

Uma investigação numérica multifásica, tridimensional e transiente do fenômeno de cavitação presente no indutor de uma bomba centrífuga de combustível para motor foguete

1 de julho de 2022

Resumo

Testes experimentais realizados em parceria entre a agência espacial brasileira (AEB) e o centro espacial alemão (DLR), sobre o funcionamento da bomba centrífuga de combustível presente no motor foguete L75, mostraram a ocorrência do fenômeno de cavitação no indutor desta bomba. Posteriores trabalhos simulacionais também observaram o mesmo fenômeno, utilizando uma abordagem numérica de estado permanente com métodos de múltiplos referenciais inerciais (MRF). Entretanto, uma investigação maior deste fenômeno deve ser realizada a fim de investigar melhor os motivos pela ocorrência de cavitação no componente indutor. Deste modo, o presente estudo tem como objetivo investigar o fenômeno de cavitação presente no componente indutor, via uma abordagem numérica transiente, multifásica e tridimensional com o auxílio de código aberto OpenFOAM. Os resultados serão validados com dados experimentais e possíveis previsões de parâmetros de projeto que implicam na cavitação podem ser levantados.

Palavras-chaves: indutor. turbobomba. CFD. cavitação. OpenFOAM

Área do conhecimento do projeto: Propulsão Aeroespacial

1 Introdução & Justificativa

Motores foguete são propulsores de fonte química projetadas para ejetar gases quentes, provenientes de combustão, a velocidades supersônicas por meio de um bocal convergente-divergente. O fluxo destes gases a tais velocidades produz um empuxo, grande o suficiente para ser usado em missões espaciais (SUTTON; BIBLARZ, 2016).

A combustão, que ocorre dentro de uma câmara de combustão a alta pressão, é proveniente de reações químicas entre propelentes. Sendo o estado físico destes propelentes mandatório no tipo da categoria do motor foguete. Assim, existem 3 principais categorias: propelente sólido, líquido ou híbrido (MISHRA, 2017). No caso de motores foguetes líquidos, estes podem ser subdivididos: monopropelentes ou bipropelentes, esse usando a mistura de um par combustível-oxidante líquido. O primeiro apresenta em sua composição química características de combustível e oxidante, sofrendo reação de decomposição exotérmica. Já no segundo ocorre a reação de combustão da interação entre um combustível e um oxidante apropriado, ambos à uma razão adequada oxidante/combustível (RIBEIRO, 2013).

Pensando em motores foguetes líquidos, seus propelentes são injetados sob pressão e a uma vazão fixa dentro da câmara de combustão por meio de injetores, os quais tem o objetivo de pulverizá-los, transformando-os do estado de líquido para uma nuvem, composta por diminutas gotículas, o quanto homogeneia possível a fim de garantir a combustão do mesmo (POPP et al., 2004). No caso de bipropelentes, há a necessidade de homogeneizar a mistura dos propelentes a fim de que a reação de combustão entre eles seja a mais apropriada possível (SIRIGNANO, 2010)(POPP et al., 2004)

Em ambos os casos, sejam monopropelentes ou bipropelentes, variações da vazão dos propelentes injetados ou uma má distribuição dos fluidos reagentes dentro da câmara de combustão podem gerar problemas de instabilidade de combustão, ou até de superaquecimento das paredes da câmara de combustão, ocasionando perda de desempenho ou até o em severos casos, o fracasso destes motores em operação (HUZEL, 1992)(POPP et al., 2004).

A pressurização e o controle da vazão dos propelentes entregues aos injetores, que estão estocados em tanques de armazenamento, podem ser feitos por meio do uso de uma turbomáquina (SUTTON; BIBLARZ, 2016). A

pressurização por turbomáquinas está no estado da arte em sistemas de alimentação em motores foguetes (ZINK et al., 2020), isso pois turbomáquinas entregam alta confiabilidade de operação, a estabilidade e controle da vazão e a alta pressão de entrega dos propelentes, tudo isso sob um amplo pacote operacional.

De acordo com Dixon (DICK et al., 2001), uma turbomáquina tem por concepção elevar a entalpia do fluido em escoamento, transferindo a energia de um eixo mecânico para o escoamento, por meio de um componente rotativo. É possível classificar este maquinário em três categorias, relacionadas com as direções do fluxo de fluido dentro de uma turbomáquina: fluxo radial (centrífuga), fluxo axial e fluxo misto (diagonal) (MISHRA, 2017).

