



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**DOUGLAS DA SILVA GONÇALVES**

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO FLUXO DE UM GÁS**  
**COMPRESSÍVEL EM UM BOCAL CONVERGENTE**

**OURO PRETO - MG**  
**2021**

**DOUGLAS DA SILVA GONÇALVES**  
**douglas.goncalves1@aluno.ufop.edu.br**

**AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO FLUXO DE UM GÁS  
COMPRESSÍVEL EM UM BOCAL CONVERGENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** Ph.D. Elisangela Martins Leal

**OURO PRETO – MG**  
**2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635a Gonçalves, Douglas da Silva .  
Avaliação computacional do fluxo de um gás compressível em um bocal convergente. [manuscrito] / Douglas da Silva Gonçalves. - 2021. 47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Escoamento - Bocal Convergente. 2. Mecânica dos fluidos - Fluido Compressível. 3. Termodinâmica. 4. Sistema computacional - Avaliação. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



### FOLHA DE APROVAÇÃO

**Douglas da Silva Gonçalves**

#### **Avaliação computacional do fluxo de um gás compressível em um bocal convergente**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 15 de dezembro de 2021

#### Membros da banca

[Ph.D.] - Elisângela Martins Leal - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[D.Sc.] - Washington Luís da Silva Vieira - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[D.Sc.] - Luís Antônio Bortolaia - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[M.Sc.] - Amauri Menezes Leal Junior - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/12/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Elisângela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/12/2021, às 14:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0258995** e o código CRC **728DE2AF**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013247/2021-16

SEI nº 0258995

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: (31)3559-1533 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

Aos meus pais Osmar e Lenice, aos meus  
irmãos Welinton, Leandro e Daniel.

A Deus dedico mais esta etapa vencida,  
pela força e inspiração.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de minha vida.

Aos meus pais e família pelo amor, apoio e dar sentido a toda essa jornada.

A minha orientadora Elisângela, pela paciência, incentivo e orientação neste trabalho.

A Universidade Federal de Ouro Preto por me proporcionar conhecimento e desenvolvimento pessoal e profissional.

E a minha namorada Lara Luiza pelo companheirismo e apoio, tornando a jornada na universidade mais fácil.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

Madre Teresa de Calcutá

## RESUMO

GONÇALVES, Douglas da Silva. **Avaliação computacional do fluxo de um gás compressível em um bocal convergente**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 47 páginas, 2021.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de operação do escoamento de um fluido compressível em um bocal convergente, utilizando análise computacional. Foram estabelecidos os parâmetros iniciais (velocidade, pressão e temperatura) referentes a entrada do fluido no dispositivo. Realizou-se uma análise termodinâmica do escoamento por meio do *software Microsoft Excel*®, sendo avaliados o número de Mach, a velocidade, a pressão, a temperatura e a massa específica do fluido, tal análise é fundamentada na teoria de escoamento isentrópico de um gás ideal em bocais. Posteriormente, realizou-se uma análise computacional, em que um protótipo do bocal convergente foi modelado no *software SolidWorks*® e importado para o *software ANSYS Fluent*®, seguindo a sequência de etapas do estudo da fluidodinâmica computacional. Os resultados da análise termodinâmica, bem como da análise fluidodinâmica, demonstram que à medida que ocorre o estreitamento do bocal, a velocidade do fluido aumenta até o limite do número de Mach (estabelecido inicialmente como 0,91), enquanto a pressão, a temperatura e a massa específica do fluido diminuem. Estes dados são condizentes com o que traz a literatura acerca do comportamento das propriedades do escoamento isentrópico em bocais. Conclui-se que em relação aos valores iniciais, a velocidade do escoamento apresentou um aumento expressivo, evidenciando a capacidade do bocal convergente analisado nesta pesquisa na aceleração do fluido. Esta situação é precursora de diversas aplicações, tal como utilizar o escoamento acelerado pelo bocal para movimentar uma turbina acoplada a um gerador elétrico com o intuito de produzir potência elétrica, beneficiando setores da indústria.

**Palavras-chave:** Bocal convergente. Fluido compressível. Avaliação termodinâmica. Avaliação computacional.



## ABSTRACT

GONÇALVES, Douglas da Silva. *Computational evaluation of the flow of a compressible gas in a converging nozzle*. Monograph (Graduate in Mechanical Engineering). School of Mines, Federal University of Ouro Preto. 47 pages, 2021.

*This work aims to evaluate the influence of the operating parameters of the flow of a compressible fluid in a converging nozzle, using computational analysis. The parameters (velocity, pressure and temperature) regarding the entry of the fluid into the device were transformed. A thermodynamic analysis of the flow was performed using Microsoft Excel® software, presenting the Mach number, velocity, pressure, temperature and specific mass of the fluid. This analysis is based on the theory of isentropic flow of an ideal gas in mouthpieces. Subsequently, a computational analysis was carried out, in which a prototype of the convergent nozzle was modeled in the SolidWorks® software and imported into the ANSYS Fluent® software, following the sequence of steps in the study of computational fluid dynamics. The results of the thermodynamic analysis, as well as the fluid dynamic analysis, demonstrate that as the nozzle narrowing occurs, the fluid velocity increases up to the Mach number limit (established as a rate of 0.91), while the pressure, the temperature and specific gravity of the fluid decrease. These data are consistent with the literature on the behavior of isentropic flow properties in nozzles. It is concluded that in relation to the initial values, the flow velocity presents a significant increase, showing the capacity of the convergent nozzle analyzed in this research in the fluid acceleration. This situation is a precursor of several applications, such as using the accelerated flow through the nozzle to move a turbine coupled to an electrical generator with the intention of producing electrical power, benefiting sectors of the industry.*

**Key-words:** *Steel industry. Converging nozzle. Compressible fluid. Thermodynamic evaluation. Computational evaluation.*

**LISTA DE SIMBOLOS**

$P$	Pressão
$\rho$	Massa Específica
$R$	Constante Específicas dos Gases
$T$	Temperatura
$R_u$	Constante Universal dos Gases Perfeitos
$M_m$	Massa Molar
$M_{m_{ar}}$	Massa Molar do Ar
$N$	Newton
$kmol$	Quilomol
$^{\circ}C$	Grau Celcius
$K$	Kelvin
$kJ$	Quilojoule
$kg$	Quilograma
$u$	Energia Interna
$v$	Volume Específico
$c_v$	Calor Específico a Volume Constante
$c_p$	Calor Específico a Pressão Constante
$h$	Entalpia
$s$	Entropia
$d$	Diferencial Ordinária
$\partial$	Diferencial Parcial
$\oint$	Integral de Linha
$k$	Razão entre Calores Específicos
$k_{ar}$	Razão entre Calores Específicos do Ar

$c_{p_{ar}}$	Calor Específico a Pressão Constante do Ar
$c_{v_{ar}}$	Calor Específico a Volume Constante do Ar
$V$	Velocidade
$h_0$	Entalpia de Estagnação
$T_0$	Temperatura de Estagnação
$P_0$	Pressão de Estagnação
$\rho_0$	Massa específica de Estagnação
$c$	Velocidade do Som
$Ma$	Mach
$\dot{m}$	Vazão em Massa
$A$	Área
$T^*$	Temperatura Crítica
$P^*$	Pressão Crítica
$\rho^*$	Massa Específica Crítica
$A^*$	Área Crítica
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
$Pa$	Pascal
$s$	Segundo
$kPa$	Quilopascal

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama entalpia <i>versus</i> entropia.....	8
Figura 2 - Configurações de bocais .....	10
Figura 3 - Variações das propriedades de escoamento em bocais e difusores .....	11
Figura 4 - Relação de áreas em função do número de Mach para um bocal com escoamento adiabático e reversível .....	13
Figura 5 - Abordagem de um sistema.....	15
Figura 6 - Processo simples de modelagem.....	15
Figura 7 - Fluxograma dos procedimentos realizados na pesquisa .....	20
Figura 8 – Protótipo de bocal convergente .....	28
Figura 9 – Geometria importada para o <i>software Ansys®</i> .....	29
Figura 10 – Malha do volume do bocal convergente .....	30
Figura 11 – Resíduos em escala .....	32
Figura 12 – Contorno do número de Mach .....	33
Figura 13 – Posição <i>versus</i> Mach.....	33
Figura 14 – Contorno da velocidade.....	34
Figura 15 – Vetores da velocidade no plano XY .....	35
Figura 16 – Posição <i>versus</i> velocidade.....	35
Figura 17 – Contorno da pressão estática.....	36
Figura 18 – Posição <i>versus</i> pressão estática .....	37
Figura 19 – Contorno da temperatura.....	37
Figura 20 – Posição <i>versus</i> temperatura .....	38
Figura 21 – Contorno da massa específica .....	39
Figura 22 – Posição <i>versus</i> massa específica .....	40
Figura 23 – Mach <i>versus</i> razão de área .....	40

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Variáveis e indicadores .....	22
Tabela 2 - Condições iniciais de operação .....	24
Tabela 3 - Condições do escoamento na entrada do bocal .....	25
Tabela 4 - Propriedades de estagnação isentrópicas.....	25
Tabela 5 - Razão das propriedades na entrada. ....	26
Tabela 6 – Propriedades iniciais do escoamento. ....	26
Tabela 7 – Razão das propriedades na saída. ....	27
Tabela 8 – Propriedades na saída do equipamento.....	27
Tabela 9 – Propriedades na saída do equipamento.....	27
Tabela 10 – Configurações iniciais do <i>software</i> .....	31
Tabela 11 – Condições de contorno .....	31
Tabela 13 – Cálculos referentes a análise termodinâmica.....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral .....	2
1.3.2	Objetivos Específicos .....	3
1.4	Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Escoamento Compressível.....	4
2.1.1	Energia interna ( $u$ ) e Calor Específico a Volume Constante ( $cv$ ).....	5
2.1.2	Entalpia ( $h$ ) e Calor Específico a Pressão Constante ( $cp$ ).....	5
2.1.3	Entropia ( $s$ ) .....	6
2.2	Propriedades de Estagnação .....	7
2.3	Velocidade do Som.....	8
2.4	Número de Mach .....	9
2.5	Escoamento Isentrópico Unidimensional de um Gás Ideal em Bocais .....	10
2.5.1	Relações de Propriedades para o Escoamento Isentrópico dos Gases Ideais .....	12
2.6	Análise Computacional.....	13
2.6.1	Sistemas.....	14
2.6.2	Modelos .....	15
2.6.3	Simulação Computacional.....	16
2.6.4	Fluidodinâmica Computacional.....	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	19
3.2	Materiais e Métodos .....	20
3.3	Variáveis e Indicadores .....	21
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	22
3.5	Tabulação dos Dados.....	23
3.6	Considerações Finais do Capítulo .....	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
4.1	Condições Iniciais.....	24

4.2	Análise Termodinâmica.....	24
4.3	Modelagem do Bocal Convergente .....	28
4.4	Análise Fluidodinâmica do Bocal Convergente .....	29
4.4.1	Configurações Iniciais .....	30
4.4.2	Solução .....	31
4.4.3	Propriedades do Escoamento no Dispositivo .....	32
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>42</b>
5.1	Conclusões.....	42
5.2	Recomendações .....	42
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>44</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>47</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo é realizada uma breve introdução ao trabalho, abordando a problemática e a justificativa que motivaram a realização desse estudo, bem como os objetivos geral e específicos, além da estrutura do trabalho.

## 1.1 Formulação do Problema

Um fluido compressível comporta grandes variações da massa específica num campo de escoamento, sendo comum em gases (ÇENGEL e CIMBALA, 2007). O escoamento compressível é amplamente utilizado e eficiente, sendo usado em sistemas de ar comprimido para acionamento de ferramentas e máquinas pneumáticas, mísseis, engenharia de aeronaves, máquinas de fluxo como ventiladores e compressores (FOX *et al.*, 2014).

O fluido compressível liberado durante um processo produtivo pode ser conduzido a uma máquina de fluxo para aproveitamento energético (FOX *et al.*, 2014). Uma forma de conduzir esse fluido compressível até uma máquina de fluxo se dá por meio da utilização de tubulação e para aceleração do fluxo, pode-se usar um bocal. O bocal é um dispositivo que possui a capacidade de acelerar um escoamento pelas várias seções de área devido a variação de pressão (WHITE, 2011).

Para um funcionamento adequado, conforme a aplicação requerida, um bocal convergente demanda de um estudo aprofundado, podendo este ser realizado por meio de análise computacional (CARVALHO *et al.*, 2015). A modelagem computacional pode ser entendida como a área que trata da simulação de soluções para problemas científicos, analisando os fenômenos, desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição e elaborando códigos computacionais para obtenção daquela solução. Dentro deste contexto, outro conceito importante é o de simulação, que consiste no emprego de técnicas matemáticas em computadores com o intuito de imitar um processo ou operação do mundo real. Desta forma, para ser realizada uma simulação, é necessário construir um modelo computacional que corresponda à situação real que se deseja simular (FREITAS FILHO, 2008; BATISTA e GOMES, 2020).

As simulações computacionais vêm se destacando cada vez mais na atualidade, abrangendo diversas áreas. Em engenharia, a modelagem computacional utilizada em áreas que estudam interações envolvendo fluidos, permite simular o efeito de ondas, o rompimento de



barragens, escoamentos de fluidos e interações fluido/estrutura (CARVALHO *et al.*, 2015), como exemplo a interação bocal convergente/fluido compressível.

Esta pesquisa propõe analisar o comportamento de um fluido compressível em um bocal convergente, bem como a influência dos parâmetros de operação, utilizando para isso a análise computacional, por meio de *softwares* específicos, tais como o *software Microsoft Excel*® para o estudo termodinâmico, o *SolidWorks*® para a modelagem do bocal convergente e o *ANSYS Fluent*® para a simulação fluidodinâmica.

