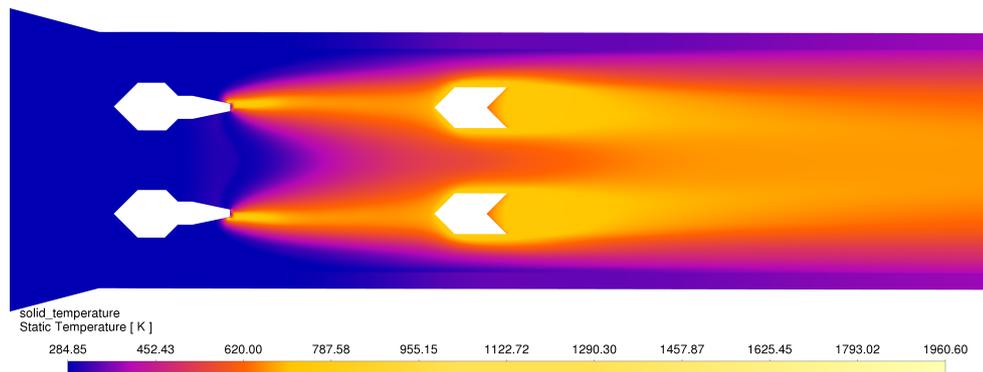
Ambiente	Malha		Caso teste	Simulação		
	Nós	Elementos		Mach <sub>∞</sub>	Altitude, km	$\epsilon/\epsilon_{opt}$
Fluent	116.071	115.170	1	2,5	14	0,9737
Mechanical	33.236	30.912	2	2,75	16	0,9963
Total	149.307	146.082	3*	3	18	1.0

Fonte: [Shynkarenko e Gontijo \(2021\)](#) (Adaptado).

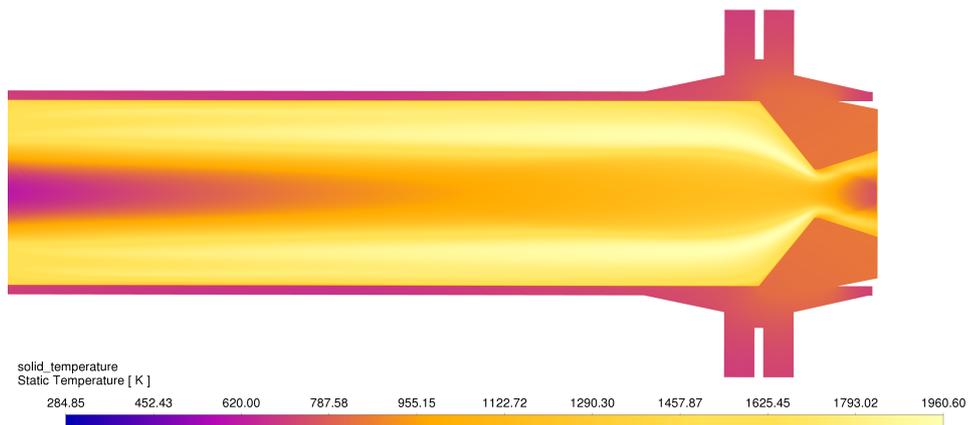
## APÊNDICE B – Segundo Apêndice

Figura 34 – Contornos de temperatura após a realização de todas as iterações (transientes e permanentes) para o injetor e bocal.

(a) Distribuição de temperatura no primeiro injetor.



(b) Distribuição de temperatura no bocal.

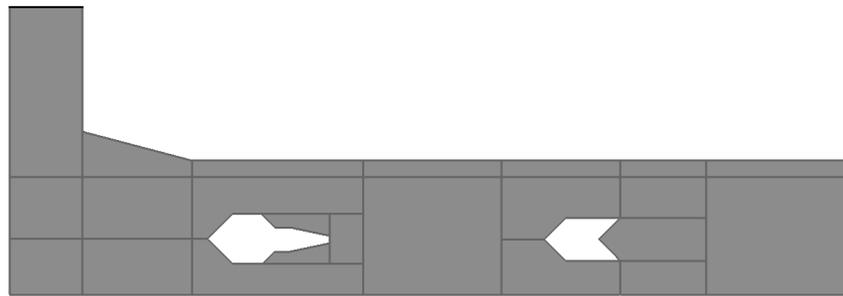


Fonte: Autoria Própria.

