



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
CEARÁ IFCE CAMPUS DE MARACANAÚ**

ANDRÉ LUIZ MELGAÇO LOPES

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM SISTEMA INTERLIGADO DE
BOMBEAMENTO EÓLICO E DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA POR
OSMOSE REVERSA**

MARACANAÚ – CE

2024

ANDRÉ LUIZ MELGAÇO LOPES

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM SISTEMA INTERLIGADO DE
BOMBEAMENTO EÓLICO E DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA POR
OSMOSE REVERSA**

Dissertação apresentada ao programa de pós graduação em energias renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE – Campus Maracanaú, como requisito para obtenção do Título de Mestre em energias renováveis Orientador: Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos

MARACANAÚ – CE

2024

ANDRÉ LUIZ MELGAÇO LOPES

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM SISTEMA INTERLIGADO DE BOMBEAMENTO
EÓLICO E DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA POR OSMOSE REVERSA

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 10/05/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Frederico dos Santos Matos (Orientador) Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Francisco Nélio Costa e Freitas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

Prof. Dr. Francisco José dos Santos Oliveira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, acima de tudo, e à minha Mãe Santíssima, Maria, digna de toda honra e reverência. Também dedico este trabalho ao meu filho, Valentim, desejando que seja para ele um exemplo de dedicação, trabalho e responsabilidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e a Maria Santíssima, por iluminar meu caminho para que eu desse esse grande passo.

À minha esposa e filho, verdadeiros motores de minha motivação e força interior, meu profundo agradecimento por seu amor incondicional e apoio constante.

Ao meu colega Luan, aluno de graduação em engenharia mecânica. Sua participação nas simulações sem acumulador de pressão enriqueceu nossas discussões e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Expresso também minha gratidão ao Okura e sua equipe, que gentilmente compartilharam os resultados experimentais de sua pesquisa. Sua colaboração foi fundamental para enriquecer o embasamento deste trabalho.

Por fim, dedico um agradecimento especial ao meu orientador, Frederico, cuja orientação e apoio foram essenciais para tornar este projeto possível. Sua expertise e incentivo foram cruciais para minha jornada acadêmica.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos por fazerem parte deste importante capítulo da minha vida acadêmica.

“Minha grande teoria é que, embora o mundo pareça confuso e caótico, se o transferirmos para o mundo dos números e formas, padrões vão surgir e começamos a entender o porquê as coisas são como são.”

(Marcus du Sautoy)

RESUMO

A garantia do acesso à água é um direito fundamental para a sobrevivência humana. Contudo, muitos habitantes da região semiárida do Brasil enfrentam desafios significativos em relação a esse recurso vital. Com aproximadamente 86% do território do estado do Ceará caracterizado por um clima semiárido, a população local lida constantemente com a ameaça de secas recorrentes e a escassez de água potável. Muitas vezes, dependendo do fornecimento de água por meio de caminhões-pipa para suprir suas necessidades básicas. A construção de poços artesianos, embora tenha sido tentada como solução, demonstrou ser um desafio, pois a grande maioria dos poços perfurados produziram água salobra (inadequada ao consumo humano). Diante desse cenário crítico, uma solução adotada é a dessalinização por osmose reversa, frequentemente associada à bombas elétricas que operam a um ritmo controlado. No entanto, a disponibilidade no fornecimento de energia elétrica é uma preocupação crescente, especialmente nas áreas mais remotas e isoladas do interior do estado. Para enfrentar esse desafio energético, alguns estudos sugerem a utilização de cataventos para bombear água e alimentar unidades de dessalinização por osmose reversa. No entanto, esses sistemas frequentemente utilizam bombas alternativas que produzem picos de pressão periódicos, chamado nesse trabalho de pulsos, durante o bombeamento. Essa pulsação pode comprometer a eficiência e a vida útil das membranas de osmose reversa. Para isso, torna-se crucial o desenvolvimento de simulações computacionais bem validadas para aumentar a confiabilidade no projeto desses sistemas. Nesse sentido, este trabalho visou desenvolver e apresentar um programa de simulação capaz de reproduzir o funcionamento de uma bomba alternativa, integrada a acumuladores de pressão e a sistemas de osmose reversa. Para validação, os resultados simulados foram comparados com os dados experimentais, onde o método analítico de média dos erros quadráticos relativos (RRMSE) foi aplicado às variáveis de potência, pressão e vazão ao longo do tempo. De maneira geral, os resultados foram bastante positivos, sendo 66,7% foram classificados como excelentes e 21,8% dos resultados como bons, baseado na classificação dos valores de RRMSE apresentados nesse trabalho, demonstrando a robustez do modelo desenvolvido.

Palavras-chaves: Osmose reversa, catavento, pulsação, modelo computacional

ABSTRACT

Ensuring access to water is a fundamental right for human survival. However, many residents in Brazil's semi-arid region face significant challenges regarding this vital resource. Approximately 86% of the state of Ceará's territory is characterized by a semi-arid climate, forcing the local population to constantly contend with recurrent droughts and a shortage of potable water. Many communities depend on water supplied by tanker trucks to meet their basic needs. The construction of artesian wells, though attempted as a solution, has proven challenging, as the majority of drilled wells produce brackish water (unsuitable for human consumption). Given this critical situation, one solution adopted is desalination via reverse osmosis, often associated with electric pumps that operate at a controlled rate. However, the reliability of electric power supply is a growing concern, especially in the more remote and isolated areas within the state. To address this energy challenge, some studies suggest the use of windmills to pump water and supply reverse osmosis desalination units. However, these systems frequently use reciprocating pumps that produce periodic pressure peaks, referred to as pulses in this study, during pumping. This pulsation can compromise the efficiency and lifespan of reverse osmosis membranes. Therefore, the development of well-validated computational simulations is essential to increase design reliability for these systems. In this context, the present study aimed to develop and present a simulation program capable of reproducing the operation of a reciprocating pump, integrated with pressure accumulators and reverse osmosis systems. For validation, the simulated results were compared with experimental data, applying the analytical method of relative root mean square error (RRMSE) to the variables of power, pressure, and flow over time. Overall, the results were quite positive, with 66.7% classified as excellent and 21.8% as good, based on the RRMSE classification values presented in this study, demonstrating the robustness of the developed model.

Keywords: Reverse osmosis, windmill, pulsation, computational model

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - População por forma de acesso a água em 2019 no Brasil e Nordeste	10
Figura 2 - Número de publicações científicas com a palavras-chave “computer simulation of wind desalination pumping”, do ano de 2010 a 2023, nos 2 principais site de pesquisa.....	15
Figura 3 - Comparação de número de publicações, desde 2020, nos 2 principais sites de pesquisas da área, para 3 frases chaves	16
Figura 4 - Configuração em Espiral do Elemento de Membrana para o Processo de Osmose Reversa.....	19
Figura 5 - Correntes no processo de separação por membranas.....	20
Figura 6 – Catavento M5015 em uma paisagem de inverno holandês no local do teste.....	21
Figura 7 - Sistema de bombeamento de água pelas forças do vento para dessalinização por osmose reversa via moinhos de vento.	23
Figura 8 - Taxa de pulsação experimental da bomba de pistão para os seguintes casos: (a) sem o uso de acumuladores de pressão, (b) com acumuladores com uma pré-carga de 0,8 MPa, (c) com acumulador e uma pré-carga de 1,2 MPa e (d) com acumulador e uma pré-carga de 2 MPa.	26
Figura 9 - Modelo de simulação de bomba de pistão de água do mar sem acumuladores	27
Figura 10 - Ilustração de uma bomba de pistão de simples efeito.....	29
Figura 11 - Representação gráfica do sistema biela e manivela para movimentação da bomba	31
Figura 12 - Fluxograma do projeto das simulações.....	35
Figura 13- Protótipo de sistema real de dessalinização por osmose, construído em laboratório.....	36
Figura 14- Conjunto motor-redutor e caixa de engrenagens	37
Figura 15 - Resultados experimentais com e sem aplicação da média móvel....	44
Figura 16 - Comparação das curvas de potência e pressão ao longo do tempo variando o refino da simulação.....	45

Figura 17 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 3,5m/s sem acumulador e OR	47
Figura 18 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 4,5m/s sem acumulador e OR	49
Figura 19 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 5,5m/s sem acumulador e OR	50
Figura 20 – Derivada da pressão para velocidade do vento de a) 3,5, b) 4,5 e c) 5,5 m/s, sem acumulador de pressão e OR	52
Figura 21 - Valores máximo para a) potência, b) pressão, c) vazão e d) derivada da pressão, sem o uso de acumulador de pressão sem OR	53
Figura 22 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 3,5m/s com acumulador sem OR.....	54
Figura 23 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 4,5m/s com acumulador sem OR.....	56
Figura 24 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 5,5m/s com acumulador.....	57
Figura 25 - Derivada da pressão para velocidade do vento de a) 3,5, b) 4,5 e c) 5,5 m/s, com acumulador de pressão sem OR.....	58
Figura 26 - Intervalo de máximos e mínimos para a a) potência, b) pressão, c) vazão e d) derivada da pressão, com o uso de acumulador de pressão sem OR	60
Figura 27 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 5,5m/s com acumulador de pressão e OR.....	62
Figura 28- Derivada da pressão para velocidade do vento de 5,5 m/s, com acumulador de pressão e sistema de OR	63
Figura 29 - Intervalo de máximos e mínimos para a a) potência, b) pressão, c) vazão e d) derivada da pressão, com o uso de acumulador de pressão e OR	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esquema de valores para rotação da bomba e velocidade de vento para cada simulação.....	40
Tabela 2 - Parâmetros do sistema físico empregadas na simulação	41
Tabela 3 - Classificação dos valores de <i>RRMSE</i>	43
Tabela 4 - Resumo dos valores de <i>RRMSE</i>	65
Tabela 5 - Resumo dos valores de perdas de carga e volume do acumulador usado na nas simulações	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.2 Justificativa.....	14
1.2.1 Lacunas identificadas nas referências bibliográficas.....	14
1.2.2 Carência no enfoque de simulações computacionais no campo de estudo.....	14
2. OBJETIVO.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Membrana de osmose reversa.....	18
3.2 Filtração de água por osmose reversa utilizando energia mecânica gerada por catavento.....	20
3.3. Operação do sistema de catavento com acoplamento a um sistema de bombeamento e filtragem.....	22
3.4. Problemas da pulsação para o sistema de osmose reversa.....	23
3.5. Sistema para redução da pulsação.....	24
3.6. Exemplo da redução das vibrações usando acumuladores de pressão....	25
4. METODOLOGIA.....	29
4.1 Descrição do modelo.....	29
4.2 Modelo experimental.....	36
4.2 Condições de simulação.....	39
4.3 Refino temporal.....	40
4.5 Parâmetros das simulações.....	41
4.6 Método para Comparação entre Simulação e Experimento: RMSE.....	42
5. RESULTADOS.....	44
5.1 Estudo de refino temporal.....	45
5.2 Análise comparativa sem acumulador de pressão e sistema de OR.....	46
5.3 Análise comparativa com acumulador de pressão e sem sistema de OR.....	53

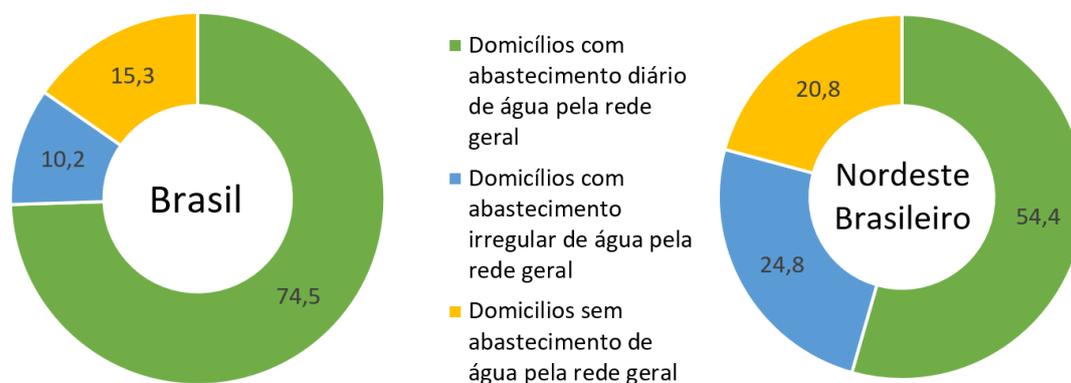
5.4 Análise comparativa com acumulador de pressão e sistema de OR.....	61
5.5 Análise comparativas dos resultados experimentais e simulados.....	65
6. CONCLUSÕES	68
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	68

1. INTRODUÇÃO

O acesso à água limpa e segura é um direito fundamental reconhecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) desde 2010, através do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). No entanto, mais de 80 países, abrigando aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas em todo o mundo, ainda enfrentam a escassez de água de qualidade (ONU, 2022) (Polido, 2005).

A discrepância na distribuição global de água também afeta o Brasil. De acordo com dados do IBGE (2021), onde cerca de 15,3% dos municípios brasileiros não têm acesso à água tratada e canalização. Essa disparidade se acentua na região Nordeste, onde aproximadamente 20,8% da população enfrenta a ausência de abastecimento de água proveniente da rede geral de distribuição. Além disso, outros 24,8% têm acesso à água canalizada, mas não de maneira regular (IBGE, 2021). Os dados citados foram compilados nos gráficos da Figura 1.

Figura 1 - População por forma de acesso a água em 2019 no Brasil e Nordeste



Fonte: Adaptado de IBGE (2021)

O estado do Ceará, por exemplo, é amplamente coberto pelo semiárido, abrangendo 86,8% de sua área (INESP, 2019). Isso torna a população local especialmente vulnerável à escassez de água. Uma das soluções fundamentais para garantir o acesso à água é a extração de água de poços profundos. Entretanto, a qualidade dessa água para consumo é afetada pela composição das rochas na região.

O território cearense é composto principalmente por duas estruturas rochosas: sedimentares, que cobrem cerca de 27% do estado e geralmente possuem lençóis

freáticos de melhor qualidade, e rochas cristalinas, que ocupam o restante do estado e tendem a produzir água com maior teor salino e em menor quantidade (Castro et al., 2001). Essa água muitas vezes contém uma média de 1.440 mg/L de Sólidos Totais Dissolvidos (SDT) (Silva et al., 2007).

Nesse contexto, é importante ressaltar as diretrizes da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), que estabelecem padrões de qualidade da água. Segundo a EPA, a concentração máxima de Sólidos Totais Dissolvidos na água potável deve ser de 500 mg/L (ou 500 ppm) (EPA, 2023).

Portanto, diante dessas circunstâncias, torna-se crucial o tratamento prévio da água para torná-la segura para o consumo humano. Existem duas abordagens principais para o tratamento de grandes volumes de água salgada: destilação e filtragem (Ghaffour et al., 2013).

O método mais amplamente utilizado para destilação é o *Multi-Stage Flash Distillation* (MSD), que geralmente é implementado em plantas industriais com múltiplos tanques, controle rigoroso de pressão e temperatura. Esse processo envolve aquecer o líquido, separar o vapor d'água da salmoura e conduzir o vapor para destilação adicional, com o número de ciclos determinando a pureza da água resultante. Embora seja reconhecido por produzir água de alta pureza, tem desvantagens como altos custos, consumo elevado de energia térmica e necessidade de tratamento adicional para mineralização da água (Dastgerdi et al., 2016).

Reversa (OR) (Buros, 2000). Este processo envolve a aplicação de alta pressão sobre membranas semipermeáveis, permitindo a passagem da água doce e retendo os sais, resultando na formação de salmoura. Após a osmose reversa, a água filtrada passa por outros filtros refinados antes de se tornar potável.

A osmose reversa destaca-se por ser mais acessível em termos de custo e por requerer menos espaço para instalações em comparação com os métodos de destilação. Além disso, apresenta uma eficiência energética significativamente maior. A OR geralmente consome entre 3 e 6 kWh por metro cúbico de água dessalinizada, enquanto os sistemas de destilação, como a destilação por múltiplos estágios, consomem entre 20 e 30 kWh para tratar a mesma quantidade de água (Elimelech & Phillip, 2011) (Kim &

Dempsey, 2008). Isso torna a OR não apenas mais econômica, mas também uma escolha mais sustentável do ponto de vista energético.

Entretanto, a salmoura gerada nos processos de dessalinização, seja por destilação ou filtragem, podem representar um desafio no momento do descarte, especialmente em regiões mais afastadas do litoral (Ribeiro et al., 2016). No entanto, a literatura já propõe diversas soluções para o reaproveitamento desse subproduto, como sua aplicação em plantações de *Atriplex nummularia* (conhecida como erva-sal) (Dias et al., 2018) ou no cultivo de *Litopenaeus vannamei* (conhecido como camarão-branco-do-pacífico) (Rodrigues, 2022). Desta forma, compreende-se que a produção de salmoura concentrada, produzida pelos métodos de dessalinização, não necessariamente desencadeia novos problemas ambientais.