Face ao exposto, tem-se a seguinte problemática:

**Como avaliar a influência dos parâmetros de operação em um bocal convergente usando a análise computacional?**

## **1.2 Justificativa**

Esta pesquisa tem o intuito de analisar computacionalmente o escoamento de um fluido compressível em um bocal convergente e os parâmetros de operação associados a este processo. Para a realização deste estudo a análise computacional é importante e permite que o problema analisado seja reproduzido em diversas situações por meio da modificação dos parâmetros de operação, facilitando a visualização e predição dos resultados para cada condição proposta (CARVALHO *et al.*, 2015). Os dados obtidos neste estudo fornecem informações importantes acerca do comportamento do fluido compressível no bocal convergente para diversas aplicações. Como por exemplo, na condução do fluxo acelerado pelo bocal convergente a uma turbina, que acoplada a um gerador leva a produção de energia elétrica.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

Avaliar computacionalmente o comportamento do escoamento de um fluido compressível em um bocal convergente, comparando os resultados com a literatura.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo teórico acerca de fluido compressível, análise computacional e fluidodinâmica computacional;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação de dados obtidos;
- Analisar termodinamicamente o dispositivo que utiliza o fluido compressível com o auxílio do *software Microsoft Excel*®;
- Desenvolver a modelagem computacional do protótipo usando o *software SolidWorks*®;
- Efetuar a simulação fluidodinâmica usando o *software Ansys Fluent*®;
- Comparar os resultados com a base teórica;
- Concluir e realizar sugestões de trabalhos futuros.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos que estão organizados da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos geral e específicos. O segundo capítulo traz um levantamento teórico sobre o fluido compressível e a análise computacional. O terceiro capítulo retrata a metodologia utilizada no estudo, com as respectivas ferramentas utilizadas para a coleta de dados e obtenção dos resultados. O quarto capítulo apresenta os resultados encontrados na coleta de dados bem como as discussões acerca destes. Por fim, o quinto capítulo descreve as conclusões e as recomendações para estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o objetivo de abordar teoricamente os conceitos relacionados ao escoamento compressível, os princípios da termodinâmica e mecânica dos fluidos acerca deste tema e por fim, análise computacional.

### 2.1 Escoamento Compressível

Segundo Fox *et al.* (2014), os escoamentos podem ser classificados em compressíveis ou incompressíveis, sendo a variação da massa específica do fluido durante o escoamento a propriedade determinante para essa classificação. Ao se mover a velocidades comparáveis a sua velocidade do som, um fluido apresenta consideráveis variações na sua massa específica, sendo este chamado de escoamento compressível, comum à sua ocorrência em gases (WHITE, 2011). Já no caso do escoamento incompressível, as variações na massa específica do fluido são insignificantes, apresentando comportamento quase constante, sendo este comum em líquidos (FOX *et al.*, 2014).

O bloqueio e as ondas de choque são os dois efeitos mais importantes e peculiares de um escoamento compressível. No primeiro, a vazão de escoamento em uma tubulação é limitada, sendo caracterizada pelo regime sônico. Já as ondas de choque se definem por alterações quase descontínuas de propriedades em um regime supersônico (WHITE, 2011).

A equação de estado de gás ideal (Equação de Clapeyron) relaciona as seguintes propriedades de uma substância: massa específica, temperatura e pressão. Em engenharia a maioria dos gases de interesse, a pressões e temperaturas moderadas, é bem representada por essa equação. Tal equação é definida por (FOX *et al.*, 2014):

$$p = \rho RT \quad (1)$$

A constante específica para cada gás ( $R$ ) é definida como a razão entre a constante universal ( $R_u$ ) e a massa molecular do gás ( $M_m$ ), assim:

$$R = \frac{R_u}{M_m} \quad (2)$$

Onde,

$$R_u = 8314 \text{ N. m}/(\text{kmol. K})$$

$$M_{m_{ar}} = 28,97$$

$$R_{ar} = 0,287 \frac{kJ}{kgK}$$

Ainda de acordo com Fox (2014), o gás ideal possui outras características importantes, são elas: energia interna ( $u$ ), volume específico ( $v$ ), calor específico a volume constante ( $c_v$ ), calor específico a pressão constante ( $c_p$ ), entalpia ( $h$ ) e entropia ( $s$ ). Tais propriedades são definidas a seguir.

### 2.1.1 Energia interna ( $u$ ) e Calor Específico a Volume Constante ( $c_v$ )

A energia interna de uma substância simples é comumente definida como uma função de duas propriedades independentes quaisquer,  $u = u(v, T)$ .

Onde  $v = \frac{1}{\rho}$  é o volume específico do fluido. Deste modo:

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (3)$$

Onde o calor específico a volume constante é expresso por:  $c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$ .

E a energia interna para um gás ideal é uma função somente da temperatura, logo:  $\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$  e  $du = c_v * dT$ .

### 2.1.2 Entalpia ( $h$ ) e Calor Específico a Pressão Constante ( $c_p$ )

A entalpia de uma substância simples pode ser estabelecida por:  $h = u + \frac{p}{\rho}$ . Em geral, para obter uma relação entre entalpia ( $h$ ) e temperatura ( $T$ ) pode-se utilizar uma função de duas propriedades independentes quaisquer,  $h = h(p, T)$ . Assim:

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp \quad (4)$$

Onde o calor específico a pressão constante é dado por:  $c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$ .

E a entalpia para um gás ideal é uma função somente da temperatura, logo:

$$\left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = 0 \text{ e } dh = c_p * dT.$$

Os calores específicos de um gás ideal podem variar com a temperatura no primeiro termo da seguinte equação:

$$c_p - c_v = R \quad (5)$$

Mas apesar disso, essa variação ocorre à mesma taxa, de forma que a diferença entre eles é sempre constante.

A razão entre os calores específicos pode ser definida conforme a seguinte equação:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (6)$$

e eles podem ser expressos em termos de  $k$  e  $R$ , assim:

$$c_p = \frac{kR}{k-1} \quad (7)$$

$$c_v = \frac{R}{k-1} \quad (8)$$

Apesar do fato de que os calores específicos para um gás ideal poderem variar com a temperatura, em faixas de temperatura moderadas os mesmos sofrem pouca alteração, podendo ser tratados como constantes (WHITE, 2011).

Ainda de acordo com White (2011), para o ar (fluido dominante de interesse) têm-se os seguintes valores a temperatura de 298,15K:

$$k_{ar} = 1,4$$

$$c_{p_{ar}} = 1,004 \frac{kJ}{kgK}$$

$$c_{v_{ar}} = 0,717 \frac{kJ}{kgK}$$

### 2.1.3 Entropia ( $s$ )

A entropia é uma propriedade extremamente importante na análise de escoamento compressível, e pode ser definida por:

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{int rev} \quad (9)$$

Deduzida através da segunda lei da termodinâmica, a desigualdade de Clausius define que:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq \Delta S \quad (10)$$

Para processos reversíveis tem-se a seguinte igualdade:

$$T d_s = \frac{\delta Q}{m} \quad (11)$$

Para processos irreversíveis tem-se a seguinte desigualdade:

$$T d_s > \frac{\delta Q}{m} \quad (12)$$

Para um processo adiabático, em que  $\frac{\delta Q}{m} = 0$ . Logo,

$$d_s = 0 \quad \rightarrow \quad \text{processo adiabático reversível (isentrópico)}$$

$$d_s > 0 \quad \rightarrow \quad \text{processo adiabático irreversível (isentrópico)}$$

Portanto, um processo que é reversível e adiabático, é também isentrópico e a entropia permanece constante ao longo do processo.

## 2.2 Propriedades de Estagnação

Conforme Çengel e Boles (2013) a entalpia definida anteriormente por  $h = u + Pv$ , relaciona a energia interna e a energia de escoamento de um fluido. A entalpia de estagnação ( $h_0$ ) combina a entalpia com a energia cinética do fluido, para esta condição os escoamentos ocorrem a alta velocidade (ex.: motores a jato), com a energia potencial do fluido desprezível mas a energia cinética não. Ainda de acordo com Çengel e Boles (2013, p.848): “a entalpia de estagnação representa a entalpia de um fluido quando ele é colocado em repouso”. A expressão que define a mesma é dada por:

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} \quad (13)$$

As propriedades de estagnação (temperatura de estagnação, pressão de estagnação, densidade de estagnação, etc.) são indicadas pelo índice 0. Neste estado a energia cinética de um fluido é convertida em entalpia, implicando em um acréscimo na temperatura e na pressão do fluido. O estado de estagnação isentrópico ocorre quando um fluido é desacelerado (de forma adiabática e reversível) até o repouso. O conceito de estado de estagnação isentrópico e as suas propriedades permite a simplificação de equações e o entendimento de problemas que abrangem os escoamentos (VAN WYLEN *et al.*, 2013; ÇENGEL e BOLES, 2013). Os processos de estagnação isentrópico e real são indicados na figura 1.

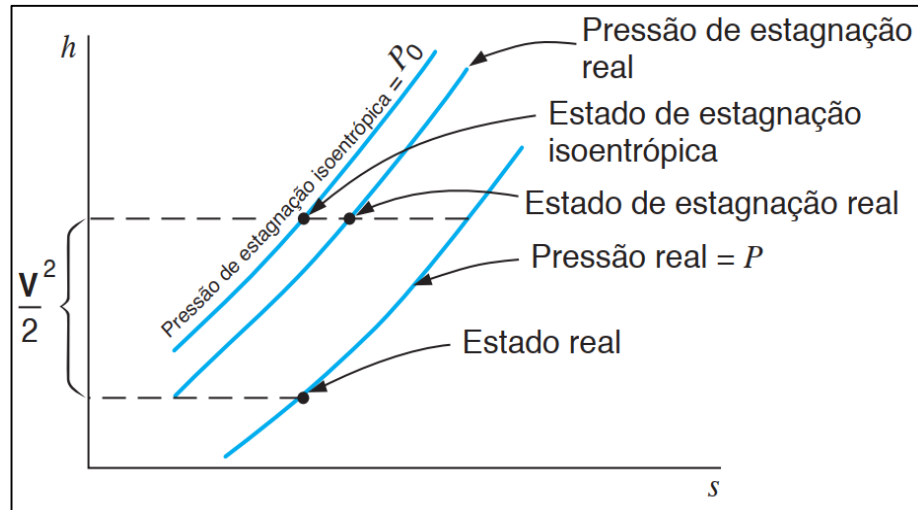


Figura 1 - Diagrama entalpia versus entropia.  
Fonte: Van Wylen *et al.* (2013).

A figura 1 mostra que a entropia de um fluido é constante durante o processo de estagnação isentrópica, já a entalpia de estagnação é a mesma para os estados de estagnação isentrópica e real, porém a pressão de estagnação real é menor do que a pressão de estagnação isentrópica, o que pode ser atribuído ao aumento de entropia causado pelo atrito de fluidos.

As propriedades de estagnação, temperatura, pressão e densidade, mencionadas anteriormente são expressas, respectivamente, pelas seguintes equações (ÇENGEL e BOLES, 2013):

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad (14)$$

$$\left(\frac{P_0}{P}\right) = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{k/(k-1)} \quad (15)$$

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/(k-1)} \quad (16)$$

### 2.3 Velocidade do Som

Uma onda de pressão infinitesimalmente pequena pode se deslocar com certa velocidade através de um meio, tal velocidade é denominada de velocidade do som ou velocidade sônica,

que é um importante parâmetro no estudo do escoamento de fluidos compressíveis. A velocidade sônica de uma onda de pressão no instante em ocorre uma perturbação depende do estado do fluido, e esta velocidade para um gás ideal em função de suas propriedades pode ser expressa pela seguinte equação (VAN WYLEN *et al.*, 2013):

$$c = \sqrt{kRT} \quad (17)$$

## 2.4 Número de Mach

Segundo Fox *et al.* (2014) o número de Mach é definido como a razão entre a velocidade do objeto que se desloca no fluido (ou velocidade real do fluido) e a velocidade das ondas sonoras neste meio no mesmo estado, e é dado pela seguinte equação:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (18)$$

Desta forma, de acordo com White (2011) os escoamentos de fluidos são geralmente descritos em relação ao número de Mach, logo:

- **Escoamento Incompressível:** escoamentos com velocidade muito menor do que a velocidade do som ( $Ma < 0,3$ ), neste caso os efeitos de densidade são desprezíveis;
- **Escoamento Compressível Subsônico:** escoamentos com velocidade menor do que a velocidade do som ( $Ma < 1$ ), condição em que os efeitos de densidade são relevantes, mas não acarretam em ondas de choque;
- **Escoamento Compressível Sônico:** escoamento com velocidade igual a velocidade do som ( $Ma = 1$ );
- **Escoamento Compressível Transônicos:** escoamento que possui ambas as regiões: subsônica e supersônica (Mach entre 0,9 e 1,2), aqui se originam as ondas de choque, dividindo regiões subsônicas e supersônicas do escoamento;
- **Escoamento Compressível Supersônico:** escoamento com velocidade maior do que a velocidade do som ( $Ma > 1$ ), em que as ondas de choque ocorrem, mas não há regiões subsônicas;
- **Escoamento Compressível Hipersônico:** escoamento com velocidade muito maior do que a velocidade do som ( $Ma \geq 5$ ), condição em que as ondas de choque são especialmente fortes.



## 2.5 Escoamento Isentrópico Unidimensional de um Gás Ideal em Bocais

As propriedades do fluido durante o escoamento em diversos mecanismos como bocais, difusores e passagens de pás de turbinas se alteram de maneira substancial somente na direção do escoamento, dessa forma considera-se o escoamento como sendo isentrópico unidimensional (ÇENGEL e BOLES, 2013). Os autores complementam ainda que o dispositivo utilizado para acelerar um escoamento é chamado de bocal, na figura 2 são expostas duas configurações deste equipamento.

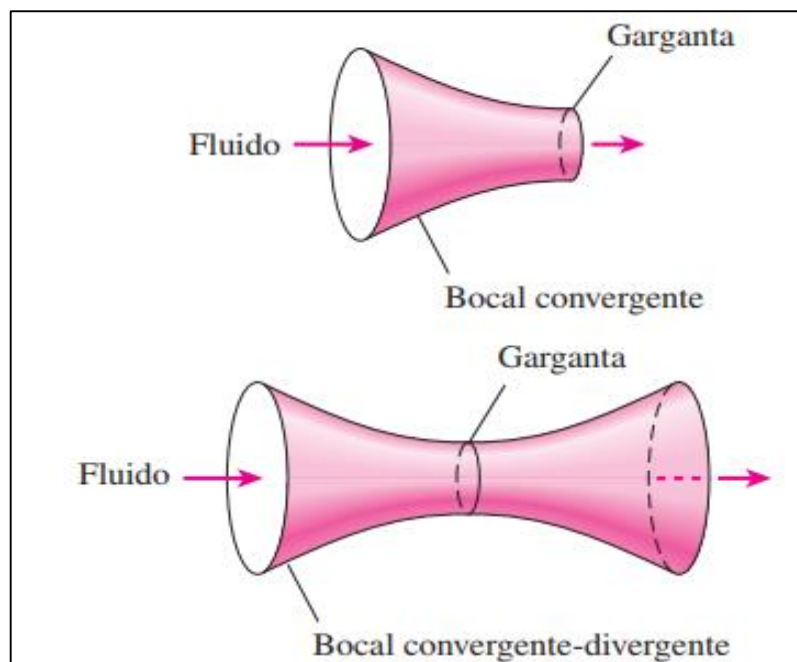


Figura 2 - Configurações de bocais.  
Fonte: Çengel e Boles (2013).