Dentre os tipos e as classificações apresentadas, comumente bombas centrífugas são utilizadas em motores foguetes, isso pois permitem um sistema de alimentação com redução em massa do motor foguete como um todo quando comparado com outros métodos de alimentação, além de necessitarem de menos espaço (GAGLIARDE, 2020).

Pensando no seguimento aeroespacial brasileiro, o motor L75 apresenta uma turbomáquina com duas bombas centrífugas, uma para o combustível e outro oxidante, e uma turbina de fluxo axial todos montados no mesmo eixo mecânico (ZINK et al., 2020)(ALMEIDA; PAGLIUCO, 2014). A figura 1 apresenta a turbomáquina presente no motor L75. Esse motor que objetiva a capacitação dos envolvidos no desenvolvimento e construção de um motor foguete usando propelentes biocombustíveis líquidos, usa um ciclo com gerador de gases para produzir a energia mecânica necessária para acionar a turbomáquina. Isso ocorre com a queima de parte dos propelentes em uma pequena câmara de combustão, que gera um jato de gases quentes direcionados radialmente na turbina presente na turbomáquina. Esta turbina extrai a energia dos jatos, rotacionando as bombas centrífugas acopladas ao seu eixo mecânico (ZINK et al., 2020). Uma vez indicada a presença de bombas centrífugas presentes na turbomáquina do motor L75, o presente estudo objetiva focar no conhecimento acerca destes componentes mecânicos e seus fundamentos teóricos.

De acordo com Gulich (GÜLICH, 2008) uma bomba centrífuga é composta basicamente de uma voluta, um eixo mecânico da bomba e um rotor. Quando em operação, o eixo mecânico rotaciona o rotor a uma velocidade angular controlada. Com a rotação do rotor, suas pás empurram o fluido, transferindo energia mecânica de eixo para energia cinética ao escoamento. Esse escoamento que entra axialmente no rotor, deixa o mesmo radialmente para entrar na voluta. Esta voluta por sua vez tem a função de aumentar a área de vazão continuamente a fim de elevar a pressão estática do escoamento, reduzindo por sua vez a velocidade do fluxo (GÜLICH, 2008)(DIXON; HALL, 2013).

Devido ao efeito de rotação do rotor, uma zona de sucção aparece na entrada axial do rotor. Esta zona, que apresenta uma baixa pressão estática, pode provocar o fenômeno de cavitação no momento em que essa pressão for igual ou menor a pressão de vapor do fluido (TURTON, 2012). Uma outra zona de baixa pressão pode ocorrer na face de sucção das pás do rotor (GÜLICH, 2008).

O fenômeno de cavitação pode ser visualmente observado com a criação de bolhas de vapor em uma região do escoamento. Esse processo é conhecido como nucleação (BRENNEN; BRENNEN, 2005; BINAMA; MUHIRWA; BISENGIMANA, 2016). O processo de nucleação leva o fluido que inicialmente apresentava uma fase, a ter duas fases escoando, o que pode causar, no que diz respeito a turbomáquinas, efeitos indesejados tais como redução de eficiência de bombeamento e oscilações de pressão de entrega (D'AGOSTINO; SALVETTI, 2017). Outros problemas causados em turbomáquina devido ao fenômeno de cavitação são os de natureza estrutural. Esses problemas ocorrem devido à implosão das bolhas criadas muito próximas às paredes da turbomáquina, que se colapsam e formam microjatos direcionados à parede, acabando por gerar micro fraturas ou imperfeições no material (D'AGOSTINO; SALVETTI, 2017; BINAMA; MUHIRWA; BISENGIMANA, 2016). O excessivo contato do material com regiões de cavitação acabam por desgastar-lo tornando o maquinário impossibilitado de operar (D'AGOSTINO; SALVETTI, 2017)(GÜLICH, 2008).

A cavitação deve ser fortemente evitada em bombas centrífugas para que não gerem instabilidades no escoamento, que podem levar a problemas de injeção de propelentes na câmara de combustão, o que diretamente implica em instabilidades de combustão (POPP et al., 2004). Nesse sentido, é intimamente prejudicial a missão de um foguete.

