

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL KENZO HORIKAWA PEREIRA RUEDA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM REGULADOR DE PRESSÃO
UTILIZANDO VÁLVULAS TESLA**

**LONDRINA
2025**

GABRIEL KENZO HORIKAWA PEREIRA RUEDA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM REGULADOR DE PRESSÃO
UTILIZANDO VÁLVULAS TESLA**

Development and analysis of a pressure regulator using Tesla valves

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo

LONDRINA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL KENZO HORIKAWA PEREIRA RUEDA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM REGULADOR DE PRESSÃO
UTILIZANDO VÁLVULAS TESLA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica pela
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 19/Dezembro/2024

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Renan Manozzo Galante
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a conclusão de mais uma importantíssima e desafiadora etapa da minha vida, me formando, agora, como engenheiro mecânico. Esta fase da minha vida foi fundamental para o meu crescimento profissional e pessoal, visando o meu amadurecimento. E, não teria sido possível sem o apoio de várias pessoas durante este processo.

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus por permanecer como a fonte central em minha vida, concedendo-me a força necessária para prosseguir e progredir em minha carreira profissional e acadêmica, bem como em todas as demais esferas. Que todas as minhas conquistas e vitórias sejam dedicadas em honra e glória ao nome de Jesus, meu Salvador.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Roberto Rueda e Michele Midori Horikawa Pereira Rueda, por todo amor, inspiração e esforços dedicados a mim, para que todo este presente processo fosse possível. Vale ainda salientar um agradecimento especial para minha irmã Beatriz, minha avó Tereza e toda a minha família, pelo suporte necessário, sendo minha base.

Agradeço à minha instituição de ensino pela oportunidade de realizar o estágio e pela estrutura curricular que me preparou para os desafios da área. Meus professores e, em especial, o Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo, merecem meu agradecimento pela orientação e pelo incentivo ao longo do processo. Outro agradecimento em especial seria para o Jader Alves e Isaac Hutter por idealizarem esse projeto e confiarem no meu potencial para tal desenvolvimento.

Agradeço aos meus colegas de curso pela amizade e pela troca de experiências, que enriqueceram nossa jornada acadêmica, onde não só me ajudaram, mas me ensinaram e me incentivaram a permanecer nesse processo. Digo em especial, Joey Queiroz, Lucas Leite, Matheus Batistela, Victor Rovesti, Vinícius Grund e Henry Miyake. Sem vocês, tudo teria sido diferente e, com certeza, mais difícil. Obrigado por tornar o processo mais leve e divertido!

Esta formação é resultado de um trabalho coletivo e de esforço árduo, muito gratificante da minha vida.

Gabriel Kenzo Horikawa Pereira Rueda

RESUMO

Investigou-se a viabilidade de aplicar os princípios da válvula de Tesla no desenvolvimento de reguladores de gás mais eficientes e seguros, com o objetivo de superar as limitações dos modelos convencionais, marcados pela obsolescência tecnológica, baixa eficiência operacional e restrições de segurança. O estudo teve como objetivo principal a criação e o aprimoramento de um regulador de gás fundamentado nos conceitos da válvula de Tesla, com ênfase na ampliação dos padrões de segurança e eficiência. Foram realizadas simulações computacionais no software ANSYS® Fluent®, que se mostraram essenciais para o design, ajuste e otimização das válvulas destinadas ao uso em Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Os testes iniciais buscaram estabilizar a pressão de saída em 2,8 kPa (manométrica) e manter a vazão próxima a 1,0 kg/h, adequada segundo a norma NBR 8474, utilizando análises detalhadas no ANSYS® CFD-POST™, que incluíram a verificação da independência da malha e a otimização geométrica, garantindo a conformidade com os parâmetros do projeto. A análise da malha, em simulações sob hipóteses de escoamento incompressível confirmou a vazão desejada dentro dos padrões normativos, e a prototipação de uma geometria de 23 cm x 20 cm x 7,5 cm, composta por 216 arcos, foi desenvolvida. Para viabilizar o produto, destacam-se como etapas indispensáveis o ajuste da configuração CFD para escoamento compressível, a calibração da vazão, o estudo do controle de pressão no botijão e a análise da viabilidade de manufatura, considerando os desafios impostos pela complexidade da geometria projetada. Ao fim do estudo, foi demonstrado resultados inconclusivos em relação ao intuito inicial e pelas limitações demonstradas ao decorrer do trabalho.

Palavras-chave: válvula; regulador de pressão; Tesla.

ABSTRACT

The feasibility of applying the principles of the Tesla valve in the development of more efficient and safer gas regulators was investigated, aiming to overcome the limitations of conventional models, characterized by technological obsolescence, low operational efficiency, and safety constraints. The main objective of the study was the creation and enhancement of a gas regulator based on the concepts of the Tesla valve, with an emphasis on improving safety and efficiency standards. Computational simulations were conducted using ANSYS® Fluent® software, which proved essential for the design, adjustment, and optimization of valves intended for use with Liquefied Petroleum Gas (LPG). The initial tests aimed to stabilize the outlet pressure at 2.8 kPa (gauge) and maintain the flow rate close to 1.0 kg/h, in accordance with NBR 8474 standards. Detailed analyses were performed in ANSYS® CFD-POST™, including mesh independence verification and geometric optimization to ensure compliance with project parameters. The mesh analysis, under incompressible flow assumptions, confirmed the desired flow rate within normative standards, leading to the prototyping of a geometry measuring 23 cm x 20 cm x 7.5 cm, composed of 216 arcs. To make the product viable, essential steps highlighted include adjusting the CFD setup for compressible flow, calibrating the flow rate, studying pressure control in the cylinder, and analyzing manufacturing feasibility, considering the challenges posed by the complexity of the designed geometry. At the end of the study, it was concluded that the analyzed object is not viable for commercial and residential use due to its complex geometry and many limitations.

Keywords: valve; pressure regulator; Tesla.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Transporte de Gás em Estágio Único.....	10
Figura 02 - Desenho de Válvula Tesla Presente na Patente Original.....	11
Figura 03 - Intestinos do tubarão visto por tomografia computadorizada.....	11
Figura 04 - (a) Válvula Tesla. (b) Direção de fluxo direto e reverso.....	16
Figura 05 - Gráfico de desempenho de um regulador de pressão.....	19
Figura 06 - Esquema do experimento de Dvořák.....	20
Figura 07 - Válvula tesla acoplada à meia taça.....	21
Figura 08 - Modelo da válvula Tesla de Zhang.....	25
Figura 09 - Ilustração das condições de contorno.....	27
Figura 10 - Dimensões relevantes da primeira geometria.	33
Figura 11 - Visão isométrica da primeira geometria.	34
Figura 12 - Visão isométrica da segunda geometria.	34
Figura 13 - (a) Dimensões externas. (b) Dimensões internas.....	35
Figura 14 - Visão isométrica da terceira geometria.	36
Figura 15 - Largura total da válvula.	37
Figura 16 - Geometria em série.....	37
Figura 17 - Geometria Final.....	38
Figura 18 - Contorno de pressão.....	40
Figura 19 - Contorno de pressão na entrada.....	41
Figura 20 - Contorno de pressão na saída.....	42
Figura 21 - Contorno de velocidade.....	42
Figura 22 - Vetores de velocidade.....	43
Figura 23 - Campo de turbulência y^+	44
Figura 24 - Linha de corrente.....	45
Figura 25 - Gráfico Pressão na entrada X Vazão Mássica.....	47
Figura 26 - Pressão de entrada para escoamento compressível.....	48
Figura 27 - Pressão de saída para escoamento compressível.....	49
Figura 28 - Temperatura para escoamento compressível.....	49
Figura 29 - Contorno de velocidade para escoamento compressível.....	50
Figura 30 - Contorno da massa específica para escoamento compressível.....	51
Figura 31 - Metade da impressão.....	51
Figura 32 - Geometria final impressa.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Configuração a ser empregada no software ANSYS® Fluent®.....	27
Quadro 2 - Configuração 2 a ser empregado no software ANSYS® Fluent®.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Refinamento de 3 malhas.....	39
Tabela 2 - Resultado das simulações com pressões intermediárias.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Di	Diodicidade.
ΔPr	Queda de pressão no sentido reverso (Pa).
ΔPf	Queda de pressão no sentido frontal (Pa).
μ	Viscosidade dinâmica (N.s/m ²).
ρ	Densidade específica (kg/m ³).
$\frac{\partial p}{\partial x}$	Taxa de variação da pressão referente a coordenada x (Pa/m).
$\frac{\partial p}{\partial y}$	Taxa de variação da pressão referente a coordenada y (Pa/m).
$\frac{\partial p}{\partial z}$	Taxa de variação da pressão referente a coordenada z (Pa/m).
g	Aceleração gravitacional (m/s ²).
u	Componente do Vetor Velocidade na direção x (m/s).
v	Componente do Vetor Velocidade na direção y (m/s).
w	Componente do Vetor Velocidade na direção z (m/s).
k	Energia cinética turbulenta (m ² /s ²).
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (m ² /s ³).
ω	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta (s ⁻¹).
P	Pressão (Pa).
T	Temperatura (K).
R	Constante do gás (kJ/kg.K).
t_T	Compressibilidade do fluido isotérmico (Pa ⁻¹).
t_s	Compressibilidade do fluido isentrópico (Pa ⁻¹).
t	Compressibilidade do fluido (Pa ⁻¹).
V	Volume específico (m ³ /kg)

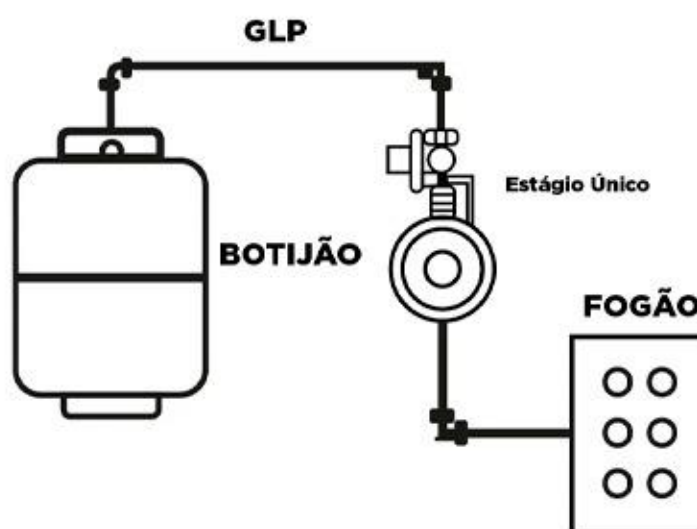
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1	Válvula Tesla	16
4.2	Regulador de pressão	17
4.3	Dinâmica dos fluidos computacional	20
4.3.1	Modelos de turbulência	21
4.4	Escoamento compressível	23
5	METODOLOGIA	25
5.1	Modelagem da geometria	25
5.1.1	Procedimentos para simulações numéricas.....	26
5.2	Teste de independência de malha	28
5.3	Análise com pressões intermediárias	29
5.4	Análise do escoamento compressível	30
5.4.1	Configuração computacional para escoamento compressível	31
5.5	Prototipagem	32
5.5.1	Metodologia de Prototipação em Impressão 3D	32
6	RESULTADO E DISCUSSÕES	33
6.1	Resultados encontrados na modelagem da geometria	33
6.2	Resultados encontrados na independência de malha	39
6.2.1	Pós processamento da geometria	40
6.3	Resultados encontrados no teste de pressões intermediárias	45
6.4	Resultados encontrados no teste do escoamento compressível ...	47
6.5	Resultados encontrados na prototipagem	51
7	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, a demanda por tecnologias seguras e eficientes torna-se cada vez mais necessários, especialmente quando se trata de dispositivos fundamentais quanto os reguladores de gás. Esses componentes desempenham um papel crucial em residências e estabelecimentos que utilizam gás natural ou GLP, sendo responsáveis por regular a pressão do gás proveniente dos cilindros, assegurando seu uso seguro em aparelhos como fogões, como ilustrado, a seguir, na Figura 1.

Figura 1 - Transporte de Gás em Estágio Único.



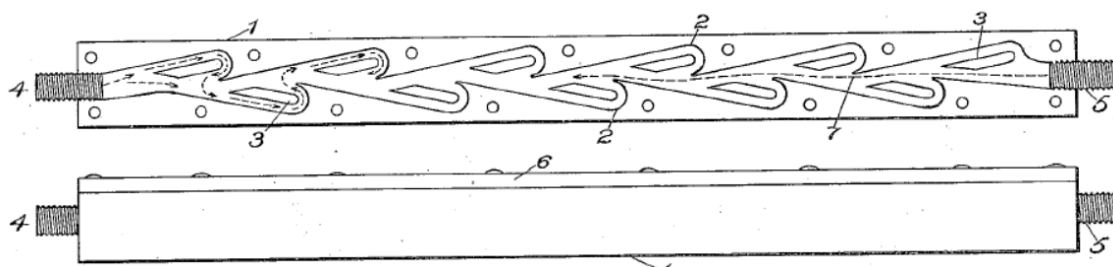
Fonte: Formagás (2021).

Neste cenário, surge a necessidade de superar as limitações inerentes aos reguladores de gás convencionais, que, embora desempenhem uma função essencial, enfrentam desafios relacionados à obsolescência tecnológica, tornando-se um componente crítico em diversas aplicações. Nesse contexto, pesquisas recentes têm se concentrado em melhorar seus recursos em sistemas inteligentes de controle e segurança (CHAO et al., 2017). Diante dessa realidade, este presente estudo propõe uma nova abordagem, explorando o potencial da aplicação dos princípios da válvula de Tesla no desenvolvimento de reguladores de gás.

A válvula de Tesla, concebida pelo inventor Nikola Tesla, representa uma alternativa aos sistemas convencionais. Sua singularidade reside na ausência de

componentes mecânicos tradicionais. Ao eliminar partes móveis sujeitas a desgaste, a válvula de Tesla se destaca como uma solução que promove eficiência e confiabilidade em aplicações diversas. Na Figura 2, pode ser observado a ilustração da válvula registrada pelo autor em sua patente.

Figura 2 - Desenho de Válvula Tesla Presente na Patente Original.



Fonte: Adaptado de Tesla (1920).

Embora a patente remonte a 1920 (TESLA, 1920), análises mais detalhadas sobre o mecanismo de operação e aprimoramento do dispositivo emergem somente em tempos recentes. Por exemplo, uma observação trazida à tona por Costa (2021) destaca a notável semelhança entre os intestinos dos tubarões e uma válvula. A Figura 3, publicada na revista *Proceedings of the Royal Society B*¹ proporciona uma visão digital dos tecidos intestinais desses animais. Essa perspectiva sugere que, ao considerarmos a utilização natural desse mecanismo, diversas outras aplicações promissoras podem emergir desse artefato.

Figura 3 - Intestinos do tubarão visto por tomografia computadorizada.



Fonte: Costa (2021).

¹ Tradução Livre: Publicações da Sociedade Real B.

A proposta deste trabalho consiste não apenas em compreender a teoria por trás da válvula de Tesla, mas também em avaliar sua viabilidade na criação de reguladores de gás mais eficazes e seguros. Ao analisar criticamente as limitações dos reguladores convencionais, pretende-se destacar a importância da inovação nesse setor, onde, tal como, Patil (2018), realizou uma investigação sobre a vazão de reguladores de pressão de gás, destacando a importância de manter uma pressão constante.