Verificam-se na figura 2 duas configurações do dispositivo que são, respectivamente, bocal convergente (subsônico) e bocal convergente-divergente (utilizado para acelerar o fluido a velocidades supersônicas). A seção transversal que apresenta a menor área nos dispositivos é chamada de garganta, nela o número Mach é igual a 1 (condição de escoamento compressível sônico).

A velocidade de escoamento do fluido varia de acordo com a área das seções transversais de escoamento no dispositivo. Tal dependência pode ser interpretada em um escoamento isentrópico unidimensional a partir de relações entre pressão, temperatura, densidade, velocidade, área de escoamento e número de Mach. Desta forma, ao considerar um escoamento isentrópico unidimensional, a partir da equação da continuidade,

$$\dot{m} = \rho VA = \text{constante} \quad (19)$$

e de outras relações, obtém-se a equação que descreve a variação da pressão com a área de escoamento (VAN WYLEN *et al.*, 2013; ÇENGEL e BOLES, 2013). Tal equação é dada por:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - Ma^2) \quad (20)$$

Para Van Wylen *et al.* (2013), a partir da equação apresentada anteriormente tem-se determinadas características importantes quanto à forma adequada para os bocais e difusores, tais características são evidenciadas na figura 3.

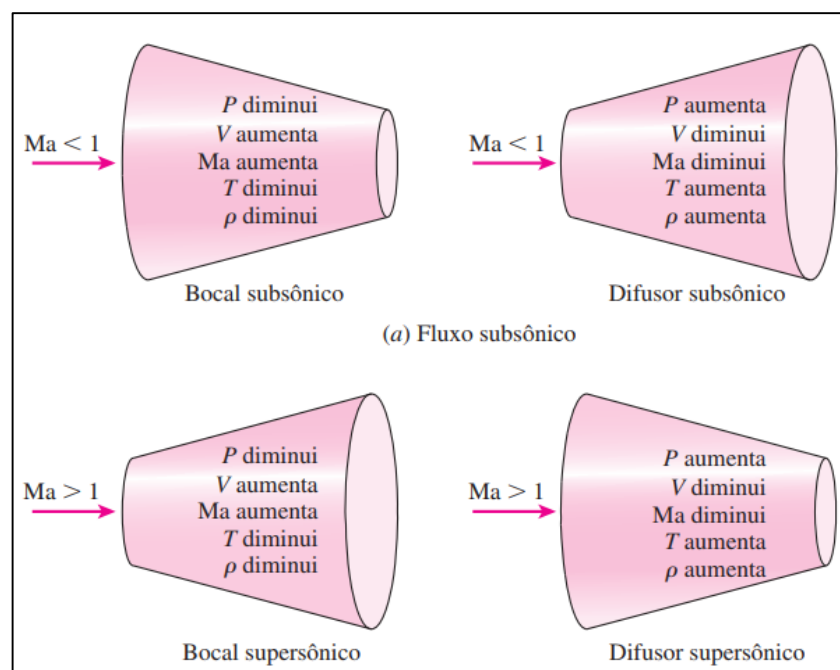


Figura 3 - Variações das propriedades de escoamento em bocais e difusores. Fonte: Çengel e Boles (2013).

Conforme a figura 3, para um bocal ( $dp < 0$ ), tem-se:

- Para um bocal subsônico,  $Ma < 1$ ,  $dA < 0$ , e o bocal é convergente;
- Para um bocal supersônico,  $Ma > 1$ ,  $dA > 0$ , e o bocal é divergente.

A figura 3 destaca ainda que para um difusor ( $dp > 0$ ), tem-se:

- Para um difusor subsônico,  $Ma < 1$ ,  $dA > 0$ , e o difusor é divergente;
- Para um difusor supersônico,  $Ma > 1$ ,  $dA < 0$ , e o difusor é convergente.

A velocidade sônica pode ser encontrada unicamente na garganta de um bocal ou difusor quando  $Ma = 1$  e  $dA = 0$  (VAN WYLEN *et al.*, 2013).

### 2.5.1 Relações de Propriedades para o Escoamento Isentrópico dos Gases Ideais

Algumas relações entre as propriedades reais, as propriedades de estagnação e o número de Mach podem ser desenvolvidas, e são muito úteis na modelagem do escoamento isentrópico de um gás ideal em bocais (ÇENGEL e BOLES, 2013).

A determinação das relações entre as propriedades reais, as propriedades de estagnação e o número de Mach são de suma importância para a compreensão do escoamento isentrópico de um gás. Tais relações são expressas a seguir (VAN WYLEN *et al.*, 2013; ÇENGEL e BOLES, 2013):

- Temperatura  $T$  de um gás ideal é relacionada com a temperatura de estagnação (já abordada anteriormente), assim:

$$\left(\frac{T_0}{T}\right) = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad (21)$$

- A razão de entre a pressão de estagnação (já abordada anteriormente) e a pressão estática é dada por:

$$\left(\frac{P_0}{P}\right) = \left[1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2\right]^{k/(k-1)} \quad (22)$$

- A razão entre a densidade de estagnação (já abordada anteriormente) e a densidade estática é expressa por:

$$\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) = \left[1 + \frac{(k-1)}{2} Ma^2\right]^{1/(k-1)} \quad (23)$$

São conhecidos os valores referentes as propriedades (mencionadas acima) de um gás ideal que apresenta  $k$  igual a 1,4. Quando o valor de  $k$  é desconhecido, pode-se utilizar um *software* computacional, por exemplo o *Microsoft Excel*®, para a sua determinação (VAN WYLEN *et al.*, 2013).

As propriedades críticas de um fluido são determinadas na garganta do dispositivo, quando  $Ma = 1$ , essas propriedades são chamadas de pressão crítica, temperatura crítica e massa específica crítica e são expressas pelo índice  $*$  ( $p^*$ ,  $T^*$ ,  $\rho^*$ , *etc.*). Fixado  $Ma = 1$ , tem-se (VAN WYLEN *et al.*, 2013; ÇENGEL e BOLES, 2013):

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad (24)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \frac{2}{k+1} \frac{k/(k-1)}{k+1} \quad (25)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \frac{2}{k+1} \frac{k/(k-1)}{k+1} \quad (26)$$

A relação para a variação entre a área da seção transversal de escoamento em que Mach é  $Ma$  e a área da garganta ( $A/A^*$ ) é expressa na equação a seguir (VAN WYLEN *et al.*, 2013; ÇENGEL e BOLES, 2013).

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} \left[ \left( \frac{2}{k+1} \right) \left( 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \right]^{(k+1)/2(k-1)} \quad (27)$$

A Figura 4, ilustra a variação de  $A/A^*$  com o número de Mach.

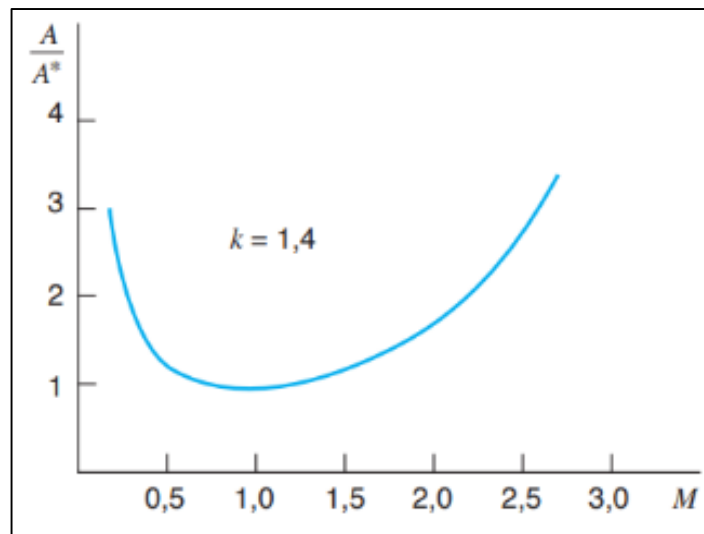


Figura 4 - Relação de áreas em função do número de Mach para um bocal com escoamento adiabático e reversível.  
Fonte: Van Wylene *et al.* (2013).

De acordo com a figura 4, para um valor fixo de  $k = 1,4$ , a variação do número de Mach mostra nitidamente que um bocal subsônico é convergente e um bocal supersônico é divergente.

## 2.6 Análise Computacional

Pastorio *et al.* (2021) afirma que a maneira com que a sociedade arquiteta a produção e o consumo de produtos e serviços sofreu enormes impactos devido à evolução das ferramentas

tecnológicas que difundem informações e a comunicação, facilitando assim a interação entre pessoas ao redor do mundo.

Tal influência está diretamente associada ao processo de globalização que em geral, pode ser definido como a eliminação de barreiras econômicas entre países, sendo caracterizado pela flexibilidade dos recursos produtivos, como por exemplo: mão-de-obra; capital; recursos financeiros; tecnologia. Desta forma, alterações estruturais severas têm ocorrido em ramos distintos (relativamente autônomos), que interagem entre si, como é o caso da telecomunicação e a informática. Portanto, esse evento modificou o desenvolvimento da tecnologia de automação (ou de ponta) (NAZARENO *et al.*, 2007; HAYNE e WYSE, 2018).

Dentro deste contexto, e graças ao surgimento de ferramentas cada vez mais acessíveis (menor custo e maior facilidade), as análises computacionais vêm passando por um processo de ascensão, no qual as grandes organizações fazem a sua utilização para o entendimento de problemas e tomada de decisões difíceis de maneira científica (GAVIRA, 2003).

Segundo Carvalho *et al.* (2015), dentro da análise computacional, a modelagem e a simulação são extremamente relevantes para a área da engenharia, que mediante a modelos matemáticos compatíveis com o problema é possível prever e averiguar situações com exatidão. A produção e execução de um experimento de forma sucessiva se tornam complexas devido a uma série de fatores, tais como o custos e dimensões do mesmo. Porém, isso se torna possível ao fazer uso de corretas ferramentas computacionais que são associadas a modelos matemáticos e princípios físicos que envolvem o experimento. Por exemplo, na concepção de experimentos que buscam o entendimento de interações fluido/estrutura em dispositivos fluidomecânicos que utilizam diferentes escoamentos de fluidos.

Para a compreensão de simulações e modelagens de sistemas, a definição de alguns conceitos básicos se faz necessária, são eles: o conceito de sistema e o conceito de modelo (ARAGÃO, 2011).

### **2.6.1 Sistemas**

Banks *et al. apud* Gavira (2003) afirma que os sistemas podem ser conceituados como um conjunto de partes integrantes e interdependentes, formando assim uma unidade com um determinado objetivo e função. Portanto, qualquer meio ou condição em que se identifica a realização de uma certa ação (onde todos os incluídos ajudam de alguma forma) é considerado um sistema. A figura 5 ressalta, de acordo com Law e Kelton (2000), a maneira como um sistema pode ser analisado.

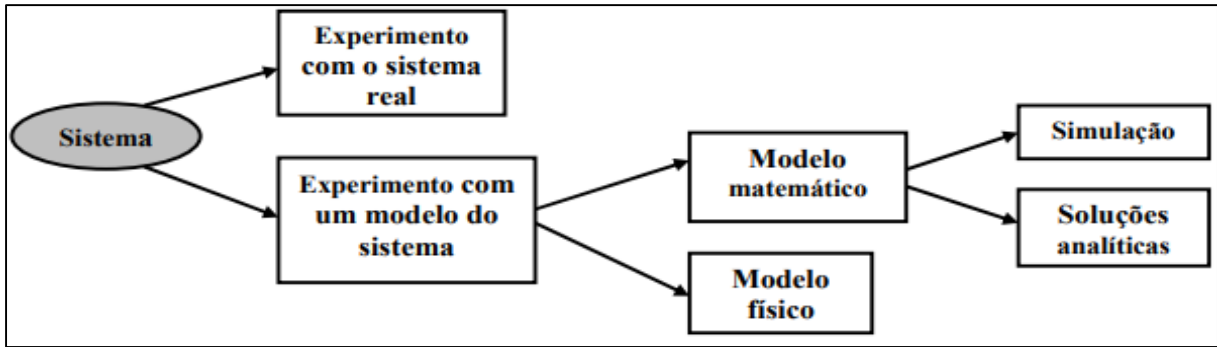


Figura 5 - Abordagem de um sistema.  
Fonte: Law e Kelton (2000).

A abordagem de um sistema representada na figura 5, indica que existem duas possibilidades para analisar um estudo, através do sistema propriamente dito e através de um modelo que represente este sistema. E a segunda possibilidade compreende na modelagem feita através de dispositivos que representam de maneira satisfatória e precisa o sistema real.

## 2.6.2 Modelos

Os modelos, de acordo com Forrester (1991), podem ser definidos como a representação de um sistema de alguma outra forma que não seja a própria entidade. Os modelos são capazes de resumir o funcionamento do sistema num pequeno número de variáveis que permita seu entendimento e quando comparados aos sistemas reais aos quais representam, detêm de algumas vantagens, tais como, baixo custo e rapidez na obtenção de informações. A figura 6 fornece uma relação entre sistema e modelo no processo de modelagem.

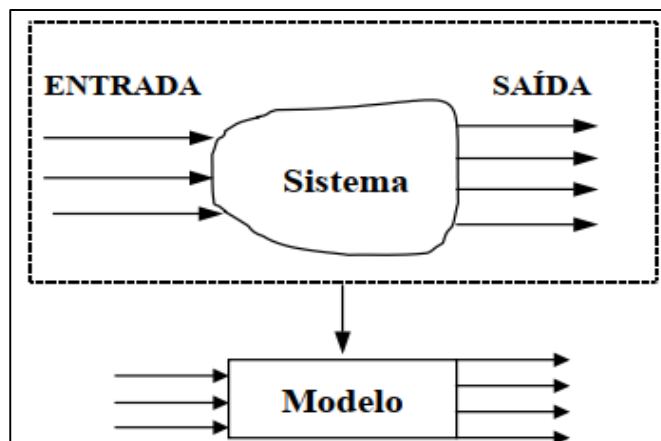


Figura 6 - Processo simples de modelagem.  
Fonte: Cassandas e Lafortune (1999).

Observa-se na figura 6, que os modelos levam em consideração as características dos elementos do sistema, bem como as suas peculiaridades. E a partir do modelo é possível prever o comportamento do sistema sob as mesmas condições as quais o modelo foi estudado.