O uso de sistemas de osmose reversa frequentemente depende de bombas hidráulicas alimentadas por motores elétricos, o que pode ser um desafio em áreas remotas sem acesso à energia. Alguns estudiosos sugerem a adoção de cataventos como fonte de energia alternativa para impulsionar o sistema de OR (Matos et al., 2021) (Heijman et al., 2009).

Os cataventos são dispositivos mecânicos amplamente empregados no bombeamento de água em diversas aplicações, proporcionando uma fonte sustentável de água potável sem a necessidade de eletricidade. Heijman et al. (2009) destacam que esse tipo de sistema pode ser adaptado para fornecer energia mecânica a uma bomba centrífuga, alimentando assim uma pequena usina de produção de água doce por osmose reversa, sem depender de alimentação elétrica secundária ou armazenamento em baterias. Os autores concluem que a energia produzida pela turbina é mais eficientemente armazenada na forma de água doce produzida.

Entretanto, é importante observar que o trabalho de Heijman et al. (2009) foi conduzido em uma região litorânea, onde a obtenção de água salgada não era um problema. Em contrapartida, em comunidades mais afastadas que precisam extrair água de poços profundos artesanais, as profundidades são maiores, geralmente variando de 20 a 60 metros (Perfurante, 2020). Nesse contexto, o sistema de catavento é comumente utilizado em conjunto com uma bomba alternativa, frequentemente referida como "bomba de catavento" (Silva et al., 2000). Ademais, é importante ressaltar que o autor

não realizou qualquer análise de simulação ou modelagem matemática, o que pode representar um desafio ao adaptar seus resultados para uma aplicação mais complexa.

Com o objetivo de evitar a necessidade de dois sistemas de catavento, uma para o bombeamento de água e outra para o tratamento, Matos et al. (2021) propuseram um modelo teórico inovador que integra o bombeamento de água ao sistema de osmose reversa. No entanto, o autor alerta sobre os riscos que a membrana de osmose reversa pode enfrentar devido aos altos gradientes de pressão de uma bomba alternativa, enfatizando a importância de considerar as limitações das membranas em relação à variação de pressão. Neste contexto, é justificável propor a utilização de recursos de modelagem matemática computacional para simular os efeitos da pressão sobre as membranas e sugerir métodos de mitigação desses efeitos

As membranas de OR têm uma tolerância a variação de pressão limitada, sendo recomendada uma taxa máxima de variação de pressão de 3,1 Bar/s para evitar danos, conforme sugerido por Liberman et al. (2020). A fim de validar e viabilizar a utilização de cataventos diretamente associados ao sistema de dessalinização por osmose reversa sem comprometer a integridade da membrana, Okura et al. (2023) desenvolveram um modelo experimental de bancada simulando a interação entre um catavento acoplado a uma bomba alternativa e um sistema de membranas de osmose reversa. O autor demonstrou como o uso de acumuladores de pressão pode ser útil para minimizar os altos gradientes de pressão, respeitando os limites estabelecidos por Liberman et al. (2020) de 3,1 Bar/s.

Apesar dos resultados positivos de Okura et al. (2023), é importante observar que a pesquisa se limitou ao uso de um reservatório de volume constante para o acumulador de pressão, sem ajuste de pré-carga de gás. A literatura destaca a importância de determinar um volume ou pré-carga ótimas para o acumulador de pressão, onde os efeitos de atenuação de pressão são mais eficientes. Por exemplo, em um estudo conduzido por Zhang Zutia et al. (2019), que analisou um sistema de bomba de pistão de 8 cilindros para o bombeamento de água do mar, onde foram instalados acumuladores para atuação em cada um dos cilindros. Cada acumulador foi ajustado individualmente para alcançar uma condição ideal de pré-carga, resultando em uma atenuação mais eficaz da pressão. O estudo de Zhang Zutia et al. (2019) consistiu em uma abordagem experimental, complementada por simulações computacionais, o que

permitiu aos autores identificar o efeito mencionado da pré-carga nos acumuladores de pressão.

1.2 Justificativa

Com base nos fatos apresentados na introdução, destaca-se de forma incontestável a notável contribuição das simulações computacionais em iniciativas voltadas para o tratamento de água por meio da energia eólica. Nesse contexto, a fundamentação deste estudo encontra respaldo em dois argumentos cruciais, delineados nas seções subsequentes.

1.2.1 Lacunas identificadas nas referências bibliográficas

Os projetos que integram sistemas de dessalinização acoplados a bombeamento eólico, com uma conexão puramente mecânica, emergem como uma alternativa inovadora e economicamente viável para comunidades que enfrentam desafios no acesso à água e energia.

O estudo conduzido por Heijmana et al. (2009) explorou o acoplamento direto entre o catavento e o sistema de membranas de filtragem. Entretanto, é importante notar que seu enfoque se baseou na utilização de uma bomba centrífuga, e o gradiente de pressão gerado não suscitou preocupações relevantes. No entanto, esse tipo de projeto mostra-se inviável para grande parte do interior do Nordeste Brasileiro, onde é necessário bombear água de poços profundos, inapropriados para o uso de bombas centrífugas (Perfurante, 2020).

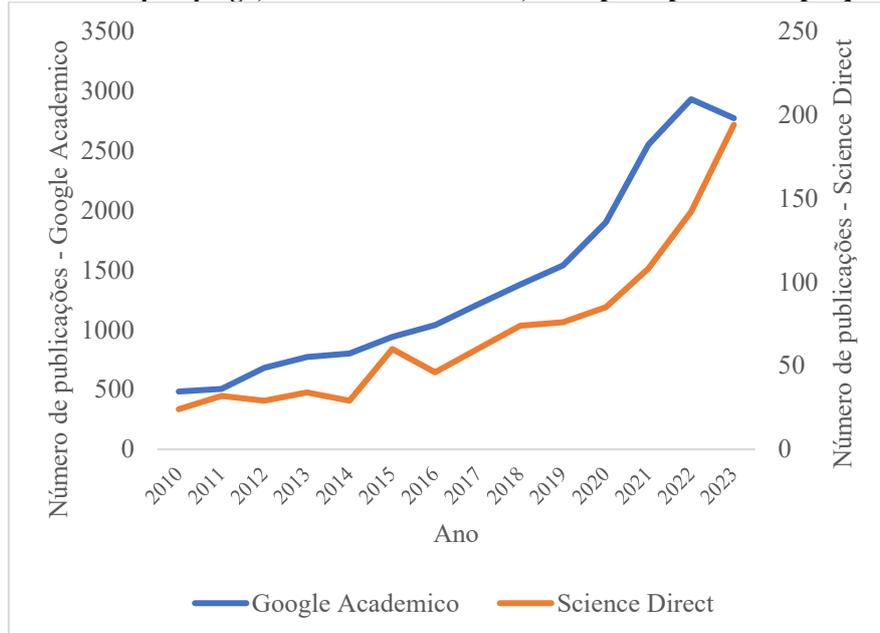
Adicionalmente, Okura et al. (2023) desenvolveram um estudo experimental que envolveu o acoplamento direto de um sistema de dessalinização com uma bomba alternativa acionada por catavento. Contudo, a ausência de simulações computacionais paralelas a esse projeto pode acarretar limitações na perspectiva de melhorias, além de significativamente prolongar o tempo necessário para as simulações em bancada.

1.2.2 Carência no enfoque de simulações computacionais no campo de estudo

A relevância desse tipo de estudo evidencia-se como uma tendência nas pesquisas globais, conforme ilustrado na Figura 2, que apresenta o número de pesquisas identificadas em duas principais ferramentas de busca de artigos: o Google Acadêmico e

o Science Direct. A pesquisa foi conduzida utilizando as palavras-chave "*computer simulation of wind desalination pumping*". Os resultados indicaram que a área, já em crescimento, experimentou um aumento significativo a partir de 2020. Essa ascensão demonstra um interesse crescente em todo o mundo no desenvolvimento desse tema.

Figura 2 - Número de publicações científicas com a palavras-chave “computer simulation of wind desalination pumping”, do ano de 2010 a 2023, nos 2 principais site de pesquisa.



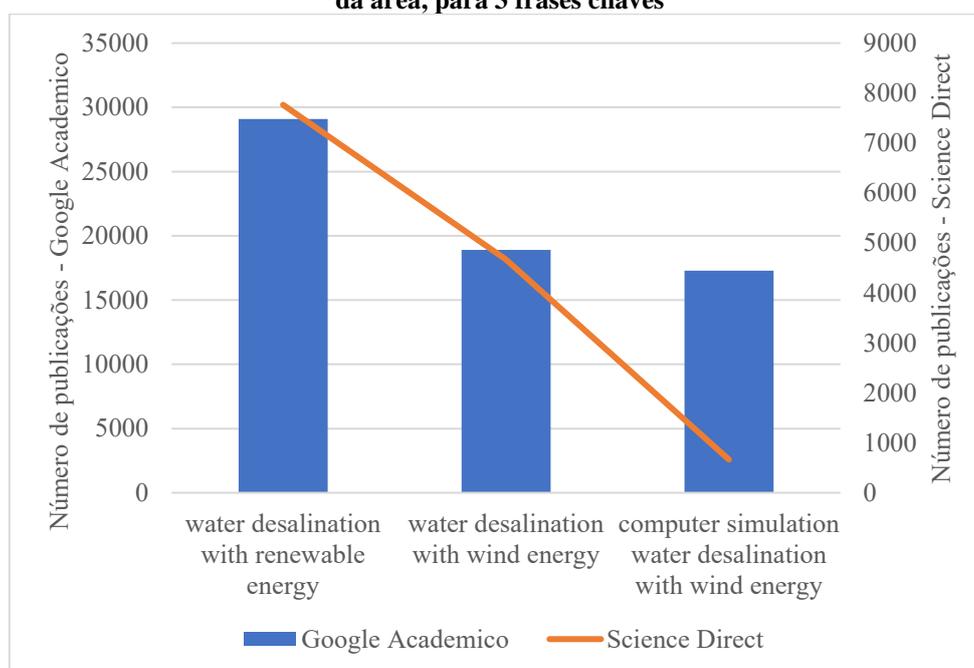
Fonte: Elaborado pelo autor

Essa análise quantitativa, baseada em dados de pesquisa, destaca não apenas o aumento na atividade de investigação, mas também a crescente importância atribuída ao estudo da simulação computacional no contexto da dessalinização acionada por vento. Essa abordagem fornece uma visão valiosa sobre a evolução temporal do interesse global nesse campo específico, evidenciando a relevância e o crescimento contínuo das pesquisas relacionadas à simulação computacional na dessalinização movida a energia eólica.

Em seguida, utilizando a mesma metodologia, foram realizadas pesquisas com o objetivo de refinar o foco do estudo abordado neste trabalho. Três frases-chave foram investigadas para direcionar o nicho de estudo. A primeira frase, "*water desalination with renewable energy*", revelou-se como aquela com a maior quantidade de pesquisas relacionadas ao tema. A segunda frase, "*water desalination with wind energy*", buscou restringir o escopo às energias renováveis, especificamente à energia eólica, enquanto a

última frase pesquisada foi "*computer simulation water desalination with wind energy*", com o intuito de compreender a relevância na produção científica da área de simulações computacionais. Os resultados dessas pesquisas foram compilados e apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Comparação de número de publicações, desde 2020, nos 2 principais sites de pesquisas da área, para 3 frases chaves



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise do gráfico, observa-se que, dentro do tema amplo de dessalinização de água com energia renovável, aproximadamente 60% do conteúdo está relacionado à energia eólica. Desses 60%, apenas 15% abordam o componente temporal da simulação computacional. Essa observação destaca a predominância da energia eólica no contexto da dessalinização e evidencia uma lacuna em termos de ênfase na simulação computacional dentro desse subcampo específico.

2. OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo principal a validação de um programa desenvolvido em linguagem Fortran, voltado para a simulação de um sistema tradicional de bombeamento eólico, originado de um catavento, tanto com quanto sem a incorporação de acumuladores de pressão, e com ou sem o uso de membranas de osmose reversa.

Os objetivos secundários desta pesquisa abrangem:

- O levantamento de curvas que enfatizam as principais características do fluxo. Busca-se antecipar o comportamento de parâmetros críticos, como potência, pressão e vazão geradas pelo catavento, em diferentes velocidades de vento.
- Analisar os gradientes de pressão desenvolvidos para cada cenário simulado, e comparar com os limites de tolerância à variação de pressão com base na preservação das membranas.
- Conduzir uma análise numérica para demonstrar como os acumuladores de pressão têm a capacidade de atenuar os gradientes de pressão do sistema, avaliando se essa redução é suficiente para o acoplamento direto de uma membrana de osmose reversa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica inicia com uma análise sobre a tecnologia da membrana de osmose reversa, que representa um marco significativo no tratamento de água, proporcionando avanços fundamentais na dessalinização. Explora-se o funcionamento deste método de filtração e sua aplicação na produção de água doce. Posteriormente, discorre-se sobre o desafio dos altos custos associados à eletricidade nas operações de dessalinização, impulsionando a investigação de alternativas sustentáveis, com destaque para a energia eólica. Neste contexto, é apresentada uma análise das limitações e propostas de soluções para a integração eficaz de energia eólica em sistemas de dessalinização. Um enfoque é dado à implementação de bombas de pistão acionadas por cataventos, explorando suas vantagens e desafios em diferentes contextos geográficos. Em seguida, aborda-se a problemática da pulsação em sistemas de bombas de pistão, destacando a importância da estabilidade operacional para a integridade das membranas de osmose reversa. Duas estratégias de redução da pulsação são discutidas, com foco especial nos acumuladores de pressão e sua eficácia comprovada na suavização do fluxo e da pressão. Após isso, é apresentado um estudo de caso relevante que demonstra os benefícios dos acumuladores de pressão na redução da pulsação em sistemas de bombeamento. Finalmente, é apresentada uma revisão de outro caso de simulação computacional aplicada a um problema similar ao abordado neste trabalho.

3.1 Membrana de osmose reversa

O tratamento de água por osmose reversa representa um avanço fundamental na dessalinização, que utiliza uma tecnologia baseada na filtração através de membranas semipermeáveis. Esta inovação foi um marco significativo, representando a primeira grande evolução desde o desenvolvimento das técnicas de dessalinização no início do século XIX (Moura et al., 2008).

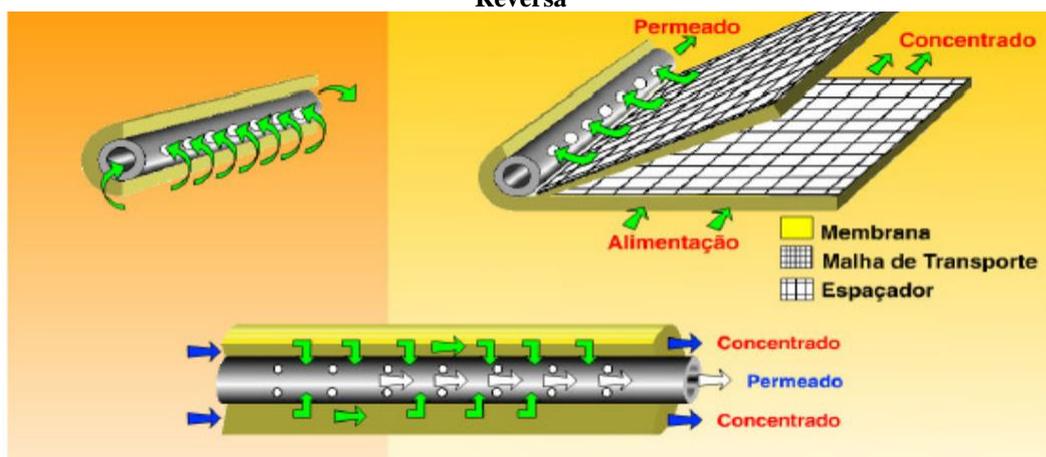
O processo de filtração é caracterizado pela separação de dois ou mais componentes em uma corrente líquida, primariamente com base em suas diferenças de tamanho de partículas. Mais especificamente, essa técnica visa distinguir partículas sólidas de líquidos ou gases, e até mesmo realizar a separação entre sólidos. A filtração

por membrana expande essa aplicação ao permitir a separação de solutos em meio líquido (Buros, 2000).

Na filtração por membrana, uma membrana semipermeável atua como uma barreira entre duas fases, realizando a transferência seletiva de massa entre elas. A distinção crucial de tamanho aqui refere-se às partículas ou solutos presentes na mistura. A membrana possui a habilidade de eficientemente transportar certos componentes, ao mesmo tempo em que impede a passagem de outros. Em suma, a membrana funciona como um filtro permeável e seletivo entre dois estágios, permitindo uma separação eficaz com base nas diferenças de tamanho das partículas ou solutos envolvidos (Buros, 2000).

O sistema de membranas mais amplamente utilizado para esse propósito é o sistema de espiral, ilustrado na Figura 4. Nesse sistema, a membrana semipermeável é posicionada entre dois componentes conhecidos como espaçadores. O primeiro espaçador funciona como um canal coletor para o permeado, enquanto o segundo proporciona espaço para o fluxo da solução de alimentação. Essas membranas são combinadas com os espaçadores e enroladas em torno de um tubo, por onde o permeado flui, e o conjunto é selado externamente com resina epóxi (Moura et al., 2008).