Para evitar o problema de cavitação, é muito comum e de grande importância a aplicação de um indutor, em bombas centrífugas de motores foguetes a propelentes líquidos (GAGLIARDE, 2020). O indutor é um componente de fluxo axial disposto na entrada da bomba, solidário ao eixo do impelidor (HUZEL, 1992), exemplificado na figura 1a. Este componente tem o objetivo de elevar a pressão estática do fluido na entrada do rotor, evitando o fenômeno de cavitação, assim permitindo o funcionamento ideal da bomba (D'AGOSTINO; SALVETTI, 2017)(GÜLICH, 2008). O componente beneficia também a redução de massa dos tanques e pressão de estoque dos fluidos propelentes (HONG et al., 2013).

Em um projeto de engenharia para a criação de um produto para um determinado propósito, inicia-se deste

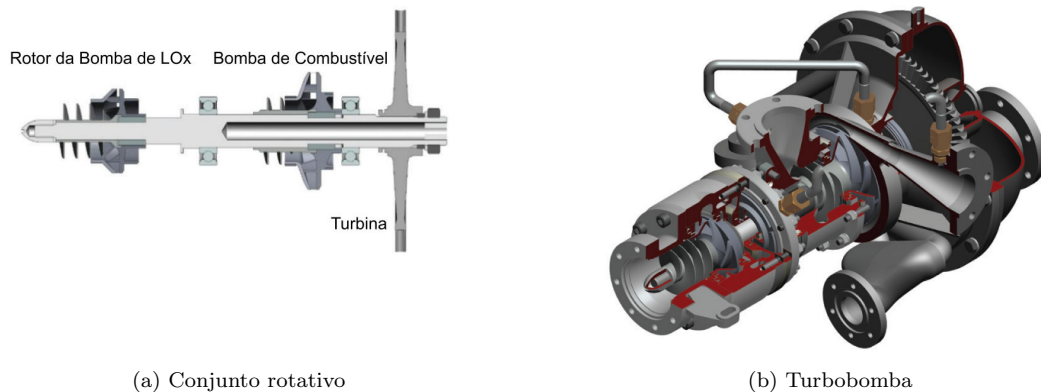


Figura 1: Turbobomba aplica no motor foguete L75. Adaptado de (ALMEIDA; PAGLIUCO, 2014)

o pré-projeto com a evolução do mesmo até o produto final, o qual atende aos requisitos propostos. Ao longo deste processo, ferramentas de análises de engenharia assistidas computacionalmente (CAE) são necessárias para o sucesso do projeto. Dentre as ferramentas no CAE, a fluidodinâmica computacional (do inglês, CFD) é largamente utilizada no estudo do escoamento, por meio de técnicas numéricas das soluções de equações que regem a dinâmica dos fluidos (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015).

No que diz respeito ao projeto das bomba centrífuga presentes no motor foguete L75, o uso da ferramenta da fluidodinâmica computacional é de extrema importância para a análise de escoamento, a fim de averiguar o correto funcionamento do projeto (ZINK et al., 2020).

A dinâmica dos fluidos é matematicamente modelada por um conjunto de "Equações Diferenciais Parciais não-lineares", conhecidas como as equações de Navier-Stokes (NS) (SCHLICHTING; GERSTEN, 2003). Essas equações apresentam alto grau de resolução para o problema do escoamento de fluidos, podendo descrever desde escoamento laminares, até os turbulentos em todas as escalas de turbulência (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015). Entretanto, ainda não foi-se apresentado uma solução analítica geral para estas equações que regem a dinâmica dos fluido. A menos de caso simples que fogem ao escopo de problemas complexos de engenharia, soluções possíveis destas equações só podem ser obtidas via métodos computacionais (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015)(VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007)

Dentro inúmeros métodos computacionais presentes para solucionar as equações de NS, o método dos volumes finitos se apresenta como o mais amplo método aplicado a soluções numéricas. Seu princípio de baseia na linearização das equações diferenciais em um sistema linear algébrico, impondo a divisão do volume de controle simulacional em uma malha computacional. Isso implica na obtenção de uma solução aproximada (ROYCHOWDHURY, 2020; MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015).

Em uma análise numérica de engenharia sobre o escoamento de fluidos, deve-se optar pela melhor relação possível entre informações obtidas do escoamento com o poder computacional exigido (WILCOX et al., 1998).

