

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
CAMPUS CENTRO MANAUS - CMC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DPI**

IVAIR DE SOUZA

**VÁLVULA DE TESLA E SUA EFICÁCIA NO ESCOAMENTO DE FLUÍDOS
NEWTONIANOS: UMA SIMULAÇÃO**

**MANAUS - AM
2021**

IVAIR DE SOUZA

**VÁLVULA DE TESLA E SUA EFICÁCIA NO ESCOAMENTO DE FLUÍDOS
NEWTONIANOS: UMA SIMULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao IFAM – Campus Centro Manaus, ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Cláudio Marcelo dos Santos Ferreira.

MANAUS

2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS

ATA Nº 171 / 2021 - DPI/CMC (11.01.03.01.16.12)

Nº do Protocolo: 23443.016327/2021-22

Manaus-AM, 23 de Setembro de 2021

ATA DE DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia vinte e um do mês de setembro de dois mil e vinte e um, às 19:00 horas na Sala Virtual da Plataforma GOOGLE MEET, [link meet.google.com/pgadzgv-teu](https://meet.google.com/pgadzgv-teu), o acadêmico **IVAIR DE SOUZA**, apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para avaliação da Banca Examinadora presidida pelo Prof. MSc. Cláudio Marcelo dos Santos Ferreira (orientador - IFAM), composta pelos demais examinadores: Prof. MSc. Cristóvão Américo Ferreira de Castro (Membro 1 - IFAM) e Prof. MSc. João Nery Filho (Membro 2 - IFAM). A sessão pública de defesa foi aberta pelo Presidente da Banca Examinadora, que fez a apresentação da mesma e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC que tem como título: **VÁLVULA DE TESLA E SUA EFICÁCIA NO ESCOAMENTO DE FLUÍDOS NEWTONIANOS: UMA SIMULAÇÃO**. Na sequência, o acadêmico teve até 30 minutos para a comunicação oral de seu trabalho, e em seguida, cada integrante da Banca Examinadores fez suas arguições. Ouvidas as explicações do acadêmico, os membros da Banca Examinadora, reunidos em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberaram por **APROVAR** e atribuir à nota **8,3** ao trabalho. Foi divulgado o resultado formalmente ao acadêmico e demais presentes, dando ciência ao mesmo que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o prazo máximo de 15 dias, com as devidas alterações sugeridas pela banca.

Nada mais a tratar, a sessão foi encerrada às **(19h 55min)**, sendo lavrado a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo acadêmico.

Prof. Orientador / Presidente: Prof. MSc. Cláudio Marcelo dos Santos Ferreira

Prof. Membro 1: Prof. MSc. Cristóvão Américo Ferreira de Castro

Prof. Membro 2: Prof. MSc. João Nery Filho

Acadêmico: IVAIR DE SOUZA

(Assinado digitalmente em 24/09/2021 08:12)

CLAUDIO MARCELO DOS SANTOS FERREIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 1061830

(Assinado digitalmente em 24/09/2021 13:15)

CRISTOVAO AMERICO FERREIRA DE CASTRO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 1037557

(Assinado digitalmente em 24/09/2021 13:00)

JOAO NERY RODRIGUES FILHO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
Matrícula: 267939

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.ifam.edu.br/documentos/> informando seu número: **171**,

ano: **2021**, tipo: **ATA**, data de emissão: **23/09/2021** e o código de verificação: **580c851fc3**

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

S729v Souza, Ivair de.
Válvula de tesla e sua eficácia no escoamento de fluídos newtonianos:
uma simulação / Ivair de Souza. – Manaus, 2021.
46 p. : il. color.

Monografia (Engenharia Mecânica). – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus Manaus Centro*, 2021.
Orientador: Prof. Me. Cláudio Marcelo dos Santos Ferreira.

1. Engenharia mecânica. 2. Válvula de tesla 3. Elementos finitos. 4.
Simulação. I. Ferreira, Cláudio Marcelo dos Santos. (Orient.) II. Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 621

À MINHA ESPOSA, AOS MEUS FILHOS E AOS MEUS PAIS.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida que Ele me concedeu.

Agradeço à minha esposa, Maria Auxiliadora de Melo Souza, a mulher mais inteligente que conheço e que tenho profunda admiração e respeito, por me fazer entender que sem sacrifícios não há vitórias na vida. Também, por estar sempre presente nos momentos mais difíceis de minha vida, na qual sempre teve palavras de incentivo que perduram por todos esses anos de convívio.

Aos meus filhos, Jovair Pazzini de Melo Souza, Marina Janaína de Melo Souza e Josué Antovani de Melo Souza, que sempre me motivaram com palavras de apoio e amor para que pudesse prosseguir nos estudos e poder alcançar a engenharia.

Aos meus pais por todo o esforço investido na minha educação e a meus irmãos que me deram a oportunidade de tê-los como amigos para toda a vida.

Ao meu orientador, Professor MSc. Cláudio Marcelo que apesar da intensa rotina de sua vida acadêmica aceitou me orientar neste trabalho. As suas valiosas indicações fizeram toda a diferença.

Ao professor Ailton pelas longas palavras de incentivo para que se pudesse fazer o melhor num trabalho acadêmico, sempre com muita dedicação e paciência durante a disciplina de TCC. Seus conhecimentos fizeram grande diferença no resultado final deste trabalho.

Aos meus professores João Nery, Josimar, Alberto Monteiro, Benedito, Anglada, Sandra Cad, Constantino, Marcelo Gama, Sarkis, Rodson, Lucielen, Marisol, Sidney, Carlos Alberto, Caldas, Queiroga, Plácido, Cristóvão, João Batista Neto pela grande atenção dispensada que se tornou essencial para que o projeto fosse concluído.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Mecânica, Douglas, Joseh Emmanuel, Renann, Débora, Nazário, Edson Hipólito, Thamires, Heitor, Eduardo Crespo, Ana Livia, Laís, Paulo Henrique, Salomão, George e muitos outros, pelas trocas de ideias e ajuda mútua, pois juntos conseguimos avançar e ultrapassar os obstáculos que nos trouxeram aqui.

Às pedagogas Patrícia e Tainá, que sempre me atenderam muito bem e com uma simples anotação num papel de rascunho fez meu ingresso no IFAM ser possível.

Aos seguranças do IFAM que nos proporcionam segurança e tranquilidade para estudar num ambiente amigável.

Aos funcionários (as) da cantina que tinham sempre um lanche para nos tirar daquele momento de muita fome, pois muitas vezes saímos diretamente do trabalho para o IFAM e isso foi o que nos permitiu estudar melhor.

Aos funcionários da limpeza que sempre nos atenderam muito bem quanto à limpeza do ambiente escolar.

Às pessoas que, por um motivo ou outro, não consegui lembrar no momento da escrita deste trabalho acadêmico, minhas sinceras desculpas e agradecimentos.

Por último, quero agradecer também ao IFAM-CMC pela oportunidade de poder estudar num ambiente bom e amigável, com um corpo docente capacitado e empenhado na melhor formação superior e pela busca incansável para atingir os índices melhores no ENADE.

RESUMO

A válvula Tesla é um mecanismo que dispensa peças móveis para seu funcionamento, portanto possui vantagens em relação às válvulas de retenção convencionais. A pouca literatura disponível foi evidenciada por não ser aplicada com frequência em problemas de escoamento de fluidos. Neste trabalho, procuramos uma abordagem simulativa aliada a escassa bibliografia disponível para este assunto. Para conseguir alguns resultados nos utilizamos dos programas relacionados a Elementos Finitos que utilizam uma malha numérica relacionada ao cálculo da Mecânica dos Fluidos, isso pode ser notado nas considerações finais e na escolha das melhores construções dos modelos estudados. Por final, é percebido que a construção de um modelo, dependendo da aplicação, se torna oportuno visando uma melhor performance da válvula.

Palavras-chave: Válvula de Tesla. Elementos Finitos. Simulação.

ABSTRACT

The Tesla valve is a mechanism that does not require moving parts for its operation, so it has advantages over conventional check valves. The little available literature was evidenced because it is not frequently applied to fluid flow problems. In this work, we seek a simulative approach combined with the scarce bibliography available on this subject. In order to obtain some results in the use of programs related to Finite Element that use a numerical mesh related to the calculation of Fluid Mechanics, this can be noticed in the final considerations and in the choice of the best constructions of the studied models. Finally, it is noticed that the construction of a model, depending on the application, becomes opportune in order to improve the performance of the valve.

Keywords: Tesla Valve. Finite Elements. Simulation.