Figura 4 - Configuração em Espiral do Elemento de Membrana para o Processo de Osmose Reversa

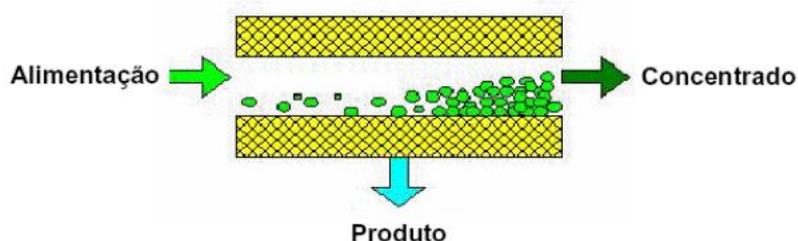


Fonte: Adaptado de Moura (et al., 2008)

A Figura 5 oferece uma representação microscópica do processo de filtração, onde o fluido de entrada flui em direção à membrana. Devido à aplicação de pressão, a água atravessa a membrana e é direcionada para um tubo central, resultando em uma

fase menos salina do processo. Simultaneamente, uma parte do líquido que não passa pela membrana aumenta sua concentração de sal e segue até o final da membrana. Assim, esse processo gera dois resultados distintos: o primeiro, em maior quantidade, é a água tratada, adequada para diversos usos, dependendo da aplicação e do tipo de filtro utilizado; o segundo é o rejeito de salmoura (Moura et al., 2008).

Figura 5 - Correntes no processo de separação por membranas.



Fonte: (Moura et al., 2008)

3.2 Filtração de água por osmose reversa utilizando energia mecânica gerada por catavento

É comum encontrar no mercado sistemas de osmose reversa que operam em conjunto com bombas elétricas centrífugas elétricas (BBI Filtrações, 2024). Esses modelos de bombas proporcionam uma vazão eficiente e estabilidade no fluxo de água (Fox et al., 2014).

Este processo, no entanto, enfrenta um desafio significativo relacionado ao custo da eletricidade, que representa aproximadamente 50% do custo total de dessalinização da água (Fritzmann et al., 2007). Algumas propostas sugerem a integração de energia elétrica da rede convencional com fontes sustentáveis, destacando a energia eólica como uma opção viável para essa finalidade (Rodríguez et al., 2001).

Nesse contexto, é comum observar projetos em que uma turbina eólica alimenta um gerador, fornecendo energia para acionar a bomba. Em períodos de baixa velocidade do vento, a rede elétrica entra em operação para manter a produção constante (Rodríguez et al., 2001). Contudo, a incerteza associada a velocidade dos vento destaca a necessidade de sistemas auxiliares para armazenamento de energia e estabilização (Mathioulakis et al., 2006).

Diversas abordagens foram propostas para essa finalidade, como o uso de baterias para armazenamento de eletricidade (Lund, 2006) e a utilização de um sistema de volante acoplado ao eixo da bomba para armazenar energia cinética (Carta et al., 2003). O objetivo desses sistemas é assegurar condições operacionais constantes, otimizando o desempenho do sistema de osmose reversa.

No entanto, Heijman et al. (2009) ressaltam que os custos associados ao armazenamento de energia são consideráveis para sustentar um sistema de osmose reversa ao longo do tempo. Eles apontam que esses custos são acentuados devido às perdas na conversão de energia cinética em elétrica pelo gerador, seguida pela reconversão em cinética para a rotação da bomba. Diante disso, os autores propõem um projeto inovador em que um catavento é diretamente acoplado a uma bomba centrífuga. Esse conceito exigiu o desenvolvimento de um sistema de proteção contra velocidades do vento baixas e altas, proteção contra operação a seco, e um sistema de recuperação de potência. Heijman et al. (2009) argumentam que é mais lógico armazenar energia na forma de água doce produzida pela dessalinização do que recorrer a sistemas auxiliares.

Entretanto, é importante salientar que a pesquisa conduzida por Heijman et al. (2009) foi realizada em uma área costeira, caracterizada pela acessibilidade facilitada à água salgada. A Figura 6 ilustra o aerogerador instalado pelos referidos autores.

Figura 6 – Catavento M5015 em uma paisagem de inverno holandês no local do teste



Fonte: (Heijman et al., 2009)

Contudo, em áreas mais distantes da costa, onde as fontes de água mais próximas são encontradas em lençóis freáticos, torna-se imprescindível a perfuração de poços artesianos, os quais podem variar em profundidade, com uma média que oscila

entre 20 e 60 metros (Perfurante, 2020). Nesse contexto, a profundidade dos lençóis freáticos inviabilizam a utilização de bombas centrífugas convencionais, projetadas para deslocar água a alturas de até 8 metros (Schneider Motobombas, 2022).

O emprego de bombas centrífugas autoaspirantes e submersas surge como uma alternativa viável nesse cenário, pois são capazes de alcançar alturas manométricas significativas. Porém, é importante ressaltar que tais equipamentos apresentam menor eficiência energética e são consideravelmente mais onerosos financeiramente (Schneider Motobombas, 2022).

Dessa maneira, torna-se imperativo adotar uma abordagem com o uso de bombas alternativas, devido à sua eficácia, custo reduzido e capacidade de atingir alturas manométricas suficientes para suprir as exigências dos projetos (Silva et al., 2000).

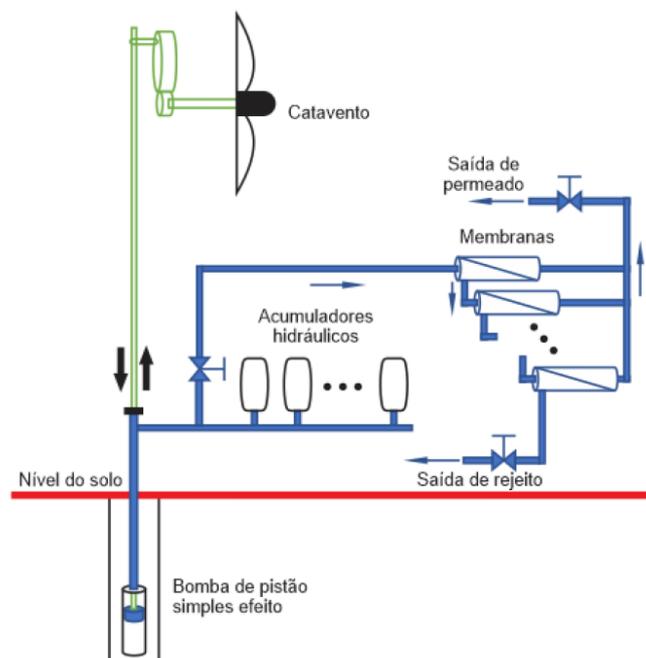
3.3. Operação do sistema de catavento com acoplamento a um sistema de bombeamento e filtragem

O sistema de bombeamento de água alimentado pela energia eólica, utilizado em conjunto com um sistema de osmose reversa, é esquematizado na Figura 7. Seu princípio de funcionamento se baseia na captação da energia dos ventos para impulsionar o movimento da água, gerando a pressão necessária para superar as barreiras das membranas de osmose reversa e, assim, realizar a filtragem (Matos et al., 2021).

Na Figura 7, é apresentado um sistema que integra um catavento, uma bomba e um sistema de osmose reversa para a dessalinização da água. O catavento assume a responsabilidade de converter a energia cinética do vento em energia mecânica, que posteriormente é transmitida a um redutor de engrenagens para amplificar o torque. Em seguida, essa energia é transformada em movimento linear alternativo por meio de uma haste. O sistema compreende uma bomba de pistão conectada à haste. A bomba de pistão extrai a água salobra de um poço e a direciona para um grupo de membranas de osmose reversa, compostas por membranas de poliamida posicionadas em configuração paralela para o permeado e em série para o descarte das águas residuais. Para controlar as oscilações de pressão e vazão, um acumulador hidráulico é utilizado. Esse sistema demonstra sua capacidade de produzir água dessalinizada, com o permeado sendo

coletado em um único canal e direcionado a um reservatório de grande capacidade, de onde será distribuído por gravidade.

Figura 7 - Sistema de bombeamento de água pelas forças do vento para dessalinização por osmose reversa via moinhos de vento.



Fonte: (Matos et al., 2021)

3.4. Problemas da pulsação para o sistema de osmose reversa

Uma bomba alternativa opera gerando uma variação de pressão que oscila entre o máximo e o mínimo a cada ciclo de bombeamento. Ao analisar o comportamento dessa variação ao longo do tempo, é possível observar um padrão senoidal no gráfico, o qual é interpretado neste trabalho como a pulsação.

A pulsação do fluxo é uma característica intrínseca dos sistemas de bomba de pistão e acarreta uma série de problemas, incluindo a indução de vibrações no fluido, vibrações mecânicas, produção de ruídos e cavitação, sendo esses os principais exemplos (Bae et al., 2014; Li et al., 2017; Sung et al., 2018). Essas vibrações, por sua vez, podem causar afrouxamento de parafusos e conexões, bem como fadiga mecânica,

fatores que podem levar à falha do equipamento e comprometer sua segurança operacional.

Além disso, como já mencionado, para garantir o funcionamento adequado e a preservação da integridade das membranas no sistema de Osmose Reversa, é fundamental manter uma variação de pressão controlada, aproximadamente em torno de 3,1 Bar/s (Lieberman et al., 2020).

3.5. Sistema para redução da pulsação

Diversas abordagens são empregadas para mitigar os problemas de vibração no sistema, destacando-se a otimização do projeto e a implementação de atenuadores auxiliares como duas das mais confiáveis (Zhang et al., 2019).

Uma abordagem multidisciplinar de otimização, baseada em co-simulação e otimização integrada, foi proposta por Liu et al. (2017). Essa abordagem visa determinar os parâmetros relacionados ao processo de distribuição de fluido da bomba de pistão, abrangendo elementos como o ângulo de envolvimento da câmara do pistão, as áreas das portas de entrada e saída, o ângulo de envolvimento da ranhura de silenciamento e o grau de abertura. A integração e otimização colaborativa entre o software AMESim, ADAMS e a Programação Quadrática Sequencial resultaram em significativa redução nas taxas de pulsação do fluxo sob seis diferentes condições de operação, gerando uma distribuição de pressão mais uniforme.

Contudo, é importante reconhecer que a técnica mencionada acima para reduzir a pulsação de pressão possuem algumas limitações. A otimização dos parâmetros da estrutura existente funciona apenas dentro de uma faixa específica, o que torna desafiante atender aos requisitos de condições de trabalho variáveis.

Por outro lado, a incorporação de atenuadores auxiliares emerge como uma solução mais simples e economicamente viável para reduzir a pulsação em sistemas de bombeamento. Um exemplo representativo desses dispositivos são os acumuladores de pressão externos, os quais foram selecionados para cumprir o objetivo proposto neste estudo, levando em consideração sua eficácia e eficiência econômica.

3.6. Exemplo da redução das vibrações usando acumuladores de pressão

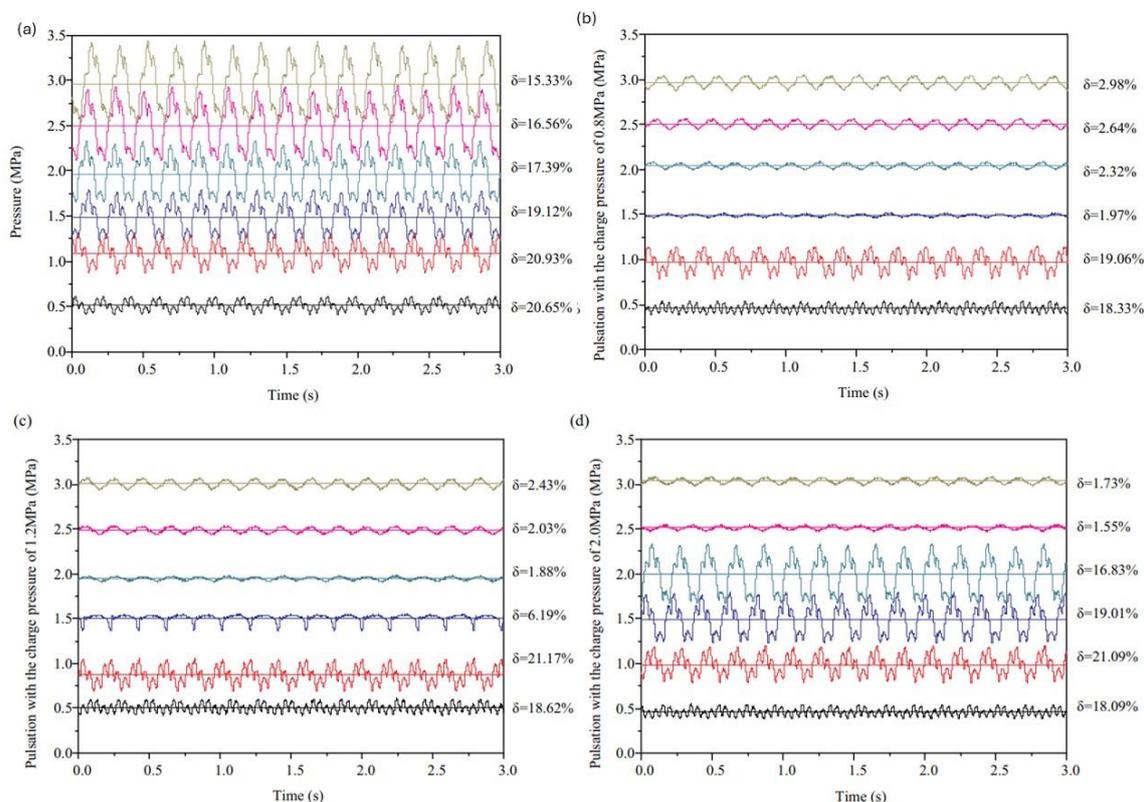
No contexto da otimização do desempenho das bombas de pistão, os acumuladores de pressão emergem como componentes cruciais, visando mitigar as variações de pressão dentro das câmaras cilíndricas. Um exemplo notável desse emprego pode ser encontrado no estudo de Zhang et al. (2019), no qual exploraram um sistema composto por oito pistões dedicados ao bombeamento de água do mar.

Os acumuladores de pressão adotados por Zhang et al. (2019) consistem em câmaras localizadas na saída da correia, incorporando bexigas que delineiam câmaras de gás isoladas e câmaras de líquido interconectadas, com a finalidade específica de atuar como acumuladores. Enquanto as câmaras de gás são pré-carregadas com gás nitrogênio sob pressão, as câmaras de líquido estão conectadas à câmara de descarga da bomba de pistão responsável pelo bombeamento da água do mar. A pressão e o volume das câmaras de gás são habilmente ajustados para se adequarem às flutuações de pressão do sistema, permitindo-lhes absorver e liberar o fluxo conforme necessário. Esse mecanismo suaviza tanto o fluxo quanto a pulsação da pressão, respondendo de forma adaptativa às variações de pressão do sistema.

Quando a pressão do sistema aumenta, a pulsação se intensifica, resultando na compressão dos volumes de gás e na expansão do líquido nas câmaras para acomodar um maior volume de água, efetivamente mitigando os picos de pressão. Em contrapartida, quando a pressão diminui, as câmaras de gás se expandem, comprimindo a câmara de líquido para reintroduzir o fluido no sistema, elevando assim a pressão mínima do sistema. Em consequência, os acumuladores desempenham um papel vital na redução da amplitude dos valores de pressão do sistema, contribuindo para um funcionamento mais estável e eficiente.

Zhang et al. (2019), conduziram uma série de ajustes na pressão inicial das bexigas em relação a vários fatores, resultando em uma notável diminuição nos efeitos da pulsação. Além disso, observaram que a pré-carga de nitrogênio nos acumuladores tem uma influência direta na redução da pulsação, destacando a importância do ajuste preciso desses parâmetros. Apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Taxa de pulsação experimental da bomba de pistão para os seguintes casos: (a) sem o uso de acumuladores de pressão, (b) com acumuladores com uma pré-carga de 0,8 MPa, (c) com acumulador e uma pré-carga de 1,2 MPa e (d) com acumulador e uma pré-carga de 2 MPa.



Fonte: (Zhang et al., 2019)

A Figura 8a apresenta um gráfico da variação da pressão ao longo do tempo, para cada cilindro, sem o uso de acumuladores de pressão. Na sequência, as Figura 8b, 9c e 9d mostram os resultados correspondentes para as mesmas variáveis, mas usando acumuladores de pressão com pré-cargas de 0,8 MPa, 1,2 MPa e 2 MPa, respectivamente.