Uma solução direta das equações de NS, conhecido como DNS (Direct Numerical SSimulation), é extremamente exigente pois ela soluciona toda as escalas de resolução de um escoamento turbulento. Já uma abordagem reduzindo a resolução das escalas turbulentas presentes em um escoamento, como é o caso da abordagem LES (Large Eddy Simulation), apesar de menos exigente computacionalmente quando comparado ao DNS, ainda necessita de um alto poder computacional e para alguma problemas de engenharia torna-se inviável. Uma abordagem menos exigente computacionalmente entre as duas anteriormente apresentadas, que entrega boas informações sobre o escoamento dos fluidos, é a abordagem estatística das propriedades presentes no escoamento dos fluidos. Essa abordagem estatística é conhecida pela aplicação dos campos de velocidade e pressão médios nas equações de NS, resultado em um modelo equacional conhecido como "Reynolds Average Navier-Stokes" (RANS) (POPE; POPE, 2000; TENNEKES et al., 1972)

A fim de que a descrição teórica estatística da dinâmica do escoamento seja fiel à realidade física dos fluidos, um modelo de turbulência deve ser aplicado (SHAH et al., 2013; WILCOX et al., 1998). Os principais modelos estatísticos de turbulência devem ser aplicados junto as equações de RANS para assegurar que p "closure problem" da turbulência seja resolvido (TENNEKES et al., 1972). Os modelos de turbulência mais comuns em engenharia

são os modelos de uma equação, como o Spallart-Allmaras e o Baldwin-Lomax, e os modelos de duas-equações, k-epsilon, k-omega e k-omegaSST (POPE; POPE, 2000; TENNEKES et al., 1972).

Entretanto, para problemas de fluido dinâmica diferentes, certos efeitos físicos característicos são presentes, e um modelo de turbulência apropriado para capturar esses efeitos físicos deve ser selecionado (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Na literatura, há inúmeros trabalhos voltados somente nesta procura, como mostra Gagliarde (GAGLIARDE, 2020).

Além dos modelos de turbulência, outros modelos matemáticos podem ser acoplados as equações da diferenças que regem a fluidodinâmica, a fim de capturar outros efeitos físicos específicos. No que diz respeito ao estudo de cavitação no indutor da bomba centrífuga do motor L75, modelos de cavitação devem ser usados para capturar a formação de bolhas (BRENNEN; BRENNEN, 2005; D'AGOSTINO; SALVETTI, 2017).

Para capturar os efeitos de cavitação, uma simulação multifásica deve ser utilizada (BRENNEN; BRENNEN, 2005). Diversos termos fonte que caracterizam a modelagem da cavitação são disponíveis na literatura, sendo eles baseados no modelo homogêneo apresentado por Kubota, chamado "Bubble Two-Phase Flow" (NIEDZWIEDZKA; DR.-ING.HABIL; SOBIESKI, 2016). Dentre alguns dos termos fontes mais comuns, tem-se os de Merkle et al., Kunz et al. e Schnerr and Sauer, sendo esse último o primeiro modelo teórico sem a necessidade de parâmetros experimentais (NIEDZWIEDZKA; DR.-ING.HABIL; SOBIESKI, 2016).

Uma vez apresentado o cenário por trás do estudo do escoamento em uma bomba centrífuga e a importância desta área na engenharia, o presente estudo objetiva investigar o fenômeno de cavitação presente no indutor da bomba centrífuga de combustível do motor foguete líquido L75, representada na 1b.

A cavitação foi observada experimentalmente em ensaios produzidos em colaboração entre a Agência Espacial Brasileira (AEB) e o Centro Aeroespacial Alemão (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt - DLR). Posteriormente, Gagliarde (GAGLIARDE, 2020) obteve o mesmo resultado, via simulações numéricas, utilizando uma abordagem de escoamento permanente com o uso do método de múltiplos Referenciais Inerciais (MRF).

Deste modo, o presente trabalho intenciona contribuir com esse projeto, por meio da investigação mais aprofundada do fenômeno de cavitação no indutor, via uma simulação transiente com o acoplamento de uma modelagem de cavitação apropriada. Todo o estudo é pautado pelo uso do código aberto OpenFOAM, com validação a partir de dados experimentais do ensaio deste componente.