Basicamente, os modelos de simulação podem ser classificados em (CARLETO, 2006):

- **Estáticos ou dinâmicos:** os modelos estáticos representam o estado de um sistema em regime permanente, ou seja, não é considerado a variável tempo, enquanto os modelos dinâmicos representam o estado de um sistema em um regime transiente, ou seja, as características do sistema variam com o tempo;
- **Determinístico ou estocástico:** o modelo determinístico não utiliza variáveis aleatórias de entrada, enquanto os modelos estocásticos usam uma ou mais variável aleatória;
- **Discretos ou contínuos:** nos modelos discretos o avanço da contagem de tempo na simulação se dá na forma de incrementos, podendo os valores serem fixos ou determinados em função do acontecimento de eventos, podendo determinar os valores das variáveis de estado do sistema quando há atualização da contagem de tempo. Ao contrário, nos modelos contínuos, o avanço da contagem de tempo na simulação é de forma contínua, possibilitando aferir os valores das variáveis de estado a qualquer instante.

### 2.6.3 Simulação Computacional

De modo geral, o estudo de simulação tem como objetivo principal conhecer o comportamento de um sistema e avaliar estratégias para a sua operação (GAVIRA, 2003). Carleto (2006) considera alguns estágios importantes e dinâmicos para o processo de modelagem e na simulação computacional, tais estágios são descritos a seguir:

- **Definição do problema:** etapa inicial em que o problema é estabelecido;
- **Concepção do sistema:** aqui se estuda os fatores que possivelmente têm influência sobre o sistema;
- **Representação do sistema:** fase em que se define um modelo representativo do sistema, caracterizando-o;

- **Comportamento do sistema:** esta etapa consiste na investigação do comportamento do sistema com base em modelos matemáticos;
- **Avaliação do modelo:** aqui são verifica-se a qualidade e validade do modelo, por meio de vários testes;
- **Estratégias de utilização do modelo:** por fim, utiliza-se o modelo para avaliar situações diversas sobre o sistema abordado com o intuito de atingir um padrão para o mesmo.

Desta forma, estes estudos podem ser empregados em diversas atividades, tais como (LAW e KELTON, 2000):

- Experimentação e avaliação (predição de consequências de alterações desnecessárias no processo, evitando gastos);
- Estudo de novos sistemas (proteção ou melhoria);
- Projeto e análise de sistemas de manufatura;
- Entendimento de um sistema real (componentes, interações, processos);
- Análise dos efeitos de alterações das condições ambientais na operação de um sistema;
- Verificação ou demonstração de uma nova ideia, sistema ou solução de um problema;
- Verificação e comparação de soluções dos métodos analíticos ou intuitivos com aquelas obtidas em outras simulações (comparação das abordagens de resolução de problemas);
- Estudo de sistemas dinâmicos em tempo real (reduzido ou dilatado);
- Projeção do futuro (previsão e planejamento quantitativo).

#### 2.6.4 Fluidodinâmica Computacional

Fluidodinâmica computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) pode ser definida como um conjunto de métodos computacionais matemáticos, utilizados para prever as propriedades em um dado escoamento, que pode sofrer interações de alguns aspectos, tais como, convecção, difusão, turbulência, entre outros (BICALHO, 2015). As propriedades físicas de um escoamento podem ser regidas por equações governamentais, sendo estas denominadas equações de Navier-Stokes. Tais equações não possuem soluções analíticas devido ao fato de aspectos importantes dessas equações serem não-lineares (BICALHO, 2015; MALISKA, 2017).

Na Engenharia, a simulação computacional é essencial para o estudo da fluidodinâmica. Dentre os *softwares* que realizam este tipo de simulação destacam-se o Ansys® (*Fluent* e *CFX*)



(FERNANDES, 2017). De acordo com Davidson (2002), para o estudo de fluidodinâmica existe uma sequência de quatro etapas.

A primeira etapa é construir a geometria do problema em *software* do tipo *Computer Aided Design* (CAD), em que são definidas as dimensões e condições iniciais (DAVIDSON, 2002). Um exemplo de *software* CAD é o *SolidWorks®*, esta ferramenta permite a confecção de modelos detalhados em três dimensões (3D) (CHANG, 2021).

A segunda etapa é a geração da malha (*meshing*) que é a reprodução discreta da geometria em que o escoamento será calculado. Essa discretização torna o sistema contínuo em sistema discreto de equações, determinando a disposição nas quais as variáveis do escoamento serão calculadas (FERZIGER e PERIC, 2002; BICALHO, 2015).

Na terceira etapa as equações algébricas não-lineares são solucionadas. A complexidade e o tamanho das equações geradas estão relacionados à dimensão do problema, ao número de nós da malha, bem como ao método de discretização empregado. Dois métodos de resolução para as equações algébricas lineares podem ser utilizados: os métodos diretos e os métodos iterativos. Este último consiste na repetição de algoritmos nos sistemas de equações até que ocorra a convergência, sendo esta atingida quando a diferença das soluções entre duas interações consecutivas, os resíduos, é igual ou menor ao critério de convergência previamente definido (FERZIGER e PERIC, 2002).

Por fim, a quarta e última etapa, após uma convergência satisfatória, consiste em avaliar a solução para atingir os dados desejados (DAVIDSON, 2002). A precisão de uma solução deve sempre ser avaliada com base nos dados disponíveis, sendo necessário alterar as condições de fronteira ou a qualidade da malha, por exemplo, caso a solução não apresente resultados razoáveis (ANSYS, 2013).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o processo utilizado para realização da pesquisa, caracterizando a essência do estudo, os materiais utilizados, os métodos, as variáveis e indicadores para realizar as análises e cálculos pertinentes deste trabalho.

#### 3.1 Tipo de Pesquisa

De acordo com Marconi e Lakatos (2017, p. 169), a pesquisa pode ser definida como “um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer tratamento científico e se constitui no caminho para conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais”. O principal objetivo da pesquisa é solucionar problemas por meio do emprego de procedimentos científicos (GIL, 2008).

Consoante com Vergara (2016) a pesquisa pode ser classificada quanto a abordagem do problema, de maneira qualitativa, quantitativa ou de ambos os modos. Quanto aos objetivos a pesquisa é classificada em exploratória, descritiva e explicativa, e quanto aos procedimentos técnicos é classificada em bibliográfica, documental, experimental, estudo de caso, pesquisa-ação e pesquisa participante (GIL, 2008). O presente estudo pode ser classificado como:

- **Quanto a abordagem do problema:** como uma pesquisa quantitativa. De acordo com Silva e Menezes (2005), a pesquisa quantitativa pode ser definida como uma informação que pode ser expressa numericamente através de dados estatísticos, opiniões e elementos obtidos em pesquisa campo.
- **Quanto aos seus objetivos:** como uma pesquisa exploratória. Conforme Gil (2008), a pesquisa exploratória tem como objetivo esclarecer, desenvolver e modificar conceitos e ideias baseado na construção de problemas mais precisos ou em hipóteses que podem ser estudadas posteriormente. Este tipo de pesquisa pode envolver levantamento bibliográfico, documental, entrevistas fora de padrão e estudos de caso, a fim de oferecer uma visão geral sobre algo.
- **Quanto aos procedimentos técnicos:** como uma pesquisa bibliográfica e um estudo de caso. Marconi e Lakatos (2017) caracterizam a pesquisa bibliográfica como a busca na literatura (livros, monografias, teses, artigos científicos, entre outros) sobre o tema a ser estudado, colocando o autor a par do que já é conhecido sobre o assunto. Já o estudo de caso, segundo Vergara (2016), é limitado a um estudo detalhado e profundo em torno

de um ou de poucos itens (empresas, produtos, pessoas, atividade, entre outros), podendo ou não ocorrer no campo.

Baseado nestas definições o presente trabalho é classificado como uma pesquisa quantitativa pois faz uso de dados numéricos, cálculos e análise estatística. É uma pesquisa exploratória pois analisa o comportamento de um fluido compressível em um bocal convergente descrevendo, registrando e comparando os dados provenientes de alterações das variáveis do sistema. O estudo possui ainda, caráter bibliográfico pois utiliza diversas fontes de pesquisa para obter uma base teórica sólida acerca do tema, e se enquadra também como um estudo de caso, pois busca analisar computacionalmente o comportamento de um fluido compressível em um bocal convergente.

### 3.2 Materiais e Métodos

Com o intuito de analisar os parâmetros de operação de um fluido compressível em um bocal convergente, foram realizados diversos procedimentos que são expostos na figura 7.

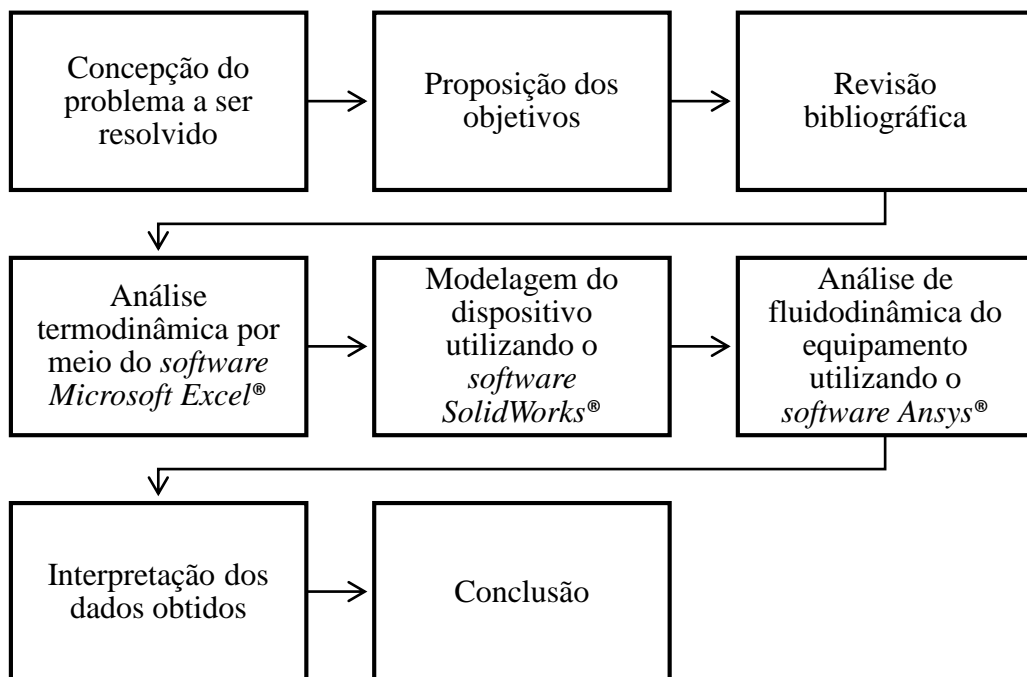


Figura 7 - Fluxograma dos procedimentos realizados na pesquisa.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Conforme o fluxograma apresentado na figura 7, a primeira etapa para a realização da pesquisa consiste na definição da problemática, juntamente com a proposição dos objetivos. Tal problemática se dá em decorrência do redirecionamento de um fluxo compressível de ar

através de um dispositivo, um bocal convergente. Em seguida, é realizado um levantamento teórico acerca do tema e dos métodos utilizados para as análises, em livros, artigos científicos, monografias, teses, dissertações e patentes.

O comportamento e as propriedades (massa específica, temperatura, pressão, velocidade e o número de Mach) do fluido no equipamento, bem como a relação entre a área de entrada e a área da garganta do mesmo são determinados a partir de uma análise termodinâmica que utiliza equações do escoamento compressível, tais equações são inseridas e calculadas por meio do *software Microsoft Excel*®. Este mesmo *software* é utilizado ainda para expressar os valores obtidos anteriormente em gráficos, que possibilitam o entendimento do comportamento do escoamento quando as variáveis do processo sofrem alterações.

Após a etapa descrita acima, é realizada a modelagem tridimensional de um protótipo de bocal convergente, tal modelagem é produzida por meio do *software SolidWorks*®. Em seguida o dispositivo passa por uma análise de fluidodinâmica realizada através do *software Ansys Fluent*®. Por fim, os dados provenientes das análises são interpretados com o intuito de quantificar a energia elétrica produzida, e é realizada uma conclusão acerca de todo o estudo.

### 3.3 Variáveis e Indicadores

Para Marconi e Lakatos (2017), variável é o termo utilizado para se referir a um conceito operacional, a uma quantidade que se altera, a uma classificação, a um aspecto que pode ser mensurável, a uma propriedade, entre outros.

Segundo Gil (2008), os elementos que atribuem valor de maneira efetiva são chamados de indicadores, e a sua mensuração é determinante para o conhecimento do valor da variável. Em determinadas situações a escolha do indicador se torna complexa pelo fato de existirem vários indicadores para uma única variável, sendo necessário optar entre os indicadores apropriados, porém de difícil mensuração e os menos adequados com mensuração mais simples.

De acordo com as definições apresentadas, pode-se afirmar que este trabalho possui algumas variáveis e seus respectivos indicadores, que são descritos na tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Escoamento Compressível	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluido</li> <li>• Energia interna</li> <li>• Volume específico</li> <li>• Calor específico a volume constante</li> <li>• Calor específico a pressão constante</li> <li>• Constante específica de cada gás</li> <li>• Entalpia</li> <li>• Entropia</li> <li>• Velocidade do som</li> <li>• Número de Mach</li> </ul>
Bocal Convergente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área</li> <li>• Pressão</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Massa específica</li> <li>• Velocidade</li> </ul>
Análise do Bocal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise termodinâmica</li> <li>• Modelagem tridimensional</li> <li>• Simulação fluidodinâmica</li> </ul>

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

### 3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Os instrumentos de coleta de dados são ferramentas de grande importância para este estudo, uma vez que todo o embasamento necessário é obtido por meio destes, possibilitando assim o desenvolvimento satisfatório do presente trabalho. Visto que este estudo se classifica em uma pesquisa bibliográfica, a coleta de dados se dá por meio de livros, artigos científicos, monografias, teses, dissertações e patentes.

### **3.5 Tabulação dos Dados**

Após a coleta de dados, estes são tabulados para melhor visualização no *software Microsoft Excel®*, que é utilizado também para a realização de cálculos das propriedades do fluido e razão de áreas do equipamento, bem como para a construção de gráficos e suas análises. Após a análise termodinâmica realizada com o auxílio do *software Microsoft Excel®*, é elaborada, através do *software SolidWorks®*, uma modelagem tridimensional de um protótipo de bocal convergente. Emprega-se ainda o *software Ansys Fluent®* para a realização de uma análise fluidodinâmica acerca do dispositivo. Por fim, para relatar, transcrever e discutir os resultados alcançados, utiliza-se o *software Microsoft Word®*.

### **3.6 Considerações Finais do Capítulo**

O presente capítulo demonstra toda a metodologia utilizada neste estudo apresentando as classificações quanto ao tipo de pesquisa, bem como as ferramentas e técnicas utilizadas na elaboração deste trabalho. Foram abordados também os materiais e métodos, os mecanismos de coleta de dados e a tabulação para uma adequada manipulação dos dados. No capítulo seguinte são abordados os resultados referentes às análises propostas e é feita uma discussão para uma melhor compreensão do estudo realizado.