Ao longo deste estudo, são exploradas as nuances da válvula de Tesla, contextualizando sua aplicação específica em reguladores de gás. Tal estudo será realizado e analisado por meio de simulações computacionais, conhecida como Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), onde se é detalhado no tópico 4.3. Sendo assim, busca-se, não apenas superar as deficiências dos reguladores tradicionais, mas também introduzir uma abordagem contemporânea e avançada neste campo, contribuindo para o aprimoramento da segurança e eficiência nos sistemas de gás.

2 OBJETIVOS

Neste tópico serão abordados os subtópicos denominados como objetivo geral e objetivos específicos.

2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver e aprimorar um regulador de gás, baseado na válvula Tesla, com foco na melhoria da segurança e eficiência do dispositivo, e não no estudo em si da diodicidade². O uso de softwares de CAD e simulações computacionais proporcionará uma base sólida para o design, e por fim, exibir um modelo, de impressão 3D.

2.2 Objetivos específicos

Ao combinar abordagens teóricas e simulações computacionais, este estudo visa conceber um regulador de gás, validando sua eficácia em ambientes simulados.

- Realizar uma revisão detalhada da literatura sobre reguladores de gás, destacando suas limitações atuais e os desafios enfrentados;
- Investigar as propriedades e características da válvula Tesla, compreendendo sua aplicação potencial como componente central no desenvolvimento de um regulador de gás;
- Projetar o regulador de gás utilizando softwares de CAD (Computer-Aided Design), considerando aspectos funcionais e ergonômicos, com base no modelo de Zhang et al. (2023);
- Realizar simulações computacionais, via Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), para analisar o desempenho teórico do regulador em diferentes cenários operacionais, identificando possíveis melhorias e otimizações;
- Implementar um protótipo, baseado na geometria obtida nas simulações computacionais.

^{2 2} Termo utilizado para medir a eficácia da válvula Tesla, dada pela razão da variação de pressão de um sentido do fluxo sobre o outro.

3 JUSTIFICATIVA

O interesse por este estudo se deu pelo fato de os atuais reguladores de pressão de gás, de uso residencial, estarem há muito tempo no mercado e sem muitas perspectivas de serem otimizados e aprimorados, que se mantêm praticamente inalterados e monopolizados há um século. Essa obsolescência traz uma demanda para qual este trabalho tentará buscar soluções.

Uma análise pertinente a ser destacada, é que os reguladores de pressão de gás contemporâneos possuem uma composição pautada em diversos componentes mecânicos, o que os torna muito suscetíveis a um potencial defeito, ou seja, quanto mais peças mecânicas houver no sistema, maior o seu critério de falha. A segurança é, obviamente, um elemento central dentro da vida das pessoas e especialmente no caso de objetos inseridos em ambientes residenciais. A demanda por tal proteção se torna ainda mais necessária, afinal, diferentemente de componentes elétricos, por exemplo, que com sua falha, a pior das hipóteses seria um prejuízo monetário, caso haja um vazamento de gás, apenas acionando um simples interruptor de lâmpada, a explosão se torna iminente.

Rodrigues et al. (2019) reiteram que em uma pesquisa conduzida na China sobre incidentes envolvendo o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), foram identificados, no ano de 2017, 1.898 casos de queimaduras relacionadas a esse agente causal. Dentre esses casos, 74,08% tiveram o ambiente doméstico como cenário, sendo o vazamento de gás a situação mais frequente. Em um estudo realizado na Índia, de 731 ocorrências de queimaduras, 20% foram atribuídas ao GLP. Dessas, 70% resultaram de vazamentos de gás, enquanto 25,5% ocorreram devido a negligência durante atividades culinárias.

Outro fator importante a ser citado é o mercado de reguladores de pressão de gás, principalmente se tratando de uma análise comercial, pois, se tratando de objetos de uso residenciais e industriais, sua demanda se torna expressiva. Segundo o site *Business Research Insights*³, o mercado global de reguladores de pressão de gás alcançou um valor de US\$ 1,69 bilhões em 2022, prevendo-se atingir US\$ 2,1 bilhões até 2028, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,1% ao longo

³ Tradução Livre: Visões de Pesquisa Empresarial.

do período previsto (2022-2028). O estudo fornece uma análise *SWOT*⁴ abrangente, explorando fatores de crescimento e identificando áreas de desenvolvimento no mercado. Avaliações nacionais e regionais são apresentadas, incluindo análises do cenário competitivo, proporcionando uma maior compreensão do mercado.

Portanto, por tais fatores apresentados nesse tópico, foi optado por este estudo, com o objetivo de avaliar os resultados e buscar um possível desfecho satisfatório dentro dos critérios expostos no Tópico 2.

⁴ Ferramenta de Gestão. Tradução Livre: Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

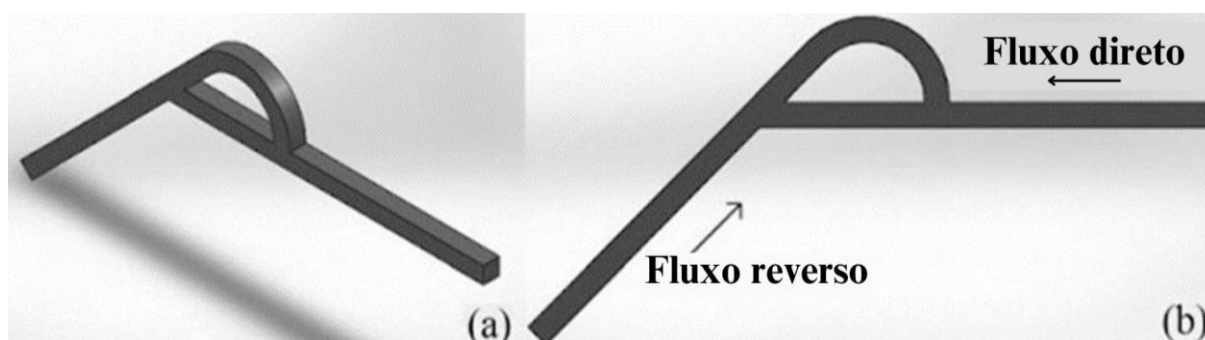
Nesta seção, é exposta a fundamentação teórica do estudo, abrangendo os princípios essenciais relacionados à válvula Tesla, regulador de pressão, simulação computacional DFC e escoamento compressível. Além disso, há uma breve descrição sobre o processo de criação da malha.

4.1 Válvula Tesla

Introduzida por Nikola Tesla na década de 1920 como "tubagem valvular", a Válvula Tesla tem sido objeto de extensas investigações, notadamente em suas capacidades de controle de fluxo e retificação. Thompson et al. (2013) revelaram que a diodicidade pode ser consideravelmente ampliada ao empregar válvulas Tesla em múltiplos estágios, sendo que tanto o número de válvulas quanto a distância entre elas influenciam diretamente o desempenho. O desenho peculiar em forma de arco de veia dupla da Válvula Tesla promove passivamente um sentido de escoamento sobre o outro, mostrado na Figura 4.

Por meio de análise numérica e redes neurais artificiais, Vaferi et al. (2023) empregou modelagem e otimização para aprimorar o desempenho hidráulico e térmico de uma válvula Tesla, destacando uma notável precisão nos modelos preditivos. Essas investigações evidenciam o considerável potencial das válvulas Tesla para a melhoria do controle de fluxo e transferência de calor em variadas aplicações.

Figura 4 - (a) Válvula Tesla. (b) Direção de fluxo direto e reverso.



Fonte: Adaptado de Thompson (2013).

Em situações de reversão de fluxo, perdas de pressão decorrentes de bifurcação, expansão repentina e choque do jato são identificadas, conforme Thompson et al. (2013) explorou em sua pesquisa. A mensuração da eficácia da Válvula Tesla é comumente realizada através da diodicidade (Di)

A aplicabilidade dessas válvulas em micros fluidos foi confirmada, evidenciando uma diodicidade superior em comparação com alternativas, conforme discutido por Thompson et al. (2013). Ainda vale salientar que a diodicidade, Di , conforme descrita pela Equação (1), é a razão adimensional entre a queda de pressão no sentido reverso (ΔPr) e a queda de pressão no sentido frontal (ΔPf).

$$Di = \frac{\Delta Pr}{\Delta Pf} \quad (1)$$

Adicionalmente, abordando otimizações topológicas, Deng et al. (2010) oferecem uma perspectiva única ao identificar uma geometria de válvula Tesla com diodicidade apreciável mesmo com Reynolds pouco acima da unidade. Este estudo, embora apresentando uma dinâmica de crescimento não convencional, destaca a diversidade de aplicações e potenciais melhorias no design das válvulas Tesla.

Essas constatações ressaltam a versatilidade e eficácia das válvulas Tesla no controle de fluidos, reforçando seu papel significativo em diversas áreas da engenharia, como micro fluídica, conforme evidenciado por diversas pesquisas referenciadas.

4.2 Regulador de pressão

Os reguladores de gás, fundamentais em sistemas de distribuição, desempenham um papel vital ao assegurar um fluxo controlado e seguro de gás. Seu propósito é claro: manter a pressão do gás em níveis seguros e consistentes, independentemente das variações nas fontes de pressão. Estes dispositivos, dotados de elementos sensoriais como diafragmas e molas, respondem dinamicamente às mudanças de pressão, ajustando a abertura da válvula para manter a pressão de saída constante. O cenário atual exige não apenas precisão, mas também confiabilidade nos reguladores de gás, que desempenham um papel crucial em setores diversos, desde o ambiente residencial até o industrial. Waxman (1984), por

exemplo, direcionou seus esforços para um regulador de pressão automatizado voltado para experimentos de PVT⁵ de elevada qualidade.

A Norma NBR estabelece requisitos criteriosos para a produção de reguladores de pressão destinados ao gás liquefeito de petróleo (GLP) de uso doméstico. Esses reguladores são fundamentais para assegurar o controle seguro e eficiente da pressão do GLP em instalações residenciais. O documento inclui referências a normas específicas, como NBR 5426 (Planos de amostragem), NBR 7551 (Terminologia para GLP) e NBR 8474 (Padronização de dimensões de reguladores de pressão).

Os reguladores devem atender a uma variedade de condições gerais e específicas. A aplicação da norma se concentra em reguladores para instalações com pressão nominal de trabalho de 2,80 kPa e vazão nominal de 1,00 kg/h de GLP, conforme um método de ensaio específico. A construção dos reguladores deve garantir a intercambialidade, segurança, fácil manuseio e resistência a condições adversas.

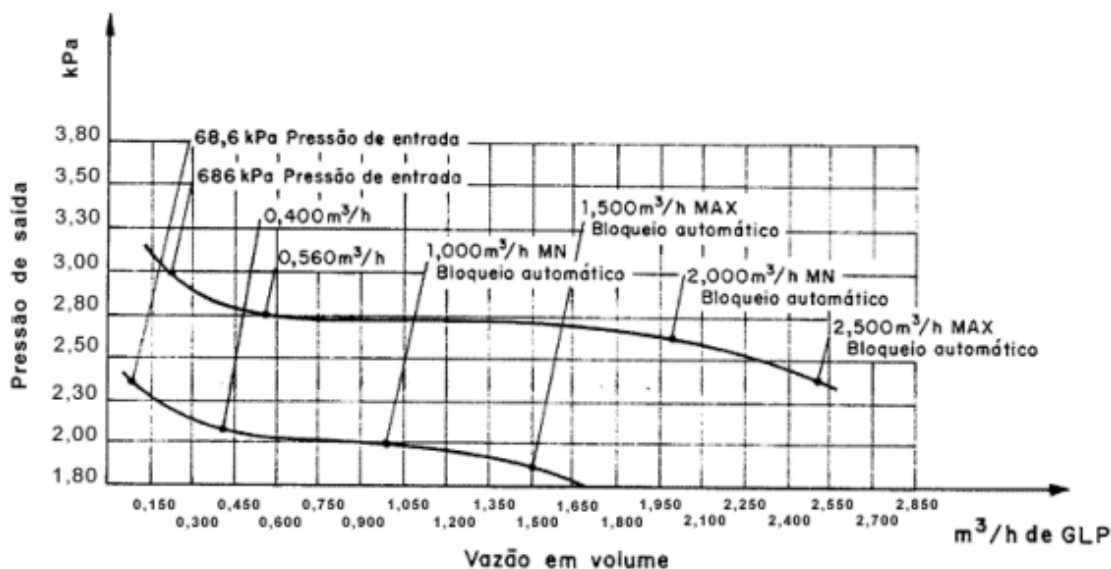
A norma detalha requisitos específicos para diferentes componentes dos reguladores, como corpo, tampa, sobre tampa, sistemas de bloqueio manual e automático, acoplamentos, válvula de alívio, respiro, injetor, balancim, obturador, eixo, estribo, conjunto, membrana, disco, mola, tope da mola, mola do sistema de alívio de pressão, lacre, porca, parafuso, vedante, entre outros. Além disso, ela destaca a importância da identificação permanente e visível dos reguladores, incluindo informações como marca do fabricante, número da norma, sentido do fluxo, data de fabricação e indicação de indústria brasileira. Esse detalhamento abrangente visa garantir a qualidade, segurança e conformidade dos reguladores de pressão de GLP utilizados em ambientes domésticos, promovendo assim a segurança e eficácia nas operações relacionadas ao gás.

Os ensaios a serem realizados incluem teste de impacto, teste de vida do mecanismo, teste de resistência a temperaturas específicas, teste de pressão hidrostática, teste de vazamento, teste de estanqueidade, teste de vazão em volume e em massa, e identificação do produto. Além disso, são estabelecidas condições específicas para aceitação e rejeição de lotes, com a possibilidade de reparos e

⁵ Relação entre pressão-volume- temperatura (PVT).

reteste em determinadas circunstâncias. A Figura 5 nos fornece o gráfico de desempenho, dado pela pressão de saída sobre a vazão em volume.

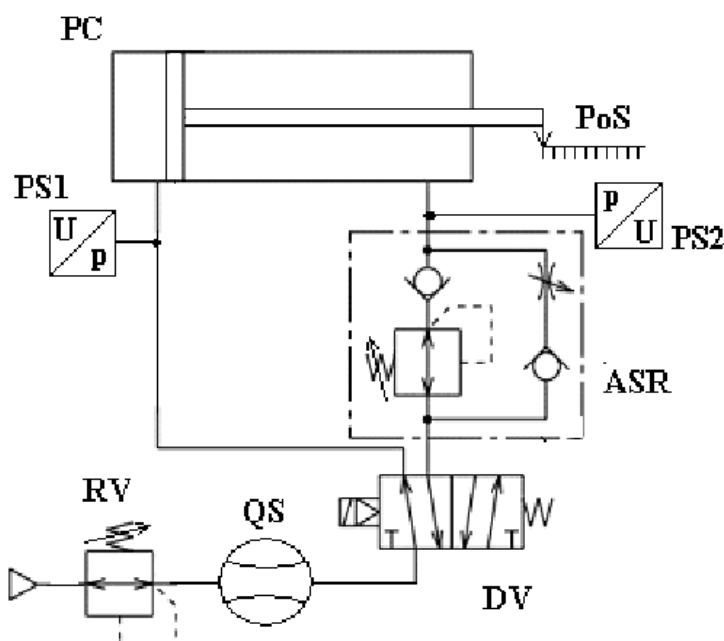
Figura 5 - Gráfico de desempenho de um regulador de pressão.



Fonte: Norma NBR 8473 (1984).

