

ANÁLISE DO IMPACTO DA INCLUSÃO DE SPLITTER BLADES NO DESEMPENHO HIDRÁULICO DE UMA MOTOBOMBA CENTRÍFUGA MONOESTÁGIO ¹

Alan Cristofolini²
Claudinei Klann²

Resumo: Este trabalho teve como objetivo analisar o impacto da inclusão de pás intermediárias no desempenho hidráulico de uma bomba centrífuga monoestágio. Para isso, foram desenvolvidas três amostras de rotores com pás intermediárias correspondentes a 30%, 40% e 50% do comprimento das pás principais, além do rotor original utilizado como referência. A metodologia envolveu modelagem computacional tridimensional, fabricação dos rotores por impressão 3D, ensaios experimentais em bancada e simulações numéricas por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). A validação numérica indicou melhor aderência do modelo de simulação transiente *Sliding Mesh* em relação ao modelo permanente *Moving Reference Frame* (MRF), sendo o modelo transiente adotado como referência para a análise fluidodinâmica. Foram avaliadas as curvas de altura manométrica e rendimento, bem como os campos de pressão, velocidade e vetores do escoamento interno. Os resultados experimentais e numéricos demonstraram que a inclusão das *splitter blades* não proporcionou melhoria significativa na altura manométrica ou no rendimento da bomba, apresentando resultados próximos ao rotor original. O rotor sem *splitter blades* apresentou o melhor desempenho global, especialmente em termos de eficiência. Em vazões acima de 8 m³/h, a amostra com *splitter blades* de 50% apresentou queda mais acentuada de desempenho. As análises CFD indicaram regiões de baixa velocidade, recirculações, separação do escoamento e formação de estruturas do tipo *wake-jet*, sugerindo aumento das perdas hidráulicas internas. Conclui-se que, para as geometrias avaliadas, a simples inclusão de *splitter blades* não resultou em ganho de desempenho hidráulico da bomba estudada.

Palavras-chave: *splitter blades*; rotor; bomba centrífuga; CFD.

1 INTRODUÇÃO

As bombas centrífugas desempenham papel essencial em diversos setores industriais, como geração de energia, indústrias químicas, petroquímicas e sistemas de abastecimento. Em muitas dessas aplicações, esses equipamentos representam parcela significativa do consumo energético associado ao transporte de fluidos, o que torna a busca por melhorias de desempenho hidráulico e eficiência energética um tema recorrente na literatura científica (KHOEINI; SHIRANI; JOGHATAEI, 2019).

Entre as diferentes estratégias utilizadas para otimização de bombas centrífugas, as modificações geométricas no rotor vêm recebendo destaque nos últimos anos. Nesse cenário, a utilização de *splitter blades* (pás intermediárias) tem

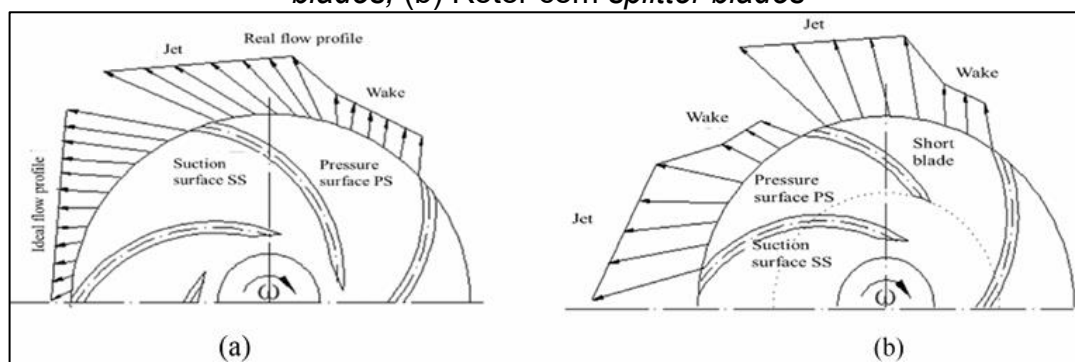
¹ Artigo apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica. 2026. Orientador: Prof. Charles Sóstenes Assunção, Doutor.

² Discente do curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina. alan.c1@aluno.ifsc.edu.br.

Discente do curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina. claudinei.k@aluno.ifsc.edu.br.

sido investigada como alternativa para melhorar o comportamento do escoamento no interior do rotor. De forma geral, essas pás adicionais podem contribuir para uma distribuição mais uniforme do campo de velocidades, além de reduzir regiões de separação do escoamento e minimizar estruturas de jato-esteira (*jet-wake*) presentes na saída do rotor (YUAN; YUAN, 2017). Segundo Shi et al. (2021), essa estrutura ocorre com maior frequência na saída do rotor e está associada a perdas hidráulicas internas da bomba. A formação da região de *wake* está relacionada à ação combinada da força de Coriolis, efeitos viscosos, desenvolvimento da camada limite, escoamentos secundários e separação do escoamento. Quando a diferença de velocidade entre as regiões de *jet* e *wake* é elevada, forma-se uma camada de cisalhamento na saída do rotor, aumentando os gradientes de velocidade, a mistura não uniforme do escoamento, e consequentemente as perdas hidráulicas. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática desse fenômeno, comparando rotor com e sem *splitter blades*.

Figura 1 – Representação esquemática da estrutura *jet-wake*: (a) Rotor sem *splitter blades*; (b) Rotor com *splitter blades*



Fonte: Shi et al. (2021, p.202)

Resultados experimentais e numéricos indicam que a aplicação de *splitter blades* pode proporcionar ganhos relevantes no desempenho hidráulico das bombas centrífugas. Estudos reportam aumento de altura manométrica, melhoria de eficiência e redução das flutuações de pressão no interior do equipamento, favorecendo maior estabilidade operacional do escoamento (YUAN; YUAN, 2017). Entretanto, os efeitos dessas pás dependem fortemente de sua configuração geométrica. Parâmetros como comprimento relativo, posicionamento e localização ao longo do canal do rotor influenciam diretamente o comportamento hidráulico da bomba. Em determinadas condições, configurações inadequadas podem inclusive reduzir o desempenho do rotor (ROSA; EMERICK, 2020).

Além disso, pesquisas recentes mostram que pequenas alterações no posicionamento das *splitter blades* podem modificar significativamente o desempenho da bomba. Algumas configurações favorecem maiores valores de eficiência, enquanto outras tendem a aumentar a altura manométrica do sistema. Também existem estudos demonstrando que a interação entre as *splitter blades* e componentes difusores pode ampliar os ganhos hidráulicos quando o conjunto é adequadamente projetado (KHOEINI; SHIRANI, 2018).

Embora existam avanços importantes relacionados à aplicação de *splitter blades*, ainda são relativamente limitados os trabalhos que combinam modelagem computacional, fabricação de protótipos e validação experimental em bancada. Nesse sentido, a utilização integrada de ferramentas de CFD, fabricação aditiva e

ensaios experimentais surge como uma abordagem interessante para avaliação do comportamento hidráulico de rotores modificados.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da utilização de *splitter blades* no desempenho de uma bomba centrífuga, avaliando diferentes comprimentos relativos das pás intermediárias por meio de uma abordagem integrada envolvendo modelagem computacional tridimensional, simulações numéricas, fabricação do rotor por impressão 3D e validação experimental em bancada.

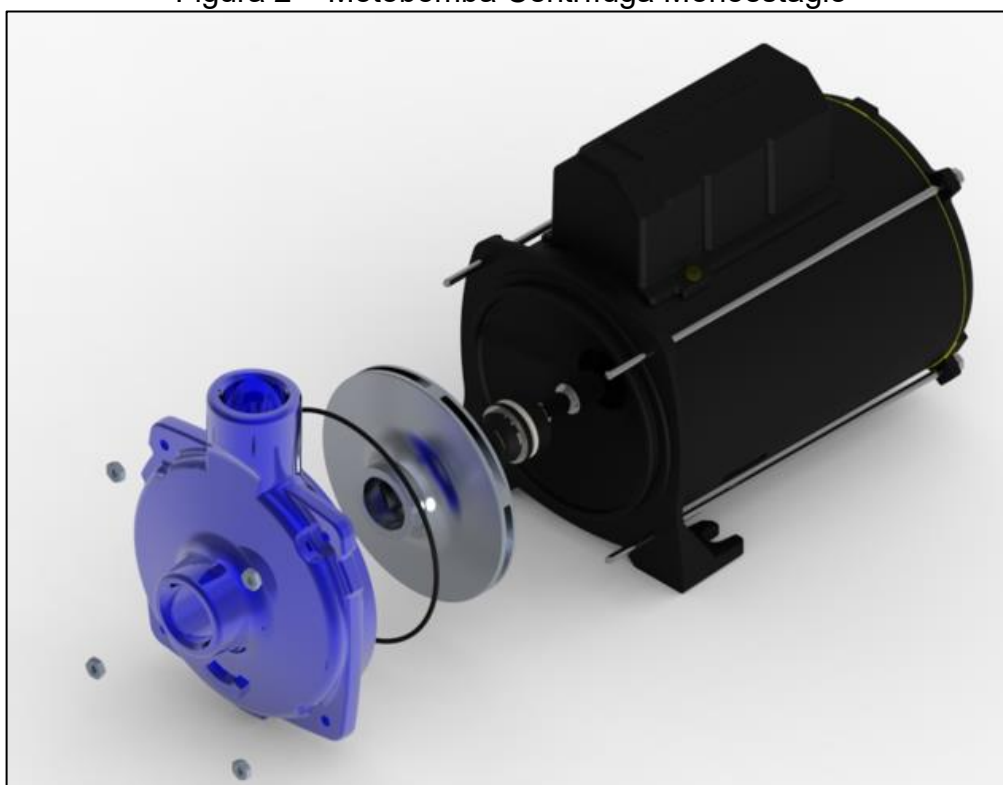
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos a motobomba utilizada nos ensaios, os instrumentos de medição empregados e as curvas características obtidas experimentalmente. Também será apresentado o processo de prototipagem dos rotores, incluindo a modelagem CAD e a fabricação por impressão 3D. Por fim, será descrita a metodologia CFD empregada nas simulações, bem como o método de comparação entre as curvas obtidas experimentalmente e as curvas simuladas.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA MOTOBOMBA

A motobomba utilizada no presente estudo é classificada como motobomba centrífuga monoestágio de eixo horizontal, equipada com rotor tipo fechado de fluxo radial. Conforme mostrado na Figura 2, o conjunto é apresentado em vista explodida, permitindo a visualização detalhada de seus componentes internos.

Figura 2 – Motobomba Centrífuga Monoestágio



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

O motor acoplado à motobomba possui potência nominal de 1 cv (0,75 kW), tensão de alimentação de 220 V, frequência de 60 Hz e rotação nominal de 3450 rpm.

Quanto às configurações hidráulicas, a motobomba apresenta conexões de sucção e recalque com bitolas de 1 polegada, vazão máxima de 14,5 m³/h e altura manométrica máxima de 26 mca (*shut-off*). O ponto de melhor eficiência (*BEP – Best Efficiency Point*) deste produto corresponde a uma vazão de 6,77 m³/h em 19 mca.