## 4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os dados de entrada do problema proposto, detalhando as propriedades termodinâmicas do escoamento do ar no bocal convergente. Em seguida, são expostos os detalhes da modelagem do dispositivo em *software* CAD, a elaboração da malha do domínio do fluido, e posteriormente, as condições de entrada e de contorno inseridas no *software* de simulação. Por fim, os resultados obtidos através da simulação são exibidos e discutidos.

### 4.1 Condições Iniciais

Inicialmente foram adotadas algumas condições de operação para o escoamento compressível no bocal. Considerando um escoamento isentrópico, a pressão, a temperatura e a velocidade do fluido são expostas na tabela 2.

Tabela 2 - Condições iniciais de operação.

Pressão (P)	101325 Pa
Temperatura (T)	373,15 K
Velocidade (V)	5,00 m/s

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

A Tabela 2 mostra que na entrada do equipamento foram consideradas como características do fluido, que opera como um gás perfeito, a pressão atmosférica de 101325Pa, uma temperatura de 373,15K (100°C), e uma velocidade de 5m/s, sendo estes dois últimos valores relativamente baixos.

### 4.2 Análise Termodinâmica

Considerando a área de entrada do bocal de  $1\text{m}^2$ , a constante específica para o ar de  $0,287\text{ kJ/kg.K}$ , e as condições iniciais de entrada indicadas anteriormente, o comportamento do fluido (ar) na entrada do dispositivo (bocal convergente) foi descrito conforme as propriedades termodinâmicas calculadas do escoamento, sendo estes dados representados na tabela 3.

Tabela 3 - Condições do escoamento na entrada do bocal.

Massa específica ( $\rho$ )	0,9459 kg/m <sup>3</sup>
Calor Específico a Pressão Constante ( $c_p$ )	1,0152 kJ/kgK
Calor Específico a Volume Constante ( $c_v$ )	0,7282 kJ/kgK
Razão entre Calores Específicos (k)	1,394
Velocidade do Som (c)	386,40 m/s
Número de Mach (Ma)	0,013

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Conforme a tabela 3, e a partir das condições preestabelecidas, a massa específica do fluido ( $\rho$ ) calculada na entrada do bocal foi de 0,9459kg/m<sup>3</sup>, o calor específico a pressão constante ( $c_p$ ) de 1,0152kJ/kg.K, o calor específico a volume constante ( $c_v$ ) de 0,7282kJ/kg.K, a razão entre os calores específicos (k) de 1,394, a velocidade do som (c) de 386,40m/s, e o número de Mach igual a 0,013.

As propriedades de estagnação isentrópicas, necessárias para descrever o comportamento do fluido ao longo do bocal durante o escoamento, foram calculadas e são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades de estagnação isentrópicas.

Temperatura ( $T_0$ )	373,16 K
Pressão ( $P_0$ )	101311,8 Pa
Massa Específica ( $\rho_0$ )	0,9460 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

De acordo com a tabela 4, a temperatura, a pressão e a massa específica de estagnação isentrópicas calculadas foram, respectivamente, iguais a 373,16K, 101311,8Pa e 0,9460kg/m<sup>3</sup>.

A tabela 5 apresenta a razão entre as propriedades iniciais do fluido para o número de Mach calculado (0,013) e as propriedades de estagnação, bem como a razão entre a área da seção transversal de escoamento para o Mach inicial e a área da garganta.



Tabela 5 - Razão das propriedades na entrada.

Razão de Temperatura ( $T/T_o$ )	0,99997
Razão de Pressão ( $P/P_o$ )	0,99988
Razão de Massa Específica ( $\rho/\rho_o$ )	0,99992
Razão de Área ( $A/A^*$ )	44,755

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Segundo a tabela 5, a razão de temperatura calculada é igual a 0,99997, a razão de pressão 0,99988 e a razão de massa específica 0,99992, o que denota que, como o número de Mach é muito baixo, os valores de propriedades de estagnação quase correspondem aos valores das propriedades estáticas. Já a razão de área corresponde a 44,75565.

A partir das razões calculadas e apresentadas anteriormente, as propriedades iniciais do escoamento foram ajustadas e são apontadas na tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades iniciais do escoamento.

Temperatura (T)	373,15 K
Pressão (P)	101300 Pa
Massa Específica ( $\rho$ )	0,9459 kg/m <sup>3</sup>
Velocidade (V)	4,999 m/s

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Observa-se na tabela 6 que as propriedades ajustadas para o escoamento na entrada do bocal correspondem a temperatura de 373,15K (mesma temperatura que a estática), pressão de 101300Pa (um pouco menor que a pressão estática), massa específica de 0,9459kg/m<sup>3</sup> (corresponde a calculada a partir das propriedades estáticas) e velocidade de 4,999m/s.

Com o intuito de evitar a ocorrência do fenômeno das ondas de choque após o bocal, adotou-se um valor máximo de número de Mach igual 0,91 na garganta, referente ao limite de saída do equipamento. Logo, as razões e as propriedades de saída calculadas com base neste valor são mostradas nas tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 – Razão das propriedades na saída.

Razão de Temperatura ( $T/T_o$ )	0,85971
Razão de Pressão ( $P/P_o$ )	0,58584
Razão de Massa Específica ( $\rho/\rho_o$ )	0,68144
Razão de Área ( $A/A^*$ )	1,00715

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Com base na tabela 7, a razão de temperatura é igual 0,85971, a razão de pressão 0,58584 e a razão de massa específica 0,68144. Já a razão entre a área da seção transversal de escoamento para o número de Mach de 0,91 e a área da garganta corresponde a 1,00715.

Tabela 8 – Propriedades na saída do equipamento.

Temperatura (T)	320,81 K
Pressão (P)	59352,67 Pa
Massa Específica ( $\rho$ )	0,6446 kg/m <sup>3</sup>
Área (A)	0,0225 m <sup>2</sup>

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Nota-se na tabela 8 que a temperatura na saída do equipamento foi de 320,81K, a pressão 59352,67Pa, a massa específica 0,6446kg/m<sup>3</sup> e a área da seção 0,0225m<sup>2</sup>.

A velocidade do som e a velocidade do escoamento na saída do bocal (para Mach igual a 0,91) foram calculadas com base na razão entre os calores específicos correspondentes a temperatura de saída, sendo estes valores apontados na tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades na saída do equipamento.

Calor Específico a Pressão Constante ( $c_p$ )	1,006915 kJ/kg.K
Calor Específico a Volume Constante ( $c_v$ )	0,719915 kJ/kg.K
Razão entre Calores Específicos (k)	1,399
Velocidade do Som (c)	358,86 m/s
Velocidade do escoamento (V)	326,56 m/s

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Percebe-se na tabela 9 que na saída do equipamento foram obtidos: calor específico a pressão constante ( $c_p$ ) de 1,0070kJ/kg.K, calor específico a volume constante ( $c_v$ ) de 0,7199kJ/kg.K, razão entre os calores específicos ( $k$ ) de 1,399, velocidade do som ( $c$ ) de 358,86m/s e velocidade do escoamento de 326,56m/s.

### 4.3 Modelagem do Bocal Convergente

Após o cálculo das propriedades termodinâmicas com auxílio do *software Microsoft Excel®*, foi possível dimensionar um protótipo de bocal convergente, apresentado na figura 8, sendo este modelado através do *software SolidWorks®*.

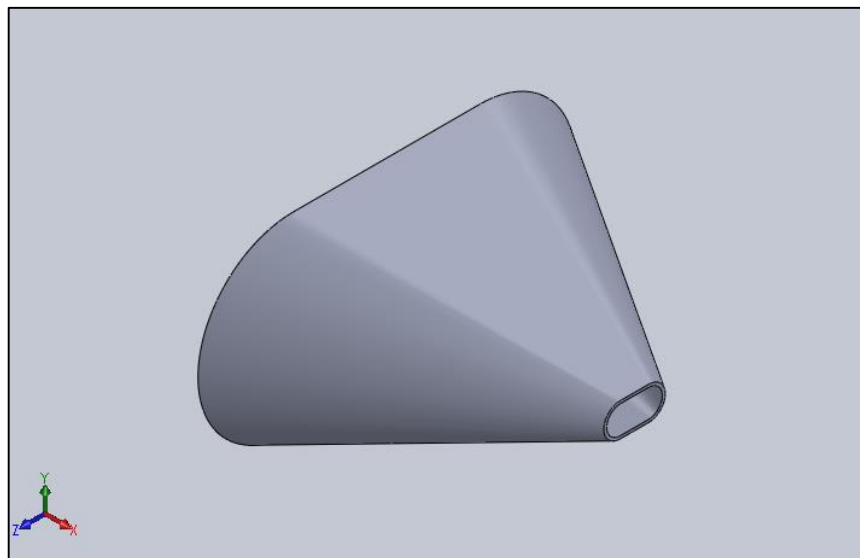


Figura 8 – Protótipo de bocal convergente.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O protótipo mostrado na figura 8 foi modelado com base na área da seção de entrada admitida inicialmente ( $1\text{m}^2$ ) e na área da seção de saída ( $0,022503\text{m}^2$ ), calculada através das relações termodinâmicas, e estas seções transversais possuem a mesma forma geométrica. O bocal possui também um comprimento preestabelecido de 1m.

Diversos estudos analisam bocais convergente-divergente (SANTOS e VARELLA JÚNIOR, 2016; SINGH e TRIPATHI, 2017), porém no caso da presente pesquisa foi escolhido trabalhar com o bocal convergente para que a velocidade obtida se enquadrasse no regime subsônico, evitando a ocorrência das ondas de choque (WHITE, 2011).

#### 4.4 Análise Fluidodinâmica do Bocal Convergente

Inicialmente, para a análise fluidodinâmica a geometria do bocal convergente foi importada para o *software Ansys®*, como mostra a figura 9.

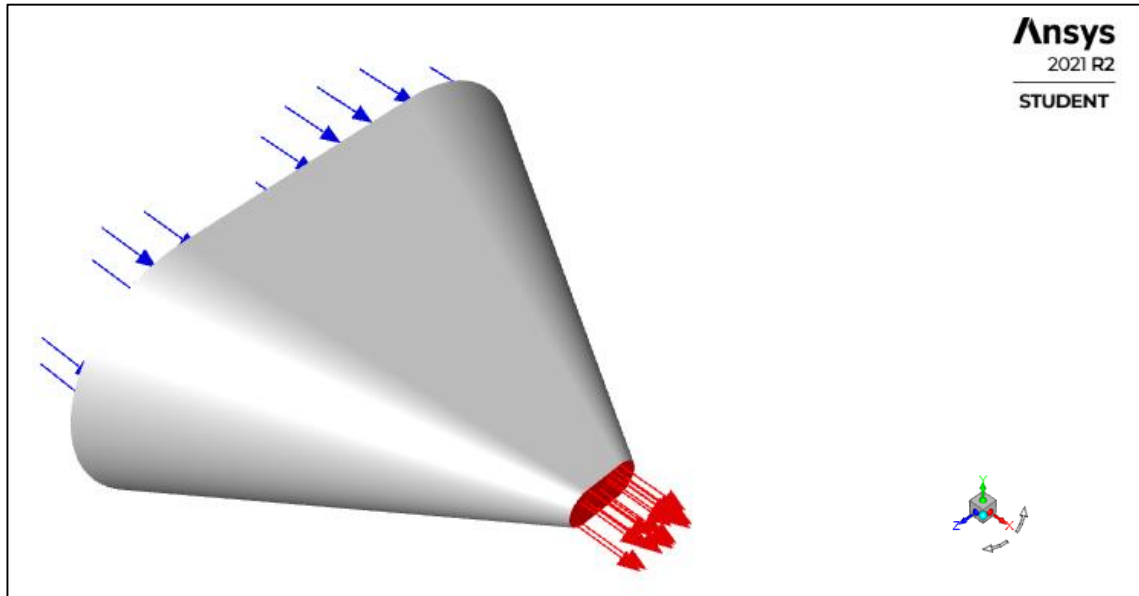


Figura 9 – Geometria importada para o *software Ansys®*.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Na seção transversal de maior área as setas vermelhas indicam a entrada do escoamento, e na seção transversal de área menor as setas azuis indicam a saída, como pode ser observado na figura 9.

O volume do bocal foi transformado em malha para fluidos orientada para o aplicativo *Ansys Meshing®*, com a referência física CFD e *solver* preferencial *Fluent*, a malha produzida é demonstrada na figura 10.

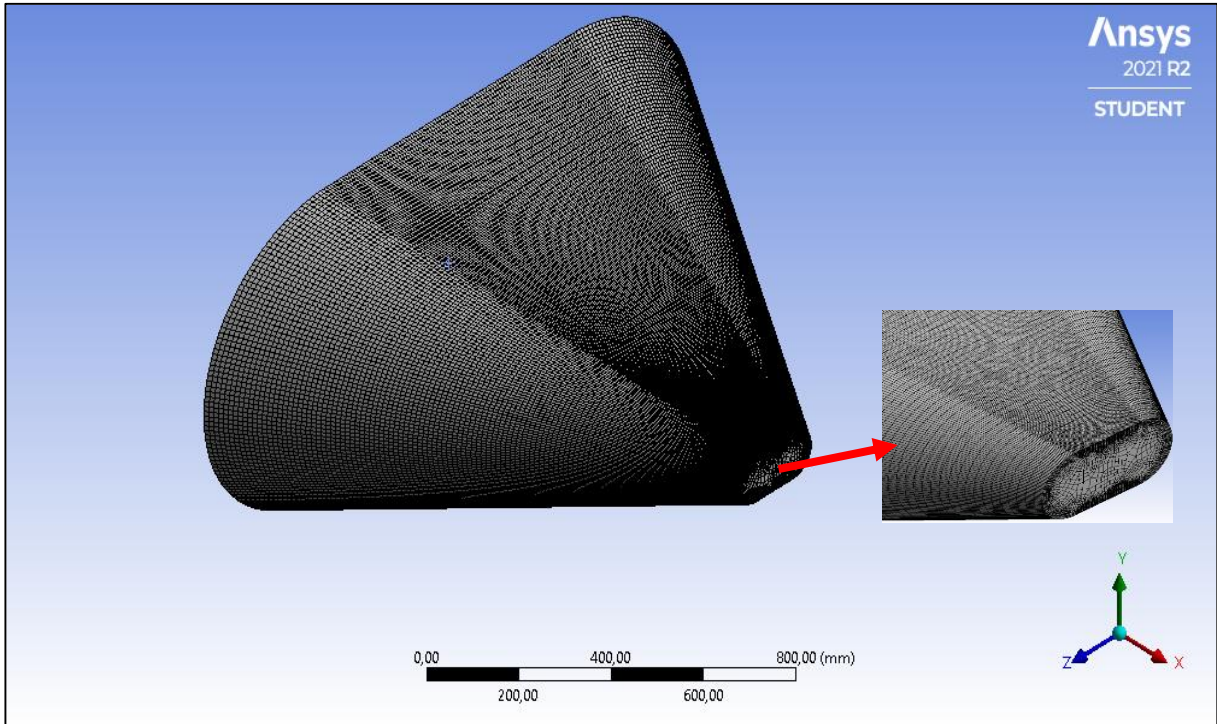


Figura 10 – Malha do volume do bocal convergente.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Na figura 10 observa-se que a malha gerada para a geometria do bocal possui maior densidade de nós à medida que ocorre a redução da seção transversal, no detalhe indicado é possível observar o refinamento dessas regiões. Por se tratar de uma geometria simples, a malha ilustrada na figura 10 foi elaborada de forma constante, através do método *Sweep*, com 508.491 nós e 485.430 elementos.