O avanço tecnológico não compromete a segurança, sendo que reguladores modernos estão equipados com recursos de alívio de pressão e monitoramento. A pesquisa e desenvolvimento continuam impulsionando melhorias, visando eficiência energética, adaptação a diferentes tipos de gases e integração com sistemas inteligentes. Essa jornada de inovação é crucial para garantir não apenas a segurança, mas também a eficácia no uso do gás em suas variadas aplicações. Kato et al. (2010) apresentou uma proposta de regulador de pressão caracterizado por sua precisão elevada e resposta rápida, desenvolvido especialmente para sistemas pneumáticos. Por sua vez, Dvořák (2015) examinou a aplicação de reguladores de pressão como válvulas visando a economia de ar comprimido e analisou seu impacto na dinâmica do sistema (Figura 6). A compreensão aprofundada desses dispositivos torna-se, assim, imperativa em face de um mundo que demanda uma abordagem cada vez mais inteligente e segura na gestão do gás.

Figura 6 - Esquema do experimento de Dvořák.



Fonte: Adaptado Dvořák (2015).

4.3 Dinâmica dos fluidos computacional

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC ou *Computational Fluid Dynamics* - CFD, em inglês) é uma disciplina essencial na engenharia, utilizando métodos numéricos para analisar o comportamento de fluidos em diversas situações. Por meio de modelos matemáticos e algoritmos computacionais, a DFC abrange aplicações que vão desde a aerodinâmica de aeronaves até estudos detalhados de transferência de calor em processos industriais complexos.

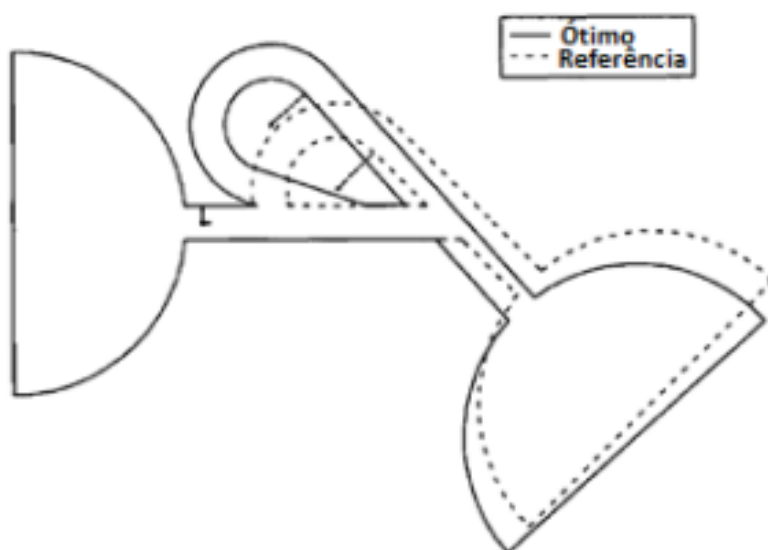
O processo de simulação DFC envolve a criação de malhas que representam geometricamente o sistema em análise. Essas malhas subdividem o domínio em pequenos volumes, permitindo uma análise precisa do comportamento fluido em diferentes regiões. As equações fundamentais que regem os fenômenos fluidos são então discretizadas e resolvidas numericamente em ambientes de computação de alta performance.

A qualidade da malha impacta diretamente na precisão da simulação, exigindo uma cuidadosa consideração da densidade e distribuição dos elementos para garantir uma representação fiel das complexidades do sistema físico. Estratégias avançadas de geração de malha são aplicadas para áreas de interesse específicas, permitindo análises detalhadas em regiões críticas e otimizando a eficiência computacional do processo como um todo.

As aplicações práticas da DFC são vastas, abrangendo setores como a indústria automotiva, onde contribui para otimizar o design de veículos, e processos industriais, onde é fundamental para compreender e melhorar a eficiência térmica. Além disso, a DFC também é aplicada na pesquisa médica, análise de poluição atmosférica, previsão de fenômenos climáticos, entre outras áreas, oferecendo uma visão detalhada e precisa sem a necessidade de extensivos experimentos físicos.

A título de exemplo, Gamboa et al. (2005) conduziram simulações numéricas e otimização de válvulas Tesla associadas a semicírculos na entrada e na saída, conforme ilustrado na Figura 7. Tal estudo utilizou malhas de 7.000 a 10.000 elementos, aplicando as equações de Navier-Stokes bidimensionais. A independência da malha foi garantida, com erro de solução abaixo de 4%, para investigar soluções em números de Reynolds de 0 a 200.

Figura 7 - Válvula tesla acoplada à meia taça.



Fonte: Adaptado Gamboa et al. (2005).

4.3.1 Modelos de turbulência

Os modelos de turbulência desempenham uma função essencial ao oferecerem abordagens matemáticas que reduzem substancialmente a carga computacional necessária para a resolução de sistemas turbulentos. A simulação numérica de fluxos turbulentos, frequentemente, encontra desafios na representação precisa por meio das equações de Navier-Stokes, obtida por meio da aplicação da segunda lei de Newton a uma partícula infinitesimal, considerando as premissas de

fluido Newtoniano - a menos que a malha computacional seja suficientemente refinada para abarcar todas as escalas de turbulência. As equações de Navier-Stokes escritas para escoamento incompressível com propriedades físicas constantes são mostradas na Eq. (2).

$$\begin{aligned}
 \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
 \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Ao explorar a matemática subjacente a uma diversidade de modelos, Davidson (2003) fornece uma visão, acerca de seu trabalho, uma abordagem focada nos aspectos relevantes ao tema, sem adentrar nos detalhes matemáticos. Dois modelos proeminentes, k - \mathcal{E} e k - ω , atualmente em voga, resolvem o sistema de equações, incorporando variáveis cruciais. Ambos consideram a energia cinética turbulenta (k), divergindo na abordagem adicional: o modelo k - \mathcal{E} incorpora a taxa de dissipação (\mathcal{E}), enquanto o k - ω utiliza a taxa de dissipação específica (ω). Frei (2017) destaca que o modelo k - \mathcal{E} exibe rápida convergência e baixo requisito computacional, embora demonstre limitações em situações de grandes gradientes de pressão. Por outro lado, o modelo k - ω oferece resultados mais satisfatórios nessas condições, embora sua convergência seja mais desafiadora.

A proposta do modelo k - ω SST, segundo o mesmo autor, representa uma síntese estratégica dos modelos k - ω e k - \mathcal{E} , visando superar as limitações individuais de cada um. Essa abordagem híbrida busca equilibrar as vantagens de ambos, fornecendo uma alternativa mais robusta e adaptável para simulações em diversas condições de escoamento. A síntese de Frei evidencia a constante evolução e adaptação dos modelos de turbulência para atender às demandas específicas de distintos cenários de simulação.

Vale ressaltar que diversos modelos de turbulência foram concebidos para atender às especificidades de diferentes tipos de fluxos. Conforme observado por Coakley (1992), embora os modelos de duas equações se destaquem na eficácia para

fluxos de alta velocidade, enfrentam desafios notáveis ao lidar com fluxos complexos. Essas pesquisas enfatizam a contínua evolução e especialização dos modelos de turbulência para melhor se adequar às demandas específicas em diversos contextos de fluxo.

4.4 Escoamento compressível

Segundo Anderson (2004), o escoamento compressível pode ser definido como aquele em que sua densidade é variável, diferentemente do escoamento incompressível, no qual sua densidade, apesar de não ser completamente linear em todo o fluido, possui uma variação muito pequena, podendo ser considerada como desprezível. Outro fator que caracteriza o escoamento compressível, descrito por White (2011), ocorre quando um fluido se move em uma velocidade compatível à velocidade do som, sendo notoriamente comuns, em gases, visto que para tal fenômeno ocorrer em líquidos, seriam necessárias pressões de grandezas elevadas para gerar velocidades supersônicas.

Anderson (2004) ainda determina, expressa a partir da Equação 3, a compressibilidade do fluido t . Sendo V o volume do elemento de fluido, P a pressão, dP a variação infinitesimal de pressão e dV a variação infinitesimal de volume, sendo esta uma quantidade negativa caso dP seja positivo. Assim, obtém-se a compressibilidade do fluido t como:

$$t = - \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dP} \quad (3)$$

Para compressibilidade isotérmica, onde a temperatura do elemento do elemento do fluido for constante, tem-se sua definição pela Equação 4, expressa a seguir:

$$t_T = - \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{dV}{dP} \right)_T \quad (4)$$

Da mesma maneira, tem-se a Equação 5 para representar a compressibilidade de um processo isentrópico.

$$t_s = -\frac{1}{V} \cdot \left(\frac{dV}{dP} \right)_s \quad (5)$$

Oliveira (2011) realizou um estudo acerca do escoamento compressível generalizado e unidimensional, tratando-se de uma análise mais profunda no escoamento de Fanno com atrito e sem troca de calor em bocais ASME. No estudo, Oliveira (2011) comparou dois modelos de análise deste escoamento, um analítico, através dos coeficientes de descarga presentes nos bocais ASME e o método dos coeficientes de influência. Por fim, pode-se constatar que tais modelos não tiveram um desvio em seus resultados muito grande, apresentando boa correlação entre os métodos apresentados. Em resumo, análise do modelo de escoamento compressível é essencial para compreender diversas propriedades físicas aplicadas.

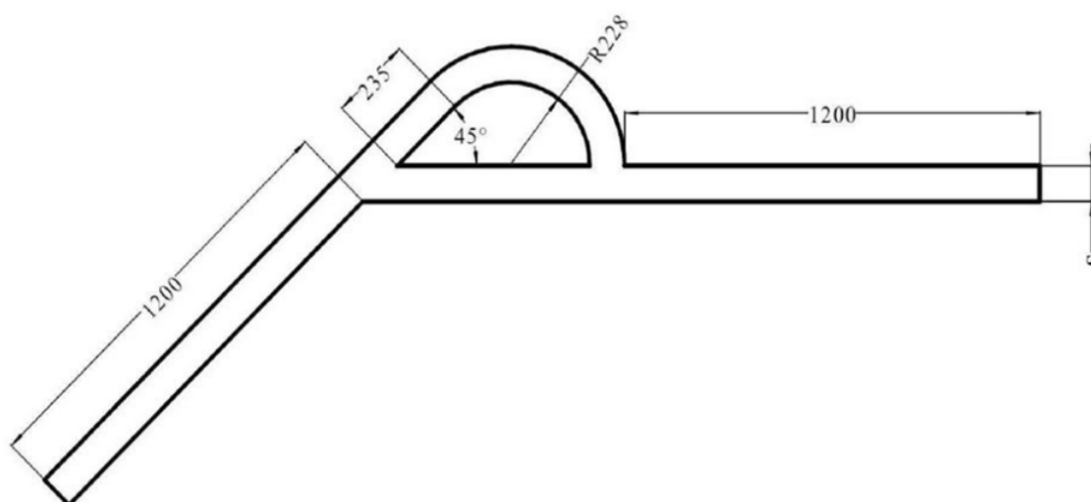
5 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é fundamentada em cinco propostas estruturadas que visam o desenvolvimento e validação de válvulas Tesla para o controle eficiente do fluxo de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Essas propostas abrangem desde as simulações numéricas detalhadas, até o protótipo do modelo, em escala, estudado. Cada etapa foi planejada para garantir a precisão dos resultados e a confiabilidade do sistema desenvolvido. Neste contexto, as cinco propostas metodológicas fornecem uma estrutura sólida e abrangente para alcançar os objetivos estabelecidos neste estudo.

5.1 Modelagem da geometria

Para a construção da modelagem geométrica, será empregado o software SOLIDWORKS®, iniciando pelo esboço bidimensional da estrutura e evoluindo para a representação tridimensional. As dimensões preliminares serão delineadas conforme os parâmetros estabelecidos por Zhang et al. (2023), como mostrado na Figura 8, onde o autor representa as medidas em mm, todavia, no presente estudo será adaptado pra uma dimensão 10 vezes menor, possibilitando a criação de uma base inicial para as simulações descritas no tópico 5.1.1. Esse primeiro modelo permitirá a execução de simulações voltadas à análise de vazão, as quais será conduzida com o intuito de verificar o desempenho inicial da estrutura.

Figura 8 – Modelo da válvula Tesla de Zhang.



Fonte: Adaptado Zhang et al. (2023)

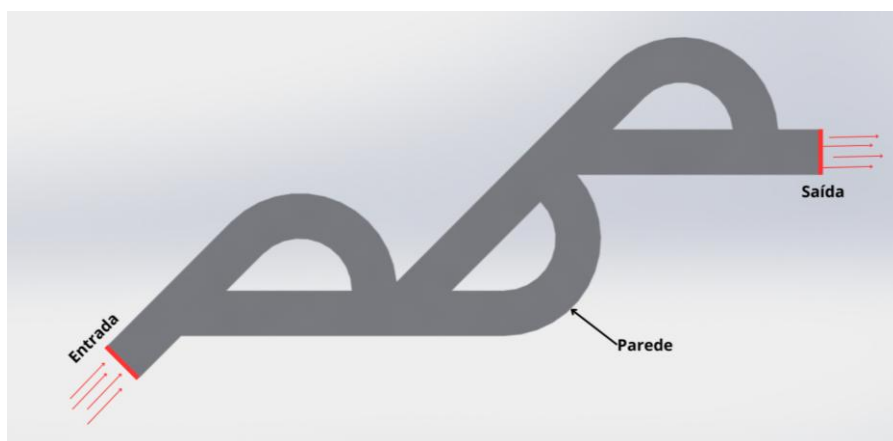
Ao obter os resultados da primeira simulação, será realizada a avaliação dos valores de vazão em relação aos requisitos normativos e às especificações do projeto. Caso os resultados estejam aquém dos critérios desejados, ajustes serão incorporados à modelagem, e novas simulações serão realizadas. Esse processo iterativo de refinamento e avaliação será mantido até que se obtenha um modelo final que atenda às expectativas de desempenho e segurança preestabelecidas.

5.1.1 Procedimentos para simulações numéricas

Serão conduzidas simulações numéricas de válvulas Tesla com o propósito de determinar uma configuração que viabilize a entrada de GLP a uma pressão de 686 kPa e a saída do mesmo a uma pressão de 2,8 kPa, mantendo uma vazão mássica constante de aproximadamente 1,0 kg/h, onde simula as propriedades onde o reservatório esteja cheio, conforme a norma NBR 8473 e mostrado na Figura 5. A modelagem geométrica das válvulas será realizada utilizando o software ANSYS® SpaceClaim. A geração da malha numérica tridimensional (3D) será efetuada no ANSYS® Fluent Meshing, priorizando a utilização de elementos poliedros com hexa-core para mitigar os efeitos de difusão numérica.

As simulações serão executadas no software ANSYS® Fluent®, iniciando-se com simulações preliminares para alcançar a queda de pressão desejada, mantendo a vazão especificada. A configuração que será empregado terá condições de contorno de pressão que será aplicada na entrada e saída, impondo as pressões de entrada e saída (manométricas) conforme especificado na norma, como é mostrado na Figura 09. Nestes testes, a vazão mássica resultante será avaliada para ajustar a geometria até obter aproximadamente 1,0 kg/h.

Figura 9 – Ilustração das condições de contorno.



Fonte: Autoria própria (2024).

O Quadro 1 descreve a configuração que será utilizada no ANSYS® Fluent® para que sejam feitas as simulações.

Quadro 1 - Configuração a ser empregada no software ANSYS® Fluent®.