SUMÁRIO

RESUMO	6
1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 VÁLVULAS	17
2.2 BREVE HISTÓRICO	21
2.3 ALGUNS CONCEITOS	21
2.3.1 Válvula de Tesla	22
2.4 DIMENSÕES DA VÁLVULA	24
2.5 FUNCIONAMENTO E OPERAÇÃO	27
2.6 ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO DA VÁLVULA DE TESLA	28
2.7 APLICAÇÕES	30
2.7.1 Microfluídica	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	34
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Válvula de Fechamento, tipo suave	15
Figura 2 - Válvula Direcional	16
Figura 3 - Válvula de Pressão	16
Figura 4 - Vista seccionada de uma Válvula de Bloqueio	17
Figura 5 - Válvula reguladora de fluxo/vazão	17
Figura 6 - Válvula de retenção simples	18
Figura 7 - Válvula desmontada	19
Figura 8 - Válvula de retenção operada por piloto	19
Figura 9 - Válvula de retenção operada por piloto no circuito - funcionamento	20
Figura 10 - Válvula de retenção geminada operada por piloto	20
Figura 11 - Intestinos do tubarão visto por tomografia computadorizada.....	23
Figura 12: Desenho original da Válvula de Tesla (patente)	24
Figura 13 - Expressão matemática da Diodicidade	24
Figura 14 - Número de Reynolds	26
Figura 15 - Diâmetro Hidráulico	26
Figura 16 - Os dois regimes de escoamento definidos pelo número de Reynolds. Em cima o fluxo laminar para $Re < 2000$ e em baixo o fluxo turbulento para $Re > 2000$	27
Figura 17 - Exemplos de geometrias das válvulas e suas direções de fluxos em seu interior.....	27
Figura 18 - Válvula de Tesla fabricada em material plástico.....	28
Figura 19 - Parâmetros de construção da Válvula de Tesla	29
Figura 20 - Relação para construção da Válvula de Tesla	29
Figura 21 - Vista em 2D do modelo da Válvula de Tesla.....	29
Figura 22 - Vista em 3D do modelo da Válvula de Tesla.....	30
Figura 23 - Vista seccionada do modelo 3D da Válvula de Tesla.....	30
Figura 24 - Micro bomba mista da Válvula de Tesla controlada por chip.....	31
Figura 25 - Micro canais transportando fluido.....	32
Figura 26 - Malha de tetraedros no COMSOL	34
Figura 27 - Válvula de Tesla tipo 1 e 2 respectivamente	34
Figura 28–Válvula de Tesla tipo 3 e 4 respectivamente	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Amostra de uma Diodicidade.....	25
Gráfico 2 - Várias válvulas em série, onde N representa o número de válvulas	25
Gráfico 3 - a) Diferença de pressão; b) Resistência hidrodinâmica $R = \Delta p/Q$ versus Q para as direções direta e inversa; c) Água pura e soluções de água-glicerol; d) Fatores de atrito $f_D = (\Delta p / L) / (\rho U^2 / 2D)$; e e) Diodicidade D_i ou razão das resistências inversa.....	35
Gráfico 4 - Velocidade simulados no COMSOL.....	36
Gráfico 5 - Pressão simulada no software COMSOL.....	37
Gráfico 6 - Gráficos resultantes das simulações feitas a 2D para vários números de válvulas em série com o objetivo de obter maior diodicidade para os desenhos VT1 em (a), VT2 em (b), VT3 em (c) e VT4 em (d).....	38
Gráfico 7 - Diodicidade em relação ao número de Reynolds ≈ 1000	39

LISTA DE SIGLAS

EF – Elementos Finitos

VT – Válvula de Tesla

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

Re – Número de Reynolds

1 INTRODUÇÃO

Os fluídos têm uma importância muito grande na sociedade contemporânea. Sem um correto entendimento de suas características e de como manipulá-los, seria impossível usufruir de seus benefícios. Assim, entender como interagem com o meio, utilizando suas características, pode ser a chave para o sucesso em sua manipulação com segurança. Os benefícios desse entendimento nos remetem àqueles que os estudaram exaustivamente, tais como: Isaac Newton (1643-1722), Daniel Bernoulli (1700-1782), Arquimedes de Siracusa (287 a.C – 212 a.C), Osborne Reynolds (1842-1912) etc.

De acordo com os autores, os fluidos em movimento estão presentes nos mais diversos lugares, desde a natureza até nos processos da indústria que no final, permeiam nossas casas. Suas características são complexas, mais precisamente em seu escoamento (um dos objetos dessa pesquisa), pois sua natureza, quando submetido à uma tensão cisalhante, sofre (m) deformação (ões). Nesse contexto, cabe ressaltar que há uma diferença muito grande entre os fluidos e os sólidos. Assim, Fox e McDonald (2014), entendem que fluidos tendem a escoar quando interagido e sólidos tendem a se deformar ou dobrar nessa mesma ação.

Perceber que fluídos necessitam de um meio seguro para desempenhar seu papel no uso de suas propriedades para transferir energia de um ponto a outro, pareceu uma ideia a ser pesquisada. Dessa forma, o presente trabalho procura elucidar alguns pontos e entender como as válvulas são elementos importantes para o manuseio de fluídos, assim, é perceber que a evolução desses artefatos contribui positivamente para o progresso do ser humano. Assim, os fluidos são classificados como fluidos newtonianos e fluídos não-newtonianos, dependendo de como reagem a uma tensão aplicada. No presente estudo, será tratado apenas os fluidos newtonianos.

Avaliando a literatura disponível, um tema que pudesse trazer discussão positiva a respeito de um invento e de como este pode ser útil nos dias de hoje, apesar de seu uso comercial ocorrer desde 1920, de forma discreta, ou seja, há aproximadamente 100 (cem) anos. Então, a proposta é discutir sobre **A Válvula de Tesla e de sua eficácia no transporte de fluidos newtonianos.**

Esse artefato serve para controlar a passagem de um fluido, que pode ser um gás ou um líquido, funcionando como uma turbina de resistência à passagem

num dado sentido ou facilitando sua passagem noutra, tendo sua arquitetura a simplicidade como carro chefe e uma dinâmica em seu funcionamento. Assim, faz com que um fluido consiga fluir sem qualquer impedimento num sentido, mas dificultado imensamente a sua passagem em sentido oposto. E para isso, recorre a um percurso bastante original, pois se utiliza do sentido contrário ao escoamento para impedir o próprio deslocamento do fluido no interior da válvula.

O tema foi delimitado baseado em uma visão industrial aliada à economia de recursos em respeito ao meio ambiente, pois esse conceito vem crescendo dia a dia e reflete importância para a humanidade no trato com o planeta. Essa evolução de pensamento adequa-se perfeitamente a um grau de usabilidade dos recursos ambientais que são limitados. Dessa maneira, encontrar soluções que exijam um número de processos de fabricação mais enxutos, reduzindo a pressão por materiais e processos, e de menores intervenções de manutenção, devido a inexistência de partes móveis, parece uma ideia a ser estudada.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pretende verificar, por meio de simulação numérica, a eficácia da Válvula de Tesla no escoamento de fluidos newtonianos, pois o inventor do mecanismo garantiu uma eficácia na diminuição da velocidade do fluido em 200 (duzentas) vezes, tendo como referência o estudo nessa área e suas fontes de pesquisa disponíveis em livros e artigos acadêmicos relacionados ao tema.

Nesse contexto, apresenta-se a seguinte pergunta problema: **“Qual a eficácia da Válvula de Tesla no escoamento de fluidos newtonianos?”** Hipoteticamente a Válvula de Tesla deve diminuir o volume de entrada numa razão de 200 (duzentas) vezes a saída. Para isso, serão feitas simulações com software adequado e que possua características nessa aplicação utilizando-se de elementos finitos para obtenção dessas respostas. Para isso, utilizaremos os autores Alves 2017; Truong e Nguyen (2003); e Lei e Li (2003); para confirmar ou afastar nossa hipótese.

O objetivo geral desse trabalho é simular via software o funcionamento da Válvula de Tesla para fluidos newtonianos. Para isso, serão testados vários modelos desse artefato, bem como verificar seu funcionamento/desempenho no programa comercial COMSOL Inc. Dessa maneira, poderemos testar a suposição de Nikola Tesla a respeito da diodicidade do mecanismo.

Para obter resultados satisfatórios listamos os seguintes objetivos específicos:

- a) Criar uma simulação para demonstrar a funcionalidade dos modelos experimentais conforme a geometria da válvula;
- b) Verificar a eficácia da válvula por intermédio dos resultados obtidos na simulação; e
- c) Colaborar com o meio ambiente por intermédio da economia de materiais na confecção da válvula.

O referencial teórico utilizado acompanha as ideias dos autores que tratam da temática Válvula de Tesla, como por exemplo: Alves (2017); Fox e McDonald (2014); Truong e Nguyen (2003); e Souza e Murata (2008).

A metodologia deste trabalho respeita as características da pesquisa sobre referências bibliográficas e simulações que obtiveram algum sucesso. Logo, para que haja um melhor aproveitamento a respeito do conteúdo foram feitas inúmeras leituras de materiais científicos, bem como artigos publicados e livros à disposição que mencionam uma teoria ou outra mencionadas ao longo dos textos.

Os resultados mostram de forma sucinta que há muitas possibilidades e aplicações para essa tecnologia que Tesla pensou. Dessa forma, espera-se que este trabalho possa elucidar algumas perguntas inerente ao tema, de forma que possa contribuir com o pensamento científico na busca por soluções relativamente simples e eficazes.

Por fim, este TCC está formatado em 5 capítulos quais sejam: O Capítulo 1 é a própria Introdução, na qual são apresentadas todas as características da pesquisa e de como ela foi pensada. O Capítulo 2 traz um referencial teórico que parte de um histórico e finaliza no que é importante para a pesquisa. O Capítulo 3 remete aos materiais e métodos utilizados para obter no Capítulo 4 uma apresentação dos resultados, bem como uma discussão sobre esses, culminando com o Capítulo 5 na qual considerações sobre todo o trabalho, lembrando que será utilizada a água como fluido de trabalho, pois sua natureza e características newtonianas refletem bem seu uso.

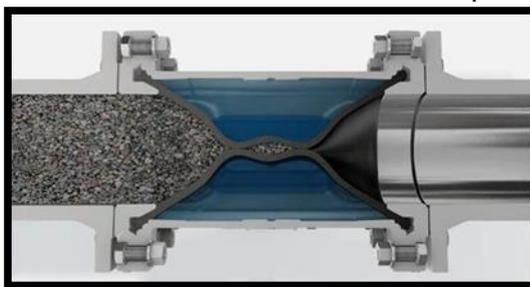
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem por objetivo fazer uma introdução teórica a respeito do tema, bem como trazer à baila os assuntos de relevância para o desenvolvimento e replicação do experimento relacionados a uma base teórica robusta de pesquisa. Dessa maneira, serão enfatizadas as principais características da válvula e em como as simulações apontam para soluções que podem ajudar a indústria na resolução de problemas inerentes à Engenharia no escoamento de fluidos newtonianos. Para isso, Alves (2017), Inovação Tecnológica (2021), Fox e McDonald (2014) e outros autores que tratam de um ou de outro assunto relacionado ao tema.

As válvulas têm inúmeras serventias, sejam para orientar fluxos de ar, sejam para impor bloqueios ou até mesmo controlar a intensidade da vazão ou da pressão. Elas influenciam nos processos de trabalhos, comandando/regulando fluxos nos quesitos pressão ou vazão daquilo que se transporta pelos dutos. São considerados válvulas: os registros, as válvulas de esfera, as válvulas de assento, as válvulas corrediças etc. Suas funções se subdividem em cinco grupos: válvula de fechamento, válvula direcional, válvula de pressão, válvula de bloqueio e válvula de fluxo ou vazão.

