

VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE UMA VÁLVULA DE TESLA EMPREGANDO DINÂMICA DOS FLUIDO COMPUTACIONAL

Douglas de Almeida Leite Furtado¹ (IC), Jesús Antônio Garcia Sanchez (PQ)²

¹Universidade Federal de Itajubá, Estudante de Graduação de Engenharia de Energia

²Universidade Federal de Itajubá, Departamento de Engenharia Mecânica

Palavras-chave: CFD. k- ω SST. Válvula de retenção. Válvula de Tesla.

Introdução

Este trabalho aborda a simulação numérica e a validação de uma válvula de Tesla, com o objetivo de compreender seu funcionamento, desenvolver uma metodologia para sua modelagem e validar os resultados com base em dados experimentais e numéricos disponíveis na literatura. A válvula de Tesla, introduzida por Nikola Tesla em 1920, tem despertado um crescente, recentemente, o interesse científico e tecnológico devido à sua capacidade de controlar o fluxo sem partes móveis, e facilidade de miniaturização desempenhando um papel crucial em diversas indústrias.

A justificativa para este estudo está na necessidade de fornecer ferramentas computacionais claras para a descrição e otimização desses dispositivos de controle de fluxo, que têm se mostrado cada vez mais relevantes em aplicações industriais. O desenvolvimento de métodos precisos para simular e validar o comportamento dessas válvulas pode acelerar o avanço de suas aplicações, reduzindo a necessidade de testes experimentais demorados e custosos.

O método dos volumes finitos foi escolhido pela sua capacidade de produzir resultados realistas, demandando menos tempo e recursos em comparação com a realização de testes de desempenho experimental. Para a simulação, foi confeccionada uma geometria baseada no trabalho de Bao e Wang (2022), e a modelagem numérica foi configurada de acordo com fundamentos encontrados na literatura. Os resultados obtidos foram posteriormente analisados e comparados aos dados disponíveis, a fim de deduzir se a validação foi efetivamente alcançada.

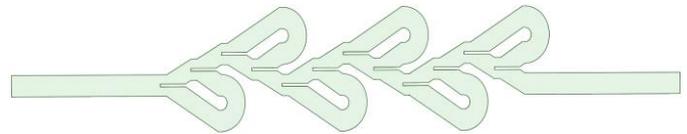
Metodologia

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na aplicação do método dos volumes finitos para simulação numérica do comportamento de uma válvula de Tesla. As equações de escoamento foram resolvidas utilizando o software Ansys Fluent 2023 R1, e as condições de contorno, como pressão e velocidade, foram configuradas

de acordo com as características presentes na literatura.

A geometria utilizada foi baseada no artigo de Bao e Wang (2022) e está disponível na Figura 1, pois com ela é possível a validação do modelo computacional, visto que há dados experimentais advindos desse estudo para essa mesma geometria. Sua geometria se trata de uma válvula de tesla de 6 estágios desenvolvida por eles, chamada de *Equivalent Shunts*, isso se deve ao fluxo da esquerda para a direita ser dividido em duas partes equivalentes que posteriormente serão unidas. A simulação o em 2D foi feita, pois os erros relativos foram menores em comparação a simulação 3D, sendo 7,25% e 6,13 o máximo e mínimo, respectivamente (BAO; WANG, 2022).

Figura 1 - Geometria utilizada na simulação



Fonte: Autoral.

O método dos volumes finitos foi escolhido pela possibilidade de alcançar resultados similares a realidade com menor demanda de tempo e recursos em relação à realização de testes de desempenho experimentais. Ademais, o *software* utilizado para aplicar o métodos dos volumes finitos foi o Ansys 2023 R1 pela suas ferramentas, precisão e facilidade de utilização.