FLUIDO	
Fluido	Gás GLP
Regime	Permanente
Solver	Baseado em Pressão
Modelo de Turbulência	k-omega SST
Densidade do Fluido	2,50 kg/m ³
Temperatura	293 K
Viscosidade dinâmica	1,15 e-05 kg/(m s)
ENTRADA	
Vazão	Variável
Pressão	686 kPa
Razão de Viscosidade Turbulenta	10
SAÍDA	
Pressão	2,8 kPa
Refluxo de Intensidade Turbulenta	5%
Razão de Viscosidade Turbulenta de Refluxo	10
PAREDE ESTACIONÁRIA	

Condição de Contorno	Parede estacionária
Condição de Cisalhamento	Sem deslizamento
Acoplamento Pressão-Velocidade	<i>Coupled</i>
DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL	
Gradiente	Baseado em mínimos quadrados
Momento	<i>upwind de segunda ordem</i>
Energia Cinética Turbulenta	<i>upwind de segunda ordem</i>
Taxa de Dissipação Específica	<i>upwind de segunda ordem</i>
Pseudo Método de Tempo	Passo de tempo global
EQUAÇÕES	
Erro Residual	1,00 e-06

Fonte: Autoria Própria (2024).

Os resultados das simulações serão processados no software ANSYS® CFD-POST™. Após obter valores próximos aos requisitos desejados, será conduzida uma análise de independência de malha, com o intuito de alcançar os parâmetros de projeto estabelecidos.

5.2 Teste de independência de malha

Após determinar a geometria que atenda aos critérios de redução de carga e alcance a vazão mássica desejada no projeto, o próximo passo será a realização do estudo de independência de malha. Esse procedimento envolve a criação de três configurações de malha no software ANSYS® Fluent Meshing®, cada uma com um nível diferente de refinamento. A independência de malha será confirmada caso a diferença entre os valores de vazão mássica obtidos nas três malhas seja inferior a 5%, sugerindo que o refinamento adicional não altera significativamente os resultados.

Na configuração de malha do ANSYS® Fluent Meshing®, serão geradas versões progressivamente mais refinadas da malha, ajustando-se o tamanho mínimo e máximo das arestas dos elementos em cada configuração. Esse ajuste será feito tanto na criação da malha superficial quanto na volumétrica, reduzindo gradualmente o tamanho dos elementos para cada nível de refinamento. Além disso, será

aumentada a quantidade de camadas na região de camada limite, o que permite uma maior resolução dos efeitos de fluxo próximos às paredes.

5.3 Análise com pressões intermediárias

Para a realização do teste de pressões intermediárias na válvula, serão adotadas três pressões de entrada distintas, de modo a simular o comportamento do regulador à medida que o botijão de GLP se esvazia e, conseqüentemente, a pressão de entrada se altera. A pressão máxima aplicada será de 686 kPa, conforme é estabelecido na norma e discutido nos tópicos anteriores, enquanto a pressão mínima será de 49 kPa. Esta última, de acordo com a NBR 8473, representa a pressão mínima admissível para a entrada de GLP, sendo estabelecida em 49,0 kPa, com vazão de 1,0 kg/h e pressão de saída a 2,8 kPa, simulando o reservatório em estado praticamente vazio.

Com base nas pressões mínima e máxima, foram definidas duas pressões intermediárias para complementar a análise: a primeira será de aproximadamente 457,3 kPa e a segunda de aproximadamente 228,6 kPa. Essas pressões intermediárias permitirão uma avaliação do comportamento do regulador de pressão em condições intermediárias de esvaziamento do botijão, fornecendo uma visão das respostas do sistema a variações graduais de pressão de entrada. Assim, será possível observar o desempenho do regulador, identificando eventuais alterações na vazão e na resposta da válvula conforme a pressão diminui progressivamente.

O procedimento de simulação seguirá as etapas descritas no subtópico 5.1.1, com as adaptações necessárias para as novas condições de pressão. Após a realização dos testes, será gerado um gráfico ilustrando a relação entre a vazão e a pressão de saída no regulador, permitindo uma análise detalhada do comportamento da vazão em função das diferentes pressões aplicadas, auxiliando na identificação do desempenho do regulador sob as condições variadas de pressão à medida que o reservatório se aproxima do esvaziamento.

5.4 Análise do escoamento compressível

Na análise simulacional deste trabalho, considera-se a diferença entre escoamento compressível e incompressível, uma vez que essa distinção afeta a variação de densidade do fluido em movimento. Em escoamentos incompressíveis, segundo White (2011), a variação de densidade é insignificante, e o fluido pode ser tratado como homogêneo ao longo de sua trajetória. Este tipo de escoamento é típico para líquidos ou gases em baixas velocidades, especialmente quando o número de Mach⁶ é inferior a 0,3. Nessas condições, a compressibilidade do fluido é desprezada, o que simplifica as equações de movimento e os métodos de solução.

Já em escoamentos compressíveis, como anteriormente exposto no tópico 4.4, ocorrem variações significativas na densidade do fluido, característica comum em gases em altas velocidades, geralmente com número de Mach maior ou igual a 0,3. Conforme White (2011), a compressibilidade do fluido passa a influenciar as características do escoamento, exigindo uma abordagem que considere essas variações de densidade ao longo do fluxo. No presente estudo, entende-se que essa temática é um pouco mais complexa, uma vez que mesmo não obtendo $Mach > 0,3$ a variação de pressão ao longo da válvula pode acarretar uma variação de massa específica superior a 5%.

Para verificar isso, utiliza-se a Equação 6, conhecida como equação dos gases ideais, demonstrada a seguir:

$$P = \rho \cdot R \cdot T \quad (6)$$

Caso a variação da massa específica seja superior a 5%, será empregado a configuração computacional e a análise do escoamento compressível, comparando-se com os resultados obtidos nas simulações para escoamento incompressível. Ressalta-se que, se necessária, a utilização de escoamento compressível neste estudo será uma análise preliminar, visto que a temperatura na saída da válvula não é conhecida.

⁶ Razão entre a velocidade de um fluido e a velocidade do som no mesmo meio.

5.4.1 Configuração computacional para escoamento compressível

Neste subtópico, apresenta-se a configuração computacional relativa ao escoamento compressível, demonstrado no Quadro 2, detalhando as configurações utilizadas no software ANSYS® Fluent® para a simulação. Descrevem-se as definições de domínio, malha, condições de contorno e as propriedades específicas do fluido, visando um melhor parâmetro que possivelmente se adeque à realidade. O ponto de análise em questão será a pressão de entrada, para fins comparativos com o resultado da simulação computacional obtida no escoamento incompressível. Logo, nessa configuração será imposta a vazão mássica e a pressão de saída e terá como variável a pressão de entrada.

Quadro 2 – Configuração 2 a ser empregado no software ANSYS® Fluent®.

FLUIDO	
Fluido	Gás GLP
Regime	Permanente
Solver	Baseado em Densidade
Modelo de Turbulência	k-omega SST
Densidade do Fluido	2,50 kg/m ³
Temperatura	300 K
Viscosidade dinâmica	Sutherland
ENTRADA	
Vazão	1,0 kg/h
Pressão	Variável
Razão de Viscosidade Turbulenta	10
SAÍDA	
Pressão	2,8 kPa
Refluxo de Intensidade Turbulenta	5%
Razão de Viscosidade Turbulenta de Refluxo	10
PAREDE ESTACIONÁRIA	
Condição de Contorno	Parede estacionária
Condição de Cisalhamento	Sem deslizamento

Acoplamento Pressão-Velocidade	<i>Coupled</i>
DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL	
Gradiente	Baseado em mínimos quadrados
Momento	<i>upwind de segunda ordem</i>
Energia Cinética Turbulenta	<i>upwind de segunda ordem</i>
Taxa de Dissipação Específica	<i>upwind de segunda ordem</i>
Pseudo Método de Tempo	Passo de tempo global
EQUAÇÕES	
Erro Residual	1,00 e-06

Fonte: Autoria Própria (2024).

5.5 Prototipagem

Após obter a geometria da válvula, o foco será direcionado para a modelagem do protótipo utilizando impressão 3D. Essa etapa é essencial para materializar o projeto.

5.5.1 Metodologia de Prototipação em Impressão 3D

Para a realização da prototipagem da Válvula Tesla como um regulador de gás, baseada na geometria estudada e definida na seção 5.1.1, serão estabelecidas as seguintes condições relacionadas ao material, configuração e tipo de impressora:

- Impressora 3D: A impressora a ser utilizada será do tipo SLA (modelo de estereolitografia) mais especificamente a Creality Mage 8k, com movimentação cartesiana. Nesse contexto, ela se torna adequada para o material selecionado e capaz de produzir peças com precisão e detalhes finos;
- A escolha do material filamentar adequado para a impressão de onde o material escolhido foi a resina fotossensível 14k lavável em álcool.
- Impressão do Protótipo: Processo de impressão do modelo digital da válvula em 3D, observando a qualidade da impressão e garantindo a integridade do protótipo.

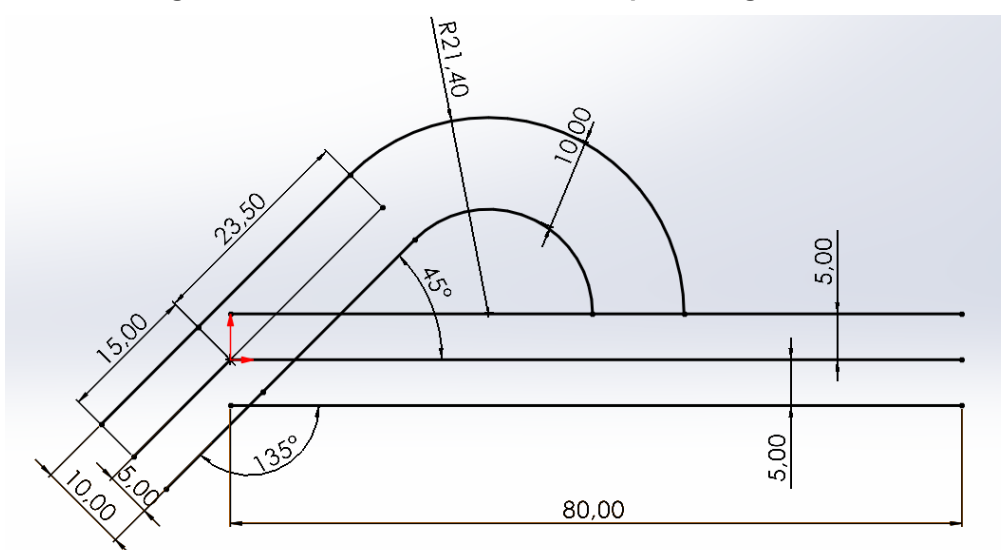
6 RESULTADO E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho estão relacionados às etapas metodológicas descritas, ao longo do desenvolvimento do Trabalho de Conclusão do Curso, incluindo a modelagem geométrica, as simulações realizadas e o estudo de independência de malha. Foram organizados para apresentar as variáveis estudadas, como a vazão mássica, a redução de carga e os ajustes na qualidade da malha nas simulações. Também foram comparados aos parâmetros normativos e aos valores definidos no escopo do projeto, com o objetivo de avaliar o atendimento aos critérios estabelecidos. Nos tópicos seguintes, os dados obtidos são apresentados e analisados de acordo com as metodologias empregadas.

6.1 Resultados encontrados na modelagem da geometria

O processo de modelagem geométrica foi iniciado com a criação do desenho 2D da válvula Tesla, desenvolvido com base nas dimensões apresentadas por Zhang et al. (2023), conforme descrito na metodologia. A partir desse esboço bidimensional, foi realizada uma extrusão de 10 mm de espessura, definindo uma parede interna de 1 mm. Com isso, a área transversal destinada à circulação do fluido ficou com 8 mm de largura. Esse modelo inicial serviu de base para as etapas subsequentes de análise e refinamento geométrico. Como demonstrado na Figura 10, o desenho 2D apresenta as principais dimensões da válvula Tesla, em mm.

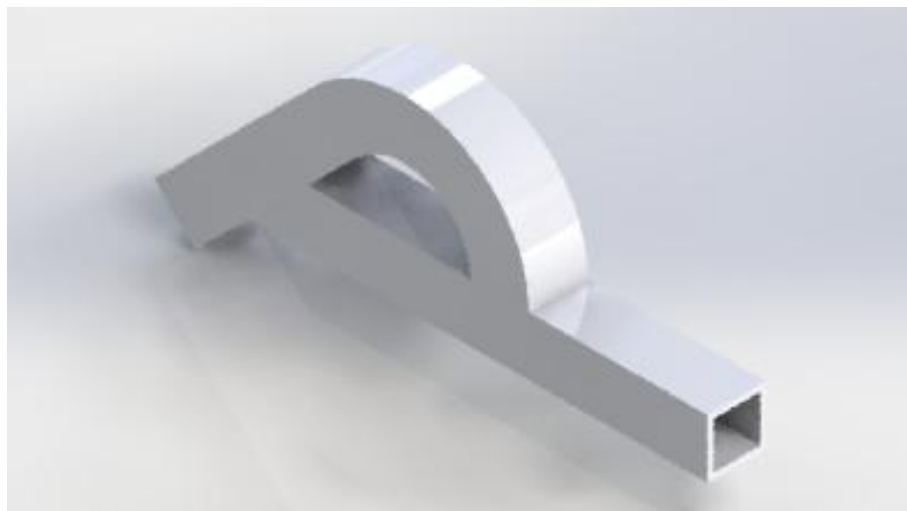
Figura 10 – Dimensões relevantes da primeira geometria.



Fonte: Autoria própria (2024).

Após a elaboração do esboço inicial, foi realizada a extrusão que resultou no modelo em 3D, gerando uma visão isométrica da válvula, como pode ser observado na Figura 11.

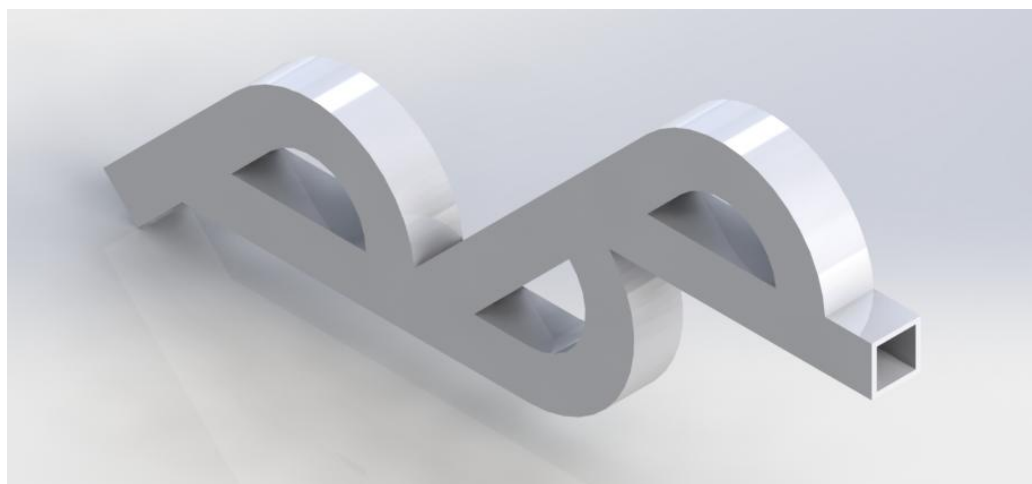
Figura 11 – Visão isométrica da primeira geometria.



Fonte: Autoria própria (2024).

Dando sequência ao processo, foi realizada uma configuração do modelo com três arcos, baseada na sistemática proposta por Du et al. (2023). Embora o estudo original tenha utilizado dois arcos, ele serviu como referência para a ampliação do número de arcos e a adaptação da geometria ao escopo do projeto. Como ilustrado na Figura 13, a segunda geometria é apresentada em vista isométrica, destacando as modificações realizadas.