- a) **Válvula de fechamento:** esse tipo de válvula evidencia um transporte de fluido com a possibilidade de interromper o trajeto quando necessário. São projetadas para suportarem bastante pressão e não deixar que o fluido ultrapasse seus limites.

Figura 1 - Válvula de Fechamento, tipo suave



Fonte: Ako (2018)

- b) **Válvula direcional:** esse tipo de válvula influencia no trajeto do fluxo, sua função é orientar a direção em que o fluxo deve seguir para realizar um trabalho proposto ou transportar algum fluido.

Figura 2 - Válvula Direcional



Fonte: SinoxTec (2021)

- c) **Válvula de pressão:** estes dispositivos reduzem a pressão do fluido transportados de modo a reduzir a pressão de entrada. Em geral, essas válvulas são projetadas para suportar altas pressões

Figura 3 - Válvula de Pressão



Fonte: HidrauNet (2021)

- d) **Válvula de bloqueio:** são mecanismos que bloqueiam/interrompem o fluxo. Geralmente são utilizadas fechadas ou completamente abertas para o escoamento.

Figura 4 - Vista seccionada de uma Válvula de Bloqueio



Fonte: Bermo (2021)

- e) **Válvula Reguladora de fluxo ou vazão:** esse tipo de válvula está relacionado à vazão/fluxo. São aplicadas em pontos para um controle melhorado das velocidades dos fluidos, limitando a pressão durante o transporte.

Figura 5 - Válvula reguladora de fluxo/vazão



Fonte: Master Tecnologia Industrial (2021)

2.1 VÁLVULAS

De acordo com Parker (2021), uma válvula de retenção é a combinação de uma válvula direcional com uma válvula de pressão, permitindo que o fluxo siga uma direção unidirecional. Dessa forma, impede que o fluido retorne à válvula de origem. As válvulas de retenção garantem uma proteção ao sistema hidráulico utilizando o bloqueio como forma de controle do fluido na tubulação. Seu funcionamento se baseia na pressão do sistema, pois sendo alta, o suficiente para empurrar a mola, há um deslocamento interno que pressiona sua parte móvel para que obstrua um pouco mais a passagem do fluido.

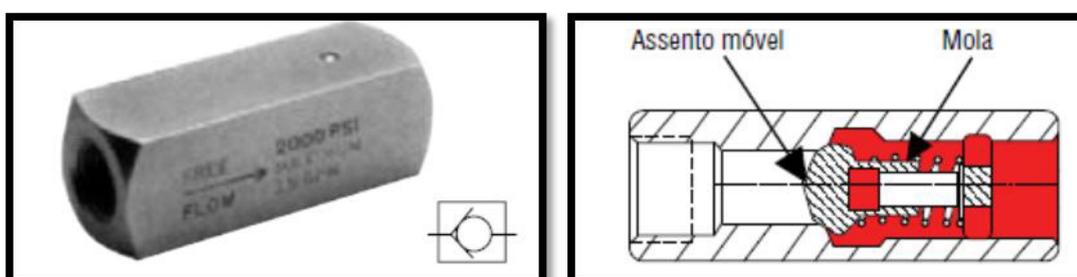
Existem muitos tipos de válvulas. As mais utilizadas são as que possuem partes móveis e que, de tempos em tempos, necessitam de manutenção. Há uma larga escala de uso desses artefatos, seja na indústria, seja no lar ou no trabalho. São equipamentos já incorporados ao nosso cotidiano. Na indústria tem um papel fundamental, pois é nesse ambiente que as paradas para manutenção custam dinheiro, causando certo prejuízo à empresa, pois máquinas paradas e sem produção representam falta de competitividade/prejuízo ou algo bem parecido com isso.

No mercado há diversos tipos de válvulas que utilizam algum mecanismo de bloqueio móvel e mecânico, seja pelo uso de molas, seja pelo uso de barreiras. As mais usuais são: válvula esfera, válvula borboleta, válvula gaveta, válvula de retenção, válvula agulha etc. Os modelos são muitos e podem se combinar de alguma maneira para poder atingir o fim a que se destinam. No mercado há diversos tipos de válvulas de retenção que utilizam algum mecanismo de bloqueio móvel e mecânico, seja pelo uso de molas.

Em seu catálogo de equipamentos, Parker (2021) apresenta vários tipos de válvulas de retenção (um dos objetos do nosso trabalho). São elas:

- a) **Válvulas de retenção simples:** este tipo de válvula consiste num corpo com vias de entrada e saída, juntamente com assento móvel que é preso por uma mola de pressão. Esse assento pode ser disco ou esfera, na maioria das vezes, é uma esfera.

Figura 6 - Válvula de retenção simples



Fonte: Parker (2021)

- b) **Válvulas de retenção no circuito:** este tipo de equipamento hidráulico combina a válvula direcional e a válvula de pressão, permitindo que o fluxo trafegue unidirecionalmente.

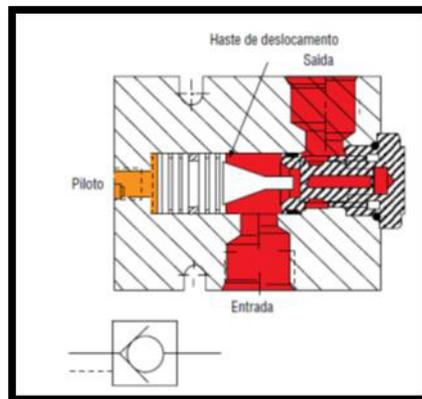
Figura 7 - Válvula desmontada



Fonte: Otto Sistemas Hidráulicos (2021)

- c) **Válvulas de retenção operada por piloto:** este artefato operado por piloto, consiste em um corpo da válvula, em suas vias de entrada e de saída, em um assento pressionado por uma mola, sendo que o pistão do piloto, que controla o fluxo numa dada direção pela pressão exercida, desloca o assento para essa finalidade.

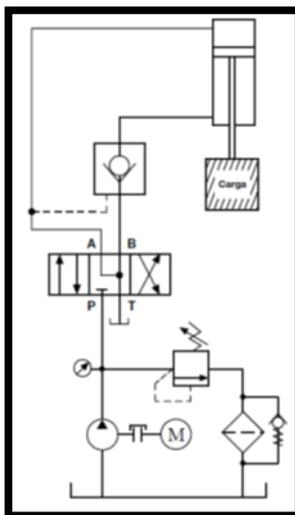
Figura 8 - Válvula de retenção operada por piloto



Fonte: Parker (2021)

- d) **Válvulas de retenção operada por piloto no circuito:** esta válvula de retenção operada por piloto no circuito, bloqueia a passagem de fluxo na saída "B" (conforme figura abaixo) do cilindro. Dessa forma, a carga ficará estacionária enquanto a vedação no cilindro se efetiva. No abaixamento da carga, a pressão no sistema aplicada na linha "A" faz com que válvula fique aberta enquanto houver pressão nessa linha.

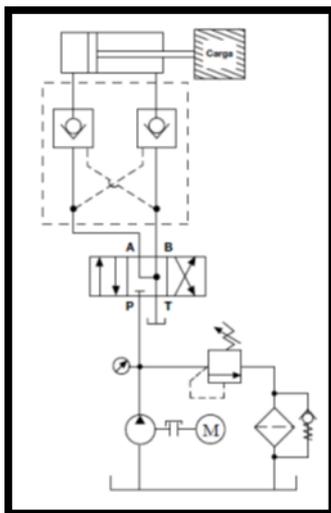
Figura 9 - Válvula de retenção operada por piloto no circuito - funcionamento



Fonte: Parker (2021)

- e) **Válvulas de retenção geminada operada por piloto:** essa válvula de retenção se caracteriza pela construção montagem em conjunto. Isso resulta em dois artefatos que operam em uma única carcaça, assim, o pistão comando duas retenções simples.

Figura 10 - Válvula de retenção geminada operada por piloto



Fonte: Parker (2021)

Diante dos modelos apresentados, percebe-se que qualquer um dos tipos citados acima possuem sua eficácia, mas todos têm parte (s) móvel (is). Avaliando

os modelos, ficou evidente que as válvulas oferecidas no mercado de uma maneira ou de outra se compõe de alguma parte móvel. Pesando nas partes móveis das válvulas disponíveis à época, o cientista Nikola Tesla desenvolveu um tipo de válvula sem partes móveis, permitindo uma durabilidade maior ao mecanismo de escoamento, bem como na redução drástica de paradas para manutenção. Assim, ele inventou o Conduíte de Tesla que ao longo dos anos teve sua tradução alterada e passou a ser chamada de Válvula de Tesla (VT). Dessa forma, ele eliminou partes móveis dando uma opção aos tipos de válvulas oferecidas no mercado local.

Assim, um sistema de válvula que controle a pressão sem partes móveis seria uma forma mais inteligente de construir equipamentos que suportem uma utilização mais severa sem interferir na capacidade operativa do sistema hidráulico. Assim, permitir um grau de liberdade operacional nesse ambiente seria uma saída mais eficaz no escoamento de fluidos newtonianos, resultando numa maior facilidade unidirecional de seu fluxo.

2.2 BREVE HISTÓRICO

Em 1920, Nikola Tesla registrou sob a Patente US1329559 (TESLA, 1920) o Conduíte Valvular (Valvular Conduit), no entanto o nome não pareceu muito usual e o termo **Válvula de Tesla** ficou mais adequado, justamente por sua função descrita na patente de invenção.

2.3 ALGUNS CONCEITOS

Segundo Ramalho Junior, Ferraro e Soares (2009), a matéria encontra-se em 3 (três) estados naturais, um deles é o líquido. Com os fluidos faz-se muitas coisas úteis, dentre ela há uma quantidade considerável de invenções mecânicas modernas, desde lavar roupas até secá-las. Assim, podemos entender que o fluido faz parte de nossa vida e gerenciá-lo pode trazer conforto e qualidade de vida.

Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importando o quão pequeno seja o seu valor. Como o movimento do fluido continua sobre a aplicação dessa tensão, definimos um fluido também como uma substância que não pode sustentar uma tensão de cisalhamento quando em repouso. (FOX, MCDONALD; PRITCHARD, 2014, p. 22)

Dessa forma, podemos entender que o líquido se enquadra perfeitamente na definição de fluídos e que entender as forças que governam seu escoamento pode ser muito útil na vida moderna. Isaac Newton, Bernolli, Arquimedes etc, conheciam perfeitamente essas características, pois criaram muitas teorias relacionadas aos fluídos.

Para Zampar Filho (2018), fluidos newtonianos são aqueles a taxa de deformação é linearmente proporcional à tensão de cisalhamento são chamados de fluidos newtonianos. Dessa forma, podemos notar que fluido newtoniano é um fluido cuja viscosidade, ou atrito interno, é constante, ou seja, nesse tipo de fluido a viscosidade ou atrito interno, há a constância para diferentes taxas de cisalhamento e que não variam com o tempo. De certo modo, podemos pensar que não existem fluido perfeitamente newtonianos, mas homogêneos. A água e o ar são grandes representantes dessa linha de fluidos e possuem muitas finalidades práticas.

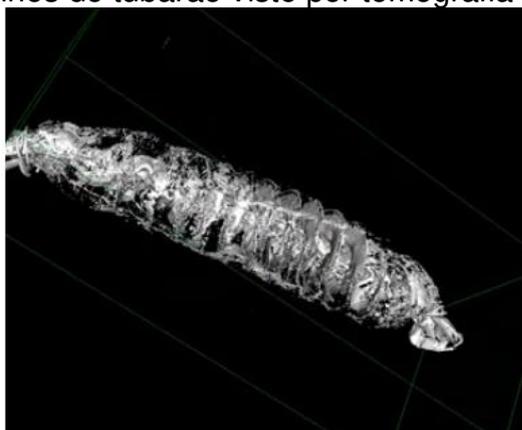
2.3.1 Válvula de Tesla

Como vimos anteriormente, todos os modelos citados de válvulas até o momento neste trabalho, possuem algum tipo de parte móvel. É nesse ponto que a Válvula de Tesla se destaca, em sua estrutura não há partes móveis. Dependendo do material na qual foi confeccionada, possui uma durabilidade maior, pois suas partes não desgastarão facilmente com a passagem do fluido. Assim, terá uma vida útil mais extensa e prolongará seu funcionamento aproveitável.

Diante disso, a indústria tem se mobilizado para encontrar outras aplicações para a Válvula de Tesla estão sendo descobertas e implementadas. Uma observação interessante trazida por Costa (2021) é de que os intestinos do tubarão se assemelham à válvula. Na figura abaixo, publicada pela revista *Proceedings of the Royal Society B*¹, foi possível ver digitalmente os tecidos dos intestinos do tubarão. Nessa perspectiva, há de se crer que muitas coisas boas podem advir disso e que, se a própria natureza a usa, então possam existir muitas outras aplicações para esse artefato.

¹ Tradução Livre: Publicações da Sociedade Real B

Figura 11 - Intestinos do tubarão visto por tomografia computadorizada



Fonte: Costa (2021)

Segundo o site Inovação Tecnológica (2021), a Válvula de Tesla é um mecanismo que serve para controlar a passagem de um fluido, que pode ser um gás ou um líquido, funcionando como uma turbina de resistência à passagem num dado sentido ou facilitando sua passagem noutro. Sua arquitetura é simples, mas dinâmica em seu funcionamento, pois faz com que um fluido consiga passar sem qualquer impedimento num sentido, mas dificultado imensamente à sua passagem em sentido oposto.

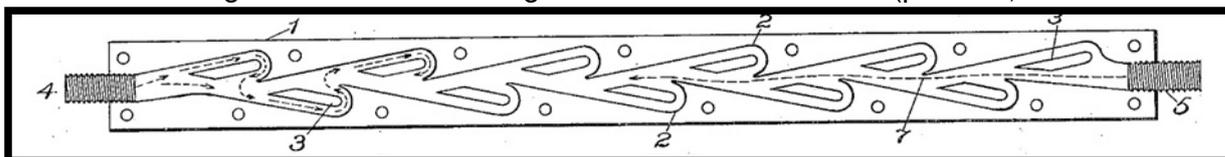
Para que ocorra essa dificuldade de passagem, a válvula recorre a uma arquitetura simples e bastante original, pois se utiliza do sentido contrário ao escoamento para impedir o próprio deslocamento do fluido em seu interior. Isso foi garantido por Tesla ao projetá-la para uso comercial numa razão de 200 (duzentas) vezes a vazão em comparação à entrada laminar usual.

A eficiência máxima ocorre geralmente no ponto de projeto (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2014, pg 393). Dessa forma, para os projetos de Engenharia, a economia é um item desejável, pois está atrelada à manutenção. Nesse quesito a Válvula de Tesla atende por não possuir qualquer parte móvel que deve ser substituída durante o processo fabril, reduzindo a parada de máquinas e dispensando a troca de peças aumentando a vantagem industrial da empresa.

Sua fabricação pode ser por estamparia, por usinagem ou por impressão 3D. Dessa maneira, a canalização dos fluidos se torna mais interessante à medida em que é mais confiável seu funcionamento. Além disso, dependendo do material fluido transportado, haverá uma menor sensibilidade às partículas e seus contaminantes.

De acordo com o site Inovação Tecnológica (2021), a Válvula Tesla ou Conduto (Conduíte) Valvular é um tipo de mecanismo sem partes móveis que permite a passagem de um fluido naturalmente numa direção e que fica impedindo parcialmente noutro sentido quando passa no sentido antinatural da válvula, tendo em sua estrutura partes fixas e nenhuma parte móvel.

Figura 12: Desenho original da Válvula de Tesla (patente)



Fonte: Tesla (1920)

2.4 DIMENSÕES DA VÁLVULA

A Válvula de Tesla apresenta passagem de fluido em dois sentidos: o direto e o inverso (TRUONG E NGUYEN, 2003, pg 2). A distinção deles é que de um lado há fluidez maior e no outro um choque de correntes que impedem parcialmente um fluxo mais intenso. Essa característica pode ser medida, sendo sua eficácia ou medida de aproveitamento real. Assim, a DIODICIDADE se caracteriza pela razão entre a diferença de pressão no sentido inverso (antinatural) e no sentido direto (natural) para um mesmo caudal.

Figura 13 - Expressão matemática da Diodicidade

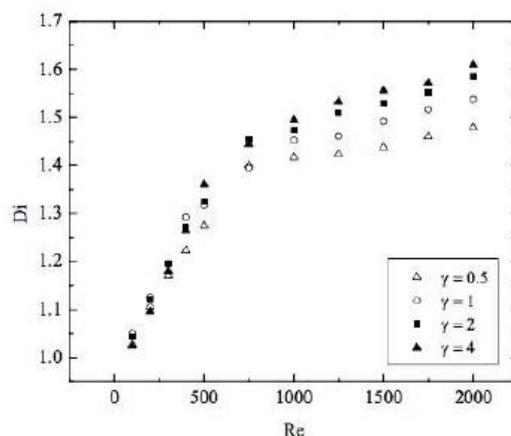
$$D_i = \left(\frac{\Delta P_{\text{inverso}}}{\Delta P_{\text{direto}}} \right)_{\text{caudal}}$$

Fonte: Alves (2014)

Para que este sistema funcione com alguma eficácia é necessário que as perdas de pressão sejam superiores no sentido inverso em relação ao sentido direto, isto é, que passe maior quantidade de fluido no sentido direto e menor no sentido inverso (encontra maior resistência) promovendo a circulação do mesmo da entrada para a saída do sistema.

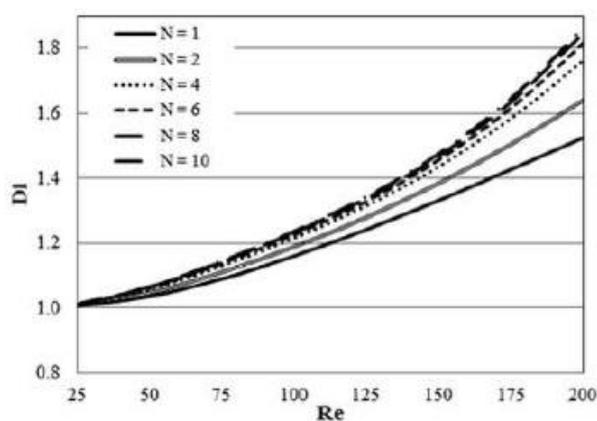
Para que isso aconteça a diodicidade tem que ser obrigatoriamente superior a 1. Dessa forma, a partir da literatura encontrada em Truong; Nguyen (2003) e em Alves (2017) sobre o uso de válvulas deste tipo, nota-se que na generalidade a diodicidade aumenta à uma medida proporcional ao número de Reynolds.

Gráfico 1 - Amostra de uma Diodicidade



Fonte: Truong; Nguyen (2003)

Gráfico 2 - Várias válvulas em série, onde N representa o número de válvulas



Fonte: Truong; Nguyen (2003)

O número de Reynolds descreve a relativa importância das forças inerciais em comparação com as forças viscosas num fluido, isto é, a relação proporcional do momento do fluido com as forças de fricção transmitidas no mesmo pelas paredes do canal.

Figura 14 - Número de Reynolds

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{\rho v D_H}{\mu}$$

Fonte: Alves (2017)

Onde:

ρ é a densidade do fluído;

v a velocidade;

μ a viscosidade dinâmica; e

D_H o diâmetro hidráulico.