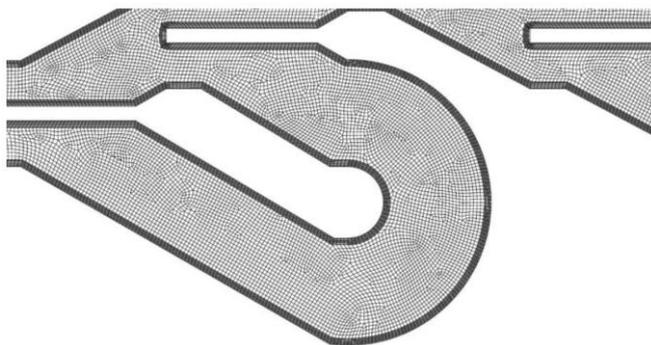
A modelagem numérica para a criação do modelo de validação contou com a seleção do modelo de turbulência, parâmetros para a discretização espacial atentando para um tratamento de parede que satisfizesse os valores ideais do adimensional y^+ . Além disso, houve a escolha da função de interpolação e acoplamento pressão-velocidade balanceando a precisão e custo computacional, após isso, a discretização temporal e critérios de parada foram discutidos finalizando com a descrição das propriedades do fluido e condições de contorno.

Sobre o modelo de turbulência, considerando o

difundido uso do método RANS para a modelagem da turbulência em problemas de engenharia e seu relativo baixo custo computacional (Versteeg; Malalasekera, 2007), tal método foi o escolhido para este estudo. Entre os modelos que utilizam essa lógica pode-se citar os modelos k- ϵ e k- ω . Porém esses modelos apresentam limitações e vantagens de acordo com as propriedades do escoamento, dessa forma, o modelo de SST k- ω de Menter consegue unir os dois, utilizando as maiores vantagens de cada um por meio de um função de mesclagem que consegue atingir uma suave transição entre os dois modelos. Ainda, o modelo de turbulência escolhido foi comparado aos resultados do método k- ϵ *realizable* (formulação variante do k- ϵ que geralmente é o mais recomendado entre a família k- ϵ) o qual de Bao e Wang (2022) utilizou para a sua simulação.

A malha construída (Figura 2 e Figura 3) foi baseada no trabalho de Bao e Wang (2022), pois ela foi capaz de discretizar apropriadamente o volume de controle e nos levar a resultados próximos ao obtido experimentalmente. Segundo Bao e Wang (2022), as configurações são resultados de uma análise de convergência de malha e, portanto, é capaz de discretizar o volume de controle de maneira a atingir um valor que não possui variações significativas se caso houvesse um maior refino da malha resultando, assim, em 111968 volumes de controles.

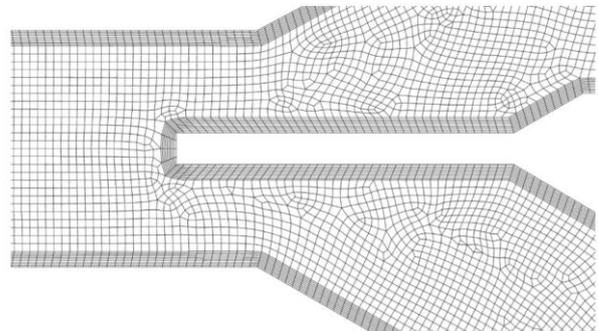
Figura 2 - Visão geral da malha da válvula de tesla



Fonte: Autoral.

Com relação ao tratamento da parede, a família k- ω , o qual foi usado nesse trabalho, apresenta grandes benefícios com relação a previsão de fluxos de gradiente de pressão adversos e separação. Ainda, para este modelo de turbulência, é comum na literatura que um valor de $y^+ \sim 1$ seja recomendado para descrever bem o escoamento próximo à parede. Portanto, as configurações da malha confeccionada garantem que grande parte do domínio seja corretamente discretizada, resultando em uma média de y^+ de 0,701, com 76% dos elementos abaixo de 1 no fluxo *forward* de maior velocidade simulada.

Figura 3 - Visão em detalhe da malha da divisão do fluxo e dos elementos perto das paredes



Fonte: Autoral.