2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS ROTORES ORIGINAL E DESENVOLVIDOS

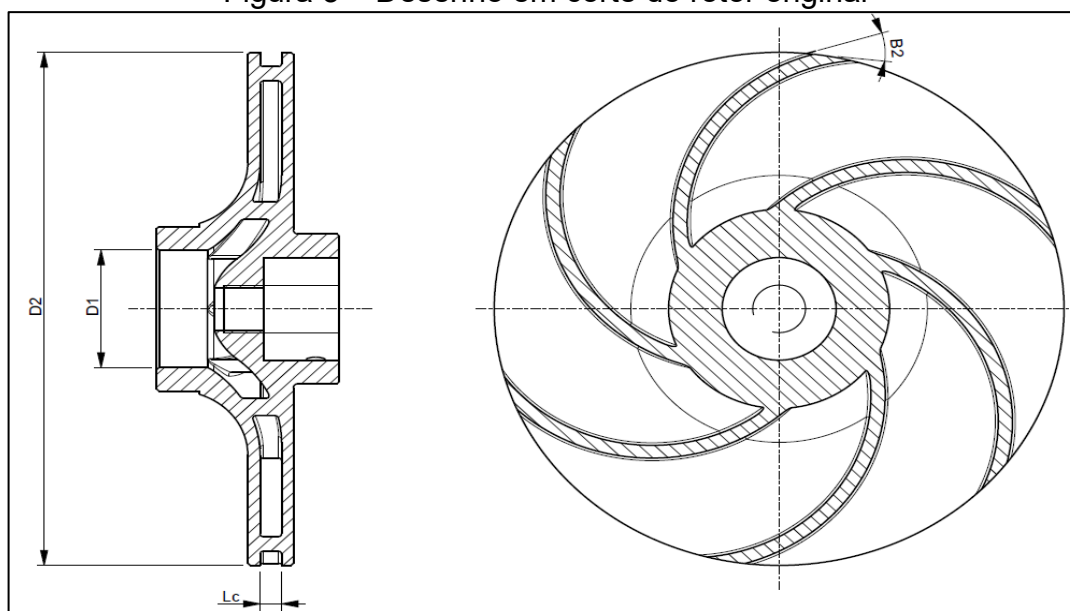
O rotor original tem suas principais dimensões geométricas apresentadas na Tabela 1 e sua representação gráfica em corte na Figura 3.

Tabela 1 – Dimensões geométricas do rotor original

Diâmetro externo – D2 (mm)	120,0
Diâmetro do bocal de sucção – D1 (mm)	27,5
Número de pás – z	6
Largura do canal – Lc (mm)	4,5
Ângulo de saída das pás – β_2 (°)	23,0

Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Figura 3 – Desenho em corte do rotor original



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

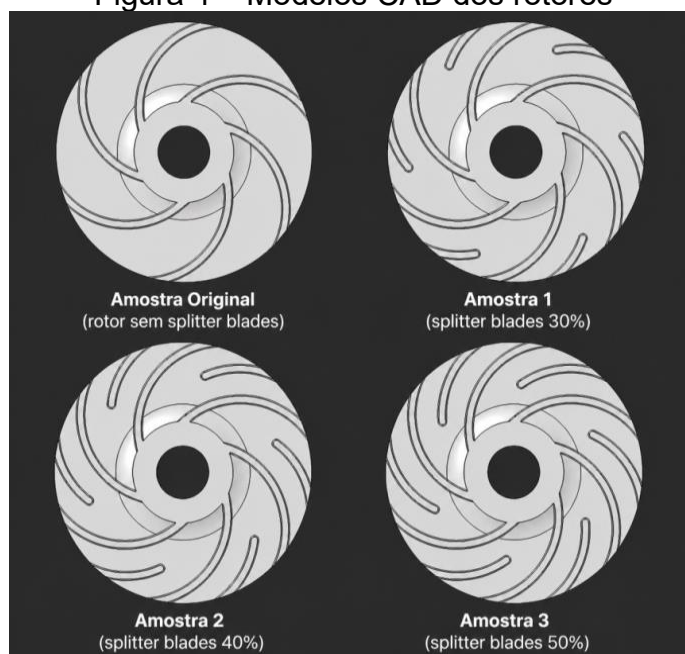
Os novos rotores foram desenvolvidos utilizando os mesmos parâmetros geométricos do rotor original, diferindo apenas pela inclusão de *splitter blades* com comprimentos equivalentes a 30% (Amostra 1), 40% (Amostra 2) e 50% (Amostra 3) do comprimento total das pás principais. As *splitter blades* foram posicionadas entre as pás originais. Dessa forma, o presente estudo avalia o comportamento hidráulico dos quatro rotores analisados.

2.3 MODELAGEM CAD E PROTOTIPAGEM 3D

A modelagem tridimensional dos rotores foi realizada utilizando o *software* PTC Creo 8. A Figura 4 apresenta os quatro protótipos modelados computacionalmente, denominados Amostra original (rotor sem *splitter blades*), Amostra 1 (*splitter blades* de 30%), Amostra 2 (*splitter blades* de 40%), Amostra 3 (*splitter blades* de 50%). Após a conclusão da modelagem, os arquivos no formato .prt foram exportados para o formato .stl (*Standard Tessellation Language*) compatível com o processo de impressão 3D.

A fabricação dos rotores foi realizada utilizando a impressora 3D Anycubic Photon Mono 4K, baseada na tecnologia LCD de fotopolimerização. O equipamento opera com radiação ultravioleta na faixa de 405 nm, sendo compatível com a resina fotopolimérica Anycubic Tough Resin 2.0 utilizada na fabricação dos protótipos.

Figura 4 – Modelos CAD dos rotores

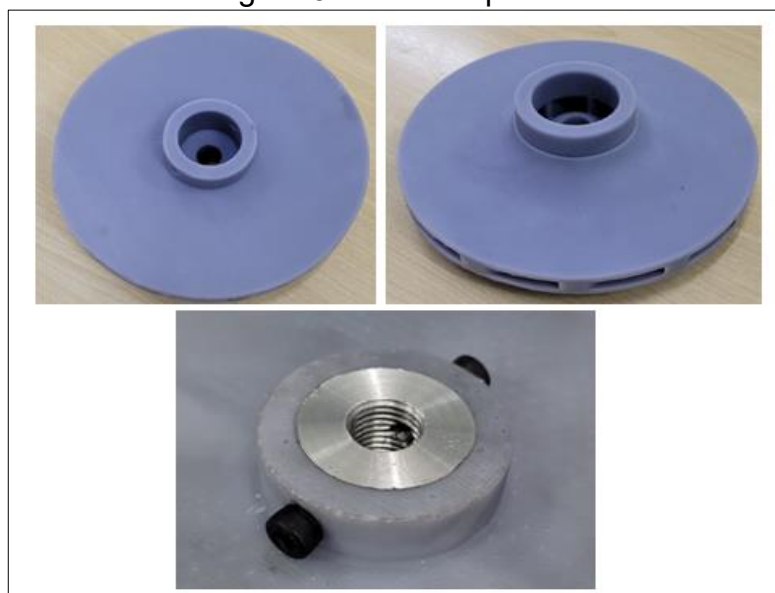


Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

A resina empregada foi selecionada devido às suas propriedades mecânicas, destacando-se elevada tenacidade, resistência ao impacto e baixa fragilidade quando comparada às resinas fotopoliméricas convencionais.

Para possibilitar a montagem dos rotores no eixo do motor, foi fabricada uma bucha em alumínio com diâmetro de 24 mm e furação compatível com a rosca do eixo motriz. A bucha foi inserida no rotor impresso, conforme ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 – Rotor impresso



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

2.4 ENSAIOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados na bancada de um laboratório de motobombas de uma empresa de Joinville/SC. A norma utilizada para o procedimento é a ISO 9906:2012.

Durante os ensaios, a motobomba operou na condição afogada, com a linha de sucção permanentemente preenchida com água. A vazão do sistema foi controlada por meio de uma válvula do tipo gaveta instalada na linha de recalque, permitindo a obtenção dos diferentes pontos de operação da motobomba.

Inicialmente, visando à estabilização térmica do motor, a motobomba foi mantida operando na condição de vazão máxima durante 10 minutos. Na sequência, foram iniciados os procedimentos de aquisição dos dados hidráulicos e elétricos em 12 pontos da curva característica da bomba. Para cada ponto, foram realizadas 10 leituras para análise da média e desvio padrão, aumentando a confiabilidade dos resultados experimentais. A faixa de vazão avaliada foi de 0 m³/h a 13,5 m³/h.

Para medição das grandezas hidráulicas e elétricas, utilizaram-se os instrumentos de medição apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Instrumentos de medição (continua)

Instrumento de medição	Variável medida	Faixa de medição	Modelo
Medidor eletromagnético de vazão	Vazão (m ³ /h)	6 à 25 m ³ /h	MAG 6000 / Siemens
Medidor eletromagnético de vazão	Vazão (m ³ /h)	0 à 6 m ³ /h	MAG 6000 / Siemens
Transdutor de pressão de sucção	Metros (mca)	-10 a 10 mca	PSI-420 / Zurich

Instrumento de medição	Variável medida	Faixa de medição	Modelo
Transdutor de pressão de recalque	Metros (mca)	0 a 60 mca	PSI-420 / Zurich
Termopar tipo J	Temperatura (°C)	0 à 760 °C	TM-J/6X300-1/2-KNC
Tacômetro	Rotação (rpm)	0,5 à 19999 rpm	MDT-2238C / Minipa
Analizador de energia	Grandezas elétricas	-	SICAM Q200 / Siemens

Fonte: Elaborado pelos próprios autores

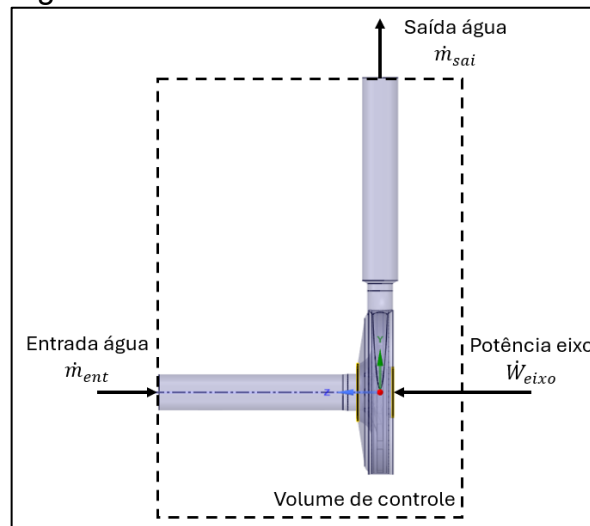
2.5 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A modelagem e simulação numérica CFD foi realizada no *software* Ansys Fluent visando investigar o comportamento do escoamento interno nos rotores com e sem *splitter blades*.

O modelo computacional considera as seguintes hipóteses:

- No volume de controle entre a sucção e recalque, o sistema é considerado em regime permanente, conforme a Figura 6.
- Escoamento tridimensional
- Escoamento incompressível
- Escoamento contínuo. Desprezando vazios e escoamentos multifásicos
- Escoamento isotérmico
- A densidade e viscosidade do fluido são consideradas constantes durante todo o escoamento, sendo a densidade de 998,2 Kg/m³ e a viscosidade de 1,003x10⁻³ Kg/ms.

Figura 6 – Volume de controle do sistema



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Foram avaliadas duas abordagens de modelagem numérica para representação da rotação do rotor. A primeira consiste no modelo estacionário Moving Reference Frame (MRF), no qual os efeitos da rotação são representados por meio de um referencial rotativo. A segunda abordagem utiliza o modelo transiente *Sliding Mesh*, que considera a rotação física do domínio de malha associado ao rotor ao longo do tempo.

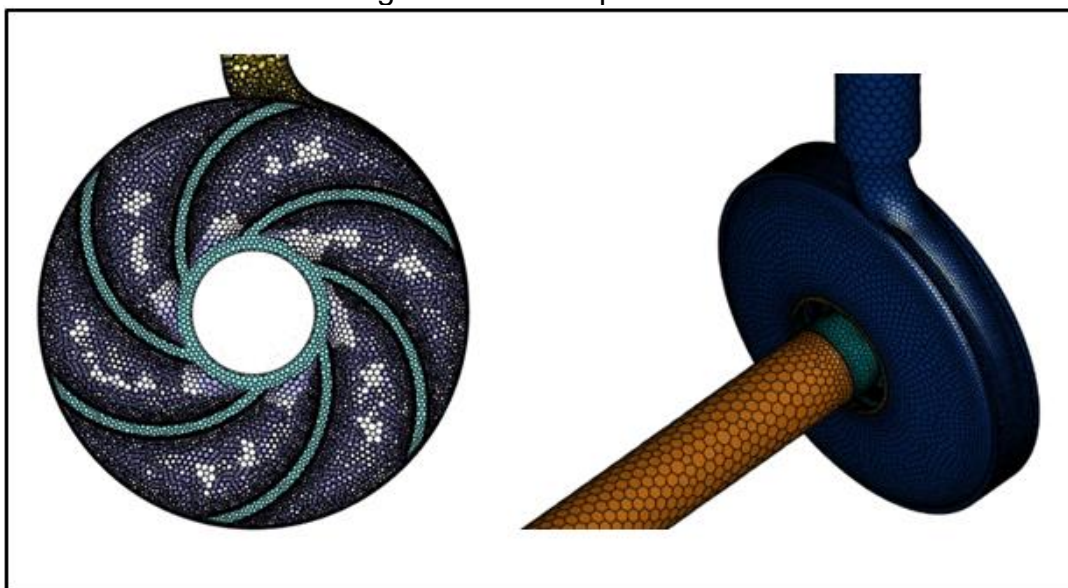
A definição da estratégia de simulação foi realizada por meio da comparação entre os resultados experimentais do rotor original e os resultados obtidos pelas duas abordagens numéricas, visando identificar o modelo capaz de representar com maior precisão o comportamento hidráulico da bomba.