#### 4.4.1 Configurações Iniciais

A etapa seguinte da simulação consiste no pré-processamento, em que as configurações iniciais são aplicadas ao modelo com malha, bem como as condições de contorno são inseridas no *software*. Tais parâmetros são expressos nas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 – Configurações iniciais do *software*.

Generalidades	Tipo de solução: Baseado na pressão
	Dimensão: 3D
	Tempo: Constante
Materiais	Massa específica: modelo de gás ideal
	$c_p$ : 1006,43 J/kg K
	Condutividade Térmica: 0,0242 W/m.K
	Relação entre os calores específicos: 1,4
	Massa molecular: 28,966 g/mol

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

É possível observar na tabela 10 que a simulação em 3 dimensões foi realizada em regime estacionário com a solução baseada na pressão, devido ao fluxo compressível de alta velocidade. O valor do calor específico a pressão constante ( $c_p$ ), assim como o valor da razão de calores específicos ( $k$ ) para o gás ideal foram baseados na temperatura de 300K durante todo o processo.

Tabela 11 – Condições de contorno.

Entrada	Pressão: 101300 Pa
	Temperatura: 373,15 K
Saída	Pressão: 59352,67 Pa
	Temperatura: 320,8107 K

Fonte: Pesquisa Direta (2021).

Na inicialização da solução, os dados foram computados a partir das condições de contorno da entrada. Sendo que estas e as condições de contorno da saída, inseridas no *software*, são: ar entra no dispositivo com pressão e temperatura respectivamente iguais a 101300Pa e 373,15K e sai com 59352,67Pa e 320,81K, como observa-se na Tabela 11.

#### 4.4.2 Solução

No estágio seguinte, para fins de obtenção do desfecho dos cálculos da simulação foi estabelecido que a mesma fosse concluída caso todos os resíduos atingissem a ordem de  $10^{-6}$

ou um limite de 1500 iterações. A figura 11 apresenta todos os resíduos em escala do processamento dos cálculos.

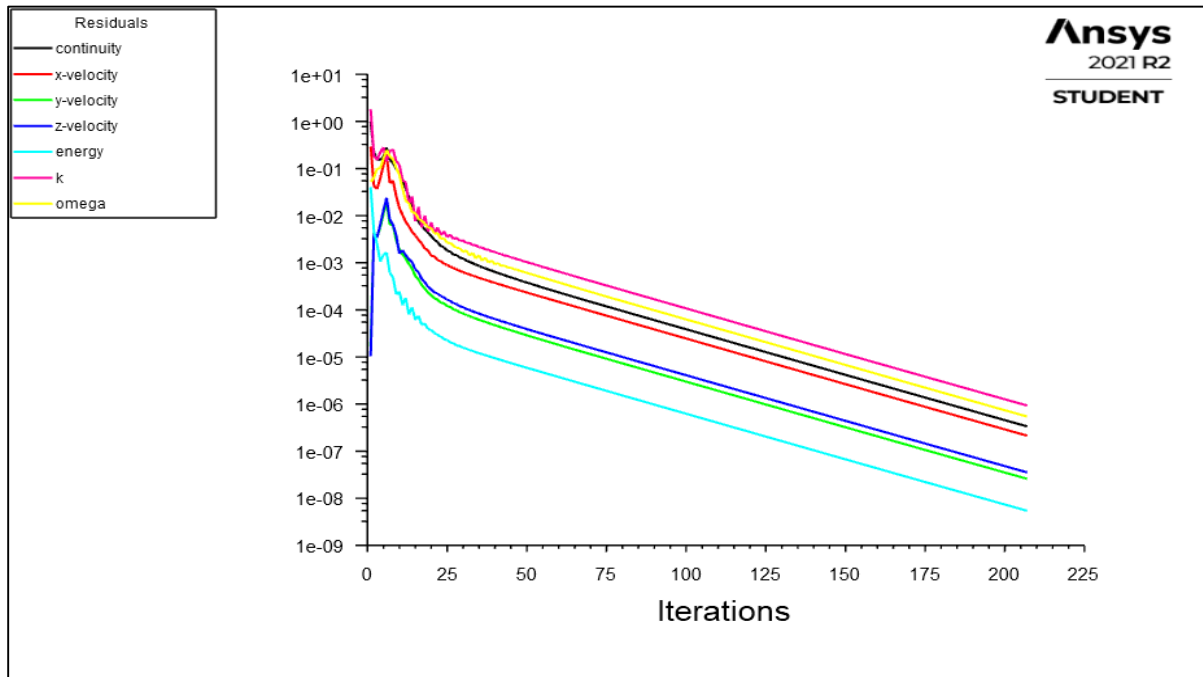


Figura 11 – Resíduos em escala.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Verifica-se na figura 11 a convergência do conjunto de equações após 206 iterações, logo todos os resíduos atingiram a ordem de  $10^{-6}$ .

#### 4.4.3 Propriedades do Escoamento no Dispositivo

Nesta etapa do estudo são apresentados os contornos da variação do número de Mach, velocidade, pressão estática, temperatura e massa específica do fluido no plano XY assim como as variações destas propriedades ao longo do comprimento do bocal convergente. E ainda os vetores da velocidade do escoamento no plano XY e a variação da razão de áreas em função do número de Mach.

As figuras 12 e 13 apresentam as análises elencadas anteriormente para o número de Mach.

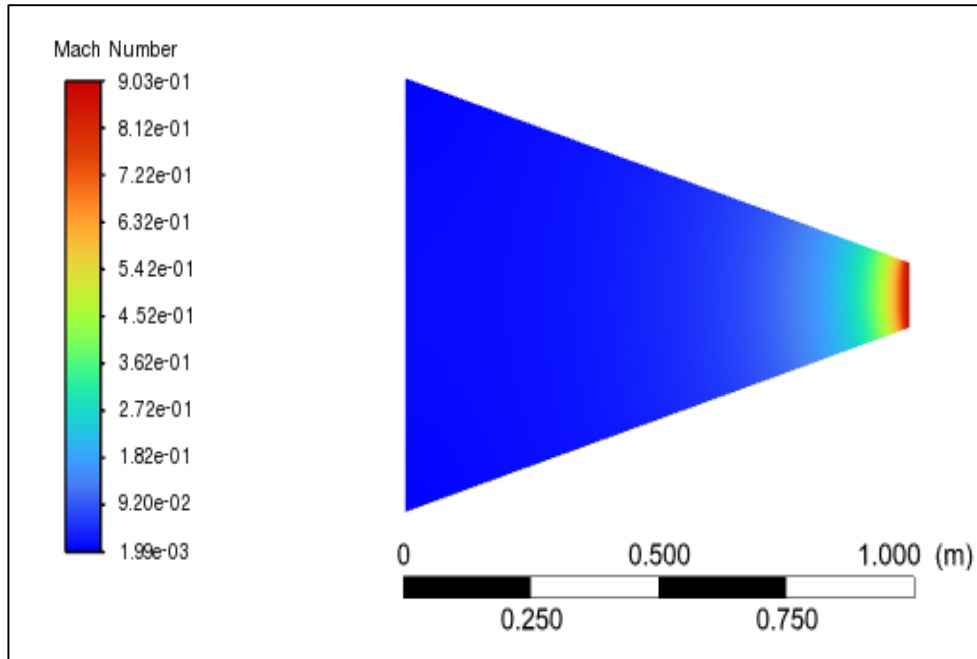


Figura 12 – Contorno do número de Mach.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O contorno do número de Mach exposto na figura 12 aponta que houve uma maior variação deste parâmetro na extremidade do dispositivo e que os valores mínimo e máximo referentes a essa variável são respectivamente, 0,00199 (entrada do bocal) e 0,903 (saída). Valores estes muito próximos aos obtidos previamente nas análises termodinâmicas, em que o Mach mínimo foi de 0,012 e o máximo de 0,91.

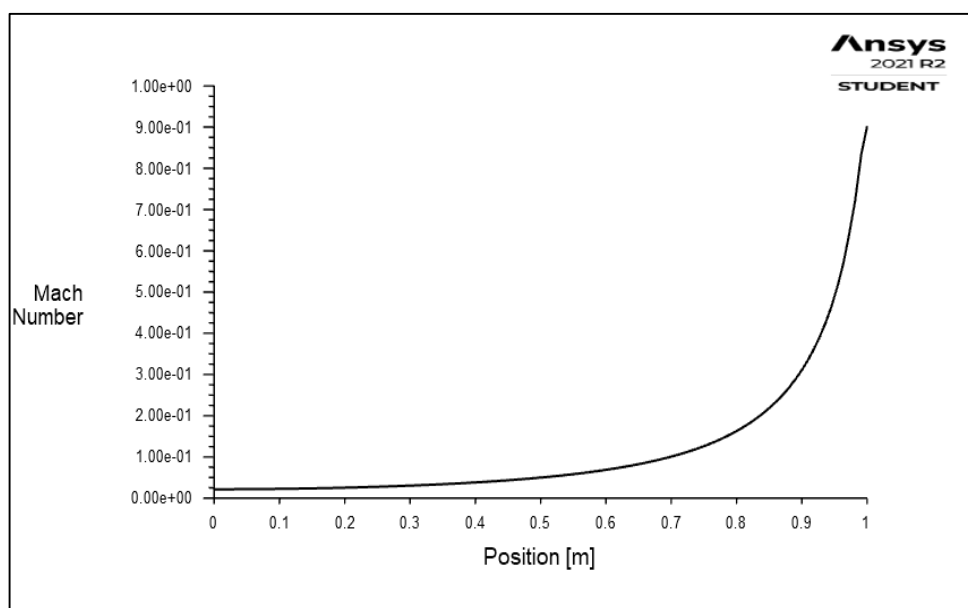


Figura 13 – Posição *versus* Mach.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).



O gráfico da figura 13 indica que inicialmente o valor de Mach se comporta de maneira quase constante, assumindo valores inferiores a 0,05 e que as maiores variações deste parâmetro ocorrem após o comprimento de 0,4m, assumindo o seu valor máximo de 0,903 no limite do comprimento (1m).

As figuras 14, 15 e 16 apresentam as análises elencadas anteriormente para a velocidade.

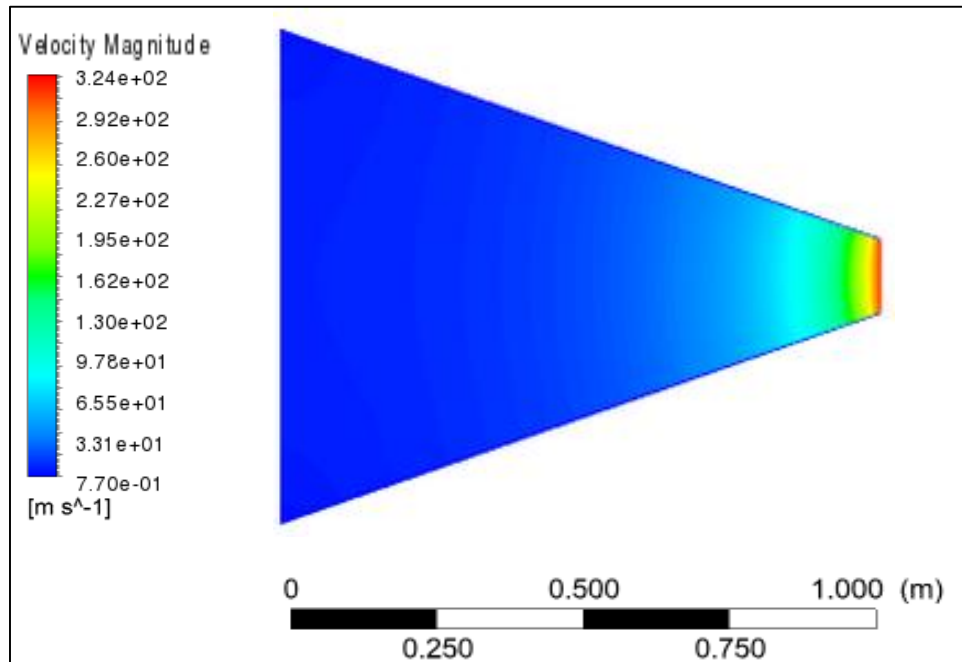


Figura 14 – Contorno da velocidade.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Conforme abordado na figura 14, o contorno indica que houve uma maior variação da velocidade na extremidade do dispositivo. Aponta ainda que os valores mínimo e máximo referentes a essa variável são respectivamente, 0,77m/s (entrada do bocal) e 324,0m/s (saída). Tais valores são muito próximos aos obtidos anteriormente nas análises termodinâmicas, em que a velocidade mínima foi de 5m/s e a máxima de 326,6m/s, representando um aumento correspondente a 6400%.