Considerando que os valores das variáveis do escoamento são calculados nos centros dos volumes de controle, é necessário a interpolação para as faces através dos valores centrais dos elementos adjacentes. Para esse trabalho utilizou-se a o esquema *Upwind* de Segunda Ordem, pois apresenta um formulação mais precisa no cálculo das variáveis transportadas. Ainda o algoritmo para resolver o acoplamento pressão-velocidade utilizado foi o SIMPLE (*Semi-implicit Pressure Linked Equations*) pela sua boa estabilidade.

Sobre a discretização temporal e critério de parada da simulação transiente foi realizada com um passo de tempo de 0,005s e número de passos a serem realizadas de 1000 com a formulação *bounded 2nd order implicit* utilizado pela sua precisão e melhor estabilidade. Além disso, o trabalho de Bao e Wang (2022) há a realização de análise de independência de passo de tempo otimizando os valores dessa variável para um resultado preciso e computacionalmente menos custoso. Ainda, para o cálculo do método iterativo admitiu-se os resíduos de $10E-4$ suficientes para a simulação proposta.

As condições de contorno do escoamento foram definidas nas extremidades abertas da válvula de tesla de forma a proporcionar um escoamento da direita para a esquerda (*forward*) e da esquerda para direita (*reverse*) de acordo configurando a pressão entre as extremidades que variam de 50 a 300 mm de coluna de água com a saída sempre à pressão atmosférica a nível do mar. Na Tabela 1 está descrito as principais condições de contorno e as propriedades do fluido utilizado na simulação.

Tabela 1 - Condições de contorno e propriedades do fluido

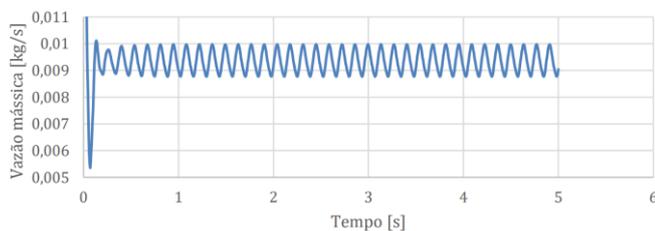
Propriedade física	Valor	Condições de Contorno	Valor
Fluido	Água líquida	<i>Pressure-Inlet</i>	Variável
Densidade	998,2 kg/m ³	<i>Pressure-Outlet</i>	0 Pa (relativa)
Viscosidade	0,001003 kg/m s	<i>No-slip Condition</i>	Parede lisa

Fonte: Autoral.

Ademais, para a obtenção das variáveis de interesse, foi necessário a seleção da aresta de uma das extremidades da válvula utilizada (Figura 9) para configurar o *software* na intenção de calcular a vazão mássica que a atravessa. Dessa forma, as condições de contorno são mudadas para a simulação dos dois fluxos desejados enquanto a seleção na aresta permanece constante, no entanto, para evitar a coleta de valores negativo, devido ao software levar em conta o sentido do fluxo mássico, a variável foi convertida para o seu valor absoluto.

Ainda, de modo inesperado, os valores de fluxo mássico calculados estavam obtendo um comportamento ciclo semelhante a uma função periódica. Dessa forma, a coleta de um ponto discreto não foi realizada, pois haveria a possibilidade de não representar adequadamente o comportamento dinâmico do sistema (Figura 4). Para contornar esse problema, foi calculada a média aritmética do último segundo de simulação, visto que, após 3 segundos, ocorre uma convergência na variação dos valores.

Figura 4 - Resultado dinâmico obtido na simulação da válvula



Fonte: Autoral.