O modelo foi desenvolvido considerando simplificações geométricas no rotor e na voluta da bomba, removendo chanfros, arredondamentos, detalhes de fixação, como parafusos e demais discontinuidades geométricas que não possuem influência significativa no comportamento do escoamento.

Devido à elevada complexidade geométrica do domínio computacional, caracterizada pela presença de múltiplas arestas, canais hidráulicos e superfícies curvas, optou-se pela utilização de malha poliédrica (Figura 7). Esse tipo de malha apresenta maior facilidade na obtenção de elementos de boa qualidade para geometrias complexas, além de proporcionar maior robustez numérica quando comparada às malhas convencionais (ANSYS FLUENT; 2025).

Para o domínio computacional geral, foi adotado tamanho máximo dos elementos de 0,006 m e tamanho mínimo de 0,001 m.

Figura 7 – Malha poliédrica

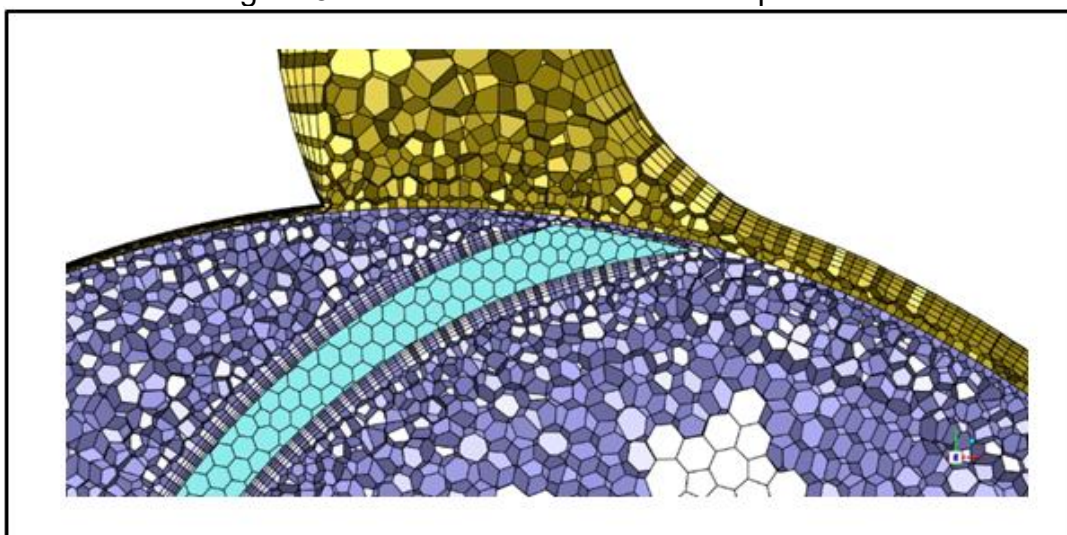


Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Com intuito de melhor representar o gradiente de velocidades do escoamento próximo às paredes, região na qual a velocidade do fluido tende a zero devido a condição de não deslizamento (*no-slip*), foi realizado refinamento localizado da malha nessas superfícies.

Esse refinamento permite ao modelo de turbulência representar de forma mais precisa o perfil de velocidades na camada limite próxima às paredes. Para essa finalidade, foram utilizadas malhas prismáticas (*prism layers*) ilustradas na Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Refinamento da malha nas paredes

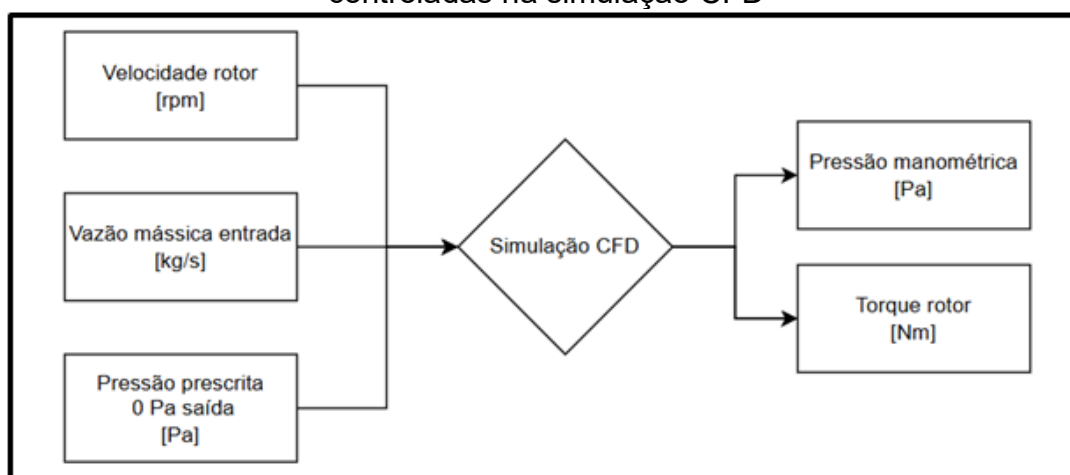


Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Como métrica de qualidade da malha, utilizou-se o parâmetro de ortogonalidade dos elementos poliédricos, cujo valor ideal é próximo de 1. Segundo o guia do usuário do *Ansys Fluent* (2025), baixos valores de ortogonalidade (menores que 0,1) podem comprometer a estabilidade numérica e a convergência da solução. Dessa forma, buscou-se manter valores superiores a 0,15 ao longo do domínio computacional, visando garantir adequada robustez numérica das simulações.

Conforme ilustrado na Figura 9, foram definidos como dados de entrada da simulação a velocidade de rotação do rotor, a vazão mássica na entrada e a pressão prescrita na saída do rotor. Como variáveis de saída são a pressão manométrica entre sucção e recalque e o torque gerado no rotor.

Figura 9 – Representação esquemática das condições de contorno e variáveis controladas na simulação CFD



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

O modelo de turbulência adotado nas simulações foi o SST $k-\omega$ (*Shear Stress Transport*). Esse modelo combina vantagens dos modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ nas regiões próximas a paredes e realizando transição gradual para o modelo $k-\epsilon$ nas regiões afastadas da camada limite (ANSYS, 2025).

Segundo Wilcox (2006), o modelo $k-\varepsilon$ utiliza uma aproximação dos tensores de Reynolds baseada na hipótese de Boussinesq, apresentando boa precisão para escoamentos com elevados números de Reynolds. Entretanto, esse modelo possui limitações na representação dos efeitos próximos as paredes (KUMAR, 2018 *apud* VINCI, 2020). Já o modelo $k-\omega$ apresenta melhor desempenho na modelagem da camada limite e em regiões próximas as superfícies solidas (SOARES, 2006 *apud* VINCI, 2020).

O modelo SST $k-\omega$ apresenta elevada precisão na investigação numérica do escoamento interno em bombas centrífugas (SHOJAEEFARD et al., 2012), sendo também amplamente utilizado em estudos semelhantes realizados por Alemi et al. (2015) e Li et al. (2018). Dessa forma, sua utilização neste trabalho buscou proporcionar maior precisão na representação dos fenômenos fluidodinâmicos associados ao escoamento interno da motobomba.

Para a discretização temporal das simulações transientes, adotou-se passo de tempo correspondente a 1° de rotação do rotor. Considerando a rotação nominal da motobomba próxima de 3500 rpm, equivalente a aproximadamente 58,33 rps, obteve-se período de uma revolução completa igual a 0,01714 s. Dessa forma, foi utilizado passo de tempo de 4×10^{-5} s, resultando em deslocamento angular aproximado de 1° por passo de tempo.

No modelo estacionário MRF, a discretização temporal foi realizada utilizando a técnica Pseudo-Transiente, na qual o passo de tempo é ajustado automaticamente pelo solver visando maior estabilidade numérica e convergência da solução.

A discretização espacial das equações de transporte no modelo transiente foi realizada utilizando esquema numérico *upwind* de segunda ordem. Já a discretização temporal foi conduzida utilizando esquema implícito de primeira ordem.

O acoplamento entre os campos de pressão e velocidade foi realizado utilizando o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*).

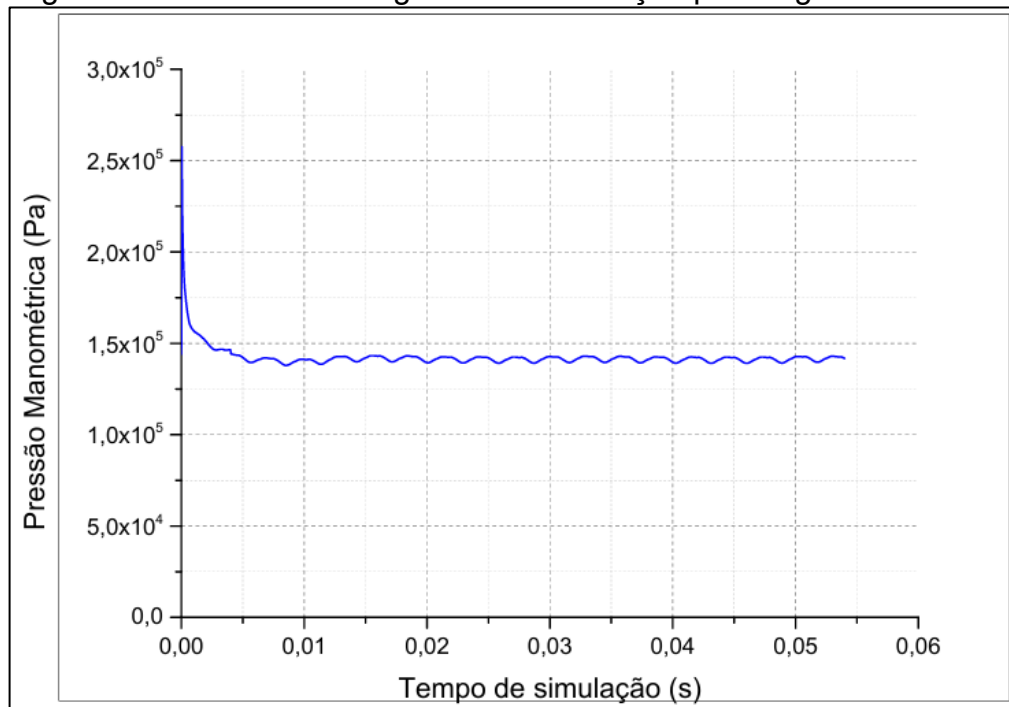
Para análise de convergência do modelo transiente com malha móvel (*Sliding Mesh*), adotaram-se resíduos inferiores a 1×10^{-4} em cada passo de tempo, além do monitoramento da estabilização da pressão manométrica entre sucção e recalque ao longo da simulação.

No modelo estacionário *Moving Reference Frame* (MRF), o critério de convergência foi baseado na estabilização da pressão manométrica obtida entre as regiões de sucção e recalque da bomba.

Na Figura 10 apresenta um exemplo da convergência da pressão manométrica ao longo do tempo de simulação para um ponto de operação da curva característica utilizando o rotor de referência (original).

Para todos os pontos de operação analisados buscou-se garantir a convergência das variáveis monitoradas antes da obtenção dos resultados finais da simulação.