A dimensão característica transversa ao fluxo do sistema calculada geralmente como quatro vezes a área a dividir pelo perímetro. Para o canal de secção quadrada que pretendemos fabricar o diâmetro hidráulico toma o valor do lado do quadrado. Caso o canal seja retangular o seu diâmetro hidráulico toma o valor da equação em que a e b são os lados da secção retangular:

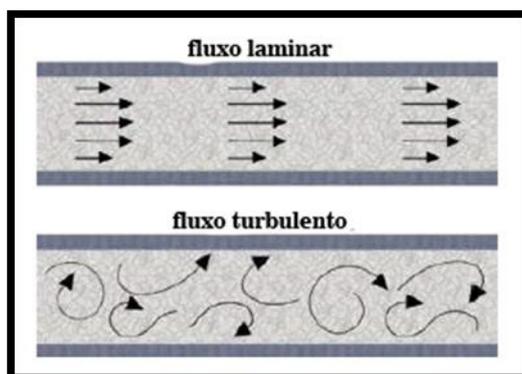
Figura 15 - Diâmetro Hidráulico

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{(a+b)}$$

Fonte: Alves (2017)

Para os baixos números de Reynolds o fluído é dominado por forças viscosas e o **fluxo é laminar**: as forças viscosas tendem a amortecer todas as perturbações do sistema. Para números de Reynolds altos as forças inerciais dominam e o **fluxo é turbulento**: irregular e com variações das propriedades de fluxo (pressão, velocidade, etc), existindo um amortecimento do sistema muito baixo que permite que pequenas perturbações cresçam e se tornem interações não lineares. A transição entre os dois regimes encontra-se por volta de $Re = 2000$, podendo este variar consoante o sistema (formato do canal, rugosidade da superfície do material, etc.).

Figura 16 - Os dois regimes de escoamento definidos pelo número de Reynolds. Em cima o fluxo laminar para $Re < 2000$ e em baixo o fluxo turbulento para $Re > 2000$

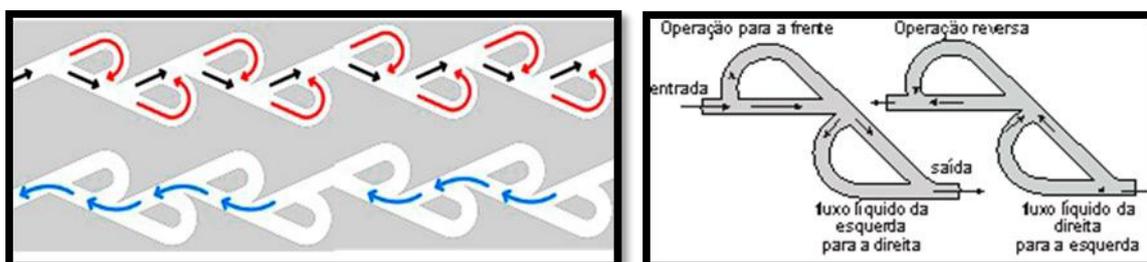


Fonte: Adaptado de Alves (2017)

2.5 FUNCIONAMENTO E OPERAÇÃO

Durante seu funcionamento, a válvula pode ter sentido mais fluente (detalhe em azul) ou mais turbulento com formação de vórtices (detalhe em vermelho) impedindo parcialmente uma fluidez mais latente.

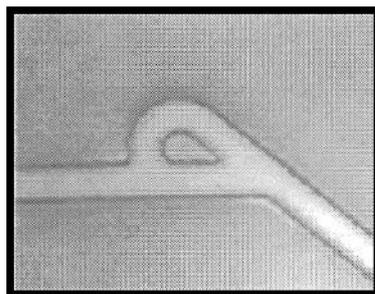
Figura 17 - Exemplos de geometrias das válvulas e suas direções de fluxos em seu interior



Fonte: Adaptado de Alves (2017).

A diodicidade da válvula nos mostra os resultados esperados do rendimento que deverá ser reduzido para que haja uma aplicação sem partes móveis de contenção. Assim, Truong e Nguyen (2003) apresenta o conceito de Válvula de Tesla e da sua aplicação em microbombas, pois o fabrico desse artefato pode ser em silício ou materiais plásticos, sempre dependendo da aplicação a que se destina.

Figura 18 - Válvula de Tesla fabricada em material plástico



Fonte: Truong; Nguyen (2003)

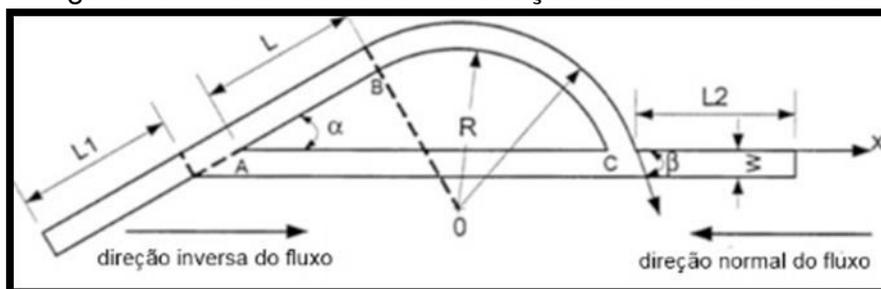
Os mesmos autores, mostram que a otimização, bem como sua eficiência, estão ligados à sua geometria. Assim, é necessário um método sistemático que conduza a resultados capazes de ratificarem ou retificarem seus resultados por intermédio de testes/simulações.

Nesse contexto, simulações com diferentes geometrias podem resultar em números compatíveis com o esperado dessa válvula. Assim, o uso de um software capaz de medir/simular tais resultados será bastante útil. Um critério muito importante para isso é a diodicidade em diferentes configurações/modelos de variações das taxas de fluxos que serão obtidas e entre si, comparadas.

2.6 ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO DA VÁLVULA DE TESLA

A partir dos estudos de Truong e Nguyen (2003), podemos encontrar sugestões para os parâmetros de construção da válvula e de suas variáveis: comprimento do segmento reto (L_1 e L_2); largura do canal (W); raio de curvatura (R); e direção do fluxo (L_i):

Figura 19 - Parâmetros de construção da Válvula de Tesla



Fonte: Adaptado de TRUONG; NGUYEN (2003)

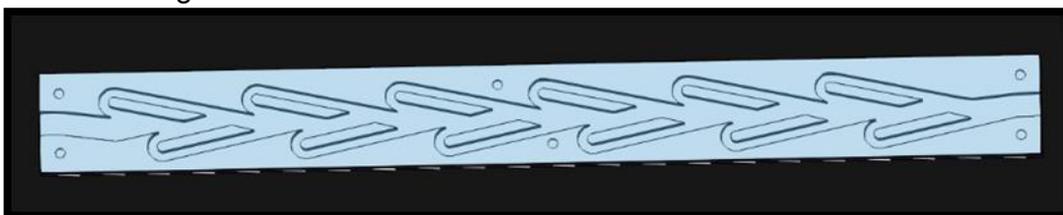
Com base em seis parâmetros mencionados acima, propomos o método para construir a Válvula de Tesla vai da seguinte forma: Construindo a parede interna e escolhendo arbitrariamente um ponto de partida, chamado A. De A, desenhe uma sequência segmento de linha AB com comprimento L e ângulo α . A partir de B, desenhe o círculo (O) (centro O, raio R) tangente a L. O círculo (O) cruza o eixo X em C. O fechamento polilinha ABC forma a parede interna da válvula. Construa a parede externa. Desenhe o limite de deslocamento para a polilinha ABC, no W distante (o largura do canal). Adicione as duas entradas e saídas seções e L2 para obter a estrutura completa da válvula. O raio da curva interna R tem um valor mínimo Rmin, porque o círculo (O) precisa interceptar o eixo X. Rmin é calculado pela Equação (2) (quando (O) é tangente ao eixo X) (TRUONG; NGUYEN, 2003, pg 13)

Figura 20 - Relação para construção da Válvula de Tesla

$$R_{min} = L \tan \frac{\alpha}{2}$$

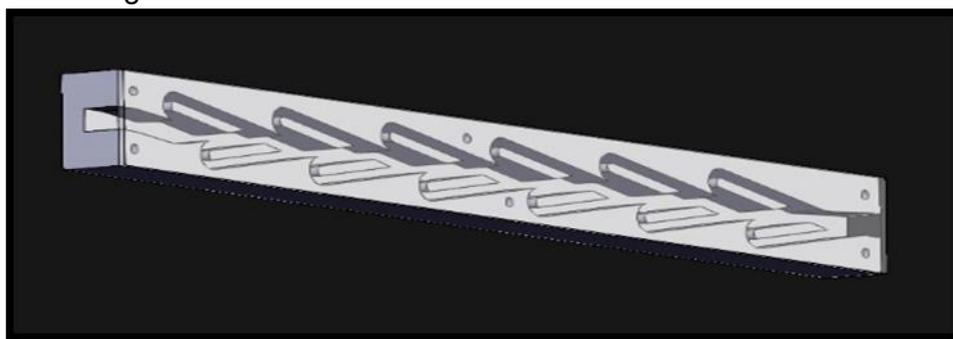
Fonte: Truong e Nguyen (2003)

Figura 21 - Vista em 2D do modelo da Válvula de Tesla



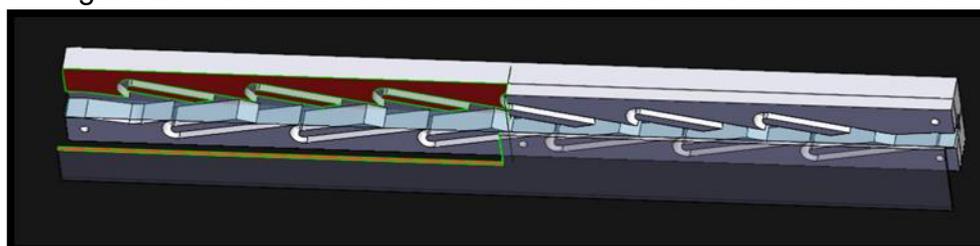
Fonte: O Próprio Autor (2021)

Figura 22 - Vista em 3D do modelo da Válvula de Tesla



Fonte: O Próprio Autor (2021)

Figura 23 - Vista seccionada do modelo 3D da Válvula de Tesla



Fonte: O Próprio Autor (2021)

Tudo isso levando em conta os vórtices que serão criados quando da saída do fluido em choque com seu contrafluxo. Assim, será possível saber se sua eficácia, bem como suas propriedades no escoamento dos líquidos que por ventura passarão pelo seu interior.