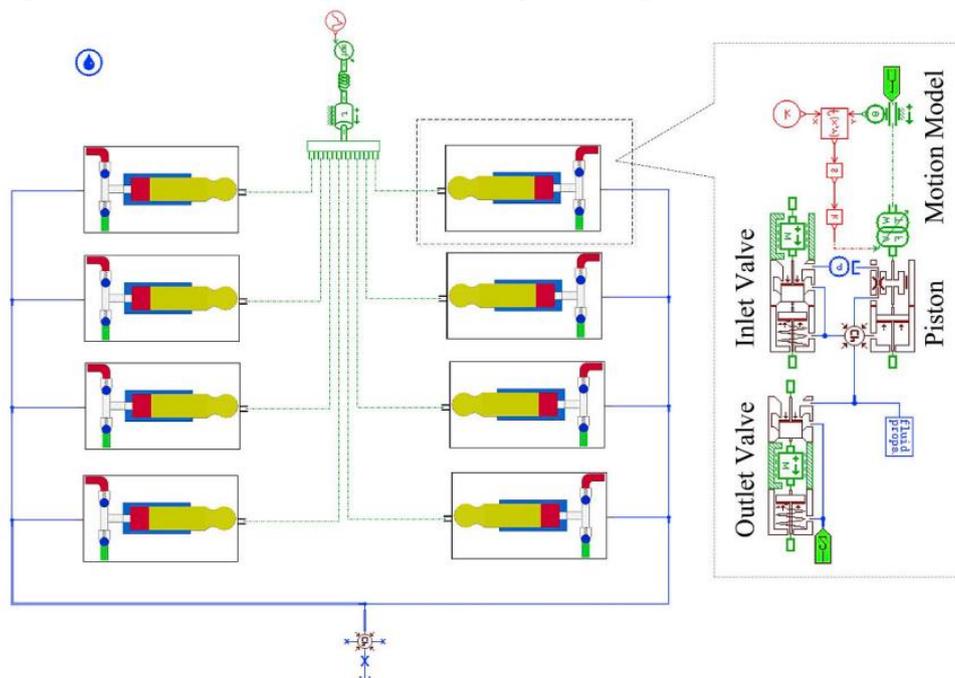
É importante salientar que quanto menor a amplitude do gráfico, menor a taxa de pulsação do sistema. Portanto, torna-se evidente não apenas como o acumulador é capaz de reduzir essa pulsação de pressão, mas também como a condição de pressão dentro do sistema é crucial para garantir uma operação ótima.

3.7 Revisão de método de simulação existente

Como mencionado, Zhang Zuti et al. (2019) conduziram um estudo combinando simulações e experimentos em paralelo. Para avaliar o desempenho da bomba de pistão para água do mar, os autores desenvolveram um modelo completo no software de

simulação AMESim R12.0, baseando-se nos princípios da bomba de pistão e nos fundamentos da cinemática do modelo. Uma representação dessa modelagem no programa utilizado é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Modelo de simulação de bomba de pistão de água do mar sem acumuladores



Fonte: (Zhang et al., 2019)

Embora o software AMESim seja uma ferramenta poderosa para a simulação de sistemas hidráulicos complexos, é importante ressaltar que, para a finalidade específica proposta neste trabalho - a simulação de um sistema de bombeamento hidráulico com uma bomba alternativa acoplada a um sistema de acumuladores de pressão e membrana de osmose reversa - suas capacidades podem não ser totalmente adequadas. Isso ocorre porque o programa não é especificamente projetado para simular detalhadamente o comportamento das membranas de osmose reversa. Portanto, embora ele possa fornecer uma valiosa análise sobre o sistema de bombeamento hidráulico em si e sua interação com os acumuladores de pressão, a modelagem do processo de dessalinização da água exige o uso de ferramentas e abordagens adicionais mais específicas.

Dentre os softwares de simulação que podem ser considerados para esse tipo de trabalho, destacam-se o ANSYS Fluent, o COMSOL Multiphysics e o OpenFOAM. Esses programas utilizam a abordagem de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), uma

área da engenharia que lida com a simulação numérica de fluxos de fluidos e fenômenos relacionados (Blazek, 2005). Essa abordagem pode ser usada para simular a dinâmica de fluidos em sistemas como bombas de pistão de simples efeito, podendo ser acoplada com acumuladores de pressão e membrana de osmose reversa. Para tal, eles se baseiam no método conhecido como *Finite Volume Methods* (FVM), uma técnica específica de discretização onde o domínio é dividido em volumes finitos e as equações físicas são resolvidas em cada volume (Blazek, 2005).

As simulações de volumes finitos podem ser úteis para esse tipo de caso de simulação. Em simulações de componentes dinâmicos usando FVM, é necessário introduzir a dependência temporal nas equações governantes do problema. Isso implica discretizar o tempo e resolver as equações em cada passo de tempo, iterativamente, enquanto os componentes mudam com o tempo (Patankar, 1980; Maliska, 2012). As técnicas de FVM dinâmico envolvem a solução de equações diferenciais parciais (EDPs) que descrevem a evolução temporal do sistema.

No entanto, a implementação do FVM para problemas dinâmicos pode ser mais complexa do que para problemas estacionários, devido à necessidade de lidar com questões como estabilidade numérica, precisão temporal e ajuste de parâmetros de discretização (Patankar, 1980; Maliska, 2012).

4. METODOLOGIA

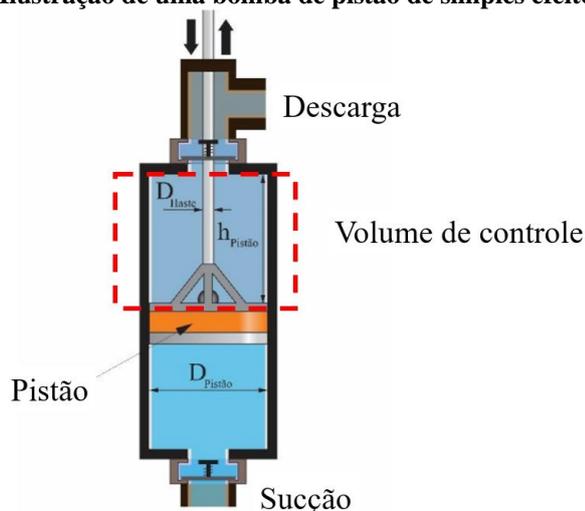
4.1 Descrição do modelo

Foi realizado o desenvolvimento e implementação computacional de um sistema de dessalinização por osmose reversa associado a uma bomba de pistão de catavento, conforme representado na Figura 7. Para essa finalidade, optou-se por utilizar a linguagem de programação Fortran, reconhecida por sua robustez e eficiência no processamento, especialmente adequada para aplicações científicas.

O programa foi construído para chamar outras sub-rotinas para o cálculo da pressão da água na bomba e na tubulação, bem como do ar nos acumuladores. As equações diferenciais resultantes do modelo matemático são resolvidas usando o método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Em concordância com White (2011), a equação que descreve a conservação da massa em um volume de controle é expressa na Eq. (1) onde \dot{m}_e e \dot{m}_s representam as taxas de fluxo de massa de entrada e saída dentro do domínio do controle, respectivamente, ao passo que dm/dt é a taxa de alteração da massa do volume de controle pela variação do tempo. O volume de controle e demais componentes da bomba de simples efeito é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Ilustração de uma bomba de pistão de simples efeito



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2023)

Considerando a massa como o produto do volume pela densidade e aplicando as propriedades da derivada parcial, encontra-se a Eq. (2). A definição de compressibilidade isométrica foi apresentada na Eq. (3) (Çengel & Cibala, 2007) e reescrita na Eq. (4) para isolar o termo da derivada parcial da pressão pelo tempo.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

$$V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP} \quad (3)$$

$$\frac{d\rho}{dP} = \beta \rho \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

Substituindo (4) em (2), chega-se a (5).

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s}{\rho} - \frac{dV}{dt} \right) \frac{1}{V\beta} \quad (5)$$

A vazão mássica através de uma seção, representada por \dot{m} , pode ser calculado pela Eq. (6) (White, 2011), sendo A a área da superfície de controle, e v a velocidade média no sentido normal a superfície.

$$\dot{m} = \rho v A \quad (6)$$

O coeficiente de perda de carga ao longo da instalação devido a presença de válvulas, curvas e outros componentes deve ser considerada (White, 2011) e pode ser calculada pela Eq. (7). Onde ΔP é a queda de pressão e K é o coeficiente de perda de carga localizada de cada componente do sistema.

$$\Delta P = \frac{1}{2} K \rho v^2 \quad (7)$$

Substituindo os termos da velocidade e densidade da equação (7) em (6), encontra-se a Eq. (8).

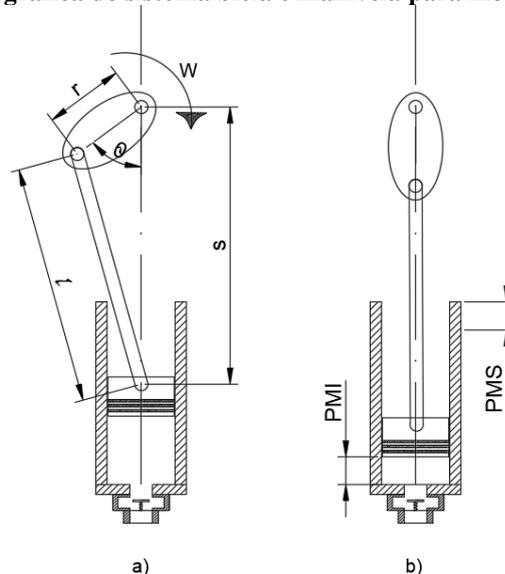
$$\dot{m} = A \sqrt{\frac{2\rho}{K} \Delta P} \quad (8)$$

Ao examinarmos a Figura 7, nosso objetivo é estabelecer a vazão ao longo da tubulação. Essa vazão é diretamente influenciada pela quantidade de água que flui durante o ciclo de funcionamento da bomba. Para atingir esse objetivo, emprega-se a equação (9) para efetuar o cálculo do volume do cilindro. Nessa equação, a variável $A_{pistão}$ representa a área da seção transversal do cilindro, enquanto "h" indica o curso variável do êmbolo do pistão.

$$V = A_{pistão} h \quad (9)$$

De acordo com o esquema ilustrado na Figura 7, a operação da bomba de pistão encontra sua origem na rotação do moinho de vento, que transmite potência para um mecanismo tipo biela-manivela, que converte o movimento rotativo do catamento, em movimento linear para o avanço do cilindro do pistão (Norton, 2009). Para uma compreensão mais simplificada da dinâmica desse processo mecânico, tal mecanismo é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Representação gráfica do sistema biela e manivela para movimentação da bomba



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta representação esquemática da Figura 7, a biela é caracterizada pelo seu comprimento "l", a variável "r" corresponde ao comprimento da manivela, enquanto θ é o ângulo formado entre a manivela e uma linha imaginária reta no sentido do avanço do pistão. Além disso, o ponto morto superior (PMS) também está indicado no esquema. É

importante ressaltar que, para fins de cálculo de volume, a altura máxima da camisa do pistão (PMS) deve ser subtraída da altura considerada. A variável “s” é calculada na Eq. (10) em função do ângulo θ . O volume da bomba é calculado na equação (11), que relaciona (9) e (10).

$$s = r \cos \theta + l \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \sin \theta\right)^2} \quad (10)$$

$$V_{bomba} = A_{pistão} \left(r + l + PMS - \left(r \cos \theta + \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta} \right) \right) \quad (11)$$

O volume da tubulação foi definido de forma análoga a Eq. (9), então a Eq. (12) relaciona a área da seção transversal da tubulação, A_{tubo} , com o comprimento do tubo, C_{tubo} .

$$V_{tubo} = A_{tubo} C_{tubo} \quad (12)$$

O cálculo da pressão contida nos acumuladores, a teoria dos gases ideais em conjunto com a primeira lei da termodinâmica aplicada a um volume de controle com paredes adiabáticas foram utilizadas conforme as Eq. (13) e (14) (Çengel & Boles, 2013). A pressão é representada por P , o volume por V , a massa do gás por m , a constante dos gases ideais por R , a temperatura por T e o calor específico a volume constante por c_v .

$$PV = mRT \quad (13)$$

$$\frac{dE}{dt} = -P \cdot \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

Através dessas formulações, foi possível aplicar o princípio de conservação da massa, conforme explicitado na Eq. (1), e estabelecer relações entre as Eq. (13) e (14). O resultado desse processo foi a Eq. (15), a qual estabelece uma correlação entre a taxa de variação da pressão em função do fluxo de água que entra e sai no acumulador.

$$\frac{dP}{dt} = \left(\rho + \frac{P}{c_{v,ar}T} \right) \frac{P}{m_{ar}\rho_{água}} \dot{m}_{água} \quad (15)$$

No contexto discutido, vale destacar a presença da massa de ar no interior do acumulador, referida como m_{ar} , e a vazão da água pela válvula do acumulador,

denotada como $\dot{m}_{\text{água}}$. O cálculo dessa vazão foi realizado conforme indicado na equação (8)

No que tange ao número de acumuladores, sua quantidade foi determinada no início do programa, permitindo simular um sistema com um acumulador ou sem nenhum.

Em relação as membranas, Matos et al. (2021) apresentou as seguintes equações:

$$\pi(C) = 78,234C - 52,617C^2 + 1,356 \cdot 10^{-7}C^2 \quad (16)$$

$$\Delta P_0 = P - (\pi_{med} - \pi_p) \quad (17)$$

$$\Delta P = P - (f_p \pi_{med} - \pi_p) \quad (18)$$

$$f_p = 0,131448 \Delta P_0^{0,16857} \quad (19)$$

$$K_{per} = 3,3076 \cdot 10^{-10} \Delta P^{0,264173} \quad (20)$$

Nesse contexto, π representa a pressão osmótica em relação à concentração C . π_{med} é a pressão osmótica média entre a alimentação e o rejeito, enquanto π_p denota a pressão osmótica do permeado. A diferença de pressão na membrana, levando em conta a influência do fator de polarização f_p , é representada por ΔP_0 . Adicionalmente, K_{per} é o coeficiente de permeabilidade da membrana. De acordo com o mesmo autor, a vazão de massa do permeado que atravessa a membrana deve ser estimada pela Eq. (21), e a vazão mássica de rejeito com a Eq. (8).

$$\dot{m} = \rho K_{per} A \Delta P \quad (21)$$

Com base nos resultados alcançados pelas equações anteriores, foi possível calcular a potência hidráulica do sistema, através da equação (22).

$$\dot{W} = \Delta P \cdot \dot{V} \quad (22)$$

Quando lidamos com bombas d'água, é uma prática comum calcular a altura manométrica, a qual corresponde à altura da coluna de água que a bomba poderia sustentar (White, 2011). Nesse contexto, a altura manométrica foi determinada através do cálculo apresentado na expressão (23), seguindo a mesma relação com a variação da pressão das equações anteriores.

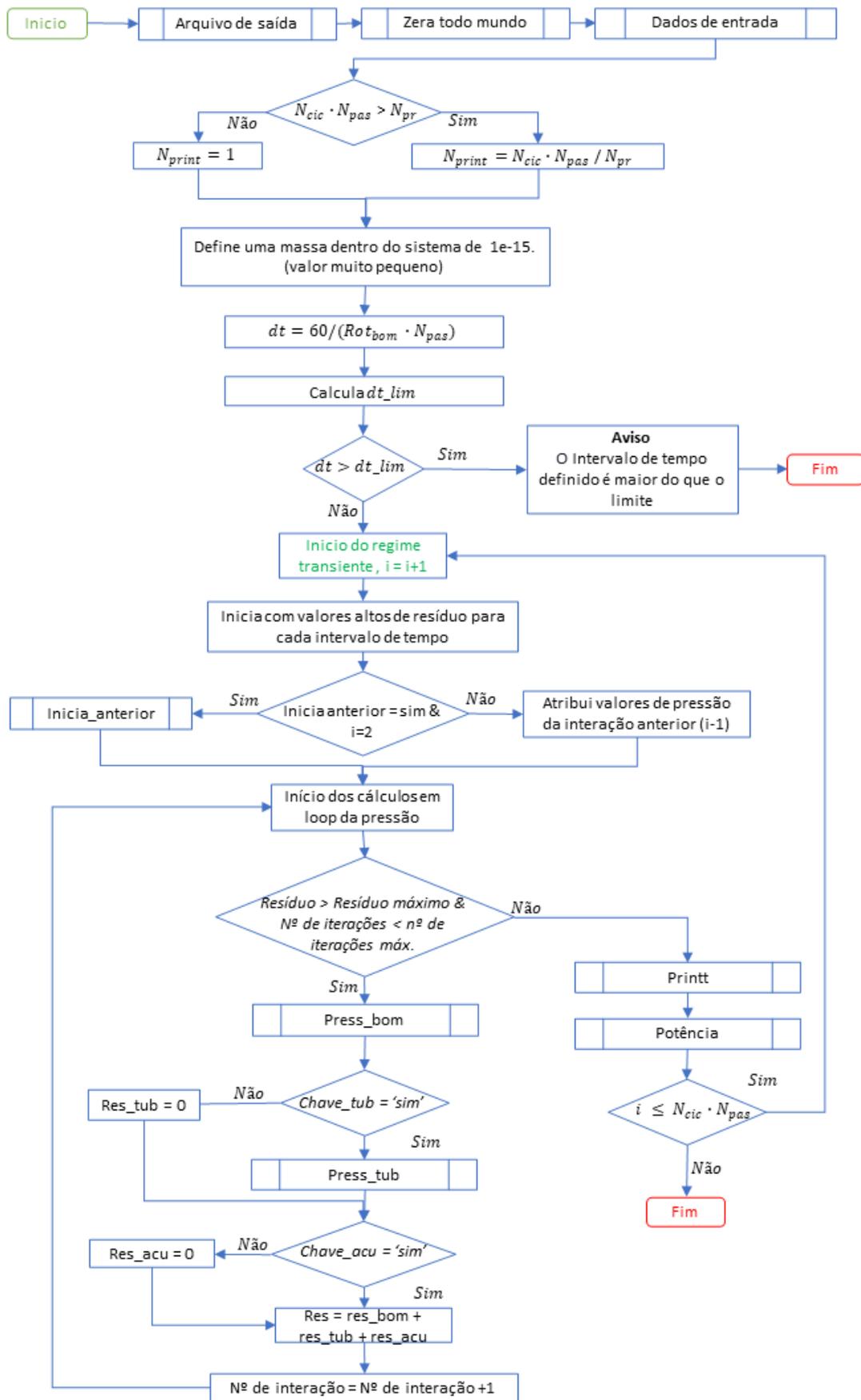
$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (23)$$

Ao final de cada iteração do cálculo em regime transiente, os resultados são exibidos no monitor e armazenados em um arquivo com extensão txt para futuras análises, utilizando o procedimento 'Printt'. Em seguida, a potência é calculada, a variável de controle do loop é atualizada e os cálculos são reiniciados para capturar os resultados após o intervalo de tempo predefinido. O encerramento do programa ocorre quando a variável de controle atinge o número de ciclos multiplicado pelo número de iterações, conforme especificado na sub-rotina 'Dados_Entrada'. A Figura 12 ilustra o fluxograma desse processo.