Figura 10 – Gráfico convergência da simulação para regime transiente



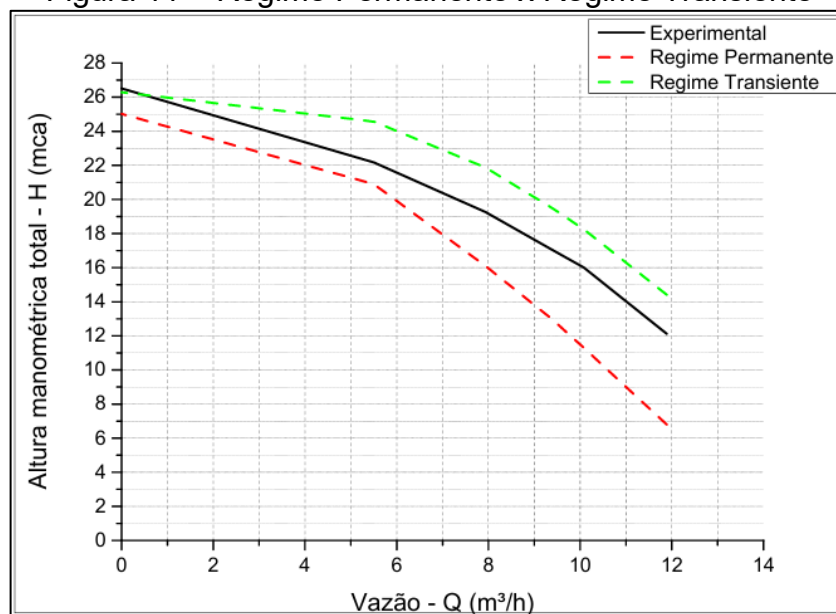
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A Figura 11 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos por meio das simulações numéricas em regime permanente e transiente para a relação entre vazão e altura manométrica total da bomba. Observa-se que a curva obtida em regime transiente apresentou maior aderência aos resultados experimentais quando comparada à simulação em regime permanente.

Figura 11 – Regime Permanente x Regime Transiente

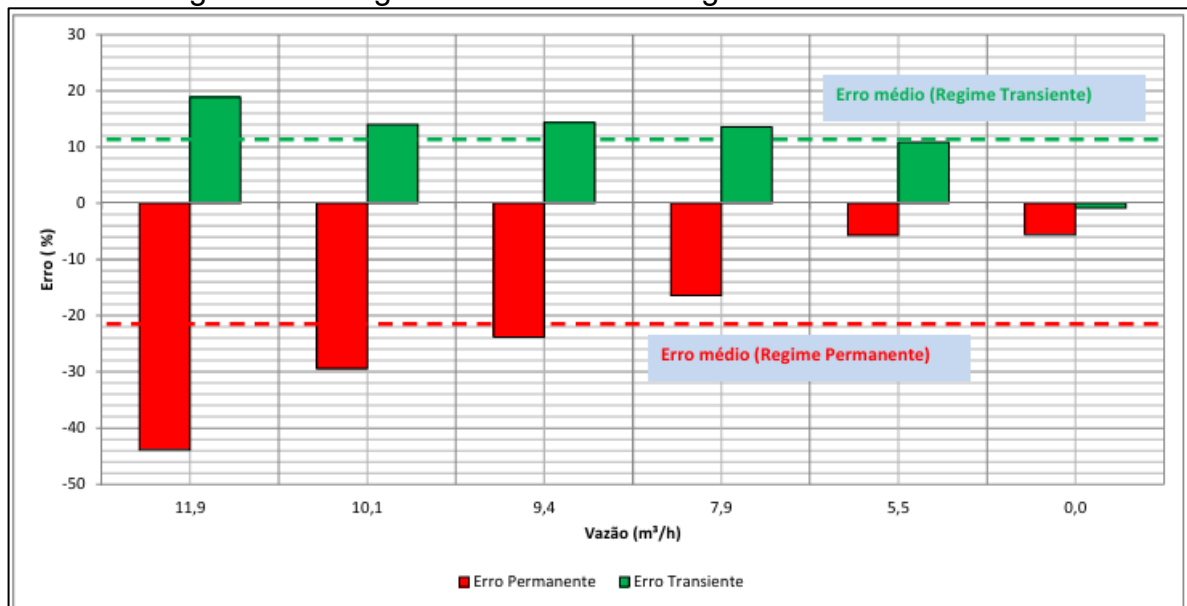


Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Segundo Shigemitsu, Fukutomi e Kaji (2011), diferenças entre os resultados experimentais e numéricos obtidos em simulações em regime permanente podem estar associadas à separação do escoamento em condições de vazão parcial. Esse fenômeno dificulta a representação adequada das estruturas de escoamento presentes no interior da bomba, indicando a necessidade da realização de análises em regime transiente para aumentar a precisão dos resultados numéricos.

A análise dos erros percentuais, apresentada pela Figura 12, reforça a escolha do modelo transiente como referência para discussão dos resultados numéricos. O regime permanente apresentou erros negativos mais intensos em diversos pontos da curva, resultando em erro médio de -20,8%, indicando subestimação da altura manométrica. O regime transiente, embora não elimine completamente as diferenças em relação ao experimento, resultando em erro médio de 11,8%, apresentou menor desvio médio e melhor coerência com o comportamento global da bomba. Dessa forma, os resultados a seguir consideram prioritariamente a simulação transiente.

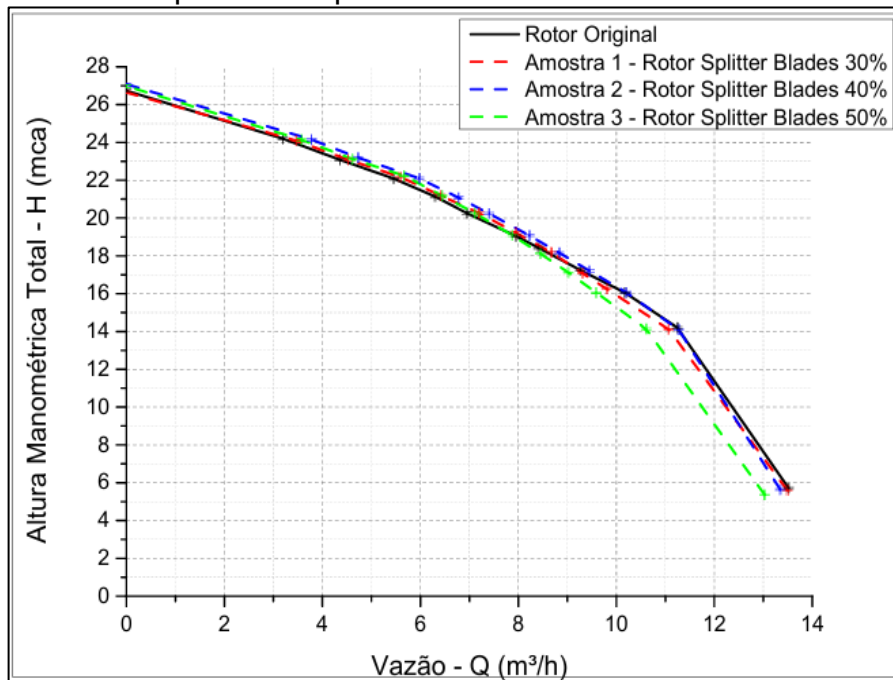
Figura 12 – Regime Permanente x Regime Transiente - Erros



3.2 COMPARAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas de altura manométrica em função da vazão apresentaram o comportamento característico de bombas centrífugas, com redução da altura manométrica total à medida que a vazão aumenta. Esse fenômeno ocorre principalmente em razão do aumento das perdas hidráulicas internas e da maior dificuldade do rotor em transferir energia ao fluido em condições de vazão elevada (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2014). A Figura 13 apresenta as curvas obtidas experimentalmente para o rotor original e para as configurações contendo *splitter blades* com comprimentos equivalentes a 30%, 40% e 50% da pá principal.

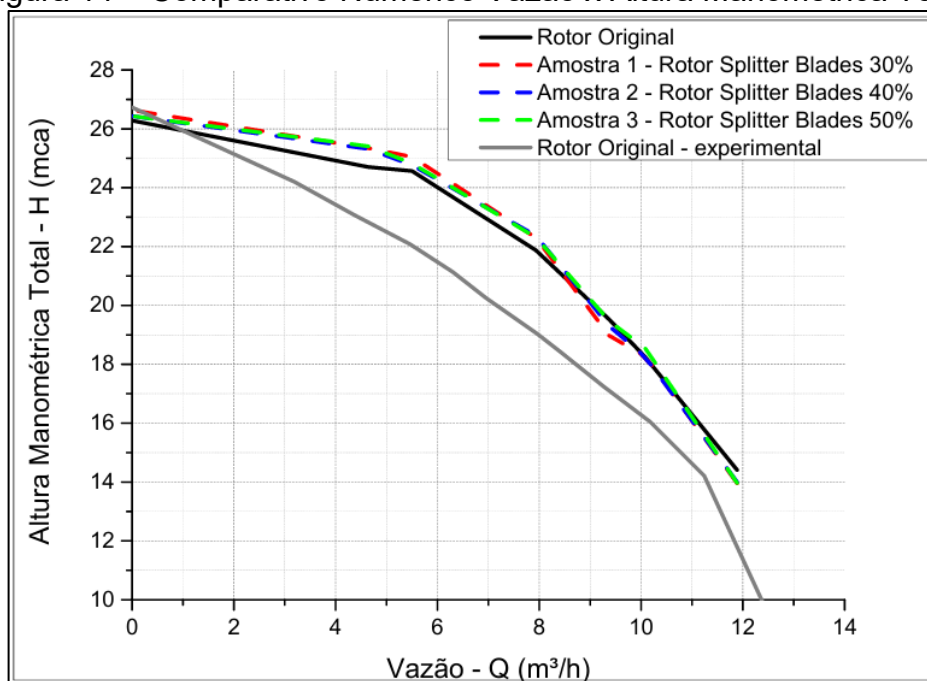
Figura 13 – Comparativo Experimental Vazão x Altura Manométrica Total



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Já nos resultados numéricos, a curva de altura manométrica também indica um comportamento próximo entre os rotores com *splitter blades* e o original. Os resultados apresentados na Figura 14 mostram uma pequena superioridade dos rotores com *splitter blades* em vazões até 8 m³/h. Entretanto, é uma pequena variação entre as geometrias, indicando que as pás modificam localmente o escoamento, mas não o suficiente para gerar uma alteração relevante na capacidade de recalque da bomba. Para maiores vazões, os rotores com *splitter blades* novamente ficaram pouco abaixo do rotor original.

Figura 14 – Comparativo Numérico Vazão x Altura Manométrica Total



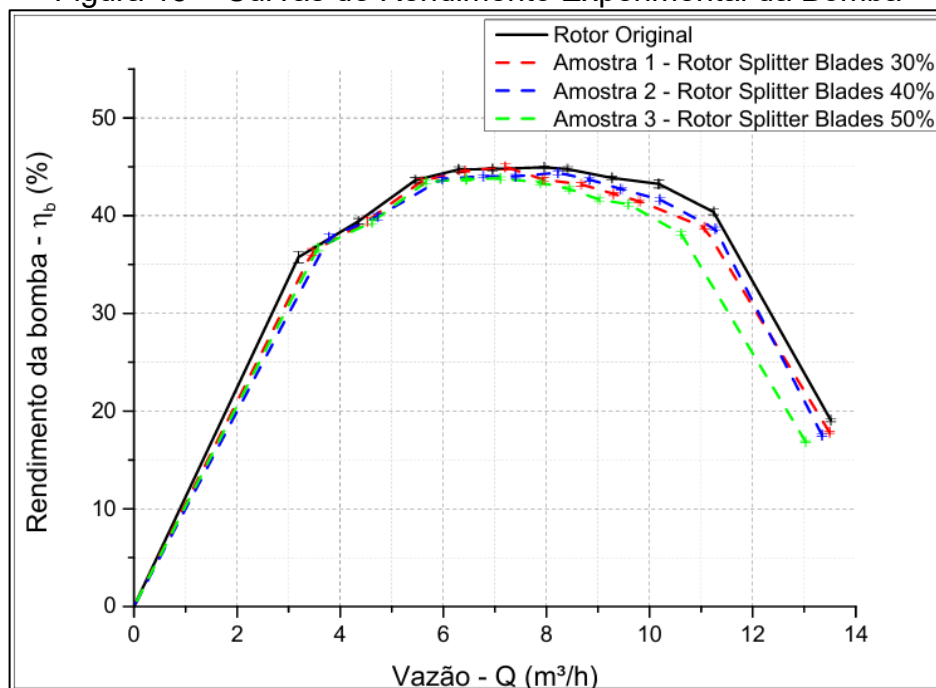
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

3.3 ANÁLISE DO RENDIMENTO

Rendimento é a medida que avalia a capacidade do conjunto de converter potência fornecida ao eixo em energia útil. No caso de bombas centrífugas, essa energia útil corresponde à energia hidráulica acrescida ao fluido através de aumento de pressão, altura manométrica e velocidade (ESTEVAM, 2017). Logo, a análise de rendimento é a chave para entender se a alteração geométrica dos rotores promoveu uma melhoria efetiva do desempenho da bomba.