2.7 APLICAÇÕES

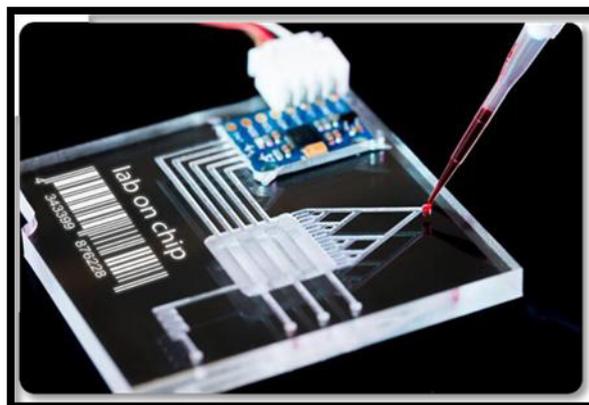
Diante dos experimentos encontrados nas literaturas disponíveis sobre o assunto, podemos inferir que muitas aplicações podem existir, mas não divulgadas, ou por questões industriais de fabricantes que não querem a divulgação de seu produto ou razões de falta de interesse da comunidade pelo artefato. Assim, apresentaremos algumas aplicações encontradas na literatura disponível de periódicos, revistas, seminários e trabalhos inerentes ao tema.

2.7.1 Microfluídica

De acordo com Bendib e França (2001), a microfluídica se apropria do conceito da Válvula de Tesla para sistemas muito pequenos. Nessa forma de trafegar, micro

canais e micro válvulas são utilizados para dar vazão ao o fluído. Esses minúsculos dutos são fabricados por tecnologia de micro usinagem. Seus modelos aproximados são estudados para que a aplicação, na qual são utilizados, estejam próximos dos protótipos analíticos estudados e que correspondam aos modelos simulados para aplicação em nano tecnologia para resfriar sistemas de potência, na medicina.

Figura 24 - Micro bomba mista da Válvula de Tesla controlada por chip



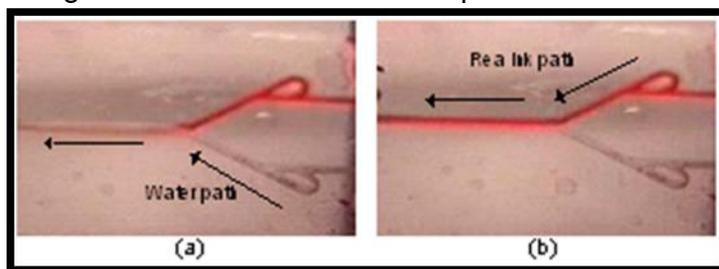
Fonte: Biolab (2021)

Segundo Biolab (2021), nas novas tecnologias, os modelos analíticos estudados são aproximados para que haja um erro numérico aceitável final do produto, pois o objetivo é otimizar sua eficiência em relação à geometria Tesla. Para se ter uma ideia, a fabricação desse dispositivo, em uma escala da ordem de 500 μm , está voltada à área de análises químicas e biomédicas. Seu funcionamento se dá pelo movimento circunrotatório de um impulsor dentro da microbomba. A taxa de bombeamento pode chegar a 2,5ml/min em uma baixa tensão de operação de 3V com um consumo de energia de 345mW.

Os autores chineses Lei e Li (2003) relatam que as recentes pesquisas apontam para Sistemas Microeletromecânicos (MEMS). Dessa forma, vários dispositivos microfluídicos foram desenvolvidos incluindo microválvula, microbomba, rede de microcanais, sensor de fluxo microfluídicoetc. Assim, pensar em dispositivos microfluídicos, é projetar artefatos que detectam, regeneram e fornecem fluidos na ordem de microlitros. Essa integração, em larga escala de dispositivos microfluídicos, é uma tendência de avanço na tecnologia microfluídica. O mais

interessante de tudo isso é que esses sistemas microfluídicos são construídos com chips da ordem de 1 a 2 cm.

Figura 25 - Micro canais transportando fluido



Fonte: Lei; Li (2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais necessários para construção de um protótipo Válvula de Tesla, bem como explicar quais modelos do mecanismo foram utilizados, mostrando suas dimensões e as soluções propostas no início deste TCC.

A metodologia geral desse trabalho está voltada às características da pesquisa aplicada, encontrando nesse modelo como objetivo para geração de conhecimento a gerar conhecimentos para solução de problemas que requeiram uma abordagem prática e imediata de natureza específica (SCALETSKY, 2010). Este estudo se caracteriza como pesquisa aplicada por buscar gerar conhecimento para a aplicações práticas, dirigidas a soluções de problemas já explorados em outras bibliografias, podendo o objetivo ser alcançado em curto ou médio prazo.

Nessa pesquisa aplicou-se a abordagem quantitativa e qualitativa, pois o objetivo é de verificar estatisticamente a hipótese da introdução deste trabalho, partindo da coleta de dados concretos e quantificáveis, seguidos de uma simulação para verificação das bibliografias disponíveis à época desse escrito (COELHO, 2018). Dessa forma, este TCC partiu de uma hipótese já pesquisada com muitos dados disponíveis para consulta, bem como se utilizando de resultados já alcançados anteriormente, utilizando software de elementos finitos capaz de gerar gráficos adequados aos resultados esperados que possa verificar a hipótese.

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

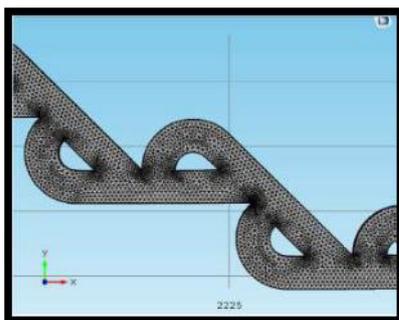
Nesse contexto, utilizaremos o **Software COMSOL** para a realizar os cálculos e exibição dos gráficos correspondentes aos dados de entrada (simulações) desenhando primeiramente o modelo 3D e inserindo-o no programa de modo a implementar as entradas das variáveis como diâmetro da tubulação, tipo de entrada (natural ou inversa), volume de entrada e tempo. Dessa forma, obteremos a vazão de saída sobre a análise da diodicidade (razão entre a entrada e a saída) caudal.

Para isso ser possível, pesquisaremos softwares de engenharia que atendam essa premissa de confiança na simulação no campo da Mecânica dos Fluidos ligada aos elementos finitos em que o todo é dividido em problemas

menores geometricamente, resultando em tetraedros, sendo capaz de realizar simulações em geometrias a 1D, 2D e 3D.

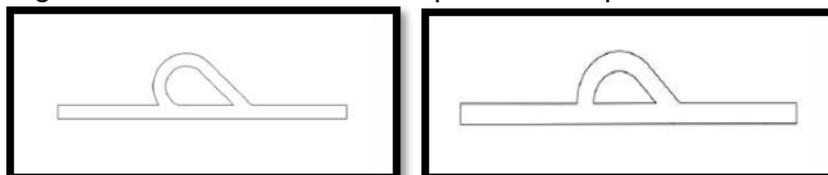
Nesse contexto, faremos uma leitura/pesquisa aprofundada nas bibliografias disponíveis relacionadas ao tema e sobre modelos relacionados ao assunto, escolheremos 04 (quatro) geometrias diferentes das Válvula de Tesla, entendendo que a diferença maior estará na inclinação dos ângulos em relação ao eixo principal de escoamento onde se encontram as junções dos canais.

Figura 26 - Malha de tetraedros no COMSOL



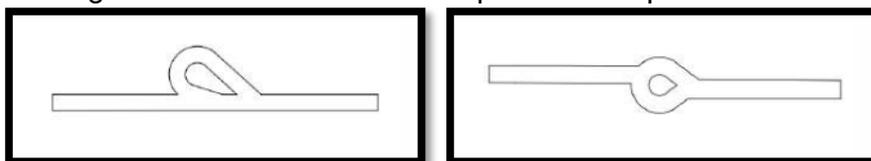
Fonte: Adaptada de Alves (2017)

Figura 27 - Válvula de Tesla tipo 1 e 2 respectivamente



Fonte: Adaptada de Alves (2017)

Figura 28 - Válvula de Tesla tipo 3 e 4 respectivamente



Fonte: Adaptada de Alves (2017)

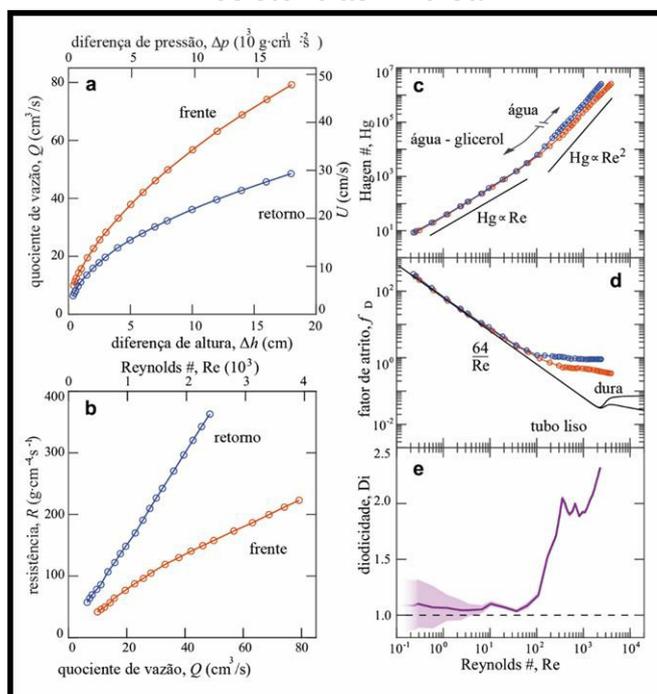
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os testes das simulações feitas com o software COMSOL apontaram para uma eficácia muito menor da prevista por TESLA. Assim, a finalidade a que se destina a Válvula de Tesla não ficou configurada em 200 vezes como projetada pelo autor, mesmo fazendo com que a geometria fosse mais fidedigna possível do artefato constante da patente. Os gráficos mostram que mudando a geometria, pode-se obter um resultado melhorado/piorado da retenção do fluido.

Assim, a resistência fluídica ou perdas de pressão induzidas, por fluxo para o diodo de Tesla, sob condições de diferenças de pressão fixas, variando sistematicamente as taxas de fluxos em ambas as direções.