O programa inicia executando uma série de sub-rotinas essenciais. Primeiramente, a sub-rotina "Arquivo de Saída" é acionada, na qual um arquivo de texto denominado "saída.txt" é aberto para registrar os resultados dos cálculos realizados durante a execução do programa. Em seguida, o programa acessa a sub-rotina "Zerar Todos os Parâmetros", que tem como finalidade redefinir os valores de quaisquer parâmetros que possam estar previamente definidos em um arquivo com o mesmo nome.

Por se tratar de uma simulação em regime transiente, ela tem uma variável chamada dt , que é o passo no tempo entre cada interação da simulação. O total de interações em uma simulação é previamente definido pelo usuário antes do início do processo por meio da variável N_{pas} , o dt é razão entre o tempo de um ciclo da bomba (Calculada pelo RPM), e N_{pas} .

Figura 12 - Fluxograma do projeto das simulações



Fonte: Elaborado pelo autor

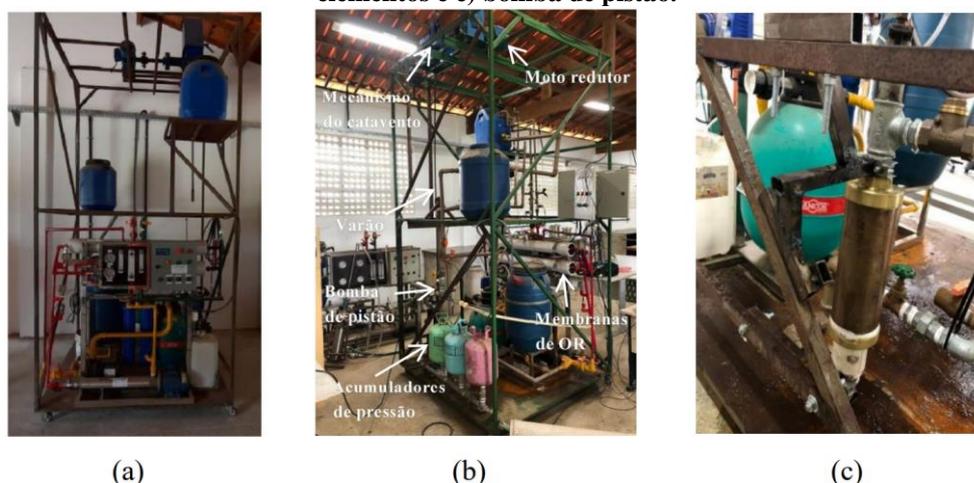
Na sequência é definido uma massa mínima e próxima de zero para dentro do sistema, para poder gerar convergências nos cálculos que virão no resto do programa. Depois disso, o programa calcula um valor para dt , que calcula o intervalo de tempo de cada passo da simulação. O método numérico aplicado na sequência dos cálculos foi o de Runge-Kutta, que estabelece uma variável de passo deve ter um valor mínimo de refino para garantir a convergência dos cálculos. O valor mínimo para convergência é calculado e chamado de dt_{lim} . O programa confere que se o valor calculado para dt for menor que o dt_{lim} a simulação é parada e um aviso é dado na tela.

Garantido esses parâmetros, o programa da continuidade para o início do cálculo transiente.

4.2 Modelo experimental

Para validar os resultados obtidos por meio de simulação, foi elaborado um modelo experimental em bancada, conforme ilustrado na Figura 13, replicando as condições planejadas durante a simulação. Este desenvolvimento seguiu a metodologia delineada por Okura et al. (2023), que consistiu na criação de um aparato experimental composto por um motor-reductor com inversor de frequência para simular o comportamento de um catavento, uma bomba de pistão e um sistema de osmose reversa convencional.

Figura 13- Protótipo de sistema real de dessalinização por osmose, composto por a) vista frontal com o painel do controlador do inversor, b) vista isométrica da modelo com destaque aos principais elementos e c) bomba de pistão.



Fonte: (Okura et al., 2023)

O conjunto motor-redutor é ilustrado na Figura 14, onde o catavento é composto por um motor elétrico WEG de 1,5 cv de potência e rotação nominal de 1750 rpm, em conjunto com um redutor de rotação de 60:1. Este redutor está conectado a uma caixa de engrenagens com uma redução adicional de 3,2:1. Após essa redução, o movimento rotativo é convertido em movimento alternativo por meio de um mecanismo de biela e manivela, como representado na Figura 14.

Figura 14- Conjunto motor-redutor e caixa de engrenagens



Fonte: Adaptado de Okura et al. (2023)

O sistema de biela e manivela aciona um varão que está conectado ao pistão da bomba, gerando um movimento alternativo vertical que possibilita o bombeamento da água pelo sistema.

O pistão, confeccionado em aço inoxidável, possui um diâmetro de 10,16 cm e um curso de 12,5 cm, resultando em um volume útil da bomba de 1,013 litros e o acumulador de pressão utilizado possui uma capacidade de 13 litros.

Para a coleta dos sinais de pressão e vazão na tubulação durante a operação do protótipo, um sistema de aquisição foi concebido e desenvolvido por Gomes (2022) e Silva (2022). Esse sistema é composto por uma placa conectável a um computador via USB, permitindo a visualização e armazenamento dos dados. A placa integra uma plataforma embarcada com um microcontrolador ESP32, contando com um processador digital ULP (Ultra Low Power), 520 kB de memória RAM, 16 MB de memória flash, dois núcleos de processamento operando a 240 MHz e uma faixa de tensão operacional entre 2,3V e 3,6V. Além disso, possui um conector externo para antena IPEX/PCB e um

crystal oscilador de 32 kHz. O programa implementado no sistema foi desenvolvido em linguagem C/C++ usando o software Arduino IDE.

Para as medições de vazão e pressão, foram empregados os sensores IFM SV7150 e PA3023, respectivamente. Esses sensores foram instalados na linha de descarga da bomba do catavento. As rotações da bomba, conforme exibido na Figura 14, foram controladas pelo inversor de frequência CFW 500 da WEG.

Considerando as velocidades de simulação estabelecidas na Tabela 1, foi necessário aplicar ajustes por meio do inversor de frequência (modelo CFW 500 da WEG), responsável por acionar o moto-reductor. Para garantir a imposição da potência máxima proveniente do catavento em cada rotação, uma válvula de restrição na descarga da bomba foi manualmente ajustada. Esse ajuste foi realizado até que a potência hidráulica, conforme a Eq. (24), se aproximasse do valor previsto pela Eq. (25) (Matos et al., 2021). A Eq. (26) representa a curva teórica da bomba (Matos et al., 2021).

$$P_{he} = Q_{be}\Delta P_{be} \quad (24)$$

$$P_{ht} = \eta_m C_p(\lambda) \frac{\rho_{ar} A_{catavento} \vec{V}^3}{2} \quad (25)$$

$$\Delta P_{bt} = \eta_m C_p(\lambda) \frac{\rho_{ar} A_{catavento} \vec{V}^3}{2Q_{bt}} \quad (26)$$

As potências hidráulicas da bomba, representadas por P_{he} (experimental) e P_{ht} (teórica), são medidas em Watts. A variável ρ_{ar} denota a densidade do ar à temperatura ambiente. A vazão de descarga experimental, Q_{be} , é expressa em m^3/s , e ΔP_{be} reflete a diferença de pressão imposta pela bomba. Vale destacar que, como mencionado anteriormente, tanto a vazão quanto a pressão da bomba foram avaliadas na tubulação de descarga, utilizando sensores específicos de vazão e pressão.

No contexto teórico, Q_{bt} refere-se à vazão de descarga teórica da bomba, também em m^3/s , e ΔP_{bt} representa a diferença de pressão teórica da bomba. O rendimento mecânico, indicado por η_m , está relacionado às perdas de transmissão do mecanismo e às perdas hidráulicas internas à bomba. Neste caso, adotou-se um rendimento mecânico de 100%, uma vez que o objetivo principal do trabalho era

promover o máximo de stress hidráulico e, por conseguinte, a transferência mais eficaz de carga ao sistema de OR.

O coeficiente de potência do catavento, denotado por c_p , varia em função da velocidade específica da ponta da pá, $\lambda = \omega R/\bar{V}$, onde ω é a rotação do cata-vento em rad/s, R é o raio do cata-vento e \bar{V} é a velocidade média do vento no local, em m/s. Além disso, A_0 representa a área transversal de varredura do cata-vento em m^2 , γ é o peso específico da água em N/m^3 , e ρ_{ar} é a densidade do ar.

4.2 Condições de simulação

Conforme discutido anteriormente, o sistema opera em baixas rotações devido à presença do redutor acoplado ao motor, uma característica crucial para garantir a aplicação de alto torque na bomba. Isso viabiliza seu desempenho tanto no bombeamento em poços profundos quanto no acionamento simultâneo de sistemas de osmose reversa. As simulações foram planejadas considerando uma rotação constante da bomba a 14,36 rpm, juntamente com diferentes velocidades de vento: 3,5 m/s, 4,5 m/s e 5,5 m/s. Estas simulações foram conduzidas em três condições distintas: no primeiro cenário, sem o uso de acumuladores de pressão e sem o sistema de osmose reversa; no segundo cenário, foi utilizado o acumulador de pressão, mas não a membrana de osmose reversa; e, por fim, no terceiro cenário, tanto o acumulador de pressão quanto as membranas de osmose reversa foram empregados. O esquema completo de todos os casos utilizados nas simulações está apresentado na Tabela 1.

Ao analisar a Tabela 1, duas observações se destacam. Primeiramente, não foi simulado nenhum caso sem acumuladores de pressão e com o sistema de osmose reversa, uma vez que essa configuração poderia danificar a membrana devido ao alto gradiente de pressão, inviabilizando a continuidade do estudo. Em segundo lugar, observa-se que, para as velocidades de 3,5 m/s e 4,5 m/s, no caso em que são usadas tanto a membrana de osmose reversa quanto o acumulador de pressão, não ocorre a produção de permeado, conforme demonstrado por Okura et al. (2023). Os autores mostraram que isso ocorre somente para velocidades a partir de 5,5 m/s, resultando na ausência de resultados experimentais para esses casos. Portanto, o presente estudo não gerou simulações para esses dois cenários, uma vez que não seria possível compará-los

para validação, resultando em um total de sete casos de simulação destinados à análise da pressão, vazão e potência.

Tabela 1 - Esquema de valores para rotação da bomba e velocidade de vento para cada simulação

Sequência	Grupo	Rotação da bomba (RPM)	Acumulador de pressão	OR	Velocidade dos ventos (m/s)
1					3,5
2	1	14.36	Não	Não	4,5
3					5,5
4					3,5
5	2	14,36	Sim	Não	4,5
6					5,5
-					3,5 (sem permeado)
-	3	14,36	Sim	Sim	4,5 (sem permeado)
7					5,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Ademais, o coeficiente de perda de carga foi ajustado por meio de um registro na saída da tubulação (conforme mostrado na Figura 7), visando uma melhor adaptação das curvas de potência aos resultados experimentais. No início do programa, são definidos o número de ciclos da bomba e a quantidade de iterações a serem executadas entre cada ciclo. O esquema representativo de todos os casos utilizados nas simulações está detalhado novamente na Tabela 1.

4.3 Refino temporal

O refino temporal de uma simulação é definido como o passo no tempo entre cada interação, uma regra geral para esse tipo de trabalho é que quanto menor o passo no tempo de uma simulação, mais preciso são os resultados, porém, mais demorado será a realização dos cálculos da simulação (John & Anderson, 1995). Nesse sentido, para otimizar o tempo de simulação sem prejuízo a qualidade dos resultados, o ideal é encontrar o menor refino necessário para que o passo no tempo não influencie mais nos resultados.

Para tanto, foram observadas as principais variáveis da simulação, a variação da pressão ao longo do tempo. Utilizando os mesmos parâmetros de simulação e variando apenas o número total de interações, N_{pas} . o valor atribuído a essa variável foi duplicado

a cada nova simulação. Esse processo continuou até encontrar um ponto em que a variação do intervalo de tempo não tivesse mais impacto nos resultados.

4.5 Parâmetros das simulações

Para representar o sistema na simulação com base no protótipo, os parâmetros gerais das condições do sistema utilizados estão resumidos de forma concisa na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do sistema físico empregadas na simulação

Parâmetro	valor
Relação de transmissão motor-redutor	60:1
Relação de transmissão da máquina do catavento	3,2:1
Diâmetro do pistão	10,16 cm
Curso do pistão	12,5 cm
Distância entre o topo do pistão no ponto morto superior e o cabeçote	6 cm
Diâmetro das válvulas de sucção e descarga da bomba	24,5mm
Coefficiente de perda de carga localizada na sucção e descarga da bomba	2,9
Densidade da água	998,2 kg/m ³
Densidade do ar	1,18 kg/m ³
Aceleração da gravidade	9,82 m/s ²
Rendimento mecânico	100 %
Raio do catavento	3,7 m
Diâmetro das membranas	10,16 cm
Comprimento das membranas	101,6 cm
Intervalo entre cada coleta de dados dos sensores	10 ms
Volume do acumulador de pressão experimental	13 L

Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de igualar a potência hidráulica experimental, calculada pela Eq. (24), com a potência teórica estabelecida na Eq. (25), foi implementada uma restrição ao fluxo usando uma válvula tipo gaveta. Esta medida permitiu variar a pressão no sistema. Os valores de pressão e vazão, registrados pelos sensores após esse ajuste, foram

armazenados para análises posteriores. Esse processo foi repetido até a obtenção dos resultados experimentais para todos os casos mencionados na Tabela 1.

4.6 Método para Comparação entre Simulação e Experimento: RMSE

Com o intuito de validar os resultados simulados em relação aos experimentais, empregou-se um método de regressão para mensurar quão próximos os dois conjuntos de valores se encontravam mutuamente.

Uma métrica amplamente utilizada na avaliação de modelos de regressão é a *Root Mean Squared Error (RMSE)*, conhecida como raiz dos erros médios quadráticos. Essa métrica expressa a média das diferenças entre os valores previstos pelo modelo e os valores reais, sendo calculada pela raiz quadrada da média dos quadrados dessas diferenças, conforme ilustrado na Eq. 27 (Padhma, 2023). O *RMSE* proporciona uma medida eficaz da dispersão dos erros, indicando a precisão geral do modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (27)$$

No entanto, os valores obtidos para o *RMSE* dependem da escala dos dados, ou seja, aumentam de acordo com a magnitude dos valores, o que seria prejudicial para este trabalho. Para contornar essa questão, tornou-se necessário utilizar outro fator, o *Relative Root Mean Squared Error (RRMSE)*, demonstrado na Eq. (28), que transforma os resultados de *RMSE* em valores percentuais, facilitando a comparação entre os conjuntos de dados e variáveis (Padhma, 2023).