A Figura 15 mostra o gráfico dos rendimentos dos 4 modelos de rotores na análise experimental. Os gráficos mostram que o rotor original apresentou maiores valores de rendimento em toda a faixa analisada, atingindo um rendimento próximo à 45% no BEP. Os rotores com *splitter blades* permaneceram com resultados ligeiramente abaixo do rotor original, embora não sejam diferenças elevadas, a análise experimental indica que a simples inclusão de *splitter blades* não resultou em um aumento global no rendimento da bomba.

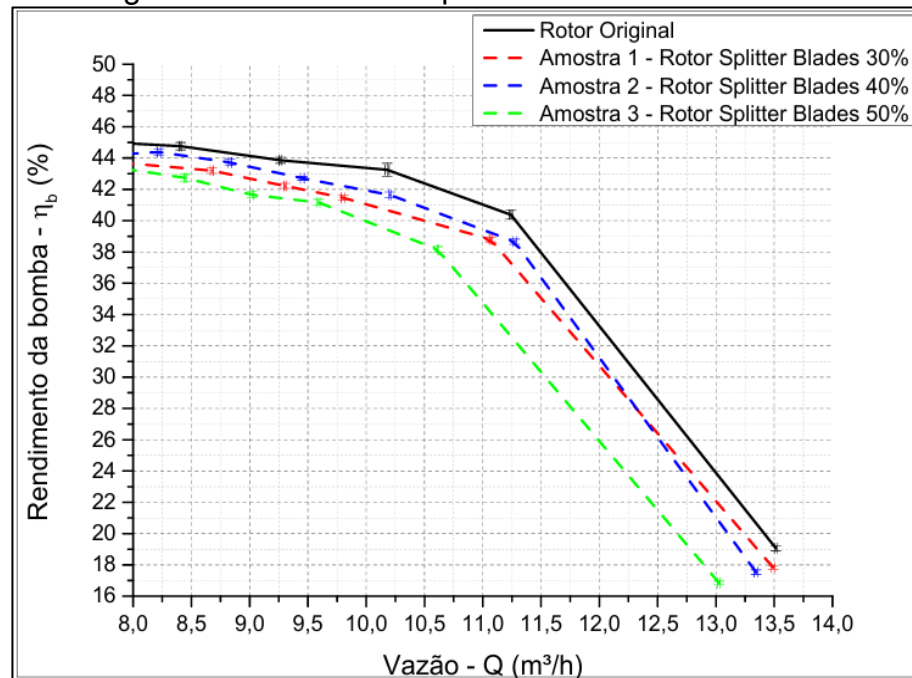
Figura 15 – Curvas de Rendimento Experimental da Bomba



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Na Figura 16 está exposto um detalhamento do gráfico no levantamento experimental para maiores vazões. Esse detalhamento evidencia a perda de desempenho dos rotores com as *splitter blades*, com queda mais acentuada na amostra com pás de 50% de comprimento, indicando que o comprimento relativo das pás pode elevar as perdas internas nessa faixa operacional. Esse comportamento mostra que, para a geometria estudada, as *splitter blades* não foram adequadamente otimizadas para elevar, ou até mesmo manter, a eficiência da bomba em condições de maior vazão.

Figura 16 - Rendimento para Grandes Vazões



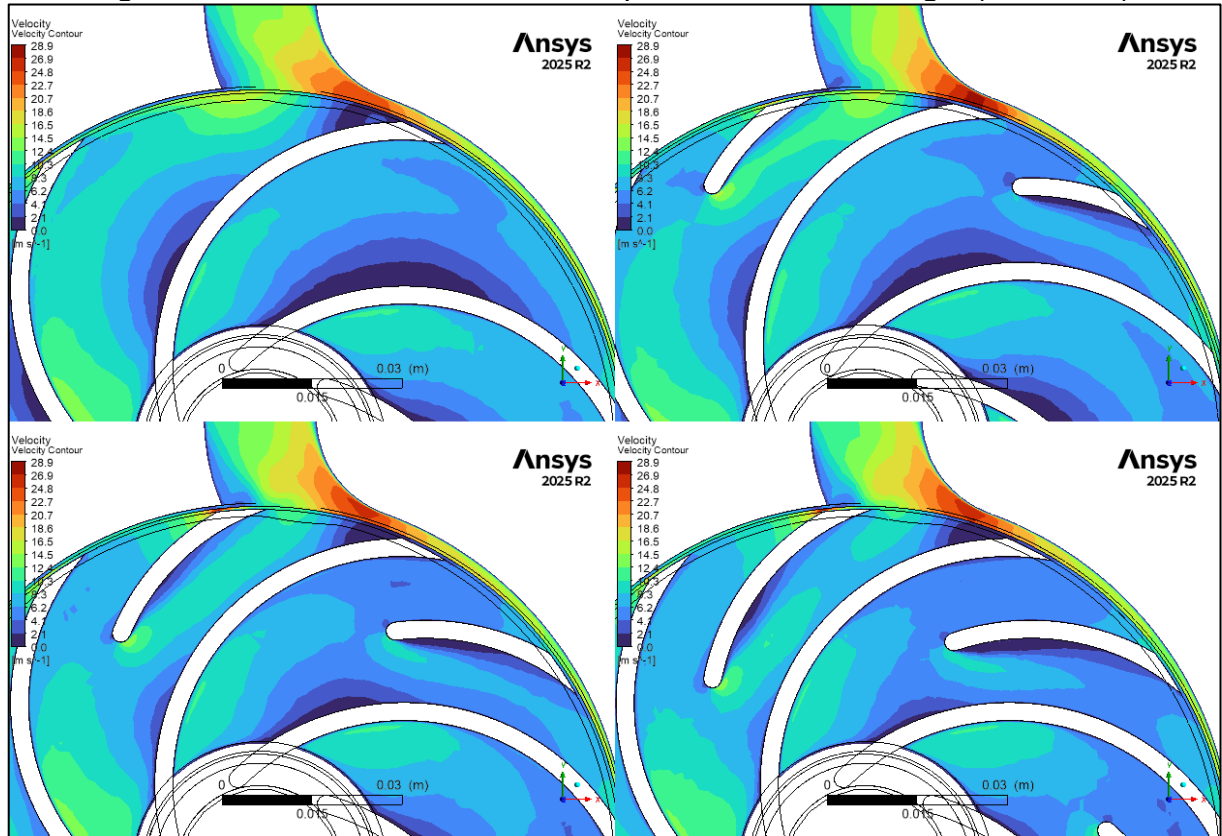
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

3.4 ANÁLISE FLUIDODINÂMICA E CORRELAÇÃO COM O DESEMPENHO HIDRÁULICO

A análise dos campos de velocidade, vetores e pressão obtidos por CFD permite identificar evidências associadas às perdas de rendimento observadas experimentalmente nos rotores com *splitter blades*. Os padrões de escoamento observados são coerentes com os mecanismos de perda descritos por Gad et al. (2024), que relacionam as perdas de energia em bombas centrífugas à presença de regiões de *wake-jet*, separação, recirculação, gradientes elevados de velocidade e tensões de cisalhamento junto às paredes.

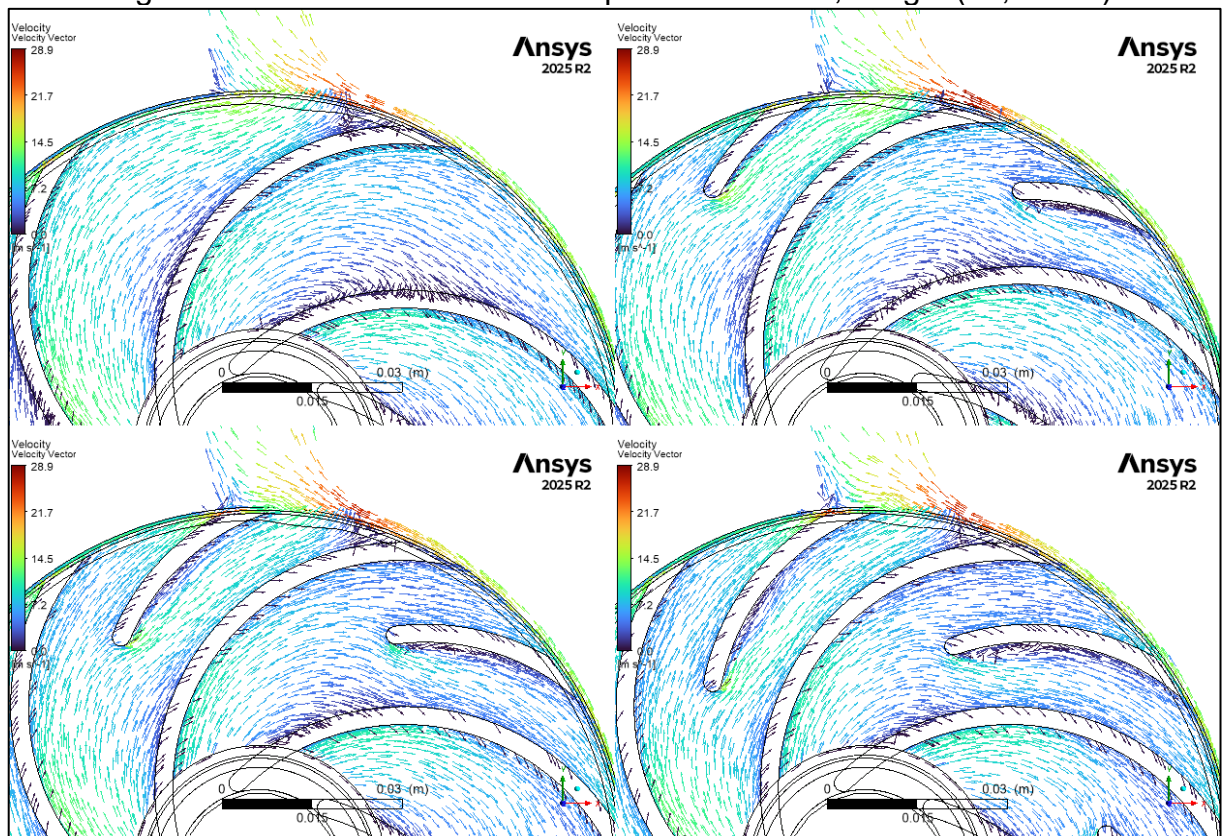
Na condição de maior vazão analisada, correspondente a 3,30 kg/s, aproximadamente 11,9 m³/h, os contornos de velocidade apresentados na Figura 17 evidenciam intensa aceleração do fluido na região de saída do rotor e na transição para a voluta. Simultaneamente, permanecem regiões de menor velocidade no interior dos canais, principalmente próximas às superfícies das pás e às extremidades das *splitter blades*. Essa distribuição demonstra uma significativa não uniformidade do escoamento na saída do rotor, caracterizada pela coexistência de regiões aceleradas e regiões de baixa velocidade, comportamento associado à formação de estruturas do tipo *wake-jet*.