Resultados e discussão

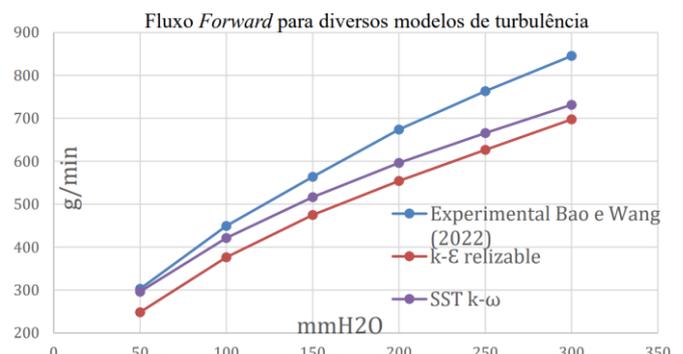
Nesta seção, serão discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia descrita. A análise foi realizada com o intuito de avaliar a precisão dos valores simulados em comparação com os resultados experimentais, identificando também as possíveis causas das diferenças observadas em relação à literatura.

Utilizando o modelo SST $k-\omega$ de Menter, foram gerados resultados que mais se aproximaram da representação ideal do fluxo na válvula. Enquanto o modelo $k-\epsilon$ *realizable* apresentou erros médios de 20,0% no fluxo reverso e 17,2% no fluxo *forward*, os erros relativos expostos nas figuras Figura 5 e Figura 6 estão mais próximos dos valores encontrados por Bao e Wang (2022), que ficaram entre 7,25% e 6,13%. Por sua vez, o modelo SST $k-\omega$ apresentou uma média de 9,1% no fluxo *forward* e 13,4% no fluxo reverso.

Além disso, foram confeccionados gráficos para proporcionar uma visualização mais clara de como o

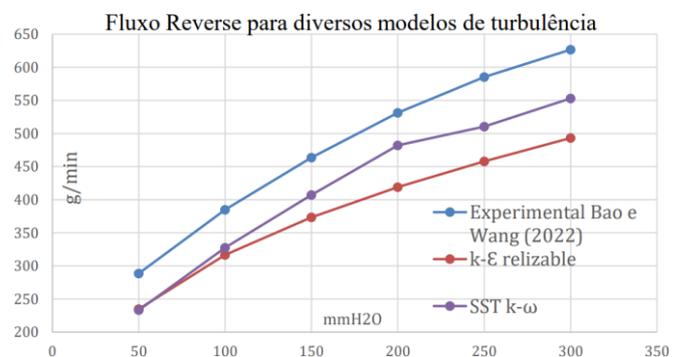
modelo SST $k-\omega$ consegue um traçado de curva mais preciso em relação ao $k-\epsilon$ *realizable* no que diz respeito à similaridade com os resultados experimentais. Nos gráficos das figuras Figura 5 e Figura 6, o eixo das abscissas detém os valores de pressão em milímetros de coluna de água enquanto nas ordenadas há os dados de vazão mássica que percorreu a válvula.

Figura 5 - Gráfico dos fluxos *forward*, experimental e simulados



Fonte: Autoral.

Figura 6 - Gráfico dos fluxos *reverse*, experimental e simulados



Fonte: Autoral.

Os erros observados podem ser atribuídos, além da falta de informações detalhadas sobre a geometria ensaiada experimentalmente, à modelagem da válvula que considerou uma superfície sem rugosidade. Embora o modelo impresso em 3D por Bao e Wang (2022) tenha sido produzido em resina, apresentando uma rugosidade muito baixa, ela ainda existe e está diretamente relacionada à espessura da camada de impressão.

Com relação a comparação entre os modelos de turbulência simulados, a melhor descrição do fluxo interno pelo modelo SST $k-\omega$ em relação ao $k-\epsilon$ *realizable* é esperada, pois sua formulação apresenta na camada limite, ou seja, na região viscosa próxima à parede, uma alta precisão em representar o fluxo (Versteeg; Malalasekera, 2007).