2 Objetivos

Objetiva-se uma investigação teórica e detalhada da ocorrência do fenômeno de cavitação, no componente indutor presente no motor foguete brasileiro L75. Essa investigação se pauta na aplicação em uma modelagem de escoamento multifásica, acoplada a métodos de simulação de turbomáquinas, a fim de capturar os efeitos transientes de cavitação na performance da bomba.

Faz parte do escopo do estudo: obtenção da geometria da bomba centrífuga e do indutor; parametrização da geometria do indutor; criação e estruturação da malha computacional; simulação do escoamento tridimensional no indutor com um algoritmo focado em escoamento multifásico apropriado para o caso em estudo, a aplicação de técnicas de simulação para turbomáquinas e a escolha de um modelo apropriado de turbulência. O estudo baseia-se no uso do software open source OpenFOAM, presente no cluster Titânio da UFABC.

3 Metodologia

O projeto de pesquisa é dividido em 3 etapas. Ao longo do período de trabalho, faz-se uma contínua e aprofundada revisão bibliográfica dos diversos fundamentos e conceitos necessários para o sucesso do estudo. Convém debates com o orientador e coorientador para aprofundamento ainda maior do discente. Ao longo do período de trabalho, será produzido relatório parcial e final. Por fim, no fechamento do estudo, será preparado um artigo para apresentação em congressos/encontros ou publicação em revista. Seguem as etapas:

1. Essa etapa pretende estar presente durante toda o trabalho pois entende-se ser a principal etapa. Nela reside: Revisão bibliográfica para maior aprofundamento dos conceitos que envolvem bombas centrífugas com indutores (1.a). Estudo aprofundado da física presente no fenômeno de cavitação, seguido do foco da sua ocorrência em bombas centrífugas (1.b). Estudo da modelagem multifásica, transiente do escoamento de fluidos incompressíveis e os principais "solvers" disponíveis dentro do OpenFOAM. Por fim selecionar um solver apropriado para o presente estudo (1.c).

2. Pre-Processamento - Obtenção e avaliação da geometria da bomba centrífuga do motor L75 com o indutor. Preparação da geometria, que consiste em modificações necessárias da mesma e a criação do domínio do volume de controle simulacional. Geração da malha computacional utilizando o cfMesh, preparação da malha em diferentes zonas (rotativas e estacionárias) e o acoplamento das zonas usando o código AMI (2.a).

Processamento - Com o solver multifásico selecionado na seção 1.c, e o pré-processamento finalizado, tem-se; Processamento 1: Simulação e validação numérica por meio de dados experimentais, usando o solver selecionado porém nesse caso "desligando" a modelagem multifásica, mais modelo de turbulência apropriado (2.b). Processamento 2: com a validação da simulação transiente anterior, aplicar a modelagem multifásica para a captura do fenômeno de cavitação e novamente validar com dados de cavitação obtidos experimentalmente (2.c).

3. Com as simulações validadas, extrair as informações possíveis para analisar o escoamento e inferir quais são os possíveis causadores de cavitação no indutor da bomba centrífuga. Ainda nessa etapa, avaliar quais são os possíveis parâmetros de projeto que podem ser ajustados a fim gerar solucionar o problema de cavitação (3.a). Finaliza-se com a conclusão de todo o trabalho por meio da criação do relatório final (3.b).

4 Viabilidade

Um trabalho anterior produzido pelo presente discente, sobre o estudo da influência do componente indutor no desempenho da bomba centrífuga de combustível aplicado ao motor foguete brasileiro a propelente líquido L75, capacitou-o para entender os conceitos e metodologias por trás do mundo da simulação numérica junto a análises de engenharia.

Com o intuito de aprofundar o trabalho que vem sendo produzido, o presente estudo tem por objetivo continuar a capacitação do discente em questão, agora em uma abordagem mais complexa misturando os conceitos anteriormente aprendidos com a modelagem do escoamento multifásico e transiente para a investigação da cavitação no componente indutor. Ao longo do trabalho, validações com dados experimentais serão produzidos para que o estudo seja validado. Deste modo, o presente trabalho visa contribuir dentro do escopo da graduação, com o programa espacial brasileiro (AEB) em parceria com o DLR.

Para tal, o estudo planeja ser feito com software livre para CAD/CAM e os softwares open source para criação de malha (cfMesh) e parametrização (FreeCAD) e simulação CFD (OpenFOAM). Sendo este último instalado no cluster Titânio da UFABC, em que o discente já possui acesso para pesquisas sobre simulação computacional.