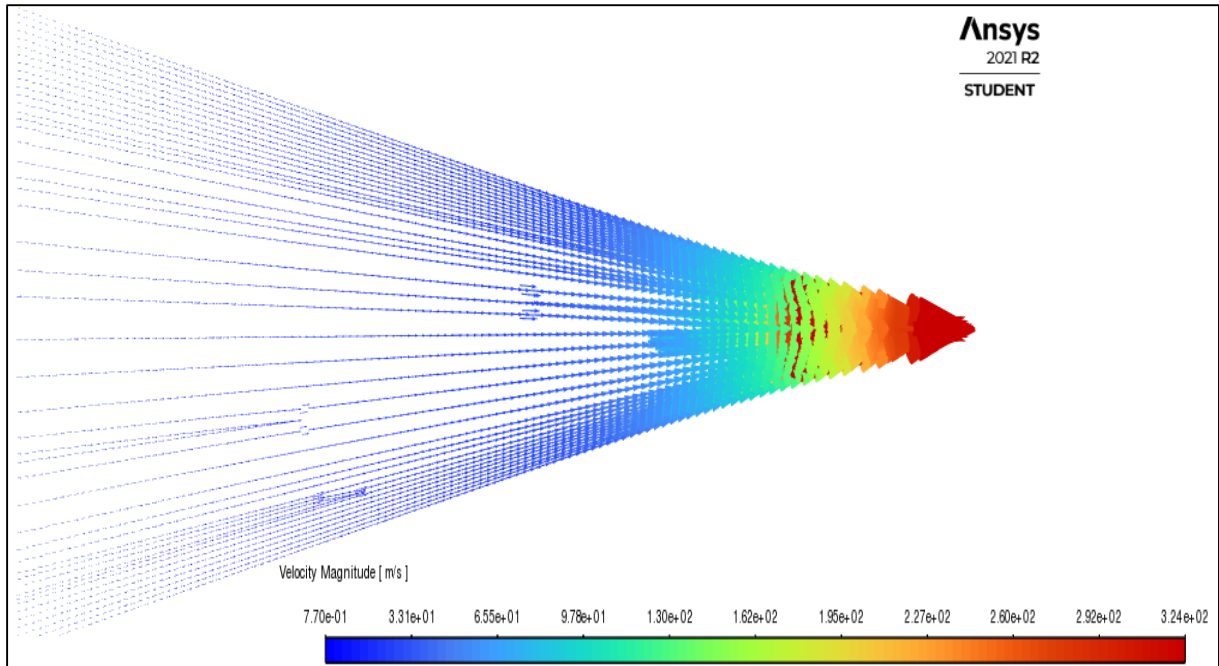


Figura 15 – Vetores da velocidade no plano XY.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

A figura 15 apresenta os vetores da velocidade do escoamento no plano XY, sendo clara a dispersão destes na entrada dispositivo e a maior compactação destes vetores ao passo que ocorre o estreitamento do bocal.

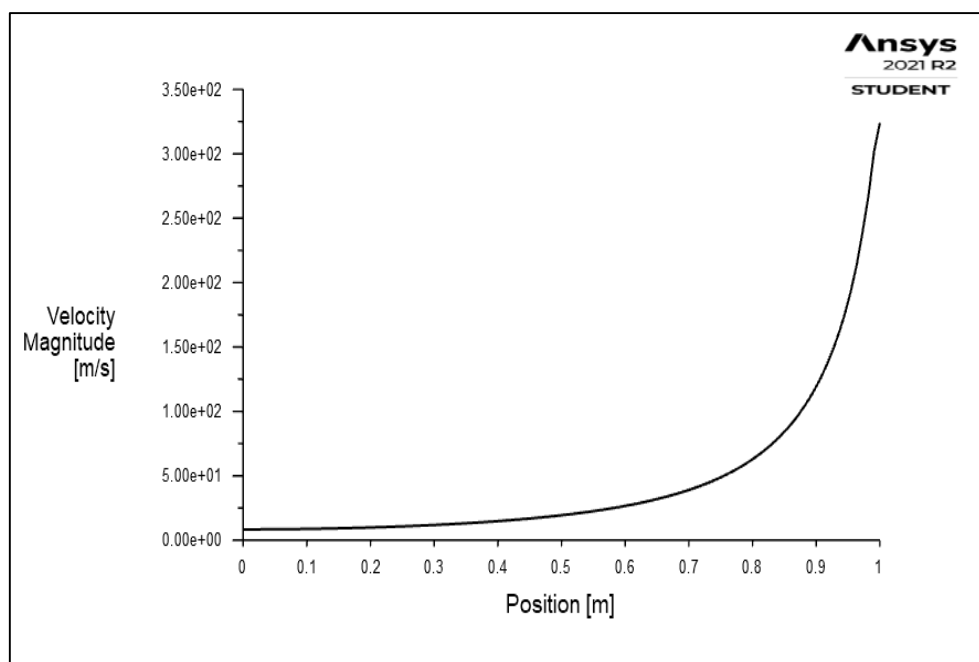


Figura 16 – Posição *versus* velocidade.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O gráfico da figura 16 sugere que inicialmente a velocidade se mantém de forma quase constante até aproximadamente 0,3m, assumindo valores inferiores a 13m/s, a partir desse comprimento maiores variações são registradas, tal como essa variável assume o seu valor máximo de 324,0m/s no limite do comprimento (1m).

As figuras 17 e 18 apresentam as análises elencadas anteriormente para a pressão estática.

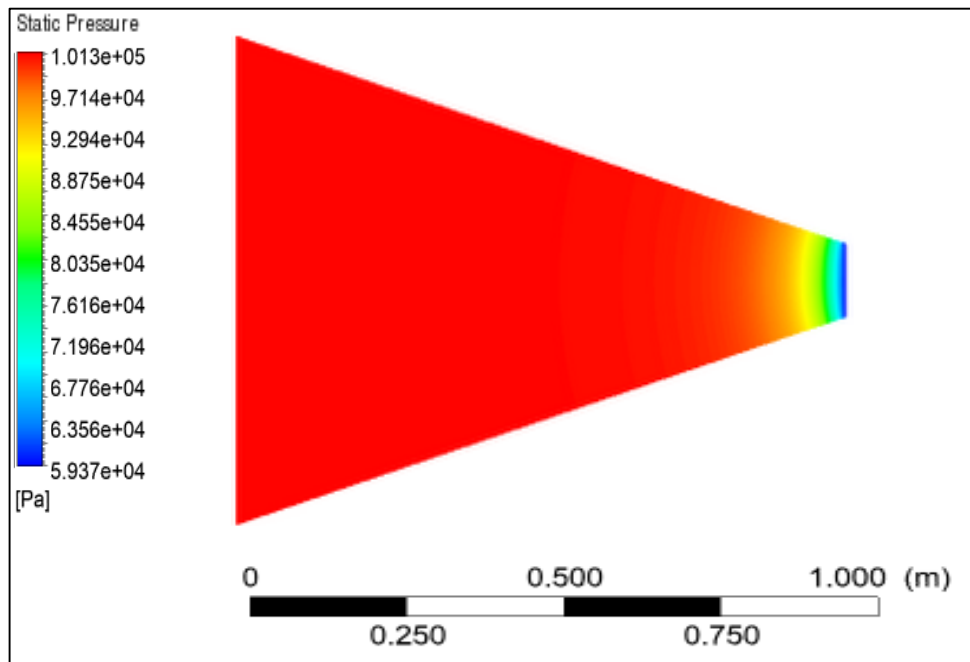


Figura 17 – Contorno da pressão estática.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O contorno da pressão estática exibido na figura 17 aponta que houve uma maior variação deste parâmetro na extremidade do equipamento e que os valores mínimo e máximo referentes a essa variável são respectivamente, 59,4kPa (saída do bocal) e 101,3kPa (entrada), representando uma redução correspondente a 41%. Valores estes muito próximos aos obtidos previamente nas análises termodinâmicas, em que o valor mínimo da pressão estática foi de 59,4kPa e o máximo de 101,3kPa.

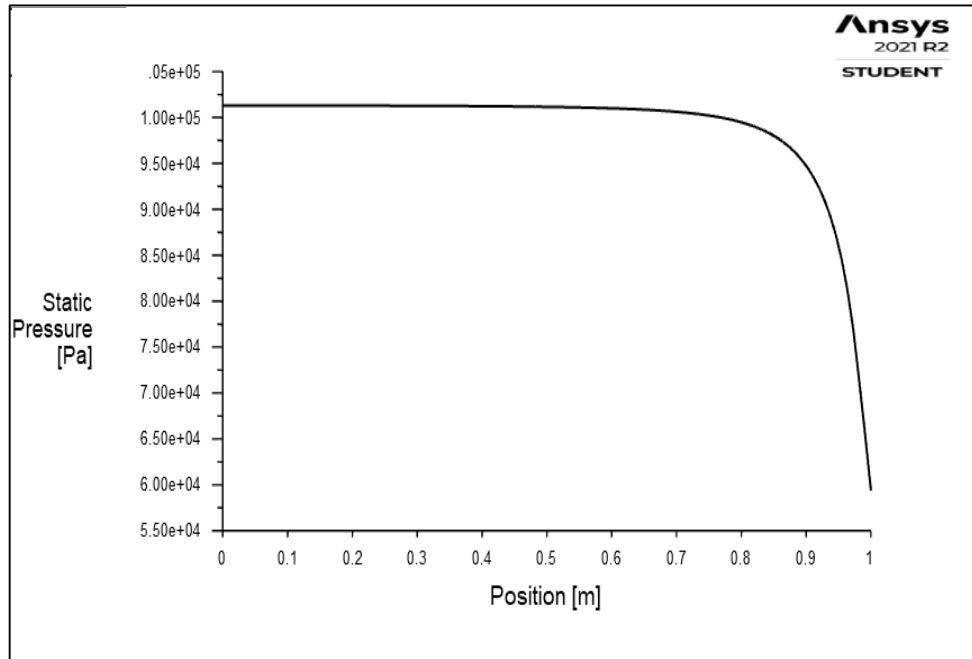


Figura 18 – Posição *versus* pressão estática.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Observa-se no gráfico da figura 18 que inicialmente a pressão se mantém de forma quase constante até aproximadamente 0,6m, assumindo valores superiores a 100kPa, após esse comprimento maiores variações são computadas, e essa variável assume o seu valor mínimo de 59,35kPa no limite do comprimento (1m).

As figuras 19 e 20 apresentam as análises elencadas anteriormente para a temperatura.

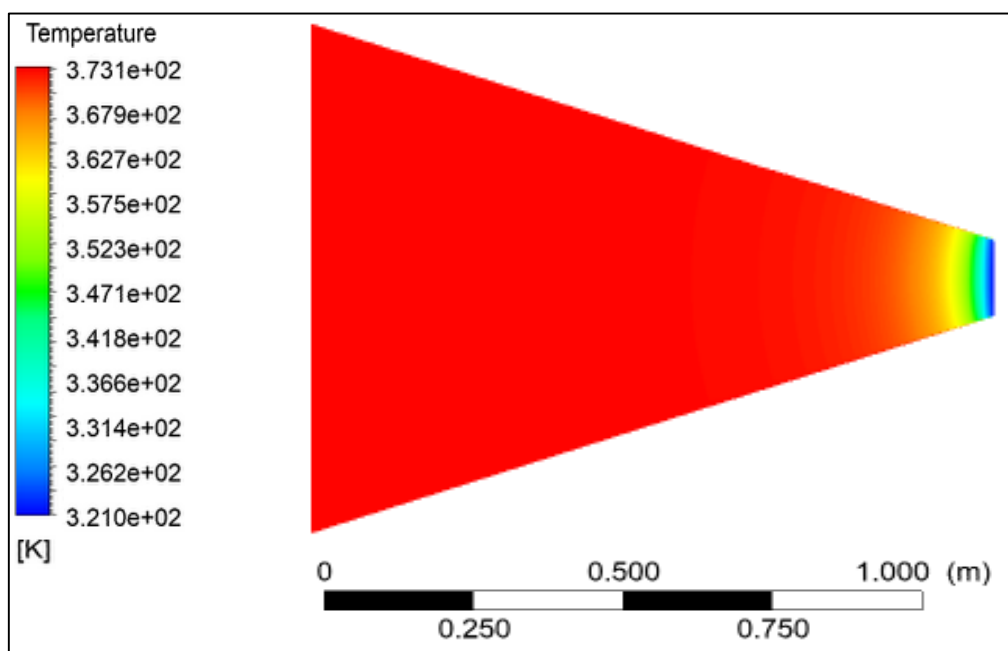


Figura 19 – Contorno da temperatura.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Segundo a figura 19, o contorno da temperatura aponta que a maior variação ocorreu na extremidade do dispositivo, indica também que os valores mínimo e máximo referentes a essa variável são respectivamente, 321K (saída do bocal) e 373,1K (entrada), representando uma redução correspondente a 14%. Tais valores são muito próximos aos obtidos anteriormente nas análises termodinâmicas, em que a temperatura mínima foi de 320,81K e a máxima de 373,15K.

Mesmo com a variação da temperatura ao longo da simulação, o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante do gás ideal apresentaram variações mínimas, e conseqüentemente a razão entre eles também apresentou variação desprezível. Logo, esse fato explica o desenvolvimento da simulação com essas variáveis baseadas na temperatura de 300K, sendo que a literatura mostra tais propriedades em forma de tabela destacando tal comportamento (VAN WYLEN *et al.*, 2013; ÇENGEL e BOLES, 2013).

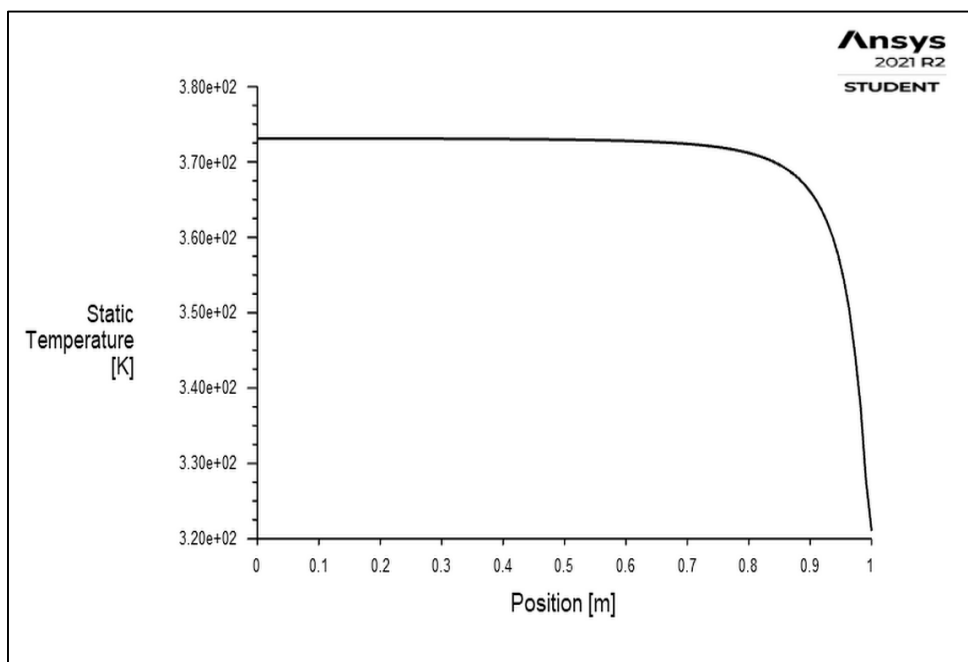


Figura 20 – Posição *versus* temperatura.  
Fonte: Pesquisa direta (2021).

O gráfico da figura 20 sugere que inicialmente a temperatura possui um comportamento quase constante até aproximadamente 0,6m, assumindo valores superiores a 370K, após esse comprimento maiores variações são registradas, como também essa variável assume o seu valor mínimo de 321K no limite do comprimento (1m).

As figuras 21 e 22 apresentam as análises elencadas anteriormente para a massa específica.