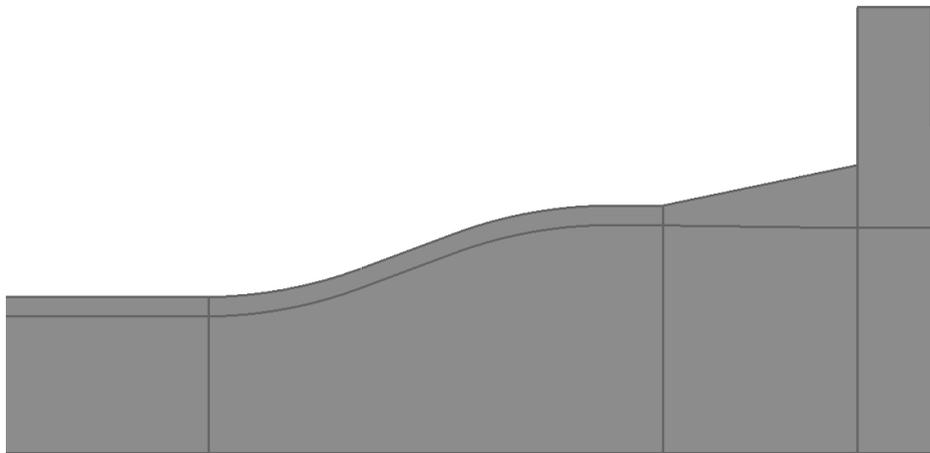
## APÊNDICE C – Terceiro Apêndice

Figura 35 – Geometria estrutural e do volume de controle de cada seção do sistema estudado.

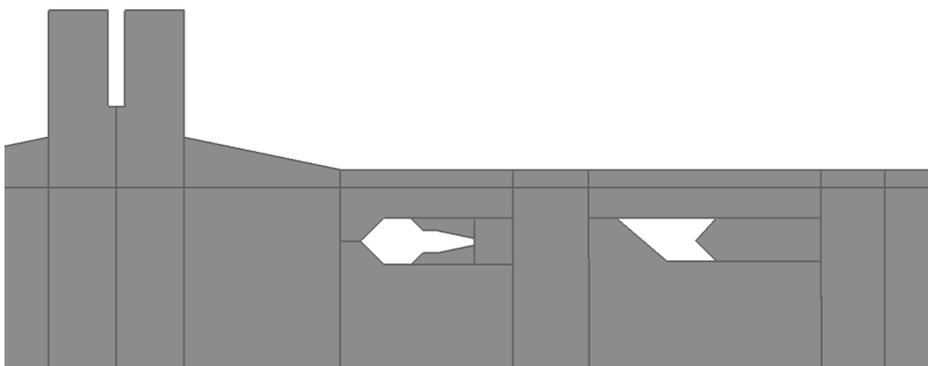
(a) Geometria na entrada (*inlet*), primeiro injetor e primeiro porta-chamas.



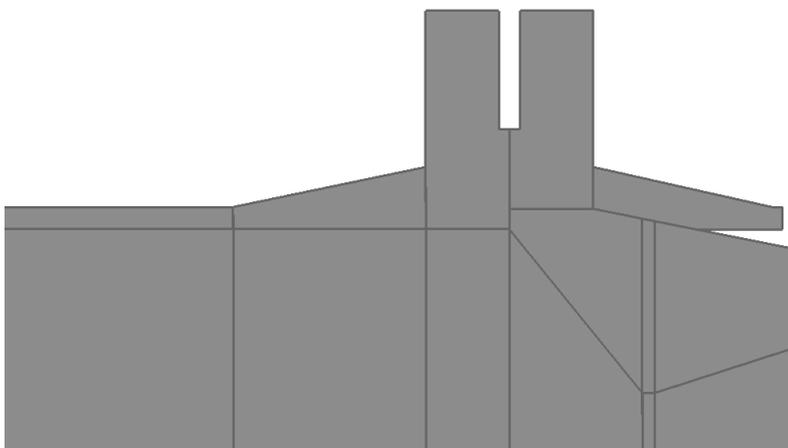
(b) Geometria da seção de expansão posterior à entrada.