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i} \cdot 100 \quad (28)$$

Os resultados obtidos são classificados como: excelente, bom, justo e ruim, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação dos valores de *RRMSE*

Classificação <i>RRMSE</i>	Condição
Excelente	$RRMSE < 10\%$
Bom	$10\% \leq RRMSE < 20\%$
Justo	$20\% \leq RRMSE < 30\%$
Ruim	$RRMSE \geq 30\%$

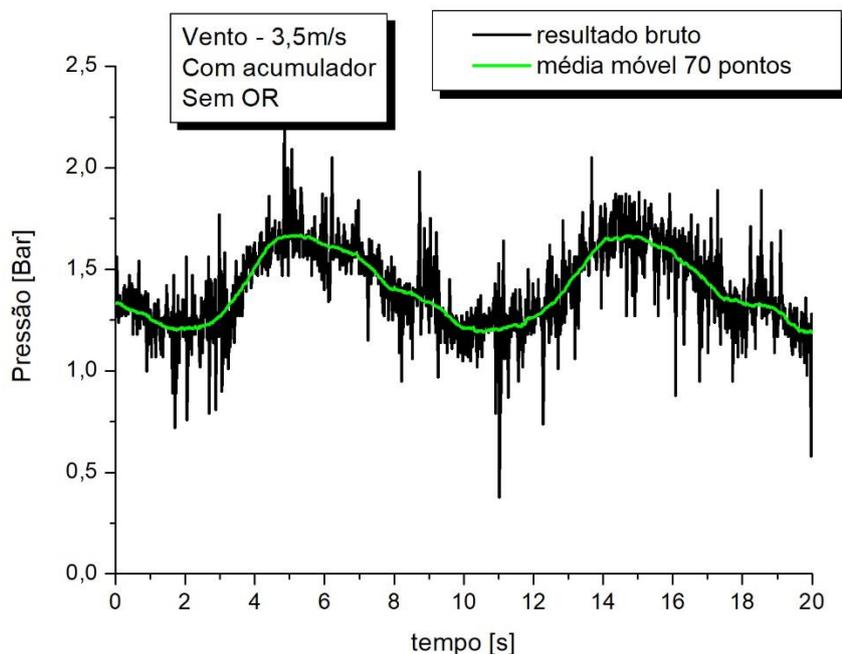
Fonte: (Padhma, 2023), editado pelo autor

5. RESULTADOS

Os resultados foram apresentados nas seções abaixo, contudo, os resultados experimentais apresentados precisaram ser tratados inicialmente, pois eles apresentavam ruídos, por isso, foi-se utilizado do método de média móvel de 30 pontos, afim de equalizar essa diferença. A Figura 15 abaixo ilustra como seria os resultados da variação da pressão ao longo do tempo com e sem o tratamento de média móvel para o caso experimental selecionado nas condições de 3,5 m/s, grupo 1 da Tabela 1.

Os resultados obtidos estão detalhados nas seções a seguir. No entanto, é importante ressaltar que os resultados experimentais exigiram um processo de tratamento, devido à presença de ruídos significativos. Para esse fim, foi empregado o método da média móvel de 70 pontos, visando suavizar os gráficos gerados. A Figura 15 apresenta uma comparação entre os resultados da variação da pressão ao longo do tempo, demonstrando os efeitos da aplicação e ausência do tratamento de média móvel para um caso experimental arbitrado.

Figura 15 - Resultados experimentais com e sem aplicação da média móvel



Fonte: Elaborado pelo autor

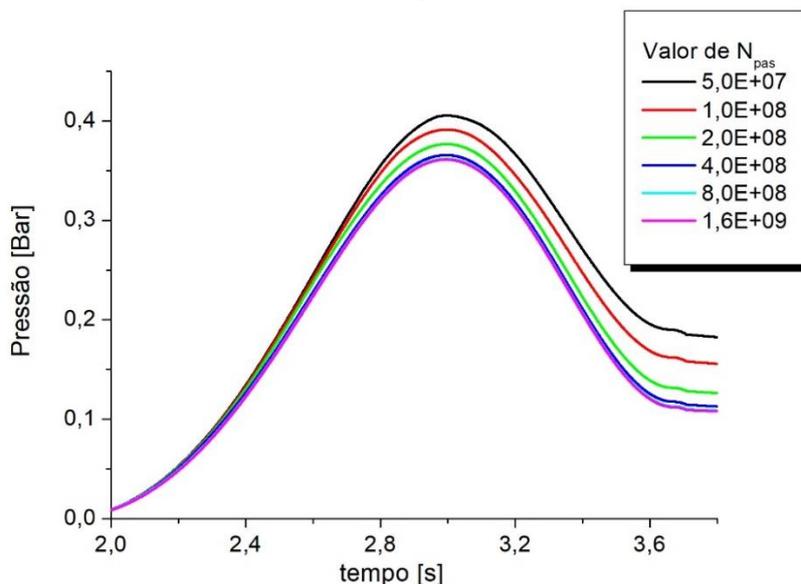
Adiante, os resultados foram organizados em quatro seções distintas. A primeira seção foi dedicada à explicação do refinamento temporal das simulações, ilustrando

como a otimização do intervalo de tempo na simulação pode não apenas reduzir os custos de processamento, mas também garantir a confiabilidade dos resultados. Em seguida, três seções sucederam, nas quais os resultados foram apresentados de forma detalhada. Uma dessas seções exibiu os resultados sem o uso de acumulador de pressão, enquanto outra demonstrou o impacto do acumulador de pressão. Por fim, na última seção, os resultados foram analisados considerando tanto o uso do acumulador de pressão quanto da osmose reversa, proporcionando uma visão abrangente do desempenho do sistema.

5.1 Estudo de refino temporal

Conforme introduzido na seção 4.3, o refino temporal foi uma etapa fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados. Seguindo a metodologia já explicada, variando apenas o número total de interações N_{pas} , o valor atribuído a essa variável foi duplicado a cada nova simulação. Esse processo continuou até encontrar um ponto em que a variação do intervalo de tempo não tivesse mais impacto nos resultados, e os resultados foram apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Comparação das curvas de potência e pressão ao longo do tempo variando o refino da simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

Como observado na Figura 16, o valor inicial para N_{pas} é $5,0E+07$, e ele é multiplicado por dois até atingir $1,6E+09$.

Observou-se que a curva gerada com N_{pas} de $8,0E+08$ replicou perfeitamente a curva resultante de $1,6E+09$. Isso evidencia que o passo no tempo deixa de influenciar a simulação após ultrapassar esse limite. Para tanto, esse foi o refino usado nas demais simulações.

A seguir, os resultados referentes às variáveis de pressão, potência e vazão foram apresentados, comparando as simulações com os dados experimentais, organizados da seguinte forma: inicialmente, os resultados sem a utilização de acumuladores de pressão (casos 1, 2 e 3 da Tabela 1); em seguida, os resultados com a implementação de acumuladores de pressão (casos 4, 5 e 6 da Tabela 1); por fim, os resultados obtidos com a inclusão de acumuladores de pressão e membrana de osmose reversa (caso 7 da Tabela 1).

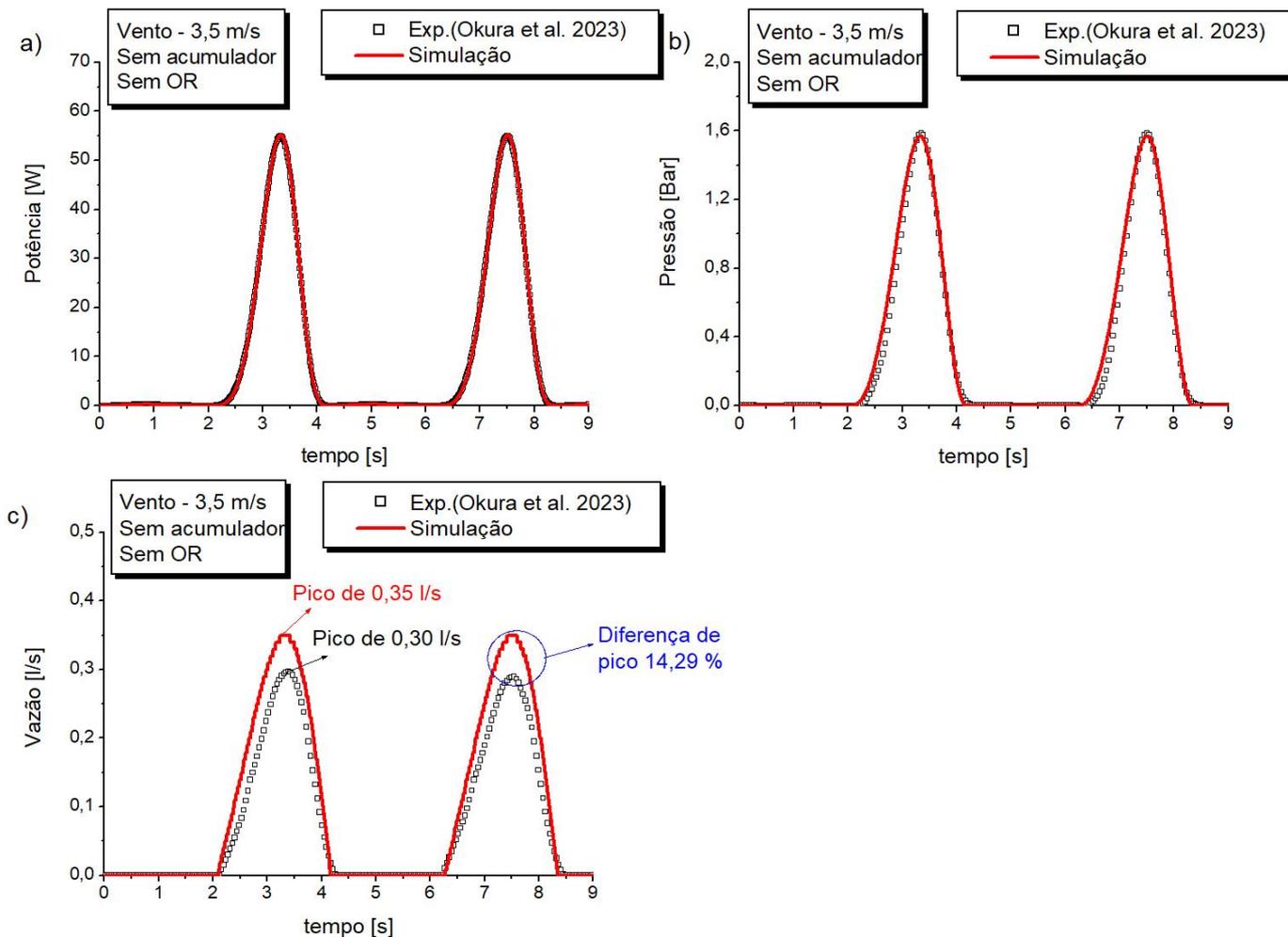
5.2 Análise comparativa sem acumulador de pressão e sistema de OR

De modo gerado, os resultados sem acumulador de pressão apresentando o seguinte comportamento. No estágio de compressão da bomba, o pistão inicia sua ascensão, resultando no aumento da pressão da água. Nesse ponto, a pressão da água cresce o suficiente para abrir a válvula de descarga. O aumento da pressão contínua até atingir o seu máximo, conforme ilustrado nas Figura 17b, Figura 18b e Figura 19b. Posteriormente, a pressão na tubulação começa a diminuir rapidamente, alcançando 0 bar, com uma variação de pressão mais intensa do que no início da compressão. Observa-se que a simulação gera curvas com uma forma de sino ligeiramente mais aberta em comparação com os resultados experimentais. Essa discrepância ocorre devido à limitação do modelo em representar precisamente a perda de carga com a abertura da válvula de sucção, resultando em um início de compressão um pouco antecipado em comparação com os resultados experimentais. Essa disparidade no início da compressão diminui à medida que a velocidade do vento aumenta, pois, maiores pressões resultam em uma abertura mais rápida da válvula.

A Figura 17 ilustra os resultados da variação da potência, pressão e vazão no cenário em que nenhum acumulador de pressão foi utilizado, com uma rotação da bomba de 14,36 rpm e uma velocidade do vento de 3,5 m/s. Nota-se que a maior

discrepância ocorre nos gráficos de vazão, onde as vazões de pico simuladas e experimentais foram de 0,35 e 0,30 l/s, respectivamente, representando uma variação de cerca de 14%, conforme demonstrado na Figura 17c.

Figura 17 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 3,5m/s sem acumulador e OR



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa discrepância pode ser atribuída ao método de controle utilizado na bancada desenvolvida por Okura et al. (2023), que envolve a manipulação manual de uma válvula. A perda de carga específica nesse ponto é de difícil quantificação, e a válvula foi ajustada para igualar a potência experimental à teórica apresentada na Eq. (25). O coeficiente de perda de carga na simulação foi ajustado manualmente para que a potência (resultado do produto entre a pressão e a vazão) simulada coincidissem com o resultado experimental. Como observado na Figura 17c, a vazão simulada de pico foi maior que a experimental em 14,29%. Essa diferença é atribuída ao modelo

implementado para a válvula de descarga da bomba, onde, nesse primeiro momento, foi usado um modelo (Eq. 8) com coeficiente de perda localizada constante e fixado para a maior abertura de válvula.

Apesar das diferenças mencionadas, as curvas dos gráficos experimentais e simulados exibidos na Figura 17 mostram consideráveis semelhanças. Em relação à potência, o valor máximo experimental foi de 54,94 W, enquanto o simulado foi de 55,21 W. Quanto à pressão, a simulação atingiu um valor máximo de 1,57 bar, enquanto os testes experimentais indicaram cerca de 1,59 bar, resultando em uma discrepância de 0,28 bar.

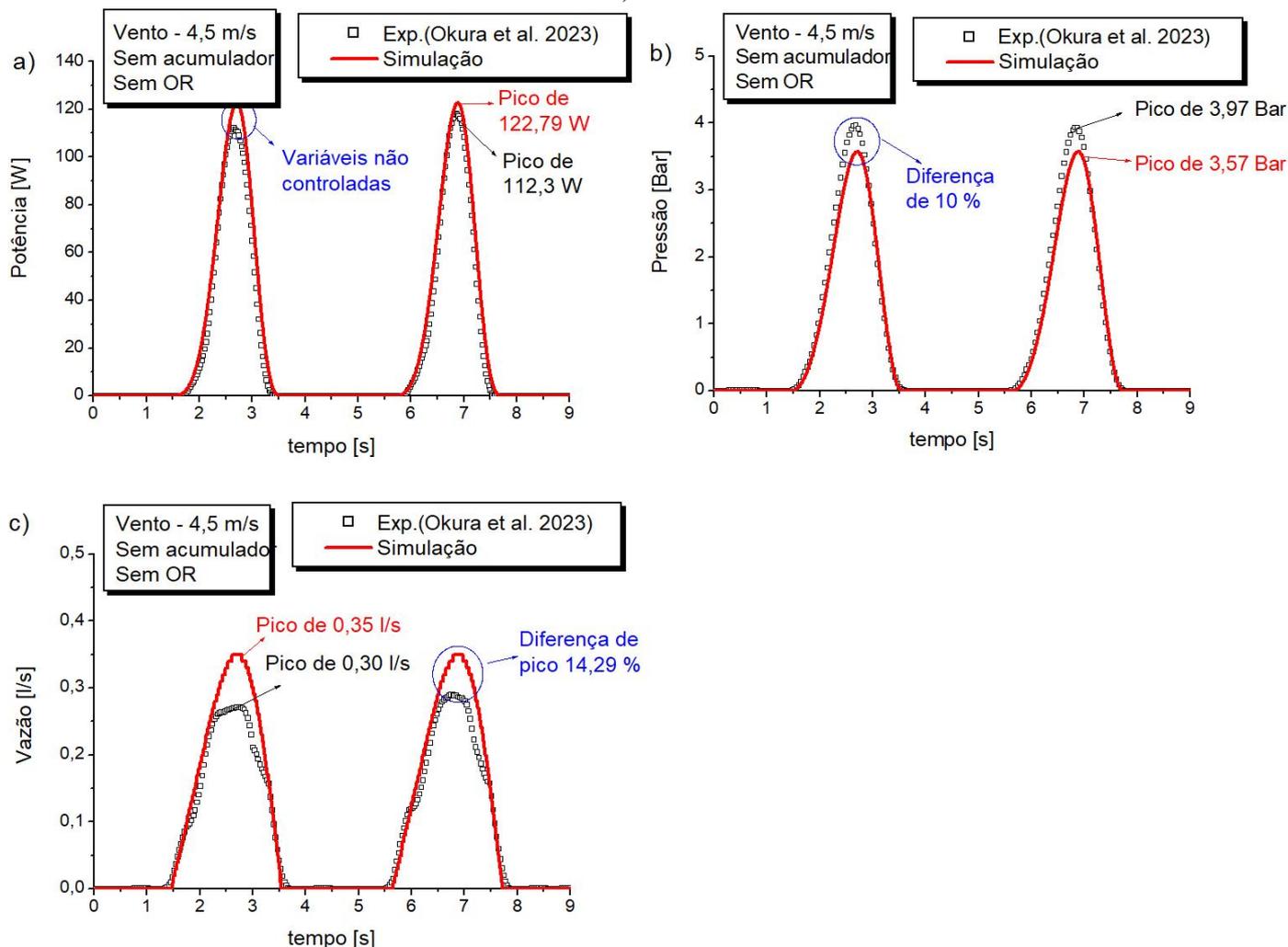
Além disso, os percentuais de Raiz do Erro Quadrático Médio Relativo (RRMSE) para potência, pressão e vazão são de 1,25%, 6,81% e 7,34%, respectivamente. Esses valores foram calculados considerando um coeficiente de perda de carga K na saída da tubulação de 654.