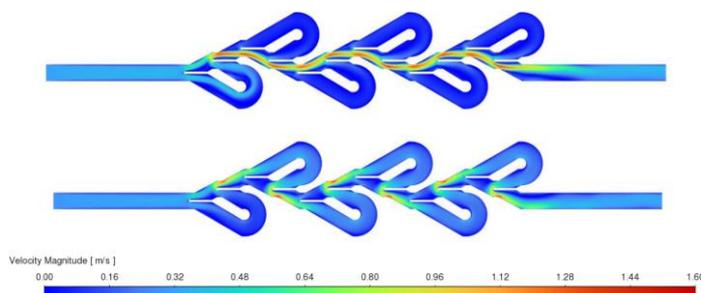
Associado a isso, como a simulação da válvula é

caracterizada por um fluxo interno delimitado por paredes de pequeno diâmetro os efeitos de camada limite são de grande impacto no escoamento resultante. Dessa forma, com a aplicação do SST $k-\omega$ e uma correta discretização espacial próxima a parede, verificado pelo valor médio máximo de $y^+ < 1$, houve uma coerência nos resultados apresentados nas figuras Figura 5 e Figura 6.

Além disso, a Figura 7 mostra que, no modelo SST $k-\omega$, o fluxo reverso apresenta maior velocidade de redirecionamento para a derivação apenas no primeiro estágio. Isso sugere que a característica responsável pela principal dificuldade do fluxo está sendo subutilizada no restante da válvula. Esse comportamento pode estar relacionado à geometria imediatamente antes da aresta de divisão, que direciona o fluxo para o caminho principal, característica ausente na primeira derivação.

No entanto, esse comportamento não foi observado na simulação de Bao e Wang (2022). Duas possíveis causas para essa diferença são o uso de dois modelos de turbulência diferentes e pequenas variações na geometria. Nas simulações do presente estudo, que utilizaram o modelo $k-\epsilon$ *realizable*, o comportamento visualizado no estudo de referência foi replicado. No entanto, como observado nos dados de vazão mássica da Figura 6, ao utilizar todas as derivações, houve uma redução no fluxo além do previsto pelos dados experimentais e pela simulação com o modelo SST $k-\omega$. Isso sugere que a vazão realmente diminui quando há uma maior divisão do fluxo pelas derivações, que o escoamento real pode estar sendo direcionado para o caminho principal gerando uma menor utilização dos estágios e, ainda, ressalta que o modelo de turbulência exerce um impacto significativo no desenvolvimento geral do escoamento.

Figura 7- Magnitude da velocidade na condição de contorno de 300mmH₂O para o fluxo reverse dos modelos de turbulência SST $k-\omega$ e $k-\epsilon$ *realizable*, respectivamente.



Fonte: Autoral

Fonte: Autoral.

Conclusões

Neste trabalho, foi realizada a simulação e análise de uma válvula Tesla do tipo *Equivalent Shunts* utilizando o *software* Ansys Fluent, baseado no método dos volumes finitos. Os principais objetivos do estudo foram alcançados, com a validação da geometria e configurações por meio da comparação com resultados experimentais e de simulações CFD disponíveis na literatura, resultando em um erro médio de 9,1% para o fluxo *forward* e 13,4% para o fluxo reverso. Esses valores demonstram uma boa precisão das simulações realizadas.

Além disso, a pesquisa identificou que, no escoamento reverso, houve uma variação significativa na magnitude da velocidade conforme o método de turbulência utilizado, sugerindo que alterações locais na geometria poderiam aumentar a eficácia das derivações na divisão do fluxo, criando maior dificuldade para o escoamento. Dentro das configurações testadas, o modelo de turbulência SST $k-\omega$ se destacou como o mais adequado para descrever o comportamento do escoamento no interior da válvula.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Jesús Antônio Garcia Sanchez, pelo suporte dado em todas as etapas do trabalho e à Professora Doutora Carolina Quintero Ramírez e ao Doutorando Celso Antônio Bittencourt, pelo apoio, atenção e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas do grupo de pesquisa MSU pela rica troca de ideias e de risadas. E por fim, agradeço à CNPq pelo auxílio financeiro e à Unifei pela infraestrutura disponibilizada

Referências

BAO, Yunhao; WANG, Huanguang. *Numerical study on flow and heat transfer characteristics of a novel Tesla valve with improved evaluation method. International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 187, 15 maio 2022.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. 2. ed. [s.l.] Pearson Education Limited, 2007.