Figura 12 – Visão isométrica da segunda geometria.

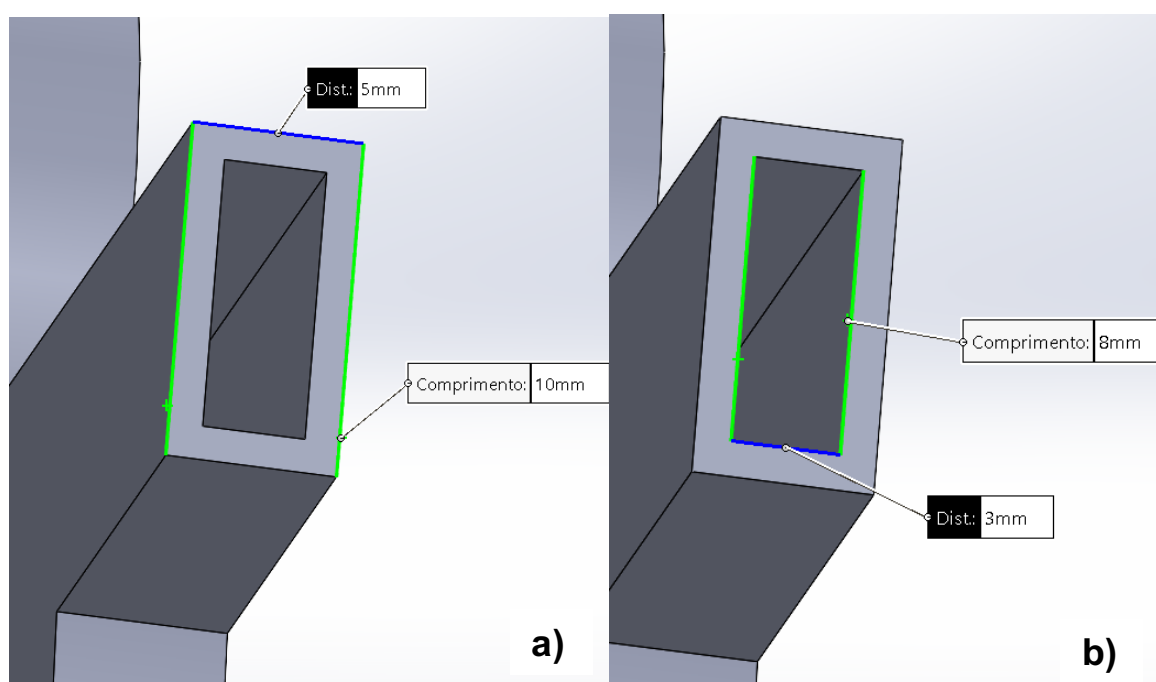


Fonte: Autoria própria (2024).

Posteriormente, as simulações computacionais foram iniciadas utilizando o software ANSYS®. No ambiente ANSYS® SpaceClaim, a geometria modelada previamente no SOLIDWORKS® foi preparada para análise, incluindo a remoção da parte interna, definida como o domínio de interesse no estudo. Durante essa etapa, também foram configuradas as superfícies de controle, identificando as regiões de entrada, saída e parede. Com a geometria configurada, foi realizada uma malha inicial com um baixo refino, contendo aproximadamente 46.109 elementos, com o objetivo de realizar uma análise preliminar do comportamento do modelo. Em seguida, foi aplicado o padrão descrito no tópico 5.1.1 e a simulação foi executada. O resultado preliminar indicou uma vazão mássica de 125,2 kg/h, proporcionando os primeiros dados para avaliação e refinamento do modelo.

Os resultados iniciais evidenciaram que a queda de pressão gerada pela geometria com três arcos estava aquém do necessário, exigindo ajustes significativos no modelo. Para isso, a angulação do raio dos arcos foi modificada, e a espessura da seção transversal foi reduzida, passando a apresentar 5 mm externamente e 3 mm internamente, como ilustrado na Figura 13. Essas alterações buscaram otimizar a válvula.

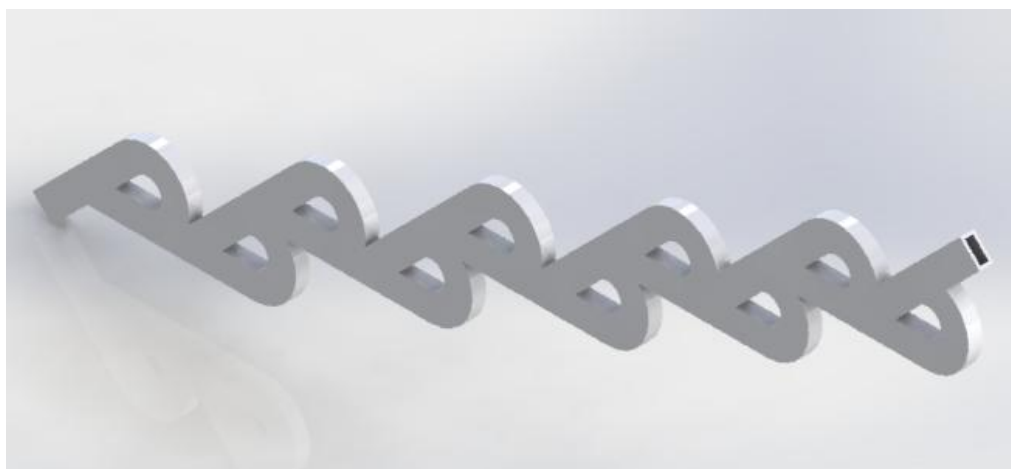
Figura 13 – (a) Dimensões externas. (b) Dimensões internas.



Fonte: Autoria própria (2024).

Além disso, outra modificação importante foi a ampliação do número de arcos para 10, conforme demonstrado na Figura 14. Após essas alterações geométricas, o modelo foi novamente processado no ANSYS® seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. Utilizando uma malha de baixa qualidade, composta por aproximadamente 121.598 elementos, a simulação indicou uma vazão mássica de 22,7 kg/h.

Figura 14 – Visão isométrica da terceira geometria.

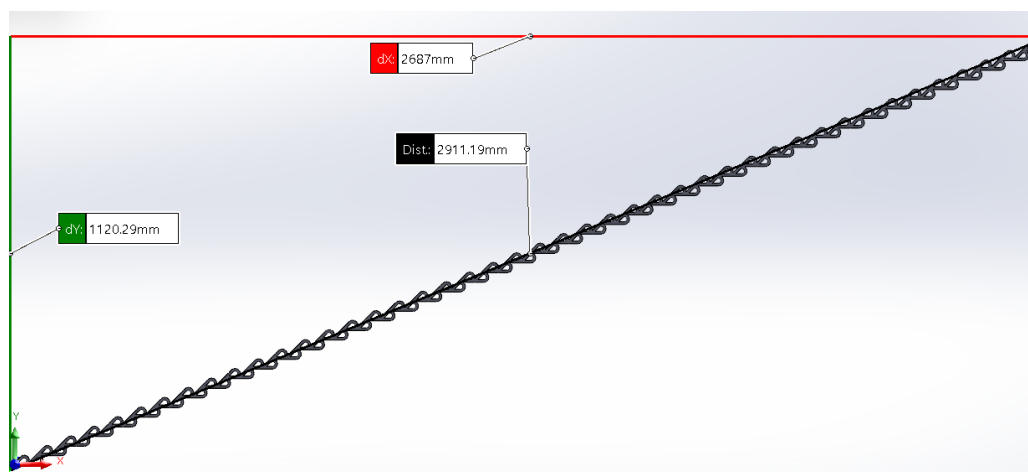


Fonte: Autoria própria (2024).

Após diversas configurações geométricas e simulações realizadas, chegou-se, ao final do processo, a uma válvula Tesla composta por 88 arcos e 4 mm de espessura. Essa configuração resultou em uma vazão mássica de 1,8 kg/h, considerada satisfatória no contexto das simulações realizadas, mas destacando sua complexidade geométrica que é um impeditivo para o estudo. É importante destacar que essas análises foram conduzidas utilizando malhas com menos de um milhão de elementos, e configurações ainda relativamente grosseiras, o que indica que os resultados podem apresentar margens de incerteza a serem refinadas em etapas futuras.

Entretanto, ao analisar o modelo resultante, foi constatada uma limitação significativa no que se refere às suas dimensões. Com uma largura total de 2,9 metros, conforme mostrado na Figura 15, a válvula apresentou características que inviabilizam sua aplicação prática, tanto em termos de fabricação quanto de comercialização. Esse fator evidencia a necessidade de ajustes adicionais na geometria para reduzir suas dimensões físicas, sem comprometer o desempenho.

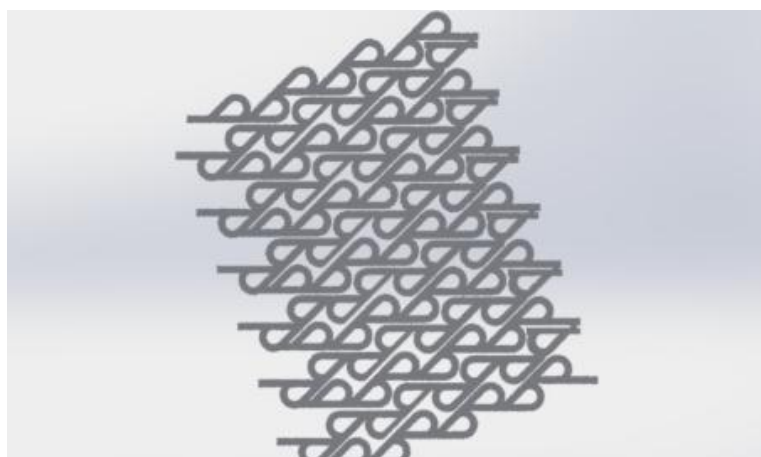
Figura 15 – Largura total da válvula.



Fonte: Autoria própria (2024).

Após uma análise das possibilidades para manter os valores de vazão, ao mesmo tempo em que se reduz a geometria para uma configuração mais viável, levantou-se a hipótese de implementar a válvula em série, posicionando cada ramo⁷ paralelamente ao outro. Esse arranjo assemelha-se ao funcionamento de um trocador de calor. Considerando que a proposta é manter o fluxo em série, direcionando o fluido em um movimento de "ida e volta", foi determinado que cada ramo deve estar posicionado a 180° em relação ao outro. Essa disposição é necessária para garantir a funcionalidade promovida pela válvula Tesla, conforme descrito no tópico 4.1. Para conectar os ramos, foi proposto um tubo no final do percurso do fluido. A Figura 16 ilustra a configuração de "grelha", mencionada.

Figura 16 – Geometria em série.



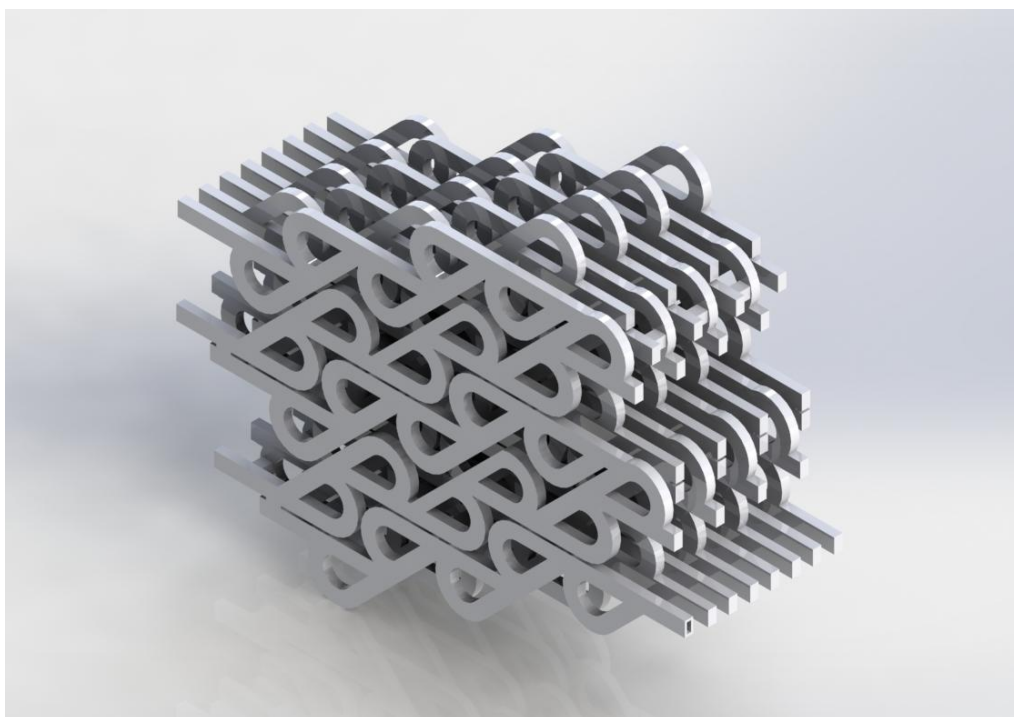
Fonte: Autoria própria (2024).

⁷ Nome denominado pelo autor para representar uma fileira de válvulas teslas.

A configuração apresentada, composta por 97 arcos, resultou em uma vazão de 2,2 kg/h. Embora este valor esteja dentro da faixa operativa de um regulador de pressão destinado ao uso doméstico, ainda não atendeu à vazão ideal desejada. Além disso, a geometria alcançada, com dimensões aproximadas de 32 x 40 cm, permaneceu significativamente maior do que a de um regulador de pressão convencional.

Diante dessas limitações, surgiu uma nova proposta que consiste em adotar uma abordagem semelhante à anterior, porém expandindo o design para a terceira dimensão. Nessa configuração tridimensional, cada coluna seria posicionada a 180° em relação à outra, conectadas por tubos entre si, mantendo a diodicidade característica da válvula Tesla e buscando otimizar o espaço ocupado pela geometria. A Figura 17 apresenta a geometria final, destacando que foram realizados diversos testes com variações geométricas até alcançar a configuração demonstrada. Vale destacar que o fluido entra no canal superior da fileira de trás e sai na parte inferior da fileira da frente.

Figura 17 – Geometria final.



Fonte: Autoria própria (2024).

A geometria final apresentou uma vazão mássica satisfatória de 1,8 kg/h, composta por 216 arcos. As dimensões da estrutura foram otimizadas, alcançando aproximadamente 23 x 20 x 7,5 cm, com uma malha mais refinada desenvolvida no software Ansys. Um ajuste adicional foi realizado na espessura interna de cada arco, que foi reduzida para 1,5 mm. Esse valor foi considerado adequado para a transição do gás GLP, levando em conta que o injetor de gás de botijões domésticos possui, em média, um orifício de apenas 1 mm.

6.2 Resultados encontrados na independência de malha

Nesta etapa do tópico 6, a intenção metodológica foi avaliar a última geometria desenvolvida, que alcançou os resultados desejados, incluindo uma queda de pressão razoável. O objetivo principal foi realizar três refinamentos diferentes na malha, conforme descrito na metodologia, e comparar os resultados das vazões mássicas obtidas. Essa análise buscou verificar a independência dos resultados da malha em relação ao nível de refinamento dela.

Foram realizados três tipos de refinamentos, limitando-se a essa quantidade por dois motivos principais: primeiro, devido ao alcance do limite computacional disponível; segundo, porque as variações entre as malhas analisadas apresentaram valores dentro do desvio tolerável. A seguir, a Tabela 1 apresenta as comparações entre as diferentes malhas, incluindo seus nomes, o número de elementos utilizados e as respectivas vazões mássicas na saída, que foi o ponto de análise considerado.

Tabela 1 – Refinamento de 3 malhas.