A Figura 18 exibe os resultados das variáveis para o cenário em que a velocidade do vento foi de 4,5 m/s e a rotação da bomba foi de 14,36 rpm.

Adotou-se um coeficiente de perda de carga de 1430 para as simulações apresentadas na Fig. 17. É evidente que os valores de pico da vazão nas Figuras 16c e 17c são idênticos, devido à variação da vazão em função da rotação da bomba, um parâmetro não manipulado neste estudo. Observa-se também que a curva experimental da vazão exibe pequenas irregularidades, possivelmente devido a travamentos breves na válvula da bomba e atrasos no acionamento, manifestando-se como pequenos desvios no gráfico.

Além disso, nota-se uma discrepância entre os picos de pressão experimentais e simulados na Figura 18a. Esse fenômeno não foi evidenciado na Figura 17b, pois a pressão era substancialmente menor, resultando em uma diferença proporcionalmente menor. O objetivo das simulações era alinhar os resultados da potência experimental com os simulados por meio de um ajuste no coeficiente de perda de carga, o que resultou em picos quase idênticos entre os dois conjuntos de dados.

Figura 18 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 4,5m/s sem acumulador e OR



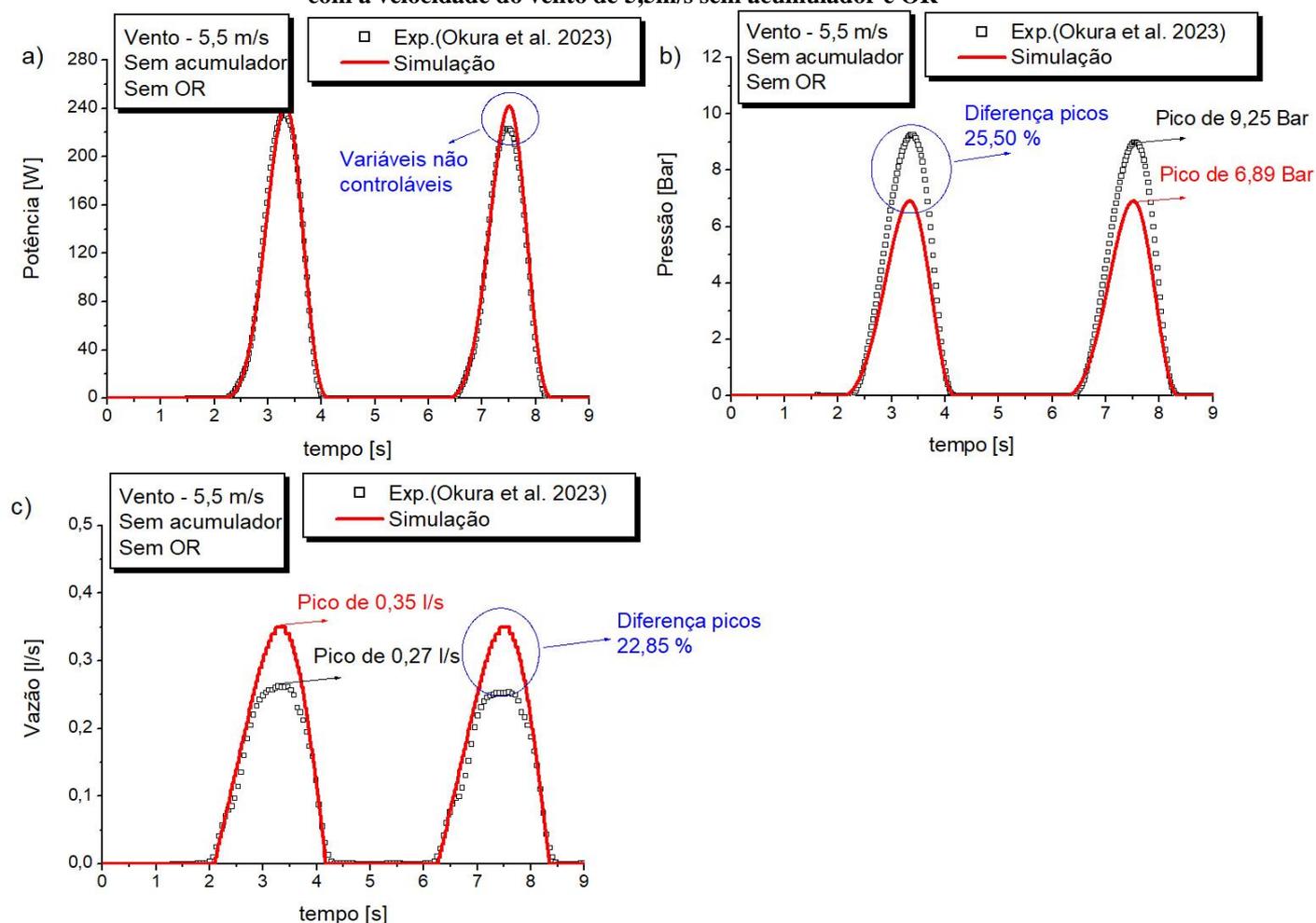
Fonte: Elaborado pelo autor

No primeiro ciclo da simulação, representado na Figura 18a, observa-se uma discrepância que ocorre devido à consideração de variáveis não dimensionadas no sistema, como vibrações e características específicas do acionamento da válvula da bomba de pistão.

Quanto à comparação entre os resultados experimentais e simulados, os valores de RRMSE foram de 2,94%, 12,76% e 10,17% para a potência, pressão e vazão, respectivamente. Estes índices de erro médio quadrático relativo são significativamente maiores em comparação com os resultados da Figura 17, conforme evidenciado no gráfico pela maior discrepância nos valores máximos. No entanto, valores acima de 10% para o RRMSE ainda podem ser considerados bons, como demonstrado na Tabela 3, indicando uma boa concordância entre os dados experimentais e simulados.

Na Figura 19, os resultados experimentais e simulados da potência, pressão e vazão para uma velocidade do vento de 5,5 m/s foram apresentados. A variação dos resultados experimentais e simulados da potência, conforme mostrado na Figura 18a, é visualmente baixa, exceto pelo erro induzido por variáveis não controladas, destacado na figura. O valor da média do erro quadrático relativo para a potência foi de 4,62%, sendo considerado excelente, conforme Tabela 3.

Figura 19 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 5,5m/s sem acumulador e OR



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o aumento da velocidade dos ventos, a pressão também aumentou, ampliando a discrepância entre os dados simulados e experimentais da pressão, apresentados na Fig. 19b. Outro fator que contribuiu para essa maior disparidade entre esses picos foi a vazão experimental ter sido ligeiramente mais baixa, quando comparadas com o caso em que foi usado uma velocidade do vento 4,5 m/s (Figura

18c). Como mencionado anteriormente, a vazão deve variar apenas em função da rotação da bomba. Portanto, os resultados da vazão simulada permanecem estáveis em 0,35 l/s. No entanto, a vazão experimental registrou uma pequena queda, atingindo no máximo 0,27 l/s, uma queda de 0,03 l/s comparando com o resultado anteriormente apresentado. Essa diminuição pode ser atribuída aos maiores esforços suportados tanto pelo motor quanto pela estrutura, possivelmente resultando em vazamentos mais significativos e, conseqüentemente, uma subestimação na medição da vazão. A necessidade de esforços adicionais é justificada pelo fato de que a potência varia conforme a velocidade dos ventos, conforme descrito na Eq. (25).

Os valores de RRMSE para a pressão e vazão, apresentados nas Figura 19b e Figura 19c, foram de 27,55% e 29,84%, respectivamente. Esses resultados são classificados como "justos" segundo os critérios definidos na Tabela 3.

A Figura 20 exibe os resultados da derivada da pressão ao longo do tempo para os casos simulados sem acumulador de pressão. Na análise da variação da pressão, percebe-se que ela oscila mais rapidamente no sistema real do que na simulação. Essa diferença ocorre porque o objetivo das simulações foi alinhar os resultados de potência simulada aos experimentais, e a vazão simulada consistentemente superou a experimental, como justificado anteriormente e comprovados nas Figura 17c, Figura 18c e Figura 19c. Isso resultou em uma pressão experimental maior que a simulada, gerando gradientes de pressão mais acentuados.

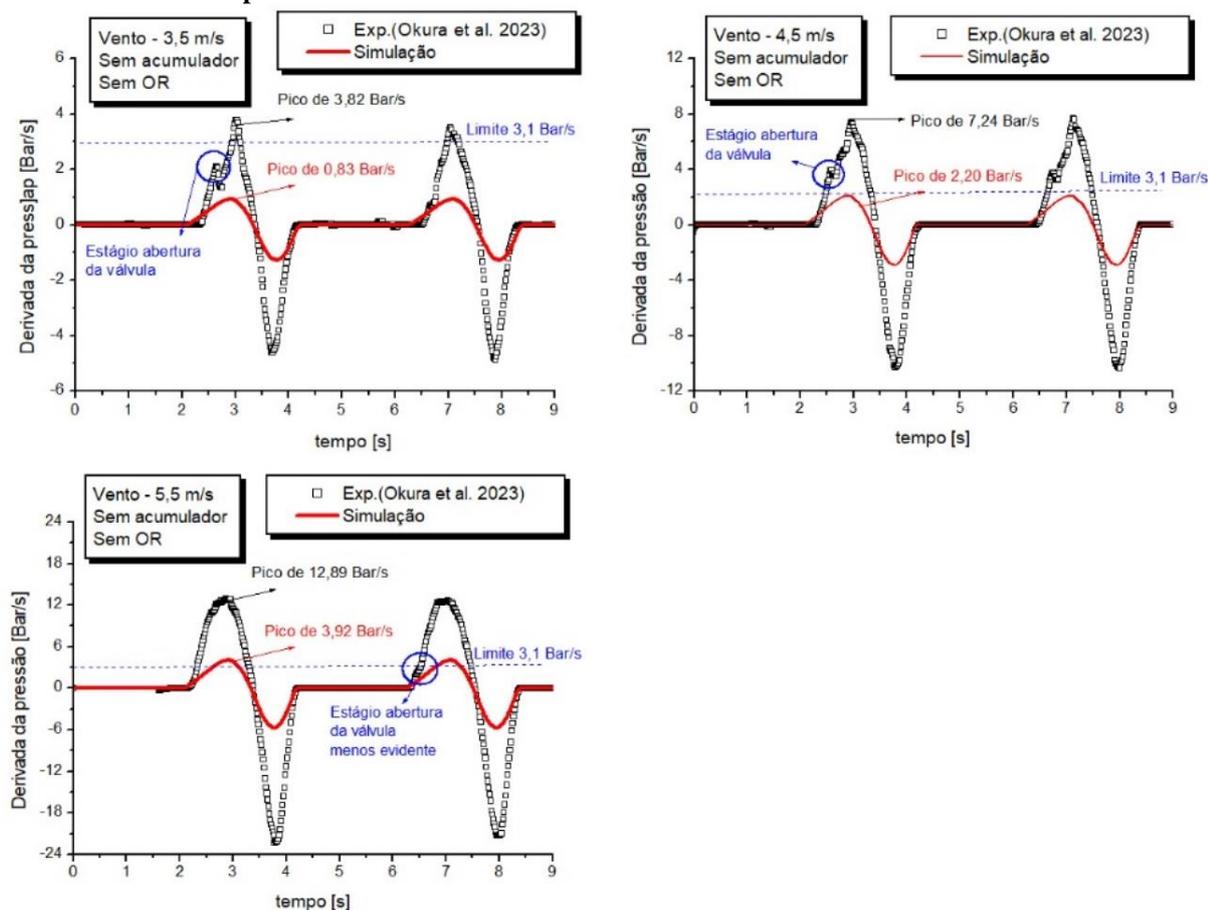
Particularmente na análise para uma velocidade do vento de 3,5 m/s, as pressões simulada e experimental apresentaram picos muito próximos, conforme ilustrado na Figura 17c. No entanto, a derivada da pressão para este caso ainda apresenta uma discrepância significativa (como observado na Figura 19a), embora menor que nos casos de velocidades de vento de 4,5 e 5,5 m/s (Figura 19b e Figura 19c, respectivamente).

Essa observação sugere que não apenas os valores máximos de pressão, mas também outros fatores influenciam o gradiente de pressão. A explicação mais plausível é que a simulação não conseguiu capturar adequadamente o comportamento da válvula da bomba alternativa utilizada, cuja resposta não linear não foi considerada no modelo computacional (Eq. (8)). Com base na eliminação de outras variáveis, foi possível concluir que a não linearidade nos resultados estava associada especificamente à válvula

da bomba de água. Essa conclusão foi alcançada através do monitoramento direto dos dados no volume de controle da bomba de água, o que permitiu descartar outras variáveis como potenciais causas desse efeito. Essa não linearidade de abertura é evidenciada na análise das Figuras 20a e 20b, onde foi destacada

No entanto, a Figura 20c apresenta um estágio de abertura de válvula menos evidente, pois foi ofuscado pelo alto gradiente de pressão.

Figura 20 – Derivada da pressão para velocidade do vento de a) 3,5, b) 4,5 e c) 5,5 m/s, sem acumulador de pressão e OR

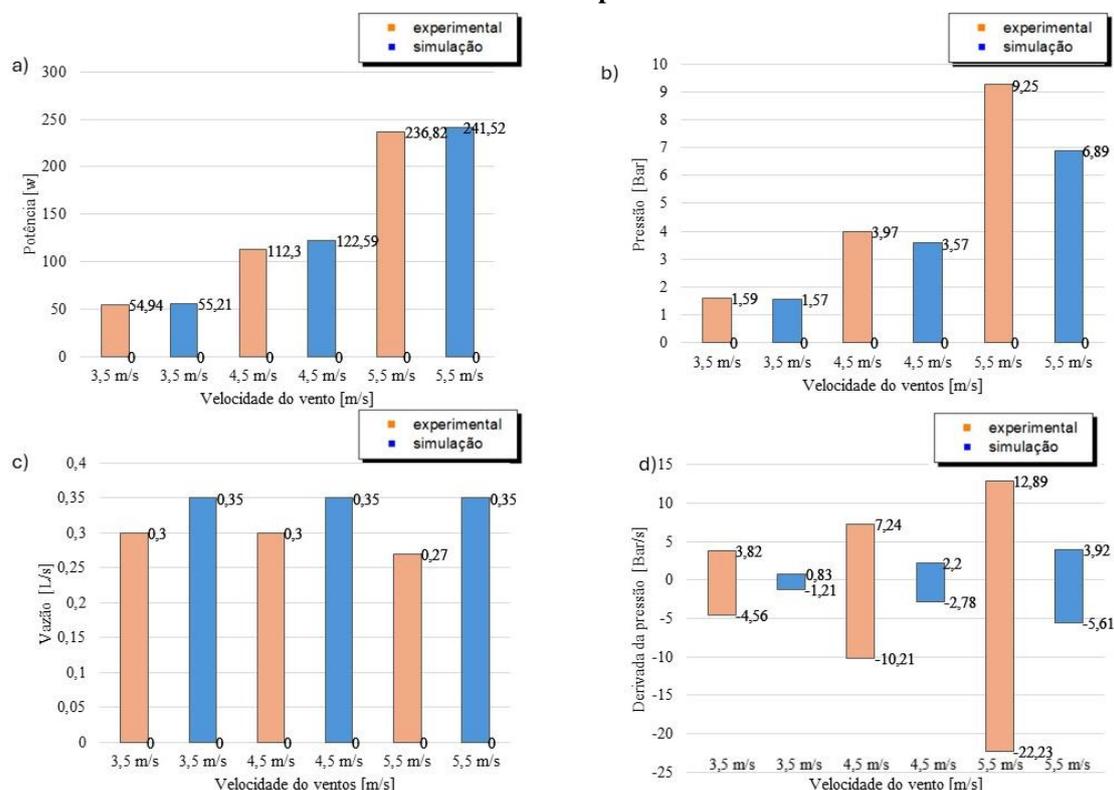


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 apresenta uma compilação dos valores máximos e mínimos obtidos em três simulações sem o uso de um acumulador de pressão. Observa-se que os valores mínimos para potência, pressão e vazão são consistentemente zero. À medida que o pistão inicia seu curso, há uma tendência para o desenvolvimento de uma pressão máxima de pico. Consequentemente, a variação total da pressão aplicada é sempre igual ao valor máximo de pressão.

Quanto a Figura 21d, fica mais evidente a discrepância entre a taxa de variação da pressão dos resultados experimentais e simulado.