Simulações realizadas com fluidos newtonianos renderam altos números de Reynolds ($Re = \rho U D / \mu \sim 10^3$), onde μ é a viscosidade do fluido, $U = Q/wd$ é a velocidade de fluxo média da seção através do canal e $D = 4Vw/Sw = 0,8$ cm é seu diâmetro hidráulico calculado a partir do volume úmido total Vw e da área de superfície úmida Sw .

Gráfico 3 - a) Diferença de pressão; b) Resistência hidrodinâmica $R = \Delta p/Q$ versus Q para as direções direta e inversa; c) Água pura e soluções de água-glicerol; d) Fatores de atrito $f_D = (\Delta p / L) / (\rho U^2 / 2D)$; e e) Diodicidade Di ou razão das resistências inversa

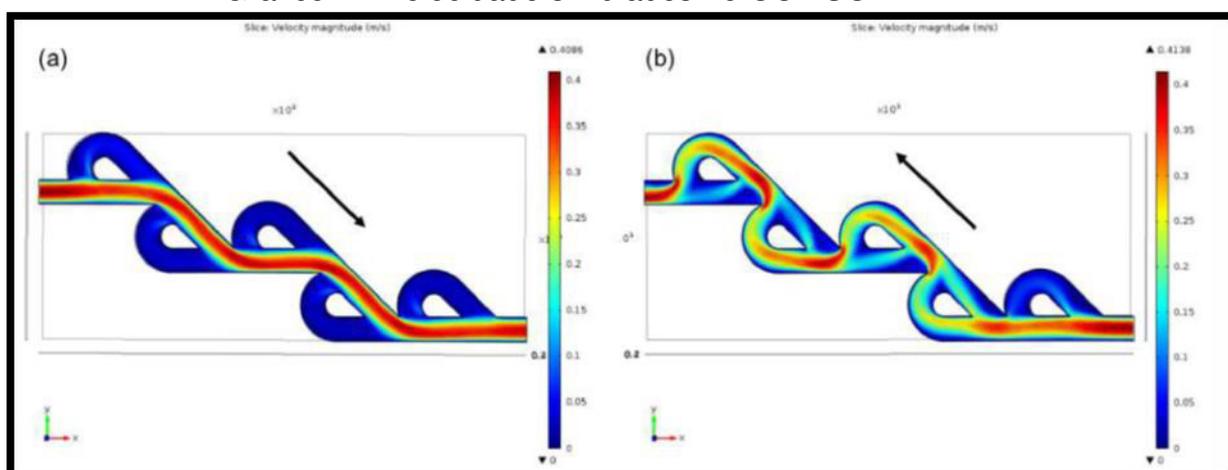


Fonte: Adaptado de Nguyen; Abouezzi; Ristroph (2021)

Para entender melhor, foi notado que para maior Re , os dados seguem uma dependência mais forte de aproximadamente $Hg \sim Re^2$, que é característico de fluxo turbulento. Curiosamente, a disparidade na resistência ocorre junto com a não linearidade da escala de $Hg-Re$. Entendendo melhor os resultados, ficou evidente que há uma associação entre a escala de Hg (Re) ou fD (Re) com o estado de fluxo (laminar ou turbulento).

O sentido natural (a) e inverso (b) do fluido, que se desloca no interior da válvula, pode ser observado na figura abaixo. Percebe-se que o sentido direto/natural é mais fluído, enquanto que no inverso há vórtices que impedem parcialmente o fluído de escoar livremente. Na simulação abaixo foi utilizada a água como fluido principal.

Gráfico 4 - Velocidade simulados no COMSOL



Fonte: O Próprio Autor (2021)

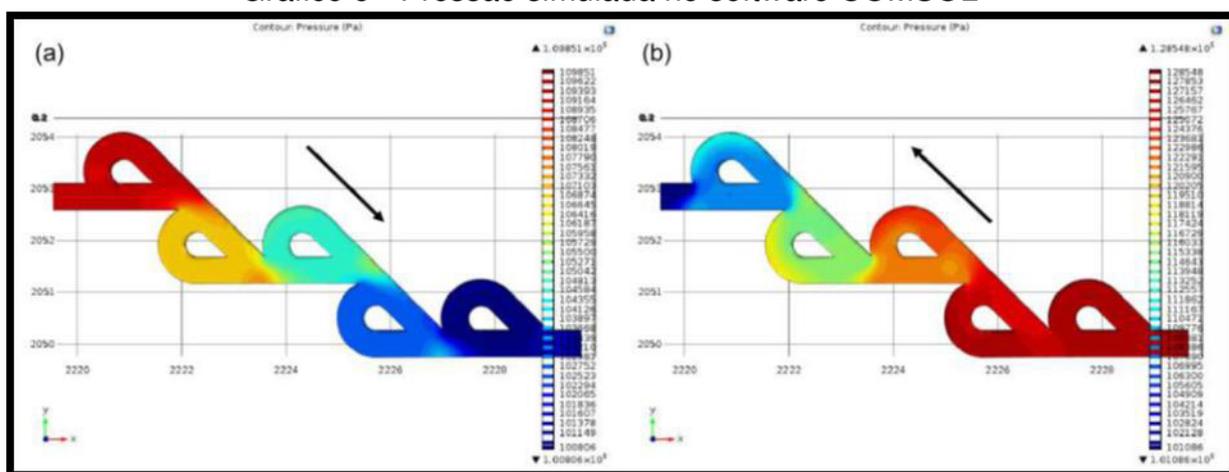
Para que houvesse uma melhor diodicidade entre os modelos, foram feitas combinações no número de válvulas (curvas) de retorno do líquido até o limite de 7 quando se pode chegar a um resultado satisfatório na simulação. Os resultados apontaram que o número de válvulas no valor de 6 é tão alto como o de 12, ou seja, não são os números de válvulas que ditam o ritmo da diodicidade, mas sim seu alinhamento com o canal principal reto na junção em seu menor ângulo.

Nas simulações foram conferidas condições de entrada partindo de um estado estacionário com elas preenchidas com água. Na condição de saída, foram admitidos fluxos com a pressão de 1 atm. Levando em conta a incompressibilidade

da água, foram gerados dois modelos de gráficos: um com a velocidade e o outro levando em conta a pressão. O modelo 2D pareceu mais adequado para a analogia dos resultados dos formatos das Figuras 23 e 24, resultando nos gráficos da Figura 25.

No Gráfico 3 podemos notar os gráficos obtidos do fluxo sem função da diodicidade que foi calculada pelo COMSOL na simulação, utilizando os valores obtidos nos gráficos de pressão (Gráfico 4).

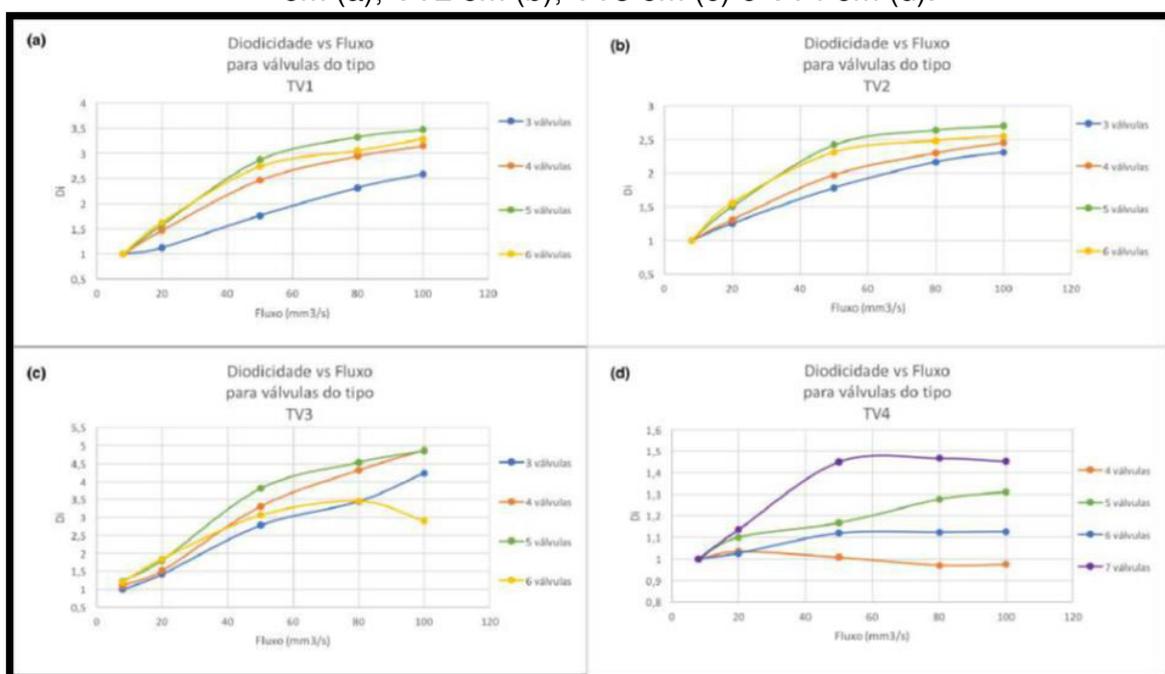
Gráfico 5 - Pressão simulada no software COMSOL



Fonte: O Próprio Autor (2021)

Para obtermos o Gráfico 4, o fluido teve sua entrada em sentido natural em (a) e inverso (b). A condição de entrada do fluxo foi de $355,7 \text{ mm}^3/\text{s}$, com saída de pressão a 1 atm. Notemos que em (a) há diferença de pressão entre a entrada e a saída das válvulas de aproximadamente 90 mbar e em (b) de aproximadamente 27000 Pa, resultando numa diodicidade de aproximadamente 3.

Gráfico 6 - Gráficos resultantes das simulações feitas a 2D para vários números de válvulas em série com o objetivo de obter maior diodicidade para os desenhos VT1 em (a), VT2 em (b), VT3 em (c) e VT4 em (d).