Malha	Vazão Mássica (kg/s)	Número de Elementos
Malha 1	$5,162 \cdot 10^{-4}$	4.588.982
Malha 2	$5,088 \cdot 10^{-4}$	8.473.388
Malha 3	$4,755 \cdot 10^{-4}$	11.593.557

Fonte: Autoria própria (2024).

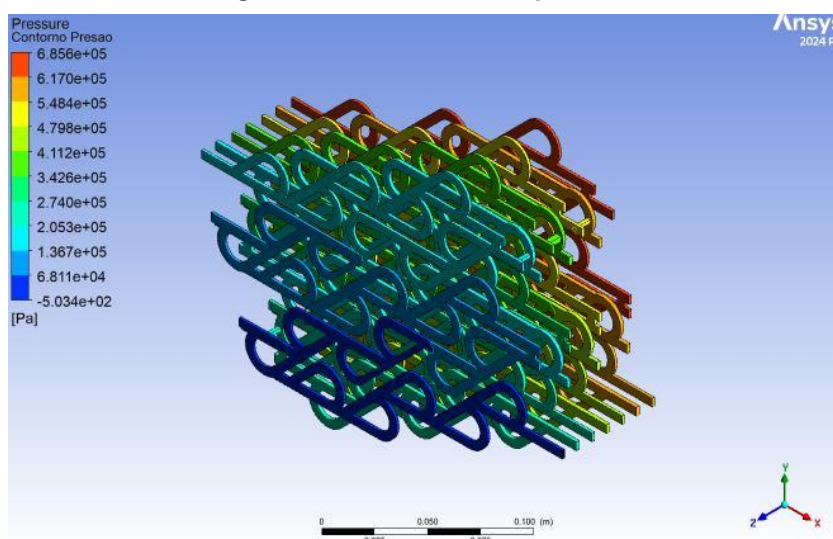
Conforme demonstrado na Tabela 1, a variação da vazão mássica entre a malha 1 e a malha 2 foi de aproximadamente 1,5%, enquanto entre a malha 2 e a malha 3 foi de aproximadamente 6,5%. Esses valores estão dentro do limite de variação considerado aceitável, o que caracteriza os resultados como satisfatórios e alinhados com o esperado. Dessa forma, pode-se concluir que a malha se tornou independente em relação ao refinamento, comprovando a estabilidade dos resultados obtidos.

6.2.1 Pós processamento da geometria

Neste subtópico, apresentam-se os resultados gráficos obtidos no pós-processamento, utilizando a malha intermediária selecionada após a realização do teste de independência da malha. Os dados e informações gerados foram analisados no software ANSYS® CFD-POST™, fornecendo representações visuais relevantes para o presente estudo.

Esses gráficos ilustram aspectos cruciais relacionados ao comportamento do fluxo, permitindo uma análise mais detalhada dos parâmetros investigados, como distribuição de pressão, perfil de velocidades e características da vazão mássica ao longo da geometria. A Figura 18, demonstra o gráfico de contorno de pressão, destacando a necessidade de análise complementar dos dados de pressão dentro da geometria de estudo. Esses resultados contribuem para a interpretação dos fenômenos observados e fundamentam as conclusões deste trabalho.

Figura 18 – Contorno de pressão.

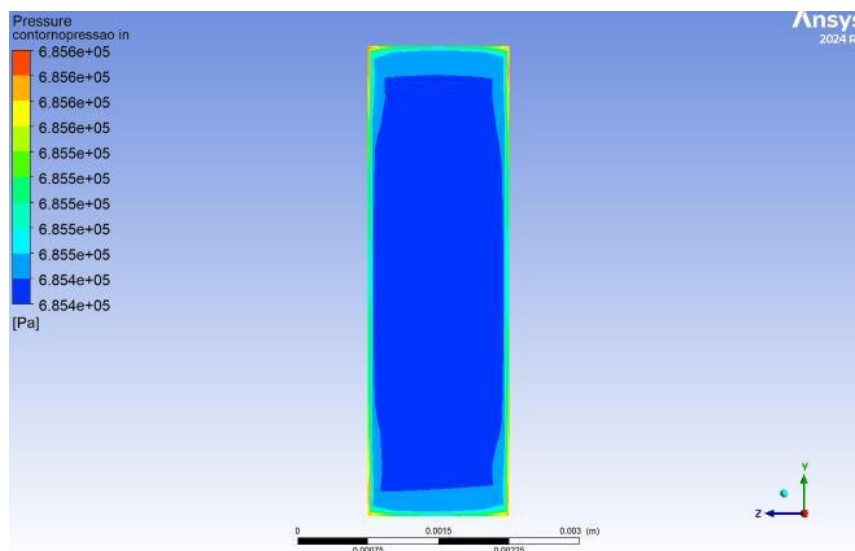


Fonte: Autoria própria (2024).

Ao analisar o contorno de pressão obtido, verificou-se que as pressões impostas no caso 1 foram distribuídas conforme o esperado, sem apresentar desvios significativos em relação às condições previstas. O comportamento observado demonstrou uma conformidade satisfatória com os parâmetros estabelecidos, indicando que a perda de carga ao longo da geometria ocorreu de forma consistente com o modelo proposto, ou seja, o fluido entrou à uma alta pressão na parte superior da fileira de trás e do regulador de pressão e saiu à baixa pressão na parte inferior da fileira da frente, como demandado na norma NBR 8473, obtendo a perda de carga. Isso se faz notório pela relação de cores com os valores de pressão descrito no canto esquerdo da Figura 18, que conforme o gás fosse passando pela geometria, sua cor vai mudando, de acordo com suas respectivas pressões, até chegar à cor azul denotando uma baixa pressão.

Tendo em vista o contorno, Figura 18, apresentado de pressão, considerou-se pertinente incluir uma representação gráfica do contorno de pressão na entrada da geometria, demonstrado na Figura 19.

Figura 19 – Contorno de pressão na entrada.

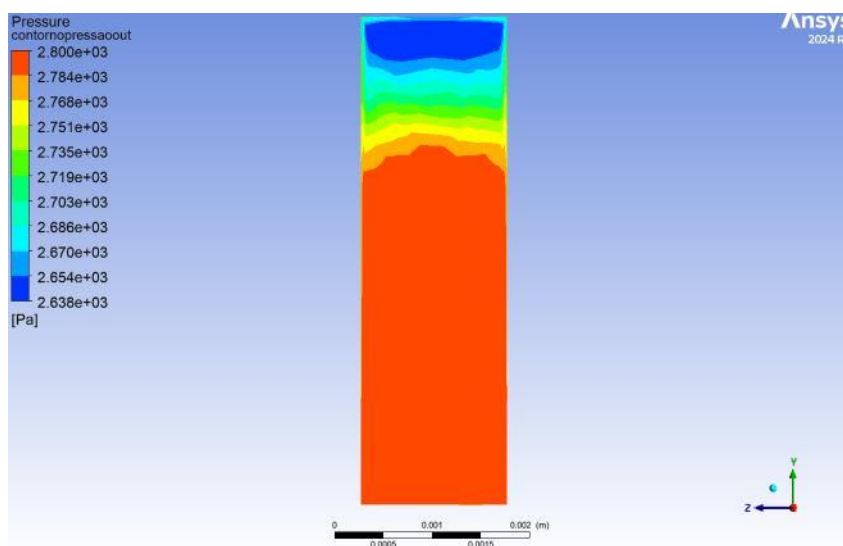


Fonte: Autoria própria (2024).

Verificou-se uma variação mínima na entrada, indicando que o formato configurado apresentou confiabilidade e consistência nos resultados simulados. A Figura 20 também tem a mesma proposta, mas mostrando o contorno de pressão na saída e demonstrando que também, como na pressão da entrada, não houve nenhum desvio significativo, mas, vale a ressalva que o contorno da pressão de saída, exposta

na Figura 20 é menos uniforme que na pressão de entrada, ilustrada na Figura 19, provavelmente pelo percurso do fluido ao longo da geometria, o que acaba ocasionando uma maior instabilidade.

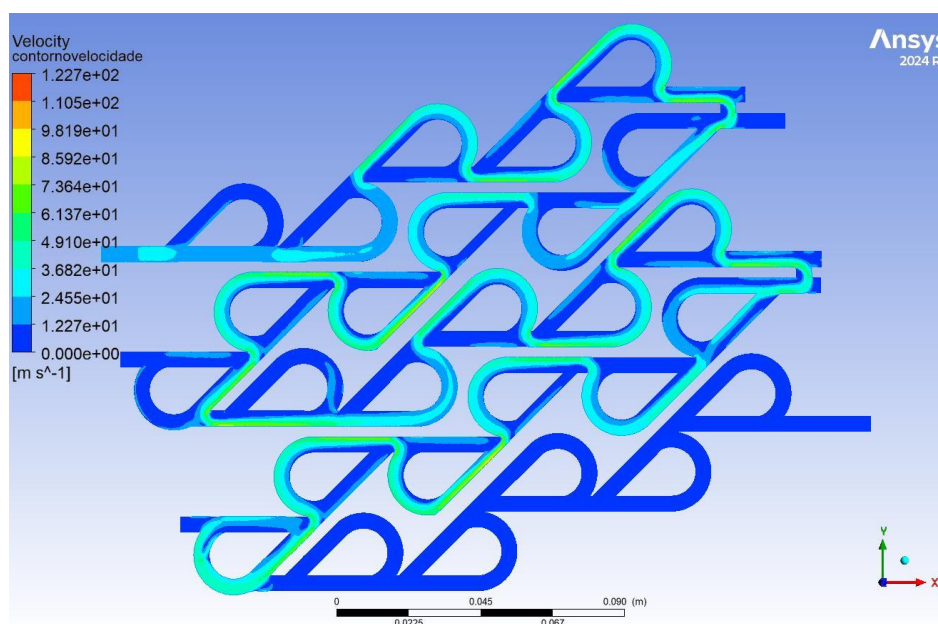
Figura 20 – Contorno de pressão na saída.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 21 apresenta o contorno de velocidade, dado considerado relevante para a análise do escoamento de gás ao longo da geometria.

Figura 21 – Contorno de velocidade.

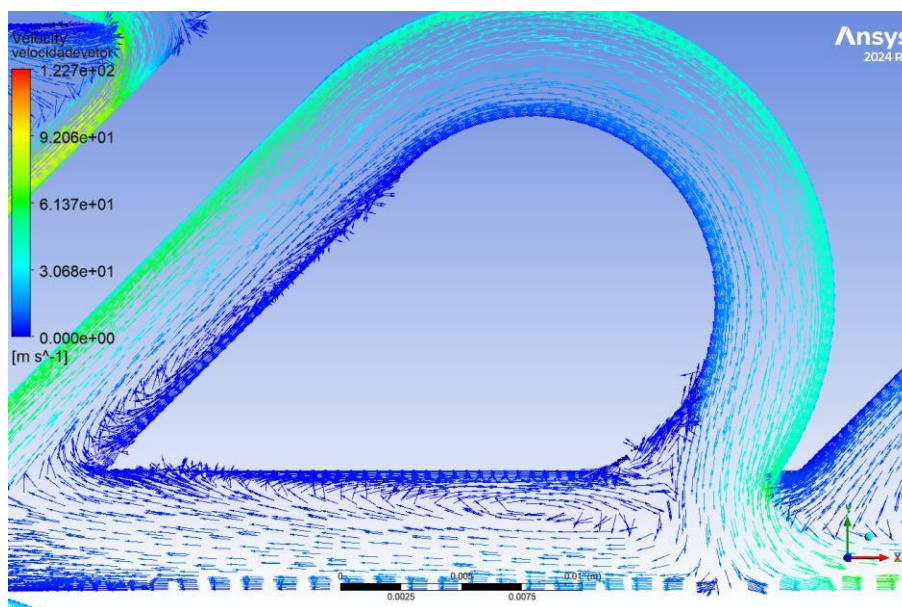


Fonte: Autoria própria (2024).

O contorno de velocidades da Figura 21 mostra uma distribuição com zonas de baixa velocidade (azul) nas regiões de recirculação e velocidades crescentes (verde a vermelho) em áreas de aceleração, como curvas e gargalos. Isso mostra uma preocupação quando se trata de escoamento incompressível pois em regiões de pico (vermelho) chega a aproximadamente 120 m/s o que, fazendo a conversão, expressa uma velocidade muito alta, ultrapassando os 400 km/h. Assim, se observa uma necessidade de uma análise com escoamento compressível, como é levantado como um ponto de atenção no tópico 5.4. Vale destacar que tal velocidade se torna impraticável em uma situação real, o que se torna mais um empecilho para o atual estudo, além de sua geometria muito complexa. Outra consideração a se fazer é que por mais que na Figura 21 demonstre apenas uma fileira do regulador, o escoamento inferior será transferido para a próxima camada, fazendo todo o percurso do regulador.

Além do contorno de velocidade, é pertinente apresentar os vetores de velocidade para observar o comportamento do fluido dentro da geometria do regulador. A Figura 22 ilustra essa representação.

Figura 22 – Vetores de velocidade.

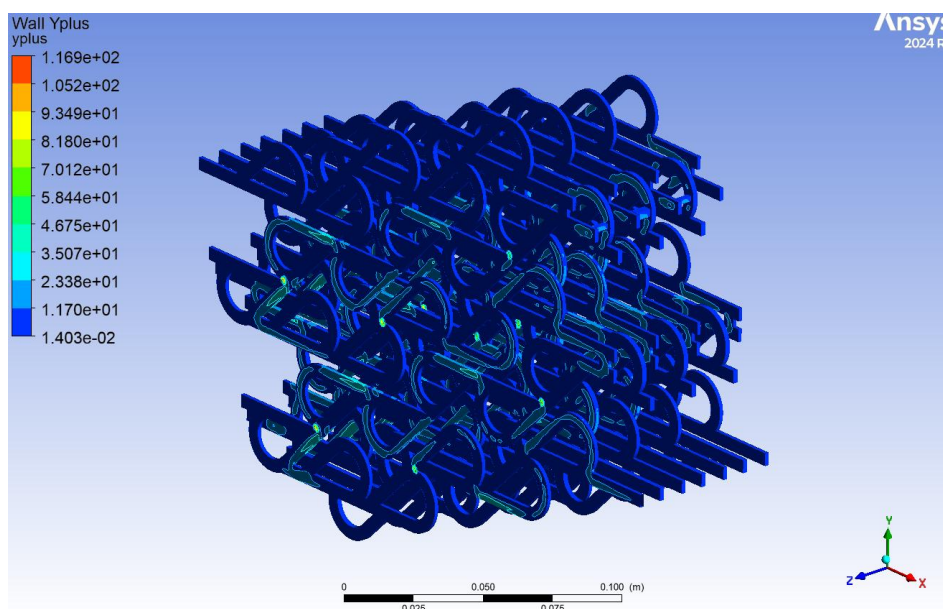


Fonte: Autoria própria (2024).

Os vetores de velocidade ao longo de um arco mostram o movimento do fluido dentro da geometria, destacando a interação com as paredes e as variações de velocidade, essenciais para avaliar a perda de carga na válvula.

Por fim, foi plotado um campo de y^+ com o objetivo de obter uma referência essencial para a análise do nível de refinamento próximo à parede. A seguir, pode se visualizar na Figura 23.