Figura 17 – Contornos de velocidade para vazão de 3,30 kg/s (11,9 m³/h)



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 18 – Vetores de velocidade para vazão de 3,30 kg/s (11,9 m³/h)



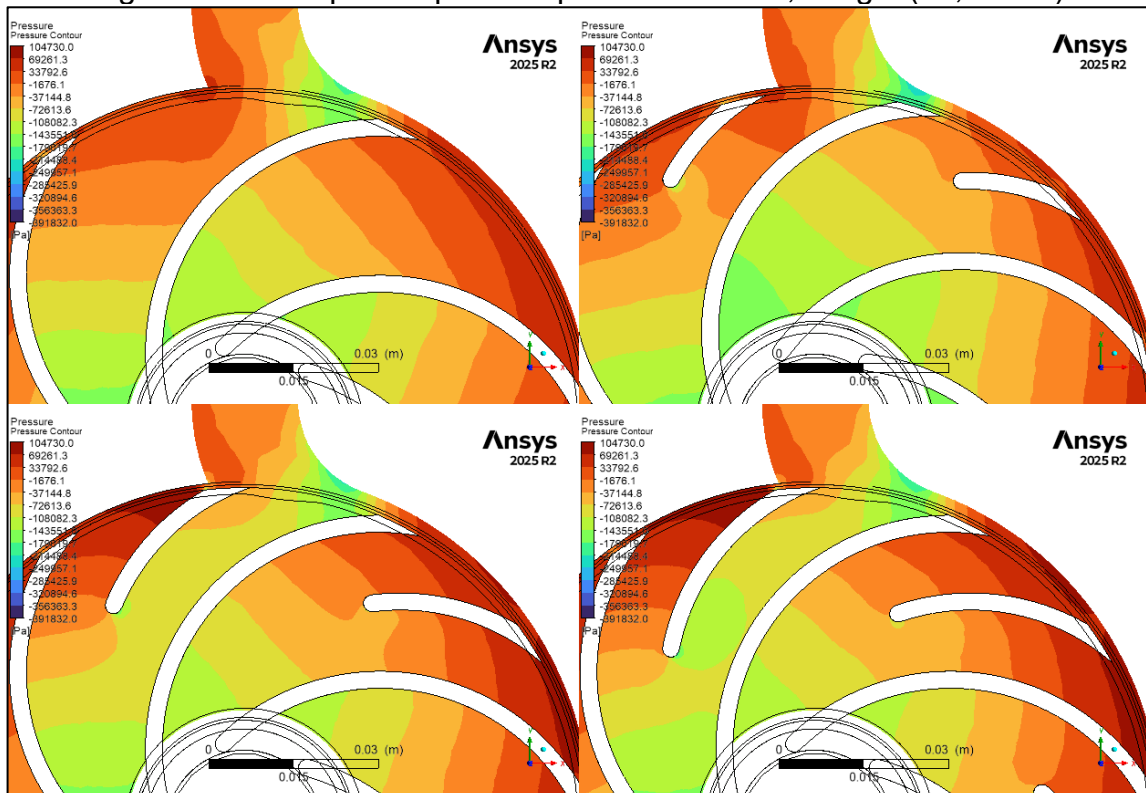
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Os vetores de velocidade apresentados na Figura 18 complementam essa análise ao indicar que, apesar de o escoamento permanecer predominantemente aderido às pás nessa condição operacional, ocorre concentração dos vetores de maior magnitude na região de descarga do rotor. Nos rotores com *splitter blades*, observa-se uma redistribuição local da direção do escoamento nas proximidades das pás intermediárias, indicando que essas superfícies modificam a trajetória do fluido dentro dos canais. Embora essa alteração não caracterize uma recirculação intensa, ela contribui para tornar o campo de velocidades menos uniforme.

Os campos de pressão da Figura 19 confirmam essa interpretação. Verifica-se o aumento progressivo da pressão ao longo do escoamento radial, com maiores valores próximos à periferia do rotor e à região de descarga para a voluta, comportamento característico de bombas centrífugas. Entretanto, nos rotores com *splitter blades*, a distribuição de pressão aparece mais segmentada entre os canais, indicando alteração local do carregamento hidráulico. Dessa forma, os campos de velocidade, vetores e pressão indicam que, em alta vazão, as *splitter blades* modificam localmente o escoamento, mas não promovem uma uniformização efetiva capaz de gerar ganho significativo de altura manométrica ou rendimento.

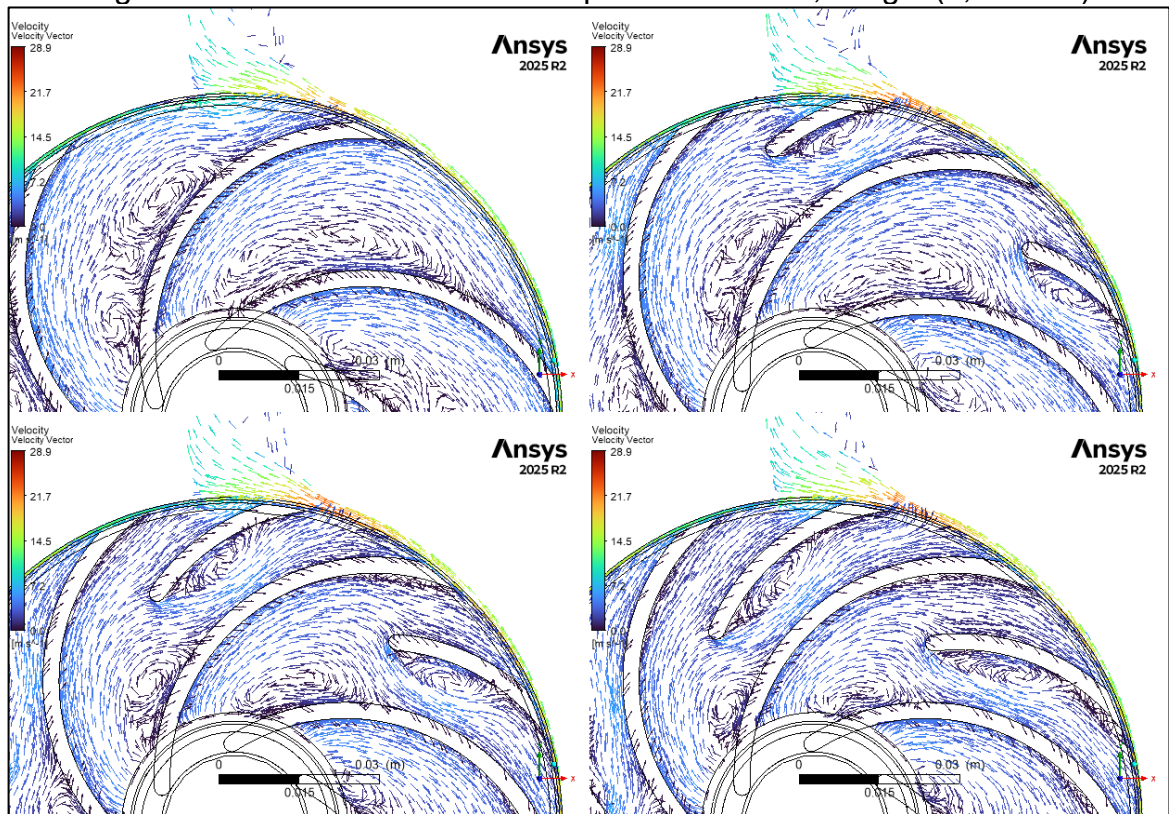
Na condição de menor vazão analisada, correspondente a 1,29 kg/s, aproximadamente 4,65 m³/h, o mecanismo de perda observado é diferente. Os vetores de velocidade apresentados na Figura 20 indicam que o escoamento deixa de seguir de forma contínua a trajetória imposta pelas pás, passando a formar regiões circulatorias no interior dos canais do rotor. Essas estruturas caracterizam fenômenos de recirculação e separação do escoamento, que não contribuem para o transporte efetivo do fluido e representam mecanismos de dissipação da energia fornecida pelo rotor.

Figura 19 – Campos de pressão para vazão de 3,30 kg/s (11,9 m³/h)



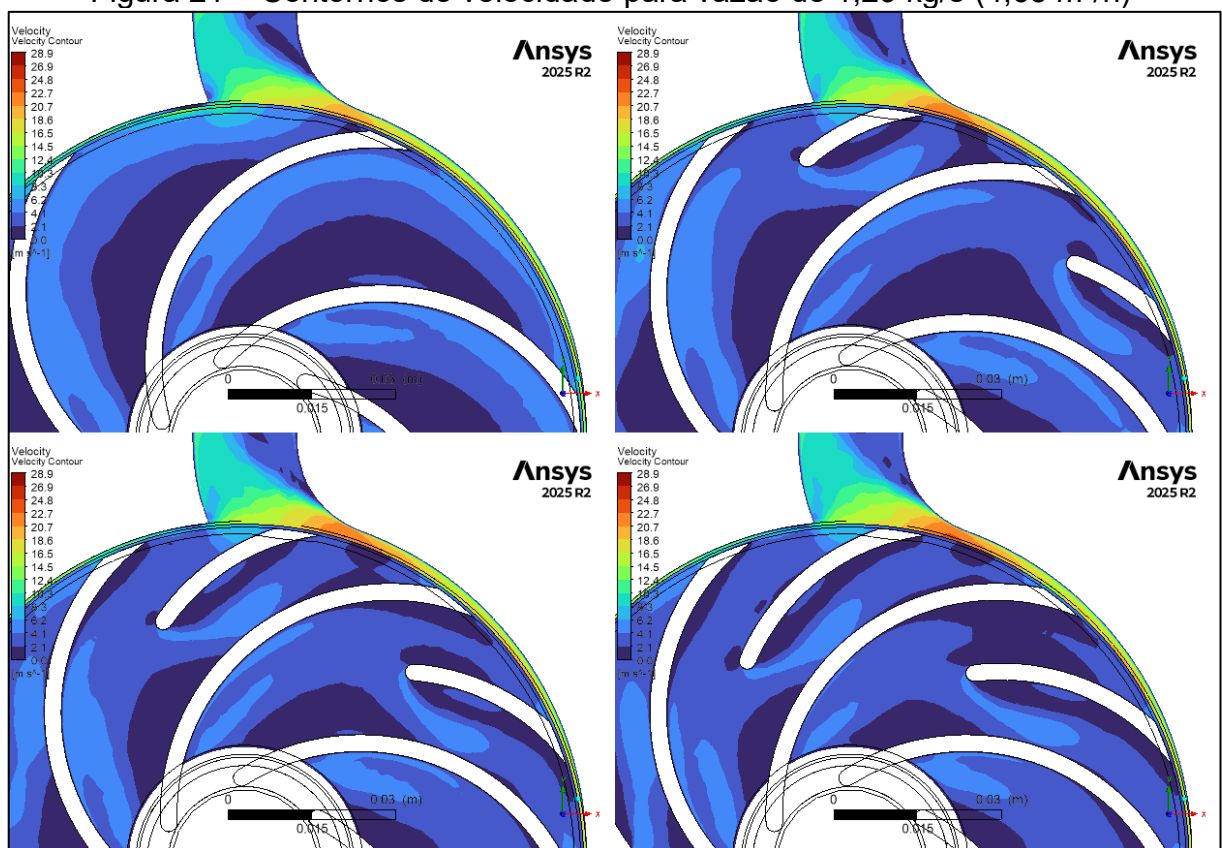
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 20 – Vetores de velocidade para vazão de 1,29 kg/s (4,65 m³/h)



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Figura 21 – Contornos de velocidade para vazão de 1,29 kg/s (4,65 m³/h)