- (c) Seção geométrica estrutural da conexão entre ambos os componentes do motor, geometria do segundo injetor e segundo porta-chamas.



- (d) Geometria na saída (*outlet*) do escoamento, seção da garganta (*throat*), suporte e bocal.



Fonte: Autoria Própria.

# APÊNDICE D – Quarto Apêndice

## Código MATLAB para validação analítica

```

1 %% Transient Heat Transfer Adopting a Long Cylinder
2 % Alexandre Ponte Carvalho – 170004449 – TCC
3
4 close all
5 clear all
6 clc
7
8 % Geometry Inputs
9 D = 0.2; % External Diameter (m)
10 r0 = D/2; % Radius (m)
11 L = 0.7; % Length (m)
12
13 %% Coefficients (Stainless Steel 304), parameters and boundary
14
15 h = 500; % Overall Heat transfer coefficient (W/m^2*K)
16 k = 60.5; % (W/m*K)
17 rho = 7900; % (kg/m^3)
18 Cp = 434; % (J/kg*K)
19 alpha = 3.95e-6; % (m^2/s)
20
21 % Temperature inputs
22 Ti = 720; % (°C)
23 T_inf = 25; % (°C)
24
25 % Time step and total time
26 t = (0:1:60) % Time step
27
28
29 %% Initial Calculations
30
31 Bi = (h*r0)/k;
32
33 exBi = 1/Bi;

```

```
34 display(exBi, '1/Bi');
35
36 % For Bi = 0.5;
37 % Table 4-2 and 4-3 / Heat and Mass Transfer, Fifth Edition
38 %{
39 lambda = 0.9408; % Alterar Conforme Biot
40 A1 = 1.1143; % Alterar Conforme Biot
41 J1 = 0.412; % Alterar Conforme Biot
42 %}
43 % For Bi = 1.2;
44
45 lambda = 1.2700; % Alterar Conforme Biot
46 A1 = 1.2143; % Alterar Conforme Biot
47 J1 = 0.52365; % Alterar Conforme Biot
48 %}
49
50 for t = 1:1:60
51     tau(t,1) = (t * alpha)/r0^2;
52 end
53 display('tau = ');
54 display(tau(t,1))
55
56 for t = 1:1:60
57     Theta0(t,1) = A1*exp(1)^(-lambda^2*tau(t,1)); % For r = 0
58 end
59 display('Theta0 = ');
60 display(Theta0(t,1));
61
62 %{
63 %Knowing that
64 % $(T0 - T_{inf}) / (Ti - T_{inf}) = Theta0,$ 
65 %}
66
67 for t = 1:1:60
68     T0(t,1) = T_inf + Theta0(t,1)*(Ti-T_inf); % Temperature drop as
        f(t)
69 end
70 display('T0 = ')
71 display(T0(t,1));
```

```
72
73
74 %% Heat Transfer Calculation
75
76 %{
77 %m = rho*V = rho * pi * r0^2 * L
78 %}
79
80 m = rho * pi * r0^2 * L; % Mass (kg)
81
82
83 Q_max = m*Cp*(Ti-T_inf); % Maximum heat that can be transferred
      relative to
84 % the environment (J)
85
86 dimensionless_Q = 1 - 2*Theta0*(J1)/lambda; % Q/Q_max
87
88 Q = dimensionless_Q * Q_max; % Total heat transfer from cylinder
      over time
89
90
91 %% Plots
92 figure
93 plot(1:1:60,T0)
94 ylabel 'Temperature (°C)'
95 xlabel 'Time (s)'
96 grid on
97
98 figure
99 plot(1:1:60,Q/1000)
100 ylabel 'Calor (kJ)'
101 xlabel 'Tempo (s)'
102 grid on
103
104
105 display('Maximum possible heat transfer for environment with the
      initial temperatures: ')
106 display(Q_max, 'Q_max (J)')
```