5 Cronograma de Atividades

As atividades serão realizadas conforme apresentado na metodologia, e suas etapas estão dispostas na tabela ?? abaixo, na forma de um cronograma de atividades previstas para melhor representação de duração das atividades.

Tabela 1: Cronograma de atividades e suas ordens

Etapas	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.a	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1.b			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1.c			X	X								
2.a		X	X	X								
2.b				X	X	X						
2.c						X	X	X				
3.a							X	X	X	X		
3.b										X	X	X

Referências

- ALMEIDA, D. S. d.; PAGLIUCO, C. M. d. M. Development status of l75: A brazilian liquid propellant rocket engine. **Journal of Aerospace Technology and Management**, SciELO Brasil, v. 6, n. 4, p. 475–484, 2014.
- BINAMA, M.; MUHIRWA, A.; BISENGIMANA, E. Cavitation effects in centrifugal pumps-a review. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 6, n. 5, p. 52–63, 2016.
- BRENNEN, C. E.; BRENNEN, C. E. Fundamentals of multiphase flow. Cambridge university press, 2005.
- D'AGOSTINO, L.; SALVETTI, M. V. **Cavitation Instabilities and Rotordynamic Effects in Turbopumps and Hydroturbines: Turbopump and Inducer Cavitation, Experiments and Design**. [S.l.]: Springer, 2017. v. 575.
- DICK, E.; VIERENDEELS, J.; SERBRUYNS, S.; VOORDE, J. V. Performance prediction of centrifugal pumps with cfd-tools. **Task quarterly**, v. 5, n. 4, p. 579–594, 2001.
- DIXON, S. L.; HALL, C. **Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.
- GAGLIARDE, J. H. **OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO DE BOMBA CENTRÍFUGA APLICADA A MOTOR FOGUETE COM SOFTWARE LIVRE PARA CFD**. Dissertação (Mestrado) — INPE, São José dos Campos, 2020.
- GÜLICH, J. F. **Centrifugal pumps**. [S.l.]: Springer, 2008. v. 2.
- HONG, S.-S.; KIM, D.-J.; KIM, J.-S.; CHOI, C.-H.; KIM, J. Study on inducer and impeller of a centrifugal pump for a rocket engine turbopump. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 227, n. 2, p. 311–319, 2013.
- HUZEL, D. K. **Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines**. [S.l.]: AIAA, 1992. v. 147.
- MISHRA, D. **Fundamentals of Rocket Propulsion**. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab**. [S.l.]: Springer, 2015. v. 113.

- NIEDZWIEDZKA, A.; DR.-ING.HABIL, G. S. P.; SOBIESKI, W. Review of numerical models of cavitating flows with the use of the homogeneous approach. **Archives of Thermodynamics**, v. 37, 02 2016.
- POPE, S. B.; POPE, S. B. **Turbulent flows**. [S.l.]: Cambridge university press, 2000.
- POPP, M.; HULKA, J.; YANG, V.; HABIBALLAH, M. **Liquid Rocket Thrust Chambers: Aspects of Modeling, Analysis, and Design**. [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- RIBEIRO, M. V. F. **Metodologia de projeto e validação de motores foguete a propelente sólido**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013.
- ROYCHOWDHURY, D. **Computational Fluid Dynamics for Incompressible Flows**. [S.l.]: CRC Press, 2020.
- SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-layer theory**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2003.
- SHAH, S.; JAIN, S.; PATEL, R.; LAKHERA, V. Cfd for centrifugal pumps: a review of the state-of-the-art. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 51, p. 715–720, 2013.
- SIRIGNANO, W. A. **Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays**. 2. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.
- SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. **Rocket propulsion elements**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L.; LUMLEY, J. L. et al. **A first course in turbulence**. [S.l.]: MIT press, 1972.
- TURTON, R. K. **Principles of turbomachinery**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson education, 2007.
- WILCOX, D. C. et al. **Turbulence modeling for CFD**. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 1998. v. 2.
- ZINK, E. S.; BOURDON, D.; JUNIOR, V. N.; SIAS, D. F.; KITSCHE, W.; WAGNER, B. Study of manufacturing processes for liquid rocket turbopump impellers: test and analysis. **Journal of Aerospace Technology and Management**, SciELO Brasil, v. 12, 2020.