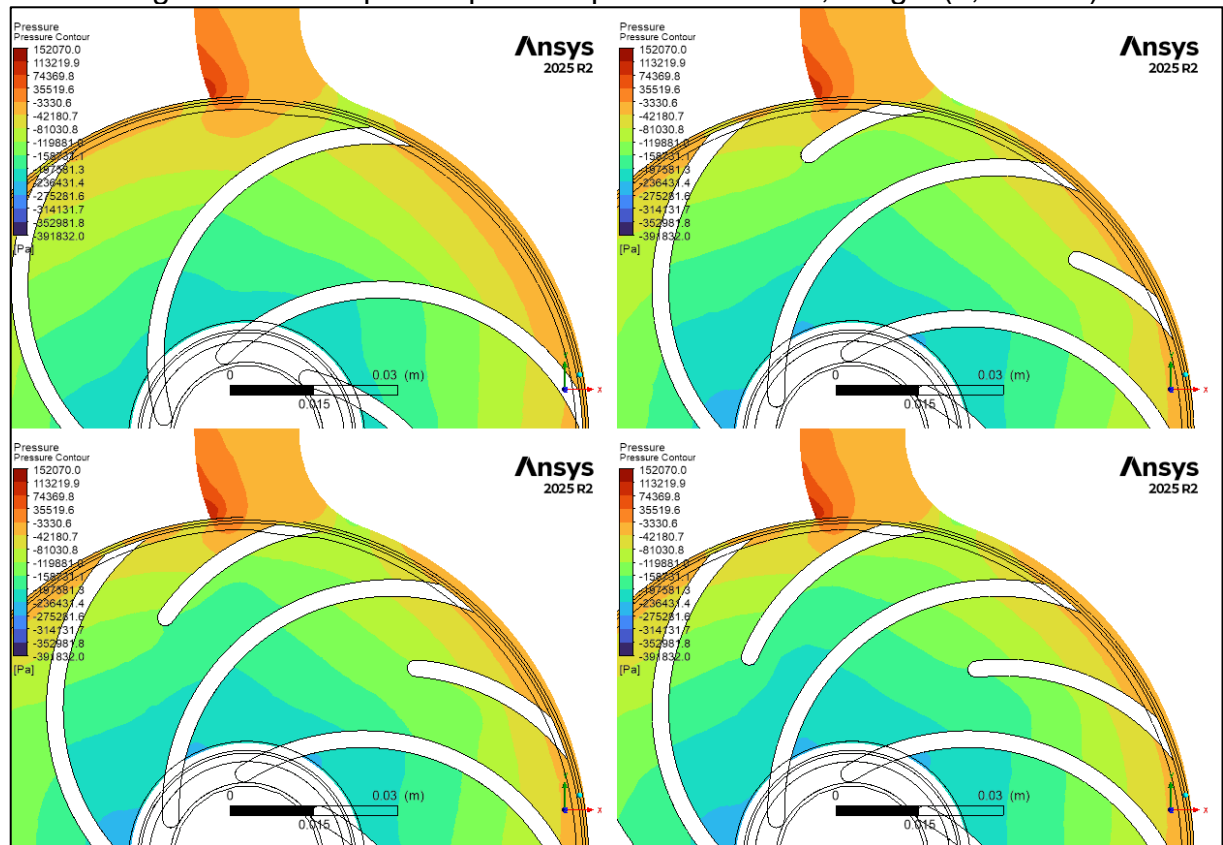


Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Esse comportamento é reforçado pelos contornos de velocidade da Figura 21, nos quais se observa uma redução significativa da velocidade do escoamento no interior dos canais do rotor. A presença de extensas regiões de baixa velocidade indica que parte do fluido permanece circulando no interior dos canais por um intervalo maior antes de atingir a saída do rotor. Nos rotores com *splitter blades*, verifica-se que as pás intermediárias reduzem parcialmente algumas regiões de baixa velocidade próximas às pás principais; entretanto, também criam novas regiões de baixa velocidade em suas proximidades, modificando a distribuição do escoamento no interior dos canais.

Os campos de pressão obtidos para essa mesma condição, apresentados na Figura 22, evidenciam a manutenção do gradiente radial de pressão característico de bombas centrífugas, com aumento progressivo da pressão em direção à periferia do rotor e à região de descarga para a voluta. Em comparação com a condição de maior vazão, o campo de pressão apresenta-se mais homogêneo, em função da menor velocidade média do escoamento. Entretanto, a introdução das *splitter blades* promove apenas alterações localizadas na distribuição de pressão entre os canais, sem evidenciar aumento significativo da pressão global desenvolvida pela bomba. Assim, mesmo havendo geração de pressão, parte da energia transferida ao fluido é dissipada em movimentos secundários, recirculações e regiões de baixa velocidade, em vez de ser convertida integralmente em altura manométrica útil.

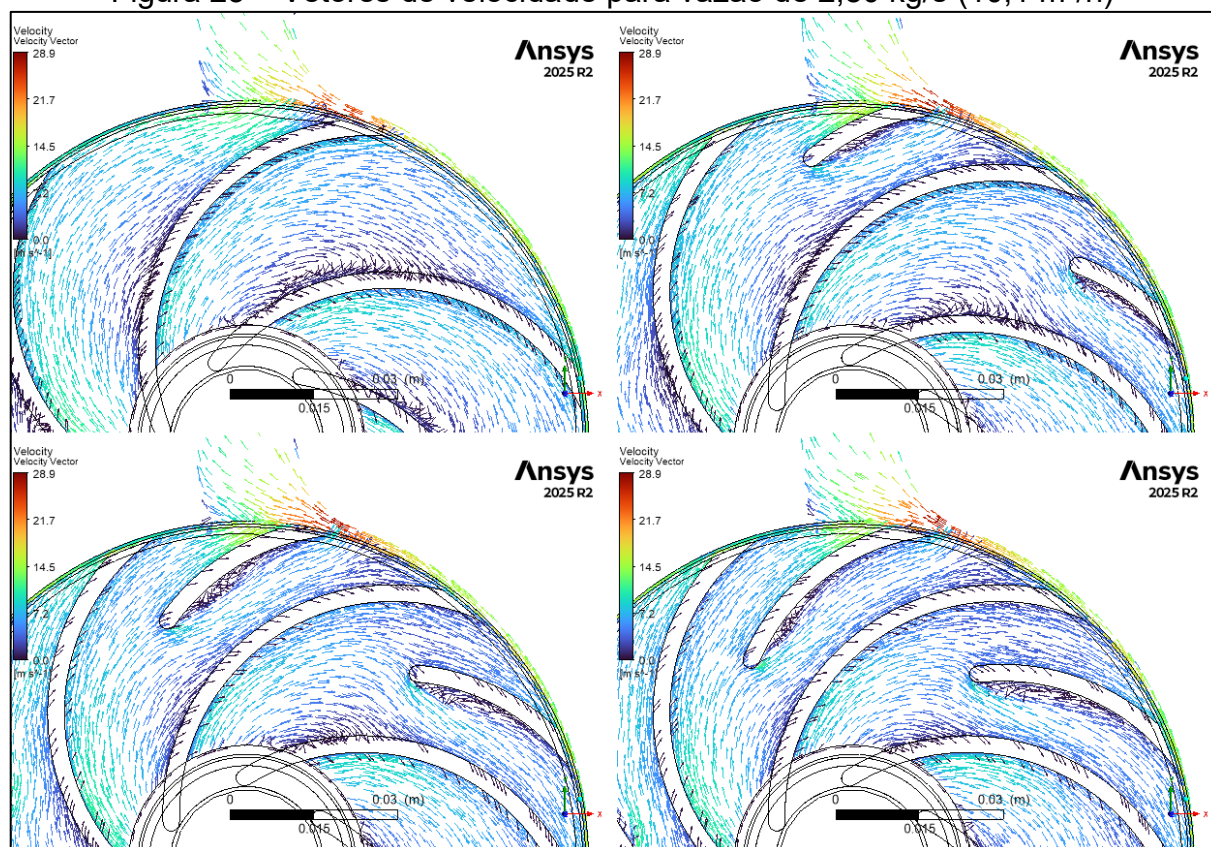
Figura 22 – Campos de pressão para vazão de 1,29 kg/s (4,65 m³/h)



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Na condição intermediária de 2,80 kg/s, aproximadamente 10,1 m³/h, os vetores de velocidade apresentados na Figura 23 indicam que o escoamento permanece predominantemente aderido às superfícies das pás, acompanhando a geometria dos canais do rotor ao longo de praticamente todo o percurso. Em comparação com a condição de maior vazão, observa-se uma leve redução da intensidade dos vetores na região de descarga, embora ainda permaneça evidente a aceleração do fluido na transição entre o rotor e a voluta. Nos rotores com *splitter blades*, verifica-se uma redistribuição local da direção do escoamento nas proximidades das pás intermediárias, indicando a influência dessas superfícies sobre a trajetória do fluido. Entretanto, não são observadas regiões expressivas de recirculação ou separação, sugerindo que o escoamento permanece relativamente organizado nessa condição operacional.

Figura 23 – Vetores de velocidade para vazão de 2,80 kg/s (10,1 m³/h)

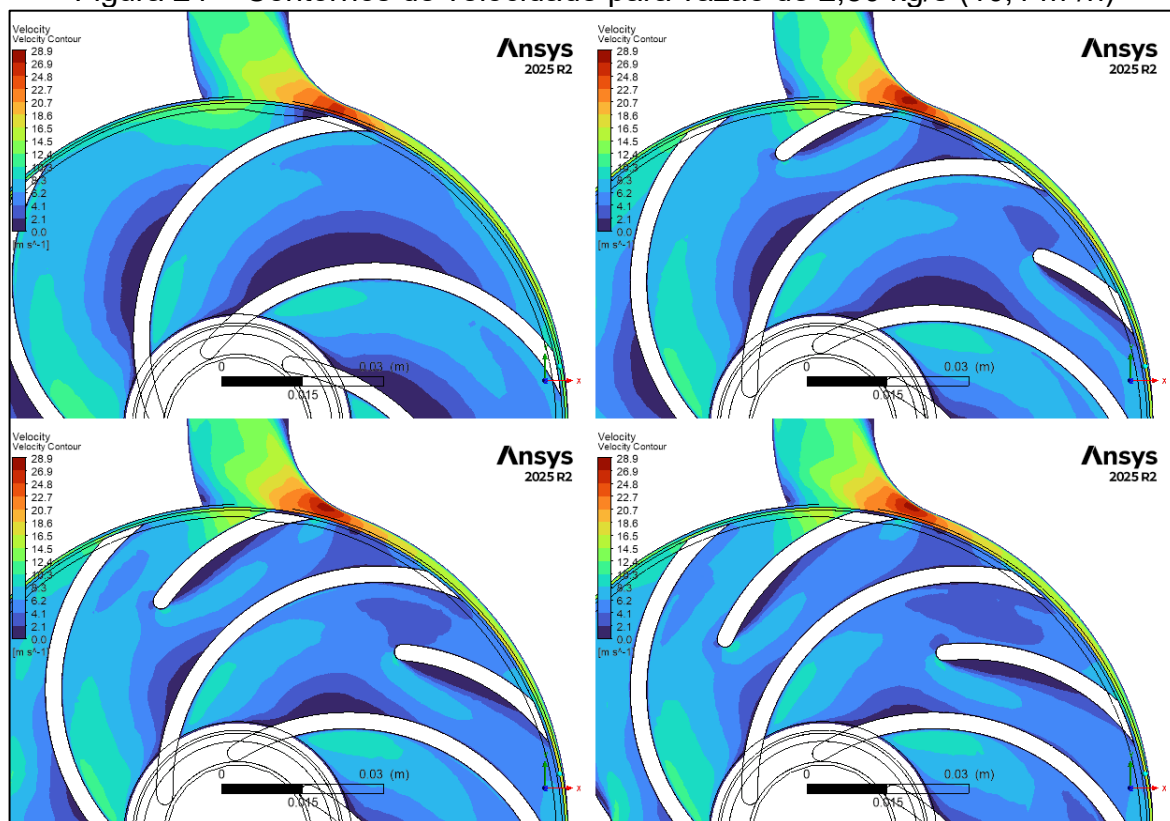


Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Os contornos de velocidade da Figura 24 confirmam essa condição intermediária do escoamento. Observa-se que as velocidades no interior dos canais são predominantemente moderadas, com aceleração localizada na região de saída em direção à voluta. Quando comparada à condição de 3,30 kg/s, a intensidade das regiões de alta velocidade é menor, indicando uma redução da concentração do escoamento na descarga da bomba. Nos rotores com *splitter blades*, aparecem pequenas regiões de baixa velocidade próximas às extremidades das pás intermediárias, porém essas alterações permanecem restritas ao entorno dessas superfícies e não comprometem significativamente a uniformidade global do escoamento.