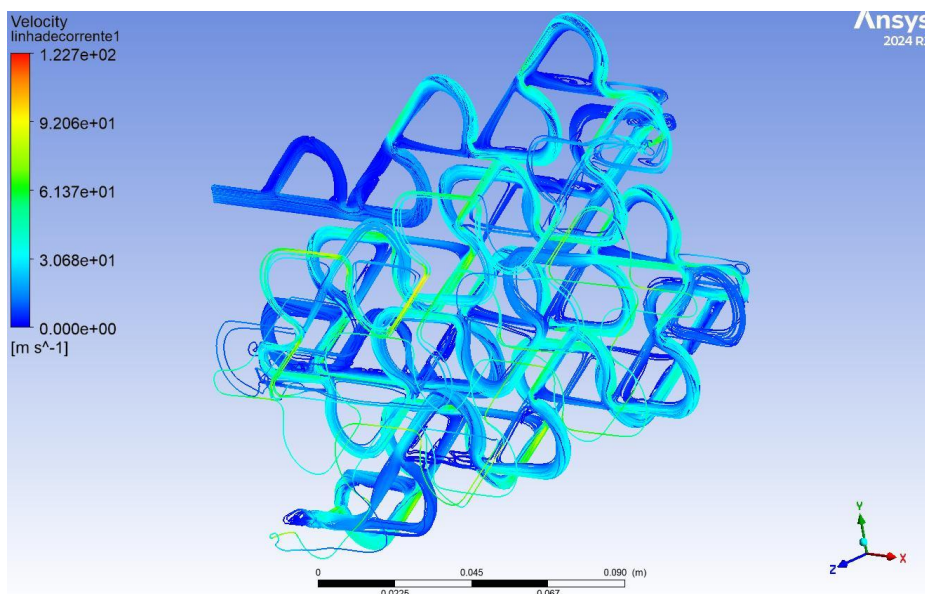
Figura 23 – Campo de turbulência y^+ .



Fonte: Autoria própria (2024).

Baseado na escala de cores apresentadas, a malha mostra-se adequada na maior parte da geometria. Observa-se um leve aumento nos valores de y^+ em algumas regiões, destacadas em verde-claro, mas, de forma geral, a subcamada viscosa, valores de y^+ menores do que 1, está sendo bem capturada. Por fim, as linhas de correntes de parte da malha, apresentada na Figura 24, onde representa uma corrente, de certa forma, estável.

Figura 24 – Linha de corrente.



Fonte: Autoria própria (2024).

6.3 Resultados encontrados no teste de pressões intermediárias

Nesta etapa, foram realizados testes de vazões mássicas intermediárias com o objetivo de avaliar o comportamento do escoamento frente a diferentes pressões de entrada, conforme definido na metodologia descrita no tópico 5.3. Para tanto, empregou-se a malha intermediária discutida no tópico 6.2, considerando-se o escoamento como incompressível. Todas as demais condições de contorno foram mantidas constantes, variando-se unicamente as pressões na superfície de entrada.

A alteração das pressões de entrada permitiu observar como o escoamento responde em relação às diferentes configurações de pressão, fornecendo dados relevantes para a análise da estabilidade do regime incompressível. Esses testes foram realizados de maneira sistemática para garantir a reprodutibilidade dos resultados, e os valores obtidos para cada condição de pressão de entrada são apresentados na Tabela 2. Essa tabela fornece uma visão comparativa dos resultados, possibilitando uma análise mais detalhada sobre a influência da pressão de entrada nas vazões mássicas intermediárias e contribuindo para a compreensão do comportamento do escoamento dentro da geometria analisada.

Tabela 2 – Resultado das simulações com pressões intermediárias.

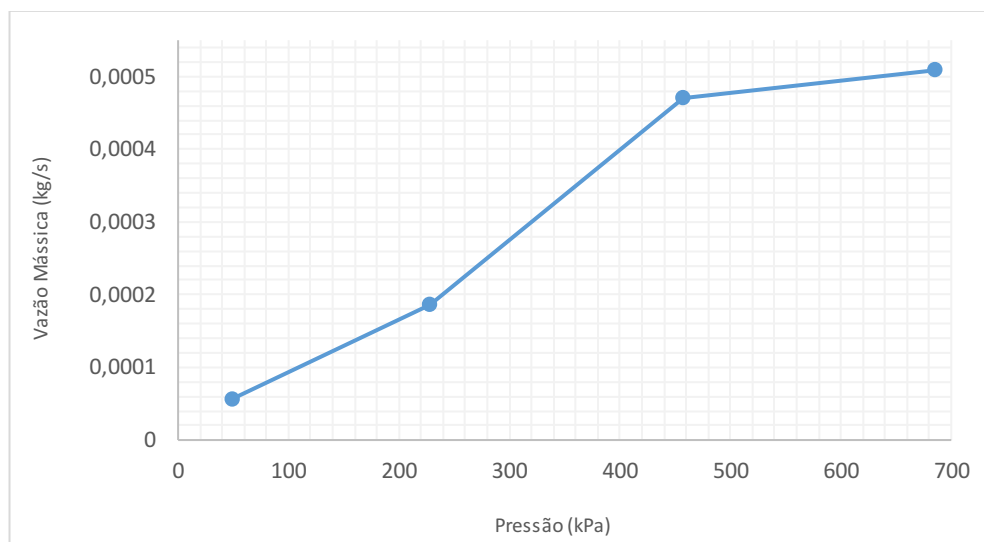
Pressão (kPa)	Vazão Mássica (kg/s)	Vazão Mássica (kg/h)
686,0	$5,088 \cdot 10^{-4}$	1,83
457,3	$4,704 \cdot 10^{-4}$	1,69
228,6	$1,860 \cdot 10^{-4}$	0,67
49,0	$5,655 \cdot 10^{-5}$	0,20

Fonte: Autoria própria (2024).

Como análise dessas variações de pressão, observa-se que, na prática, conforme o botijão de GLP é utilizado, a quantidade de gás em seu interior diminui, o que reduz gradativamente a pressão interna. Em um sistema desprovido de componentes para controle da vazão, essa diminuição resulta em uma redução proporcional da vazão mássica, que pode se aproximar de zero à medida que o botijão se esvazia, alcançando a pressão de 49 kPa, conforme estabelecido pela norma, se tornando mais um ponto crítico dentro da utilidade proposta inicialmente no estudo, denotando o objeto cada vez menos usual e, principalmente, e provavelmente, impossível de se fabricar. Outro ponto pertinente é que, com a necessidade de se ter um componente de controle de vazão, acaba perdendo a principal proposta deste estudo de ser um regulador de pressão de gás sem componentes mecânicos.

Além disso, percebe-se que a queda da vazão mássica acompanha, de forma aproximadamente linear, a redução da pressão interna. A Figura 25 apresenta um gráfico de Pressão na entrada X Vazão mássica, que auxilia no entendimento visual e na análise do comportamento mencionado.

Figura 25 – Gráfico Pressão na entrada X Vazão Mássica.



Fonte: Autoria própria (2024).

6.4 Resultados encontrados no teste do escoamento compressível

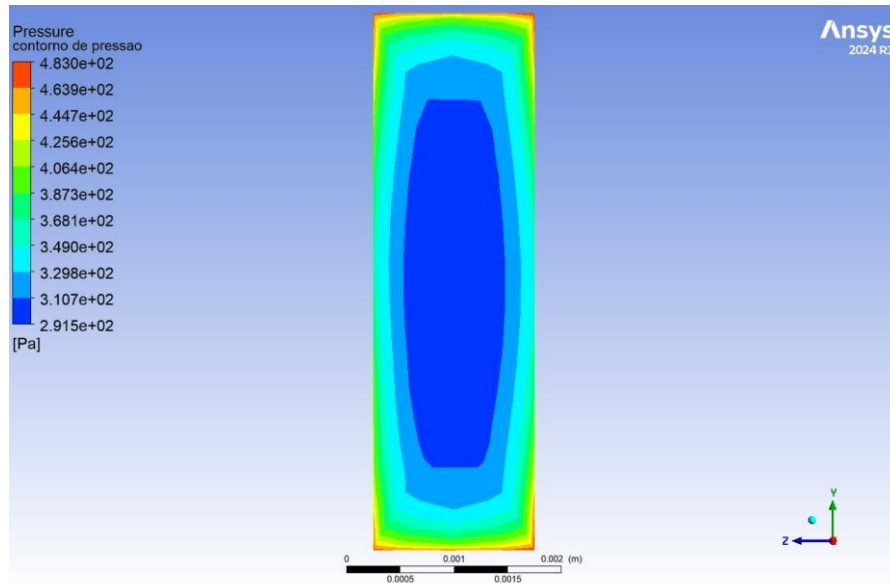
Conforme descrito no tópico 5.4, seria necessário realizar uma análise do escoamento para verificar se ele se caracteriza como compressível ou incompressível. Utilizando a Equação 6 para calcular a densidade específica na entrada e na saída da geometria, foram considerados os seguintes dados: pressão de entrada de 686 kPa, pressão de saída de 2,8 kPa, e temperaturas de entrada e saída de 293 K.

Como o gás GLP é composto majoritariamente por propano e butano, com traços de outros hidrocarbonetos, e não foi possível encontrar a constante específica do GLP, foi adotado o valor aproximado do propano. Segundo (Cengel e Boles, 2019), a constante dos gases (R) para o propano é 0,1885 kJ/kg.K, valor suficiente para esta análise. Essa abordagem permite uma estimativa razoável para os cálculos, considerando a dificuldade de obter dados específicos para o GLP. Substituindo os valores mencionados na Equação 6, foi possível calcular a densidade na entrada da geometria como 12,42 kg/m³ e na saída como 0,05 kg/m³. Assim, indica-se que a abordagem mais adequada seria configurar o modelo com base em um escoamento compressível.

Com o intuito de ajustar o modelo a essa nova análise, aplicou-se a configuração descrita na metodologia (tópico 5.4), modificando as propriedades do fluido para as do gás GLP. Dessa forma, obteve-se uma condição de pressão estática máxima de entrada de 483 Pa, representada graficamente na Figura 26. Cabe

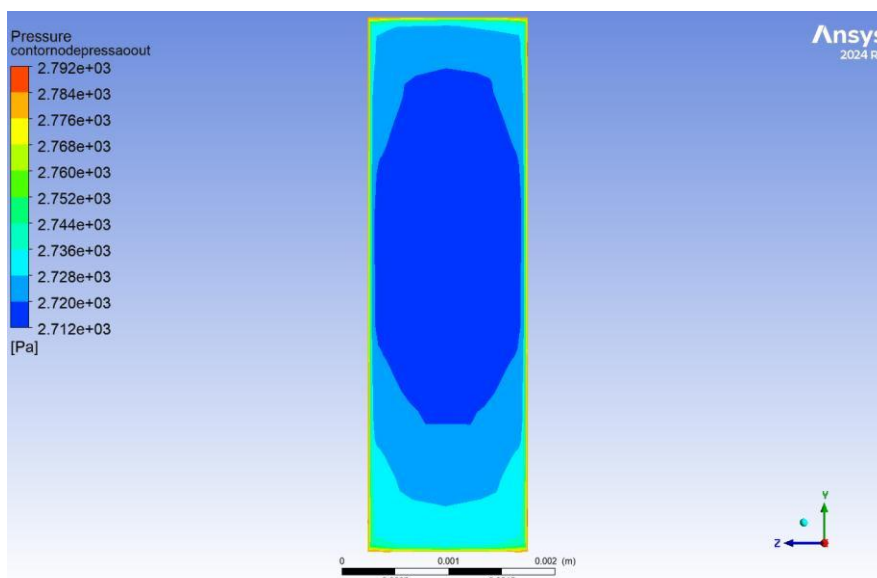
destacar que a configuração, dentro do software, do escoamento compressível, não pôde ser aprofundada devido à limitação de tempo.

Figura 26 – Pressão de entrada para escoamento compressível.



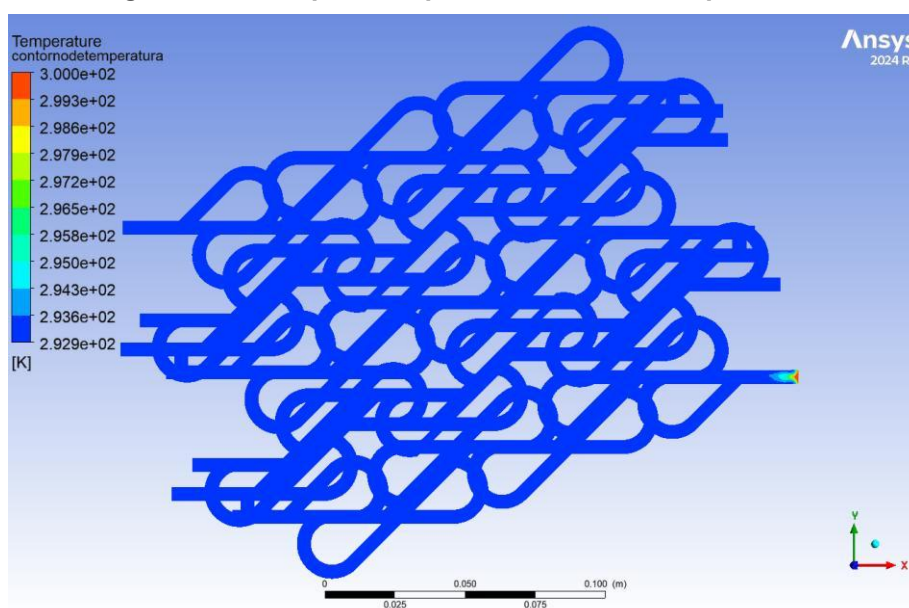
Fonte: Autoria própria (2024).

Observa-se que a pressão de entrada do escoamento compressível foi aproximadamente 1400 vezes menor que a pressão estática de entrada do escoamento incompressível, considerando as mesmas condições de vazão mássica encontradas com a malha intermediária, conforme descrito no tópico 6.2. Tornando-se incoerente com as condições normativas e mostra-se outra instabilidade dentro do objeto de estudo. O que revigora tal análise, é que, ao observar a pressão de saída imposta no Quadro 2, ela se mantém estável e sem oscilações significativas dentro dos parâmetros estabelecidos, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Pressão de saída para escoamento compressível.

Fonte: Autoria própria (2024).

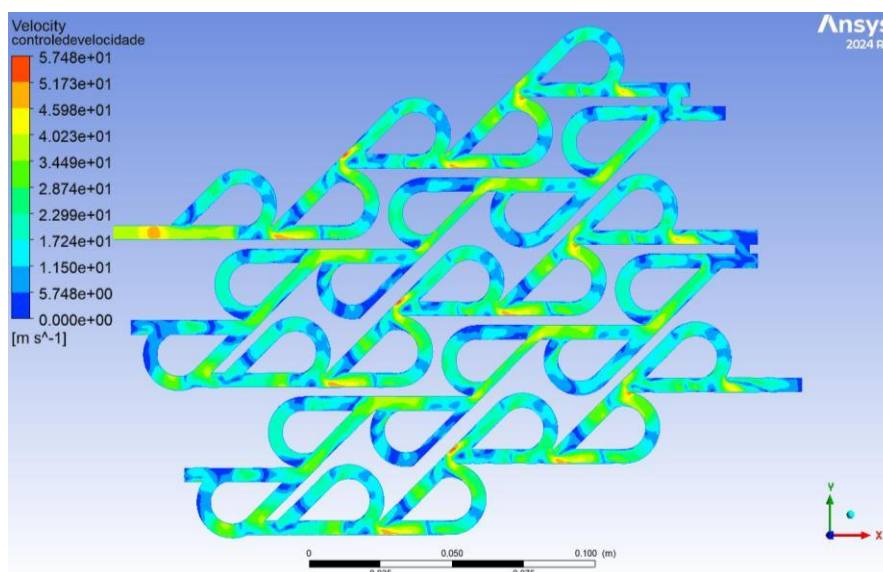
Outro aspecto relevante é a variação de temperatura, uma vez que, diferentemente do escoamento incompressível, no escoamento compressível a temperatura pode sofrer alterações ao longo do fluxo. Como ilustrado na Figura 28, a temperatura no escoamento compressível não apresentou variação significativa, mantendo-se próxima à temperatura ambiente. Esse comportamento se encontra dentro da norma, conforme citado na metodologia.