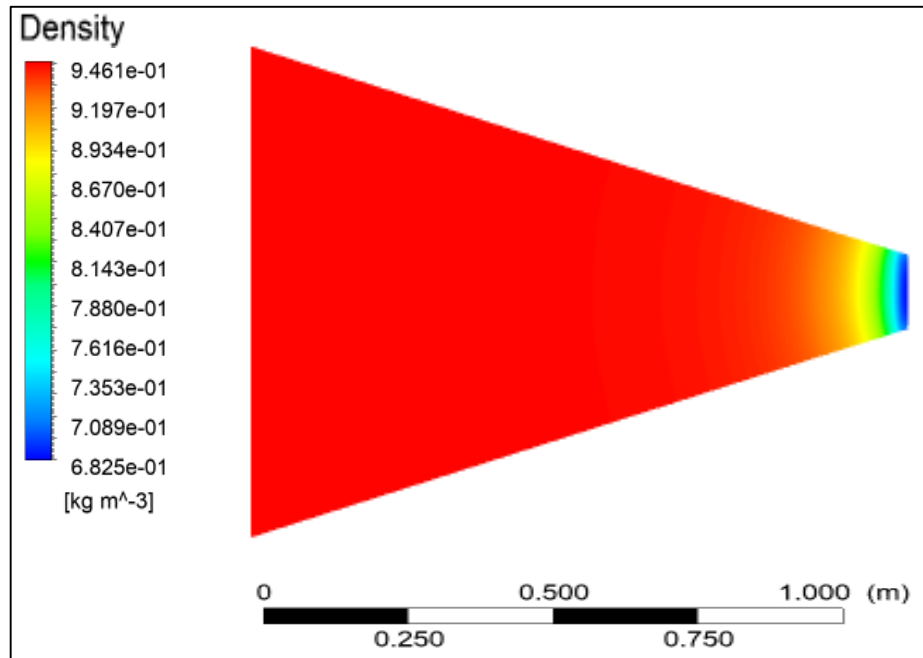


Figura 21 – Contorno da massa específica.

Fonte: Pesquisa direta (2021).

O contorno da massa específica apresentado na figura 21 aponta que houve uma maior variação deste parâmetro na extremidade do dispositivo e que os valores mínimo e máximo referentes a essa variável são respectivamente,  $0,68\text{kg/m}^3$  (saída do bocal) e  $0,94\text{kg/m}^3$  (entrada), representando uma redução correspondente a 28%. Valores estes muito próximos aos obtidos previamente nas análises termodinâmicas, em que o valor mínimo da massa específica foi de  $0,64\text{kg/m}^3$  e o máximo de  $0,94\text{kg/m}^3$ .

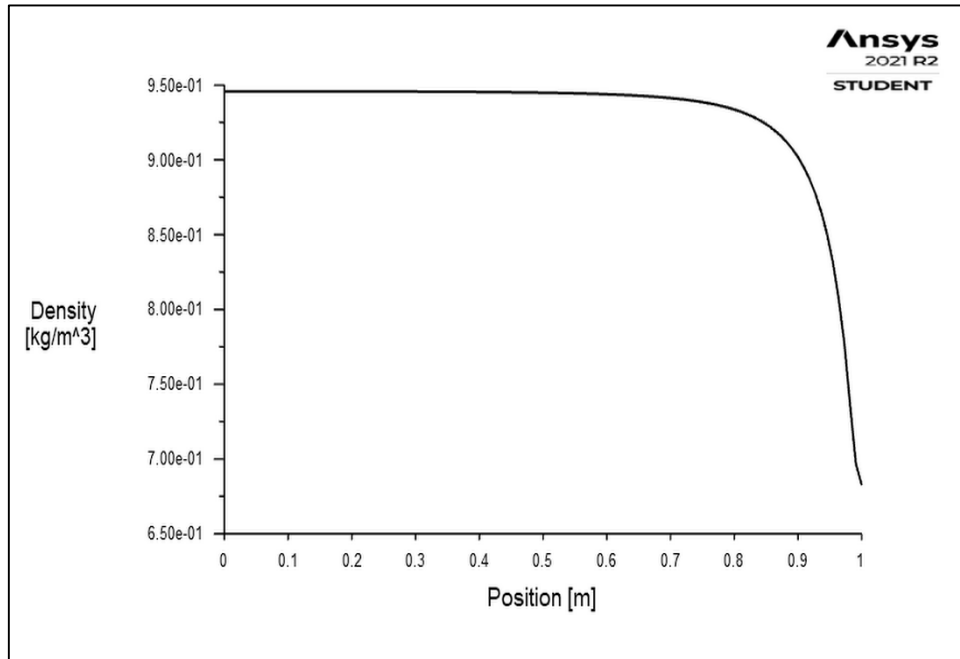


Figura 22 – Posição *versus* massa específica.  
 Fonte: Pesquisa direta (2021).

Conforme o gráfico da figura 22, inicialmente a massa específica possui um comportamento quase constante até aproximadamente 0,6m, assumindo valores superiores a  $0,92\text{kg/m}^3$ , após esse comprimento maiores variações são registradas, bem como essa variável assume o seu valor mínimo de  $0,68\text{kg/m}^3$  no limite do comprimento (1m).

A figura 23 apresenta a relação entre a razão de áreas e o número de Mach.

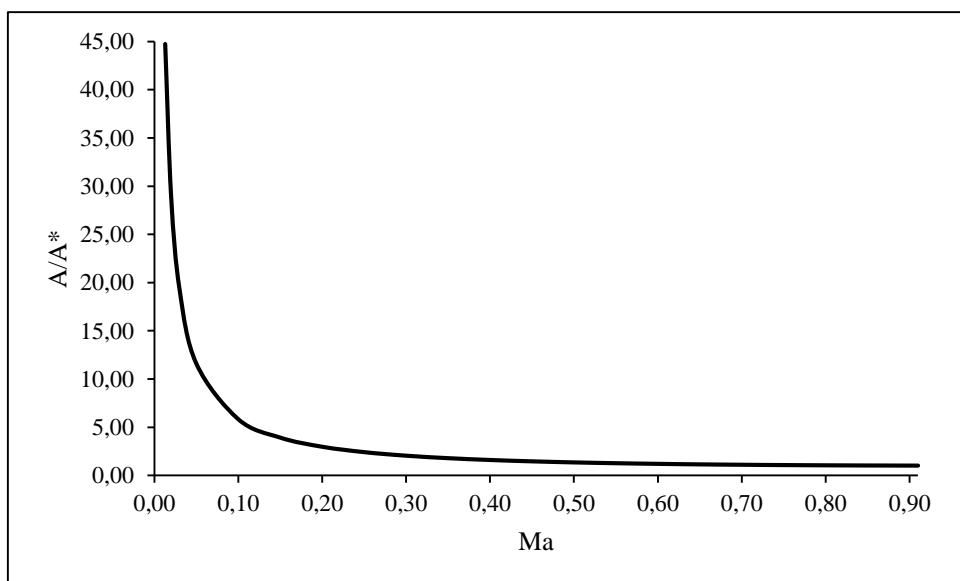


Figura 23 – Mach *versus* razão de área.  
 Fonte: Pesquisa direta (2021).

Na figura 23 é possível notar que inicialmente até Mach igual a 0,1, há uma grande variação da razão de área (de 44 para aproximadamente 6), em contrapartida ocorre uma baixa variação no valor de Mach (de 0,002 até 0,1). A partir de então ocorre o inverso, há uma grande variação de Mach até o seu limite de 0,91, em paralelo a pequena variação da razão de área das seções transversais. Tal fato explica o motivo dos parâmetros de operação, pressão, temperatura, densidade e velocidade do fluido apresentarem maior alteração na extremidade do bocal convergente.

As propriedades observadas nas imagens e gráficos expostos até aqui, demonstram que os dados obtidos são coerentes com a literatura (VAN WYLEN *et al.*, 2013; WHITE, 2011; ÇENGEL e BOLES, 2013), que mostram que o escoamento de um fluido compressível em um bocal convergente tem a sua velocidade elevada à medida que o número de Mach aumenta, enquanto as outras propriedades (massa específica, pressão e temperatura) diminuem conforme a área das seções transversais sofre redução.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho, com base nos resultados e discussões acerca da análise computacional do bocal convergente, além de serem apresentadas as recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho é proposto um estudo acerca do comportamento de um fluido compressível que escoar por um bocal convergente, sendo acelerado a velocidades próximas as velocidades sônicas.

Com vistas aos parâmetros de operação, a análise termodinâmica, assim como a análise de fluidodinâmica computacional demonstraram que com o aumento do número de Mach até o seu limite máximo (aproximadamente 0,91), o bocal convergente, atuou sobre o escoamento do fluido de forma a promover um aumento expressivo da velocidade, não ocorrendo o fenômeno das ondas de choque. Quanto à pressão, a temperatura e a massa específica do fluido, estas propriedades apresentaram um decréscimo de seu valor de entrada no equipamento, à medida que a área da seção transversal do bocal sofria redução.

Após avaliação dos dados obtidos e posterior comparação dos mesmos com a análise termodinâmica, fundamentada na teoria de escoamento isentrópico de um gás ideal em bocais, é nítido que a solução alcançada na simulação fluidodinâmica condiz com a literatura e possui grande acurácia.

Por fim, em relação ao valor inicial, a velocidade do escoamento apresentou um incrível aumento de 6400%, evidenciando a excepcional capacidade do equipamento na aceleração do fluido. Podendo empregar esse fluxo acelerado para diversas aplicações, tal como utilizá-lo para mover uma turbina ligada a um gerador com o intuito de produzir energia elétrica, beneficiando setores como a indústria siderúrgica.

### 5.2 Recomendações

A partir deste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar análise computacional do escoamento do fluido compressível no bocal convergente, apresentado neste estudo, integrado a uma turbina que por sua vez

é acoplada a um gerador, a fim de produzir energia elétrica, contribuindo assim com a sustentabilidade e amenizando os impactos da crise energética.

- Quantificar a produção de energia elétrica proveniente da simulação proposta anteriormente.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANSYS INC ®. **ANSYS Fluent Theory Guide**. 2013. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>>. Acesso em 22 jul. 2021.

ARAGÃO, A. P. **Modelagem e simulação computacional de processos produtivos: o caso da cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes, RJ**. 2011. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2011.

BATISTA, R. C.; GOMES, M. N. Modelagem Computacional Aplicada como uma Tecnologia no Currículo de Engenharia Mecânica. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**. Paranaguá, v. 5, n. 3, p. 1-20, 2020.

BICALHO, I. C. **Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamento em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna**. 2015. 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

CARLETO, N. **A importância da simulação computacional em projetos de sistemas na área de engenharia elétrica**. In: 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS RIBEIRÃO PRETO – SP, 2006. Ribeirão Preto, 2006.

CARVALHO, N. J. S.; ALMEIDA, E. M. P.; NASCIMENTO, E. O.; FIGUEIRA, K. S.; GÓES, J. F. **Importância da Modelagem Computacional na Engenharia**. In: Jornada Acadêmica. Universidade Federal do Oeste do Pará, 2015.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. 2ª ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo: AMGH, 2007.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHANG, K. H. **Motion Simulation and Mechanism Design Using SOLIDWORKS Motion 2021**. Norman: SDC Publications, 2021.

DAVIDSON, D. L. The Role of Computational Fluid Dynamics in Process Industries. **The Bridge**. Washington, v. 32, n. 4, p. 9-14, 2002.

- FERNANDES, T. H. D. D. **Fluidodinâmica computacional no ensino de física**. 2017. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2017.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3ª ed. Heidelberg: Springer, 2002.
- FORRESTER, J.W. **Industrial Dynamics**. Cambridge: M.I.T. Press, 1961.
- FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª ed. LTC, 2014.
- FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena**. 2º ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- HAYNE, L. A.; WYSE, A. T. S. Análise da evolução da tecnologia: uma contribuição para o ensino da ciência e tecnologia. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**. Ponta Grossa, v. 11, n. 3, p. 37-64, 2018.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3. ed. McGraw-Hill, 2000.
- MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8ª ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- NAZARENO, C.; BOCCHINO, E. V.; MENDES, F. L.; PAZ FILHO, J. S. **Tecnologia da Informação e Sociedade: o panorama brasileiro**. Brasília. Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2006.
- PASTORIO, D. P.; ALVES, J.; FRAGOSO, T. A. Uma revisão bibliográfica sobre o uso de *software* de análise de dados: um olhar para o Octave. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**. São Paulo, v. 12, n. 3, p. 1-23, 2021.
- SANTOS, I. F. D. R.; VARELLA JUNIOR, J. L. M. **Escoamentos unidimensionais de fluido compressível com ondas de choque em bocais convergente-divergente**. 2016. 67 p. Trabalho

de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SINGH, P. K.; TRIPATHI, A. CFD analysis of de-laval nozzle. **IJARIE**. Ajmer, v. 3, n. 2, p. 2395-4396, 2017.

VAN WYLEN, G. J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 8ª Edição Americana. São Paulo: Blucher, 2013.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 16ª ed. São Paulo: Atlas, 2016.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6º ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

## APÊNDICE

Tabela 13 – Cálculos referentes a análise termodinâmica.

Funções de escoamento compressível para escoamento isoentrópico				
Ma	A/A*	P/Po	$\rho/\rho_0$	T/To
0,01294	44,75565	0,99988	0,99992	0,99997
0,05000	11,59894	0,99826	0,99875	0,99951
0,10000	5,82553	0,99306	0,99502	0,99803
0,15000	3,91276	0,98447	0,98884	0,99559
0,20000	2,96528	0,97261	0,98028	0,99218
0,25000	2,40406	0,95762	0,96942	0,98783
0,30000	2,03614	0,93971	0,95637	0,98257
0,35000	1,77883	0,91909	0,94127	0,97643
0,40000	1,59084	0,89601	0,92426	0,96943
0,45000	1,44924	0,87074	0,90549	0,96163
0,50000	1,34030	0,84357	0,88513	0,95305
0,55000	1,25532	0,81480	0,86337	0,94374
0,60000	1,18849	0,78471	0,84038	0,93376
0,65000	1,13584	0,75360	0,81635	0,92314
0,70000	1,09454	0,72176	0,79146	0,91194
0,75000	1,06253	0,68946	0,76588	0,90021
0,80000	1,03830	0,65695	0,73980	0,88801
0,85000	1,02071	0,62447	0,71338	0,87537
0,90000	1,00888	0,59224	0,68677	0,86235
0,91000	1,00715	0,58584	0,68144	0,85971
0,95000	1,00215	0,56045	0,66013	0,84901
1,00000	1,00000	0,52927	0,63357	0,83538

Fonte: Pesquisa Direta (2021).