Os campos de pressão apresentados na Figura 25 demonstram que a bomba continua promovendo aumento radial de pressão, com maiores valores na periferia do rotor e na região de descarga. Entretanto, assim como nas demais vazões analisadas, os rotores com *splitter blades* apresentam apenas alterações locais na distribuição de pressão, sem evidência clara de ganho global. Esse resultado indica que, embora as pás intermediárias modifiquem a trajetória do fluido e a distribuição local de velocidade e pressão, tais modificações não foram suficientes para promover melhoria significativa no desempenho hidráulico da bomba.

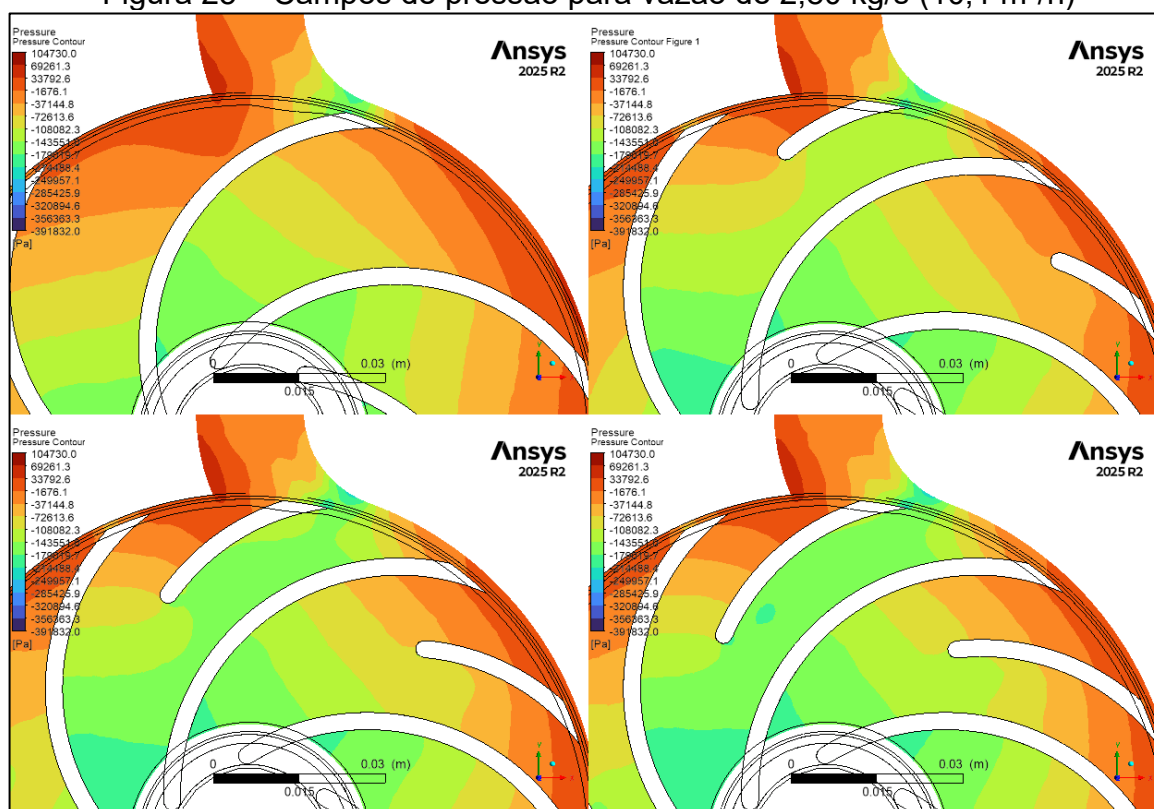
Figura 24 – Contornos de velocidade para vazão de 2,80 kg/s (10,1 m³/h)



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

De forma geral, as imagens CFD fornecem evidências qualitativas consistentes para explicar os resultados observados nas curvas experimentais. Em altas vazões, as perdas estão associadas principalmente à não uniformidade do escoamento na saída do rotor, aos elevados gradientes de velocidade e à formação de regiões do tipo *wake-jet*. Em baixas vazões, predominam mecanismos associados à separação do escoamento, recirculações e extensas regiões de baixa velocidade no interior dos canais. Já na condição intermediária, o escoamento permanece relativamente organizado, embora as *splitter blades* ainda promovam alterações locais na trajetória do fluido.

Figura 25 – Campos de pressão para vazão de 2,80 kg/s (10,1 m³/h)



Fonte: Elaborado pelos próprios autores

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da inclusão de *splitter blades* no desempenho de uma bomba centrífuga monoestágio, por meio de uma abordagem integrada envolvendo modelagem tridimensional, fabricação de rotores por impressão 3D, ensaios experimentais em bancada e simulações numéricas em CFD. Foram avaliadas três configurações de rotores modificados, com *splitter blades* correspondentes a 30%, 40% e 50% do comprimento das pás principais, comparadas ao rotor original da motobomba.

A validação do modelo numérico demonstrou que a abordagem transiente com malha móvel (*Sliding Mesh*) apresentou melhor aderência aos resultados experimentais em relação ao modelo permanente MRF. Enquanto o modelo permanente apresentou erro médio de -20,8%, indicando subestimação da altura manométrica, o modelo transiente resultou em erro médio de 11,8%, mostrando maior coerência com o comportamento global da bomba. Dessa forma, os resultados obtidos em regime transiente foram adotados como principal referência para a análise fluidodinâmica do escoamento interno.

Os resultados experimentais indicaram que a inclusão das *splitter blades* não proporcionou aumento significativo de altura manométrica em relação ao rotor original. Em baixas e médias vazões, as curvas dos rotores modificados permaneceram próximas à curva do rotor original, com diferenças pouco expressivas. Em vazões elevadas, especialmente acima de 10 m³/h, observou-se queda mais acentuada no desempenho das amostras com *splitter blades*, com destaque para a configuração de 50%, que apresentou redução de altura manométrica próxima a 7% em relação ao rotor original. Esse comportamento indica

que o aumento do comprimento relativo das pás intermediárias não favoreceu a transferência de energia ao fluido nessa faixa operacional.

A análise de rendimento reforçou esse resultado. O rotor original apresentou os maiores valores de rendimento ao longo da faixa analisada, atingindo valor próximo a 45% na região de melhor eficiência. Os rotores com *splitter blades* permaneceram ligeiramente abaixo do rotor original, evidenciando que a simples inclusão das pás intermediárias não foi suficiente para melhorar o desempenho global da bomba. Em maiores vazões, a perda de rendimento tornou-se mais evidente, principalmente na amostra com *splitter blades* de 50%, sugerindo aumento das perdas hidráulicas internas.

A partir das imagens obtidas por CFD foi possível explicar fisicamente esse comportamento. Nas condições de maior vazão, os contornos de velocidade evidenciaram aceleração intensa na região de saída do rotor e na transição para a voluta, coexistindo com regiões de baixa velocidade no interior dos canais. Essa não uniformidade do escoamento sugere a presença de estruturas do tipo *wake-jet*, associadas a gradientes elevados de velocidade e dissipação hidráulica. Nas condições de menor vazão, os vetores de velocidade mostraram recirculações, separação do escoamento e formação de vórtices no interior dos canais, fenômenos que reduzem a conversão da energia fornecida ao eixo em energia hidráulica útil.

Nos rotores com *splitter blades*, essas regiões de baixa velocidade e recirculação tornaram-se mais fragmentadas, especialmente próximas às extremidades das pás intermediárias. Esse comportamento indica que as *splitter blades*, nas configurações avaliadas, modificaram localmente o escoamento, mas não promoveram sua uniformização de maneira efetiva. Pelo contrário, em determinadas condições, as pás intermediárias podem ter contribuído para aumento de obstrução, formação de esteiras, separação local e perdas por mistura. Essa interpretação é coerente com Gad et al. (2024), que identificaram a região das *splitter blades*, a saída do rotor e as zonas de *wake-jet* como locais relevantes de perdas de energia em bombas centrífugas com pás intermediárias.

Dessa forma, conclui-se que, para a geometria estudada, a inclusão de *splitter blades* com comprimentos relativos de 30%, 40% e 50% não resultou em melhoria significativa do desempenho hidráulico da bomba centrífuga monoestágio. O rotor original apresentou desempenho global superior, principalmente em termos de rendimento. Os resultados demonstram que o uso de *splitter blades* não garante, por si só, aumento de eficiência ou altura manométrica, sendo necessário otimizar parâmetros como comprimento, posicionamento, ângulo de instalação e interação com os canais do rotor.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação de novas geometrias de *splitter blades*, variando não apenas o comprimento, mas também sua posição circunferencial, ângulo de entrada, espessura e curvatura. Também se recomenda realizar estudo de independência de malha, análise quantitativa de perdas por geração de entropia, avaliação de rugosidade dos rotores impressos e testes com materiais ou processos de fabricação que permitam melhor acabamento superficial. Essas análises podem contribuir para uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos de perda e para o desenvolvimento de geometrias mais eficientes.

REFERÊNCIAS

ALEMI, Hamed *et al.* Development of new “multivolute casing” geometries for radial force reduction in centrifugal pumps. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2015. DOI: 10.1080/19942060.2015.1004787.

ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent User's Guide: Release 2025 R2**. Canonsburg, PA: ANSYS, 2025. E-book.

CHABANNES, J. *et al.* Effect of splitter blades on performances of a very low specific speed pump. **Energies**, Basel, v. 14, n. 13, p. 3785, 2021. DOI: 10.3390/en14133785.

ESTEVAM, Marcelo Almeida. **Análise de desempenho de bombas hidráulicas operando com rotores de disco para diferentes concentrações de polpa**. 2017. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

GAD, Mona *et al.* Influence of internal flow structure on flow energy losses in a centrifugal pump with splitter blades using entropy generation theory. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 55, p. 102936, 2024. DOI: 10.1016/j.tsep.2024.102936.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9906:2012 — Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests — Grades 1, 2 and 3**. Geneva: ISO, 2012.

KHOEINI, D.; SHIRANI, E.; JOGHATAEI, M. Improvement of centrifugal pump performance by using different impeller diffuser angles with and without vanes. **Journal of Mechanics**, Cambridge, v. 35, n. 4, p. 577–589, 2019. DOI: 10.1017/jmech.2018.39.

KHOEINI, Davood; SHIRANI, Ebrahim. Enhancement of a centrifugal pump performance by simultaneous use of splitter blades and angular impeller diffuser. **International Journal of Fluid Machinery and Systems**, v. 11, n. 2, p. 191–204, 2018. DOI: 10.5293/IJFMS.2018.11.2.191.

LI, D. *et al.* Transient characteristics during the closure of guide vanes in pump-turbine mode. **Renewable Energy**, v. 118, p. 973–983, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.088.

ROSA, H. M. P.; EMERICK, B. S. CFD simulation on centrifugal pump impeller with splitter blades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 1, p. 3–7, 2020. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p3-7.

SHI, Baocheng *et al.* PIV test of the flow field of a centrifugal pump with four types of impeller blades. **Journal of Mechanics**, v. 37, p. 192–204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/jom/ufaa024>.

SHIGEMITSU, Toru; FUKUTOMI, Junichiro; KAJI, Kensuke. Influence of blade outlet angle and blade thickness on performance and internal flow conditions of mini centrifugal pump. **International Journal of Fluid Machinery and Systems**, v. 4, n. 3, p. 317–323, 2011. DOI: 10.5293/IJFMS.2011.4.3.317.

SHOJAEEFARD, M. H. *et al.* Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid. **Computers & Fluids**, v. 60, p. 61–70, 2012. DOI: 10.1016/j.compfluid.2012.02.028.

VINCI, Muryllo. **Otimização da geometria do canal de resfriamento do motor elétrico utilizando CFD**. 2020.

WILCOX, David C. **Turbulence modeling for CFD**. 3. ed. La Canada: DCW Industries, 2006.

YUAN, Ye.; YUAN, Shouqi. Analyzing the effects of splitter blade on the performance characteristics for a high-speed centrifugal pump. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 12, p. 1–11, 2017. DOI: 10.1177/1687814017745251.