Figura 28 – Temperatura para escoamento compressível.

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 29, é possível visualizar o contorno de velocidade do escoamento compressível mostra variações graduais e abruptas no campo de velocidade, com máximos em torno de 57,5 m/s e mínimos próximos de 0 m/s. Observa-se aceleração nas trajetórias retas e desaceleração nas curvas, com gradientes indicativos de perturbações no fluxo, possivelmente associadas à compressibilidade do fluido, diferentemente do escoamento incompressível que teve uma condição de fluido mais uniforme.

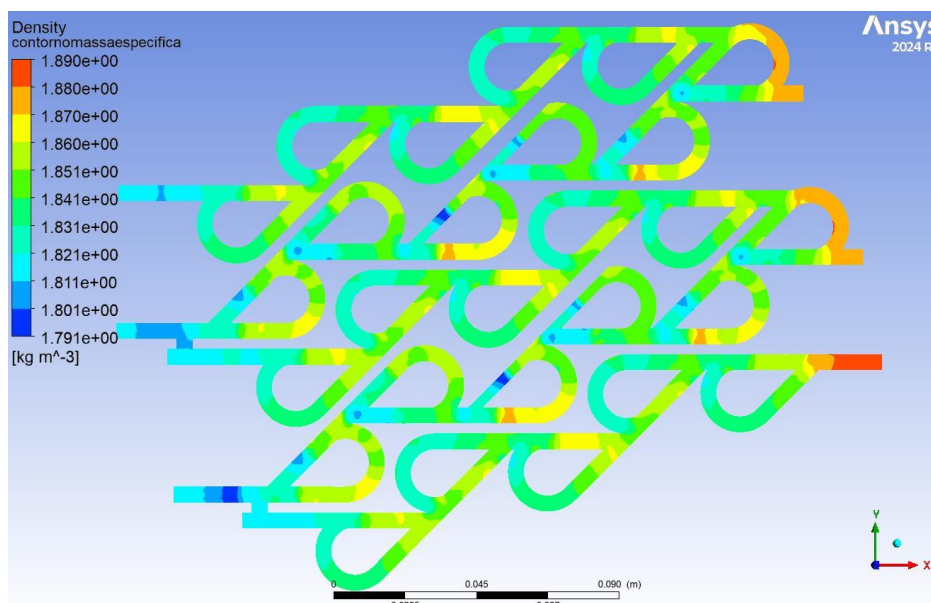
Figura 29 – Contorno de velocidade para escoamento compressível.



Fonte: Autoria própria (2024).

A análise da configuração computacional proposta sugere que os resultados obtidos não são representativos da realidade, indicando inconsistências no comportamento do escoamento compressível simulado, em relação à sua faixa de velocidade. Assim, é necessário revisar e reformular a configuração, adotando condições de contorno e parâmetros mais alinhados à dinâmica real do fluido compressível. A Figura 30 retrata mais esse cenário onde há pouca variação da massa específica durante a geometria, mas tendo em vista que a pressão estática de entrada foi muito inferior a pressão requisitada.

Figura 30 – Contorno da massa específica para escoamento compressível.



Fonte: Autoria própria (2024).

6.5 Resultados encontrados na prototipagem

Conforme descrito na etapa metodológica, a geometria resultante das análises realizadas seria prototipada. A geometria selecionada para prototipação foi a obtida com base no escoamento incompressível, apresentada na Figura 17 e denominada "Geometria Final". O processo de prototipação e impressão 3D foi terceirizado e realizado por uma empresa especializada nesse serviço. A Figura 31 ilustra uma das etapas do processo de impressão.

Figura 31 – Metade da impressão.

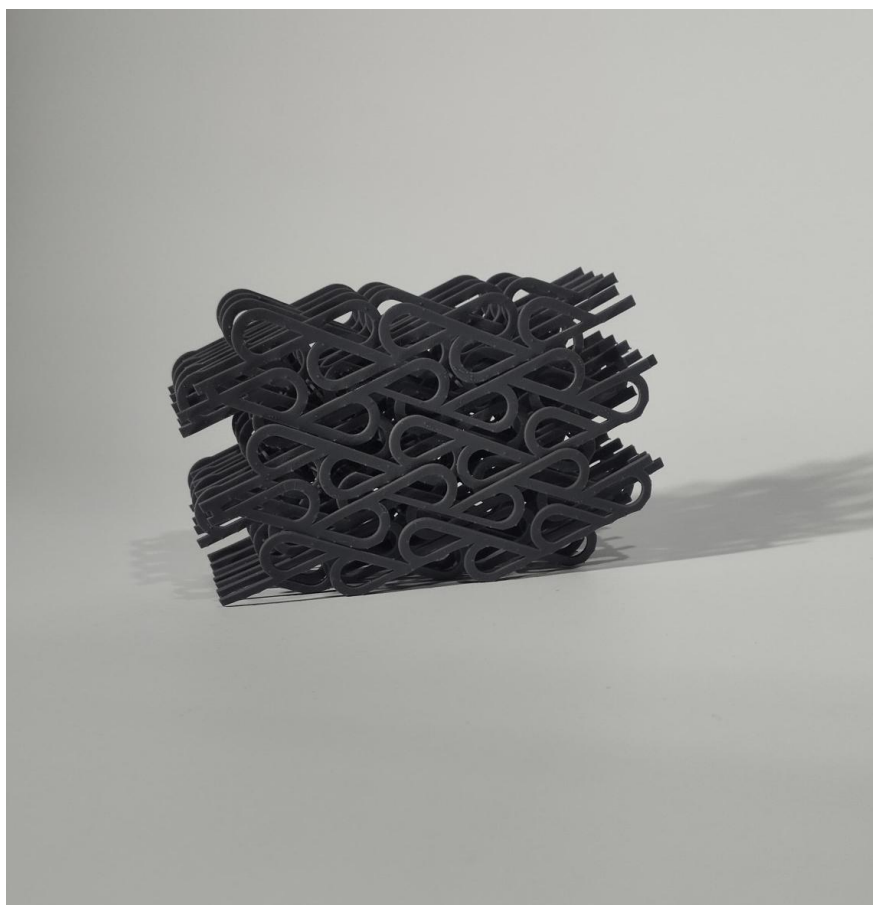


Fonte: Autoria própria (2024).

A impressão foi realizada em escala 1:2 devido ao fato de o tamanho real da geometria ultrapassar ligeiramente as dimensões da mesa da impressora, além de fazerem algumas adaptações, como suporte para a facilidade da impressão. No entanto, como o objetivo era apenas a demonstração da geometria, essa adaptação foi considerada satisfatória e sem prejuízo para a análise e foi concluída em aproximadamente 8 horas, utilizando 52 ml de material de resina. Como mostrado na Figura 32, a "Geometria Final" impressa apresentou excelente qualidade e acabamento. No entanto, ressalta-se que o protótipo se destina apenas à visualização da válvula e não suporta testes laboratoriais. Para realizar testes primários com ar comprimido, seria necessária uma impressão em material mais resistente.

Adicionalmente, para uma eventual comercialização, a geometria ainda requer ajustes no layout, como a criação de uma estrutura externa – similar a uma parede –, para que a válvula permaneça internamente e, assim, aumente a robustez do equipamento.

Figura 32 – Geometria final impressa.



Fonte: Autoria própria (2024).

7 CONCLUSÃO

Este estudo alcançou uma vazão mássica de 1,8 kg/h, valor aceitável para reguladores residenciais segundo a norma, que permite vazões entre 1 a 4 kg/h, no modelo de configuração de escoamento incompressível. Embora a meta de 1 kg/h não tenha sido atingida, a vazão obtida se aproxima do uso residencial e reflete as condições mais comuns de mercado, em que reguladores de 2 kg/h possuem ampla utilização. Com uma modelagem mais desenvolvida, é possível que a configuração ideal de 1 kg/h seja alcançada, evitando o excesso de consumo e perdas associados aos modelos de maior capacidade.

A análise do escoamento mostrou que as variações na massa específica, como demonstrado na Figura 30, sugerem a necessidade de um estudo que tenha maior representatividade dos fenômenos físicos reais. As limitações de tempo impediram o desenvolvimento de uma configuração, dentro do software, ideal para o escoamento compressível. Ou seja, embora tenha sido testada uma possível configuração computacional para a representar o escoamento compressível, os resultados se mostraram insatisfatórios se tornando necessário repensar outra formulação para simular tal escoamento dentro do ANSYS® Fluent®. Para possíveis trabalhos futuros, recomenda-se o estudo para uma melhor configuração de um modelo compressível computacional, incluindo adaptações geométricas que atendam às exigências normativas, chegando em uma vazão ideal de 1 kg/h, pressão de entrada de 686 kPa e 2,8 kPa de saída.

Quanto à proposta do estudo, que visa utilizar a geometria da válvula Tesla no desenvolvimento de um regulador de pressão de gás para uso residencial, conforme a norma NBR 8473, identificaram-se limitações. Essas limitações incluem a necessidade de implementar um mecanismo de controle de vazão para compensar a variação de pressão — conforme apresentado no tópico 6.3 — e garantir uma vazão constante à medida que o botijão de GLP é esvaziado, o que foge da proposta inicial de desenvolver tal componente sem elementos mecânicos. Esses elementos prejudicam a montagem tornando-o possivelmente mais caro. Além disso, sua geometria final, encontrada no tópico 6.1, mostrou-se extremamente complexa, tendo uma distribuição ao longo dos três eixos e uma espessura muito fina, o que torna o produto praticamente improdutivo. Por exemplo, em uma espessura tão pequena,

uma simples rebarba, em sua fabricação, seria um impeditivo para a passagem do fluido.

A perda de carga obtida no protótipo pode facilmente levar a uma interpretação errônea de ser uma aplicação potencialmente útil para além do controle da pressão de um sistema de gás. No entanto, dispositivos mais simples e amplamente utilizados, como tubos capilares, oferecem a mesma funcionalidade de maneira mais eficiente, com geometria simplificada e menor custo.

Em resumo, o estudo apresentou resultados inconclusivos em sua proposta de utilizar a geometria da válvula Tesla como um regulador de pressão de gás por ter uma geometria complexa e limitações evidentes em comparação com componentes já existentes, além de não atender plenamente às condições de mercado e aplicabilidade comercial.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. D. **Modern Compressible Flow**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

BUSINESS RESEARCH INSIGHTS. **Visão geral do relatório de mercado de sistemas reguladores de pressão de gás**. Dez. 2023. Disponível em: <https://www.businessresearchinsights.com/pt/market-reports/gas-pressure-regulator-market-110121>. Acesso em: 8 mar. 2024.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica: abordagem prática**. 9. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2019.

CHAO, L. et al. **Intelligent gas pressure regulator control system**. *In: 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2017, Chongqing, China. Proceedings [...]. [S. l.: s. n.], 2017. p. 2723-2728. DOI: 10.1109/CCDC.2017.7978975.*

COAKLEY, T.; HUANG, P. **Turbulence modeling for high speed flows**. *In: 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992a.*

CONMETRO – Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Reguladores de pressão para gases liquefeitos de petróleo de uso doméstico: especificação** – NBR 8473. Brasília, 30 out. 1984.

COSTA, D. **Cientistas “encontraram” a válvula de Nikola Tesla nos intestinos de tubarões**. Disponível em: <https://zap.aeiou.pt/valvula-nikola-tesla-intestinos-tubaroes-420552>. Acesso em: 04 abr. 2024.

DAVIDSON, L. **An Introduction to Turbulence Models**. Goteborg: [s. n.], jan. 2003. Disponível em: https://www.tfd.chalmers.se/~lada/postscript_files/turb.pdf. Acesso em: 23 fev. 2024.

DENG, Y. et al. **Optimization of no-moving part fluidic resistance microvalves with low Reynolds number**. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS (MEMS), 2010, Hong Kong, China. Proceedings [...]. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/224129251. Acesso em: 20 fev. 2024.*

DU, G. et al. **Improving thermal and hydraulic performances through artificial neural networks: an optimization approach for Tesla valve geometrical parameters**. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 52, p. 103670–103670, 1 dez. 2023. DOI: 10.1016/j.csite.2023.103670.

DVOŘÁK, L.; FOJTÁŠEK, K. **Pressure regulators as valves for saving compressed air and their influence on system dynamics**. *EPJ Web of Conferences*, v. 92, p. 02015, 2015.

FORMAGÁS. **Reguladores para gás**. 12 jan. 2021. Disponível em: <https://www.formagas.com.br/dicasreceitas/post/2>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FREI, W. **Which turbulence model should I choose for my CFD application?** [S. l.], 6 jul. 2017. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

GAMBOA, A. R. et al. **Improvements in fixed-valve micropump performance through shape optimization of valves**. *Journal of Fluids Engineering*, [s. l.], mar. 2005. Disponível em: <https://faculty.washington.edu/forster/forsterpubs/gamboa05a.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

KATO, T. et al. **A new, high precision, quick response pressure regulator for active control of pneumatic vibration isolation tables**. *Precision Engineering*, v. 34, p. 43–48, 2010.

OLIVEIRA, R. P. **Escoamento compressível generalizado de Fanno em bocais**. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/artigos/art_tcc_049_2011.pdf. Acesso em: 23 jan. 2025.

PATIL, M.; BARJIBHE, R. **Flow analysis of gas pressure regulator by numerical and experimental method**. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Flow-Analysis-of-Gas-Pressure-Regulator-by-%26-Method-Patil-Barjibhe/e6a18fe7a46a541a66181a50ca0803240528740f>. Acesso em: 25 jan. 2024.

RODRIGUES, M. F.; NASCIMENTO, E. C.; SANTOS JUNIOR, R. A.; TELES, H. C. C.; CINTRA, B. B. **Relação do preço do gás de cozinha e queimaduras por líquido inflamável**. *Revista Brasileira de Queimaduras*, v. 18, n. 3, p. 162-166, 2019.

TESLA, Nikola. **Valvular conduit**. Depositante: United States Patent Office. US nº1.329.599. Depósito: 21 fev. 1916. Concessão: 3 fev. 1920.

THOMPSON, S. M. et al. **Numerical investigation of multistaged Tesla valves**. *In: ASME 2013 FLUIDS ENGINEERING DIVISION SUMMER MEETING, Incline Village, 2013*. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/FEDSM/proceedings-abstract/FEDSM2013/55546/V01AT03A012/231598>. Acesso em: 20 fev. 2024.

VAFERI, K. et al. **Modeling and optimization of hydraulic and thermal performance of a Tesla valve using a numerical method and artificial neural network**. *Entropy*, v. 25, n. 7, p. 967, 1 jul. 2023. DOI: 10.3390/e25070967.

WAXMAN, M. et al. **Automated pressure regulator**. *The Review of Scientific Instruments*, v. 55, n. 9, p. 1467–1470, 1984.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2011.

ZHANG, Y. L.; TONG, J. B.; ZHU, Z. C. **Numerical calculation of forward and reverse flow in Tesla valves with different longitudinal width-to-narrow ratios.** Scientific Reports, v. 13, p. 12496, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39758-3>. Acesso em: 18 set. 2024.