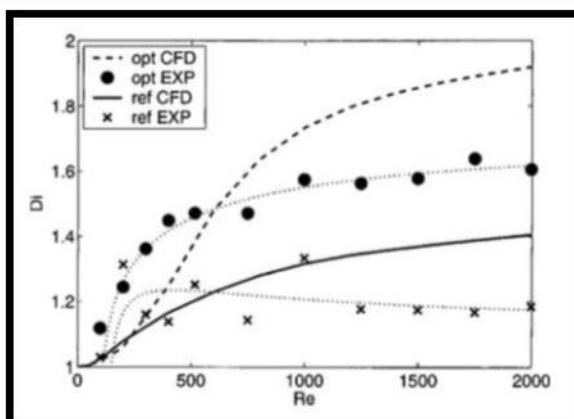
Fonte: O Próprio Autor (2021)

Dos resultados das simulações, nota-se que a maior diodicidade ficou com o tipo 4 enquanto a diodicidade 5 ficou com os outros tipos (1, 2 e 3). Dessa maneira, percebe-se que quanto mais desalinhado o eixo central da tubulação, mais difícil se torna a passagem do fluido, sendo verdadeiro o contrário. Assim, a fabricação da válvula pode incutir numa estrutura voltada ao fim a que se destina, ou seja, quanto mais desalinhado seu eixo, mais resistência.

Os mesmos resultados conclusivos de simulação, e fruto de experimentação foram obtidos quando se colocou os 4 tipos de válvulas em relação ao número de Reynolds ≈ 1000 (Alves, 2017). Percebe-se que a diodicidade com resultados CFD (simulados) e EXP (experimentais) das válvulas REF (tipo 2) e OPT (tipo 3) foram interessantes no sentido de dar um melhor entendimento do funcionamento desse artefato à medida que se propõe a vários tipos de pressões.

Gráfico 7 - Diodicidade em relação ao número de Reynolds ≈ 1000

Tipo Válvula	Diodicidade ($Re \approx 1000$)			
	Nossos Resultados		Ref. [51]	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
TV2	2,4	1,6	1,3	1,2
TV3	3,5	2,0	1,7	1,55



Fonte: Adaptado de Alves (2017)

Analisando o Gráfico 6 e seus resultados, no parece que a diodicidade é um tanto pequena para os fluxos maiores, aumentando e saturando para resultados maiores ou parecidos com 15 ml/min, também, se percebe que os resultados simulados são maiores em comparação aos resultados experimentais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o processo de construção do modelo em computador da Válvula de Tesla, pode-se inferir que as diferentes válvulas testadas sob simulação, ratificadas pela bibliografia, levam a crer que um modelo mais otimizado pode ser conseguido para a construção que privilegie o ângulo em relação ao segmento reto L(Figura 15), assim, ficou evidente que essa geometria angular é inversamente proporcional, assim como seu segmento é proporcional ao número de Reynolds, respectivamente.

Para que as Válvulas Tesla favoreça inúmeras aplicações em microfluídica, mais estudos são necessários para se chegar a essa conclusão. Para isso, aplicar uma análise numérica desse feito é poder entender melhor sua dinâmica do fluxo em seu interior, pois a pouca eficiência encontrada nas simulações levam a crer que estudos mais exacerbados devem ser feitos no intuito de comprovar sua eficácia.

Nessa linha de pensamento, não podemos deixar de notar o relativo sucesso em reter parcialmente líquidos em sua estrutura, nos dando pistas de que é possível obter uma estrutura capaz de atrasar a dinâmica fluídica para um aproveitamento ao fim a que se destina. A construção de micro bombas é uma boa dica para isso.

Neste trabalho foi utilizado a água como fluído nas simulações, pois atende os pré-requisitos para ser um fluído newtoniano, assim como outros. Essa medida foi vital para que se ganhasse tempo na construção dos resultados, pois o software utilizado fica disponível sob a forma on-line, ou seja, seu processamento é feito no site do fabricante, causando uma demora expressiva nos resultados.

Ademais, os dados não são conclusivos para que se tenha uma resposta exata a respeito da Válvula de Tesla e de sua eficácia. O que se pode notar durante o desenvolvimento deste trabalho é de que a diminuição do volume de entrada em 200 (duzentas) em relação à saída patenteada pelo inventor não se configurou nas simulações, mas pensando de outra maneira e em como o autor inventou a corrente alternada, tem-se uma pista de que a válvula funcione similarmente a isso.

REFERÊNCIAS

ALVES, Sofia de Sousa. **DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO CIRCULADOR DE LÍQUIDO MILIMÉTRICO**. Dissertação de mestrado em 2017. Disponível em https://run.unl.pt/bitstream/10362/57142/1/Alves_2017.pdf> Acesso em 22 Jun 2021.

AKO, Armaturen & Separation stechnik GmbH, 2018. Disponível em <<https://www.valvula-de-mangote.com/valvulas-de-fechamento-suave.html>>. Acesso em 10 Ago 2021.

BENDIB, Samir; e FRANÇAIS, Olivier. **Analytical study of microchannel and passive microvalve “application to micro pump simulator”**. VL – 4593. DOI-10.1117/12.448859. JO -Proc SPIE, 11 JAN 2001. Disponível em <<https://www.ieee-nems.org/ftp/papers>> Acesso em 22 Jun 2021.

BERMO (2021). Disponível em <<https://bermo.com.br/produtos/bloqueio>>. Acesso em 10 Set 2021.

BIOLABS, Creative. **ONE-STOP MICROFLUIDIC SOLUTIONS**. Disponível em <https://microfluidics.creative-biolabs.com/one-stop-microfluidic-solutions.htm?gclid=CjwKCAjw3MShBhB3EiwAxcaEuxHi1Z5-1Zm7rN1GqhEx-YoiRBTnZbfxBan7zLsnKNBB-FsZJ879yRoCbUYQAvD_BwE>. Acesso em 22 Jun 2021.

COELHO, Beatriz. **Pesquisa quantitativa: entenda como utilizar essa abordagem de pesquisa, 04/02/2018**. Disponível em <<https://blog.mettzer.com/pesquisa-quantitativa/>> Acesso em 09 Set 2021.

COMSOL Multiphysics. **Software de Simulação para a Engenharia**. Disponível em <<https://br.comsol.com/optimization-module>> Acesso em 22 Jun 2021.

COSTA, Daniel. **Válvula inventada por Nikola Tesla há mais de 100 anos pode ter uso moderno**. Disponível em <<https://zap.aeiou.pt/valvula-nikola-tesla-uso-moderno-403170>> Acesso em 22 Maio 2021.

_____. **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 30 JUL 2021.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; e PRITCHARD, Philip J. **INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS FLUÍDOS.** 8º Ed. Gen LTC, 2014.

HidrauNet (2021). Disponível em <https://www.hidraunet.com.br/valvula-reduzora-de-pressao-112-manometro-opcional.html>. Acesso em 01 Set 2021.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, Site. **Válvula inventada por Tesla há um século pode ter usos modernos.** 18Maio2021. Disponível em <www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=valvula-nikola-tesla> Acesso em 13 Maio 2021.

LEI, Kin Fong; LI, Wen J. **VORTEX MICROPUMP FOR INTEGRATED OPTICALLY TRANSPARENT MICROFLUIDIC CHIPS.** Centre for Micro and Nano Systems, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hong Kong SAR. JAN 2003. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/278146439_Micro_fluidic_channel_fabrication_by_PDMS-interface_bonding> Acesso em 22 JUN 2021.

KEIZER, K. **Determination whether a largescale Tesla valve could be applicable as a fish passage.** Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Stevinweg 1, 2628CN Delft, PO-Box 5048, The Netherlands. October, 2016. Disponível em <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:c871a0b0-a0d5-4b6e-afab-bc29c9a9797b>>. Acesso em 22 Jun 2021.

Master Tecnologia Industrial (2021). Disponível em <<https://www.mtibrasil.com.br/valvula-reguladora-de-fluxo.php>>. Acesso em 29 Ago 2021.

NGUYEN, Q.M., ABOUEZZI, J. & RISTROPH, L. **Early turbulence and pulsatile flows enhancedodicityofTesla’smacrofluidicvalve.** Nat Commun 12, 2884 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23009-y>.

Otto Sistemas Hidráulicos (2021). Disponível em <<http://www.ottosistemas.com.br/noticias.php?ler=Mzcxw>>. Acesso em 26 Ago 2021.

PARKER, Hannifin Ind. Com. Ltda. **Catálogo de equipamentos PARKER**. Disponível em <https://www.parker.com/literature/Brazil/M2001_2_P_10.pdf> Acesso em 01 Set 2021, Jacareí, SP – Brasil.

RAMALHO JUNIOR, Francisco; FERRARO, Nicolau Gilberto; SOARES, Paulo Antônio de Toledo. **Fundamentos da Física I**. Vol 1, 10^a ed. São Paulo: Moderna, 2009 (pg. 17).

SCALETISKY, Celso Carnos. **Pesquisa aplicada/pesquisa acadêmica – o caso Sander, 2010**. 8^o Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. Disponível em <https://scholar.google.com.br/scholar_url?url=https://eed.emnuvens.com.br/design/article/download/55/52&hl=pt-BR&sa=X&ei=5Ps9YaDfGqOVy9YP9lu48A4&scisigAAGBfm05jAJhlf8jfxUouXNAyY OxNyMN-w&oi=scholar> Acesso em 08 Set 2021.

SinoxTec (Abr, 2021). Disponível em <https://sinox.com.br/?utm_source=solucoes_industriais> Acesso em 29 Ago 2021.

SOUZA, Délio Barroso de; MURATA, Valéria Viana. **Simulação computacional da dinâmica dos fluídos (CFD) utilizando o software livre Openfoam release 1.4.1**. XII Seminário de Iniciação Científica, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

TESLA, Nikola, **VALVULAR CONDUIT**. APPLICATION FILED FEB. 21, 1916. RENEWED JULY 8.1919. PatentedFeb. 3, 1920.

TRUONG, T-Q; NGUYEN, N-T. **Simulation and Optimization of Tesla Valves**. Nanotech, 2003, Vol. 1. Technical Proceedingsofthe 2003 Nanotechnology Conferenceand Trade Show, Volume 1, ISBN 0-9728422-0-9. Disponível em <https://briefs.techconnect.org/wp-content/volumes/Nanotech2003v1/pdf/M7205.pdf>. Acesso em 24 Maio 2021.

ZAMPAR FILHO, Luis Eduardo. **Mecânica dos fluidos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A. p. 123, 2018.