Figura 21 - Valores máximo para a) potência, b) pressão, c) vazão e d) derivada da pressão, sem o uso de acumulador de pressão sem OR



Fonte: Elaborado pelo autor

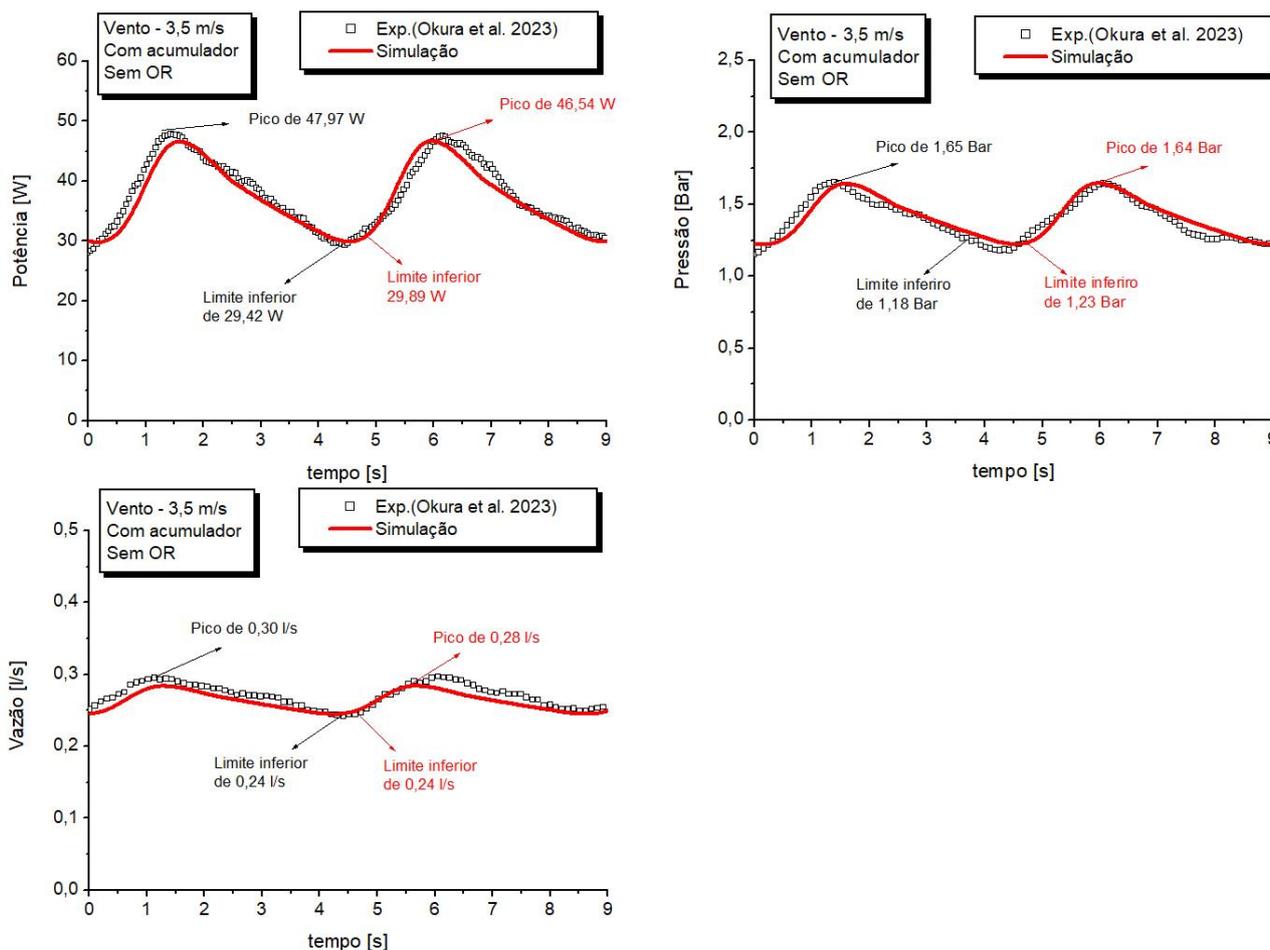
5.3 Análise comparativa com acumulador de pressão e sem sistema de OR

A Figura 22 apresenta os resultados simulados e experimentais referentes ao caso em que foi empregado o acumulador de pressão, para uma velocidade do vento de 3,5 m/s, e para esses resultados foi usado um valor para o coeficiente perda de carga de 1050.

Na comparação entre os resultados evidenciados na Figura 17 e os da Figura 22, ressalta-se a discrepância fundamental: a pressão no segundo caso não atinge o ponto zero em nenhum momento dos ciclos. Esta notável disparidade é resultante da atuação do acumulador de pressão, que mantém parte da pressão do sistema durante a fase de descarga da bomba. Conseqüentemente, a variação da pressão ao longo do tempo revela uma significativa redução quando contrastada com os resultados obtidos sem a

implementação do acumulador. Nos casos com o acumulador, os picos dos resultados experimentais e simulados atingiram 1,65 e 1,64 Bar/s, respectivamente, uma redução de 66% nos resultados experimentais e 34% nos resultados simulados comparando com os resultados sem acumulador de pressão.

Figura 22 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 3,5m/s com acumulador sem OR



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a Figura 22 em relação aos valores máximos, os resultados experimentais apresentaram potência, pressão e vazão de 47,97 W, 1,65 Bar e 0,30 L/s, respectivamente, enquanto os simulados registraram 46,54 W, 1,6 Bar e 0,28 L/s.

Dado que os gráficos gerados com o uso de acumuladores exibem limites inferiores distintos de zero, é essencial analisar esses limites inferiores. Nesse contexto, os limites inferiores dos gráficos apresentados na Figura 22 foram de 29,42 W, 1,18

Bar e 0,24 L/s para os resultados experimentais de potência, pressão e vazão, respectivamente. Em contraste, para os resultados simulados, os valores correspondentes foram de 29,89 W, 1,23 Bar e 0,24 L/s para potência, pressão e vazão, respectivamente.

A amplitude dos resultados na Figura 22, referentes à potência, pressão, vazão e derivada da pressão, apresentou valores distintas. Para os resultados experimentais, registrou-se uma amplitude de 18,55 W, 0,47 Bar e 0,06 L/s. Já para os resultados simulados, as amplitudes foram de 16,65 W, 0,42 Bar e 0,04 L/s, respectivamente.

Como observador, nota-se que a amplitude dos resultados experimentais é ligeiramente superior à dos resultados simulados. Essa discrepância pode ser justificada com o fato do ajuste manual da válvula para induzir a perda de carga, sendo que essa configuração não pode ser reproduzida exatamente igual no cenário tanto com acumulador quanto sem acumulador.

Conforme mencionado anteriormente, nos resultados experimentais foram usados um acumulador de pressão com capacidade de 13 L. No entanto, no contexto da simulação representada na Figura 22, foi necessário ajustar o volume do acumulador para 6L, a fim de viabilizar a comparação direta com os resultados experimentais. Essa disparidade é resultante da simplicidade do modelo do acumulador experimental, o qual não faz separação entre água e ar. Essa imprecisão impactou diretamente no volume útil do acumulador experimental, exigindo uma adaptação na simulação para assegurar a representação precisa dessa condição.

Quanto à comparação entre os resultados simulados e experimentais para Figura 22, os valores de RRMSE foram de 0,03%, 3,25% e 3,90% para potência, pressão e vazão, respectivamente.

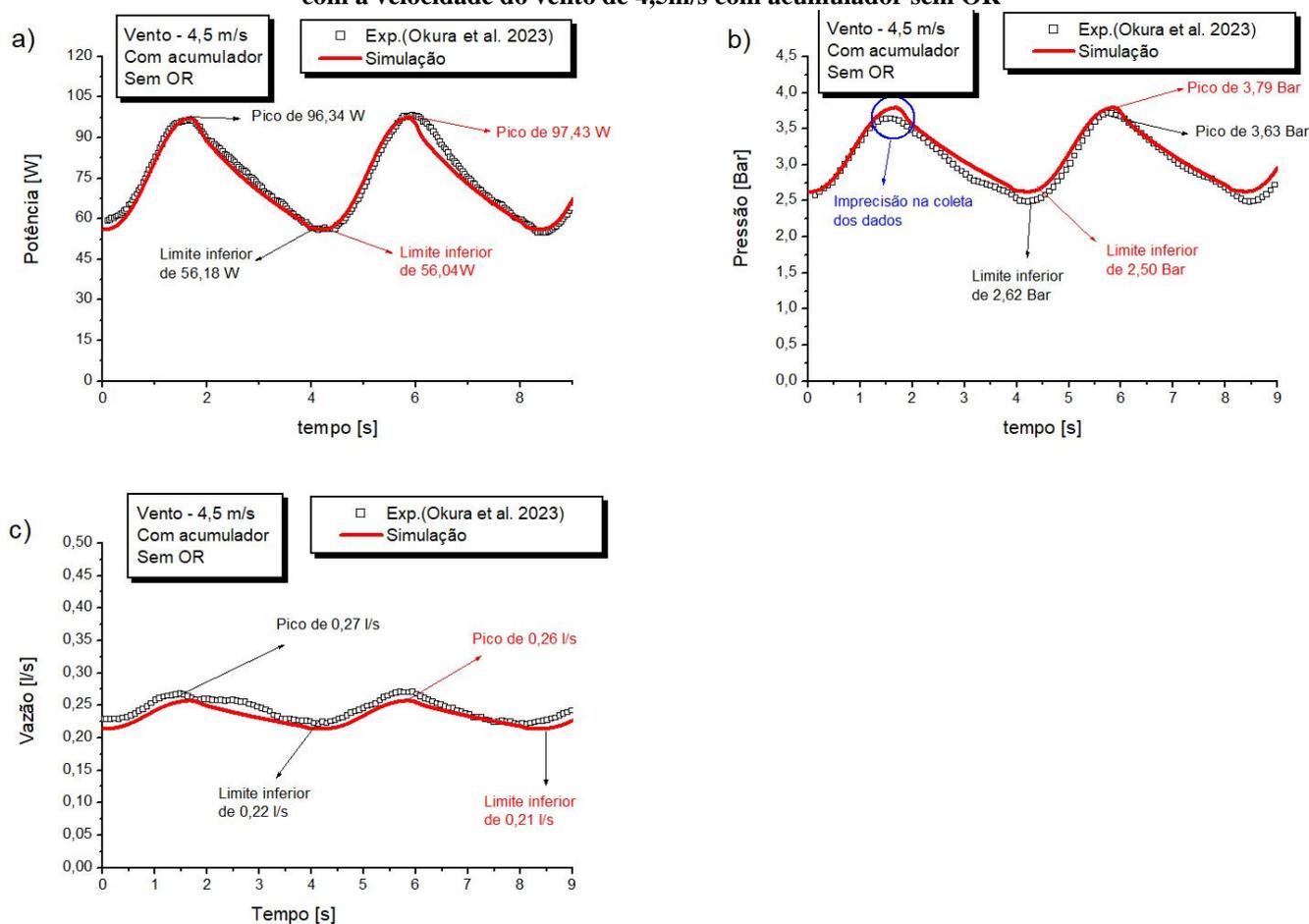
Em relação à Figura 22c, destaca-se uma notável redução na discrepância entre os resultados simulados e experimentais para a vazão, em comparação com os resultados do grupo 1. Isso se deve à presença do acumulador, que atenuou o erro do modelo para a válvula de descarga. Esse efeito de amortecimento é observado consistentemente em todos os resultados dos grupos 2 e 3.

Sobre Figura 22c, observa-se a diferença entre os resultados simulados e experimentais para a vazão foram significativamente reduzidas, quando comparadas

com as apresentadas no grupo 1, pois com a presença do acumulador, o erro do modelo para válvula de descarga foi amortecido no acumulador. Esse mesmo efeito é observado para todos os resultados do grupo 2 e 3.

A Figura 23 exibe os resultados simulados e experimentais relacionados ao cenário com o uso de um acumulador de pressão, considerando uma velocidade do vento de 4,5 m/s. Nessa análise, o coeficiente perda de carga utilizada foi de 2950.

Figura 23 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 4,5m/s com acumulador sem OR



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso apresentado na Figura 23, a simulação foi parametrizada para usar um acumulador de pressão de 2 L, diferentemente da simulação anterior, figura 14.

Isso foi necessário para garantir que a amplitude dos resultados simulados coincidissem com os experimentais, sendo a justificativa a mesma comentada

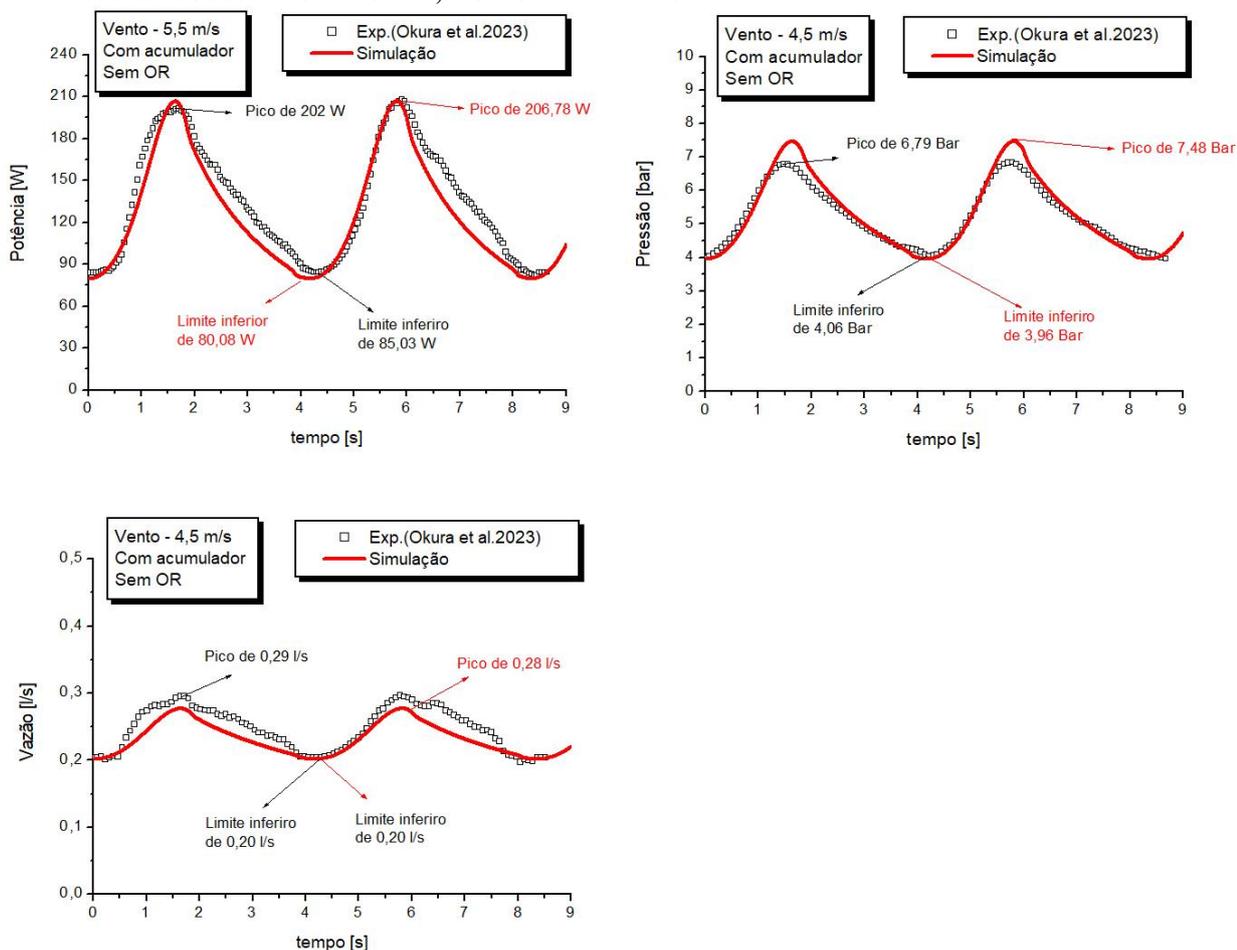
anteriormente, sobre a simplicidade do modelo de acumulador de pressão experimental, sendo que nesse caso, o volume onde houve a estabilização dos resultados foi de 2L.

No caso representado pela Figura 23, os valores máximos experimentais foram registrados em 96,35 W, 3,63 Bar e 0,27 L/s para potência, pressão e vazão, respectivamente. Já para os resultados simulados, os valores correspondentes foram de 97,43 W, 3,79 Bar e 0,26 L/s para as mesmas variáveis.

A amplitude dos resultados experimentais foi de 40,17 W, 1,01 Bar e 0,05 L/s para potência, pressão e vazão, enquanto a amplitude dos resultados simulados atingiu 41,39 watts, 1,29 Bar e 0,05 L/s.

Analisando os valores de RRMSE para os resultados apresentados na Figura 23, foi observado valores de 3,32%, 3,62% e 4,79% para potência, pressão e vazão, respectivamente.

Figura 24 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 5,5m/s com acumulador

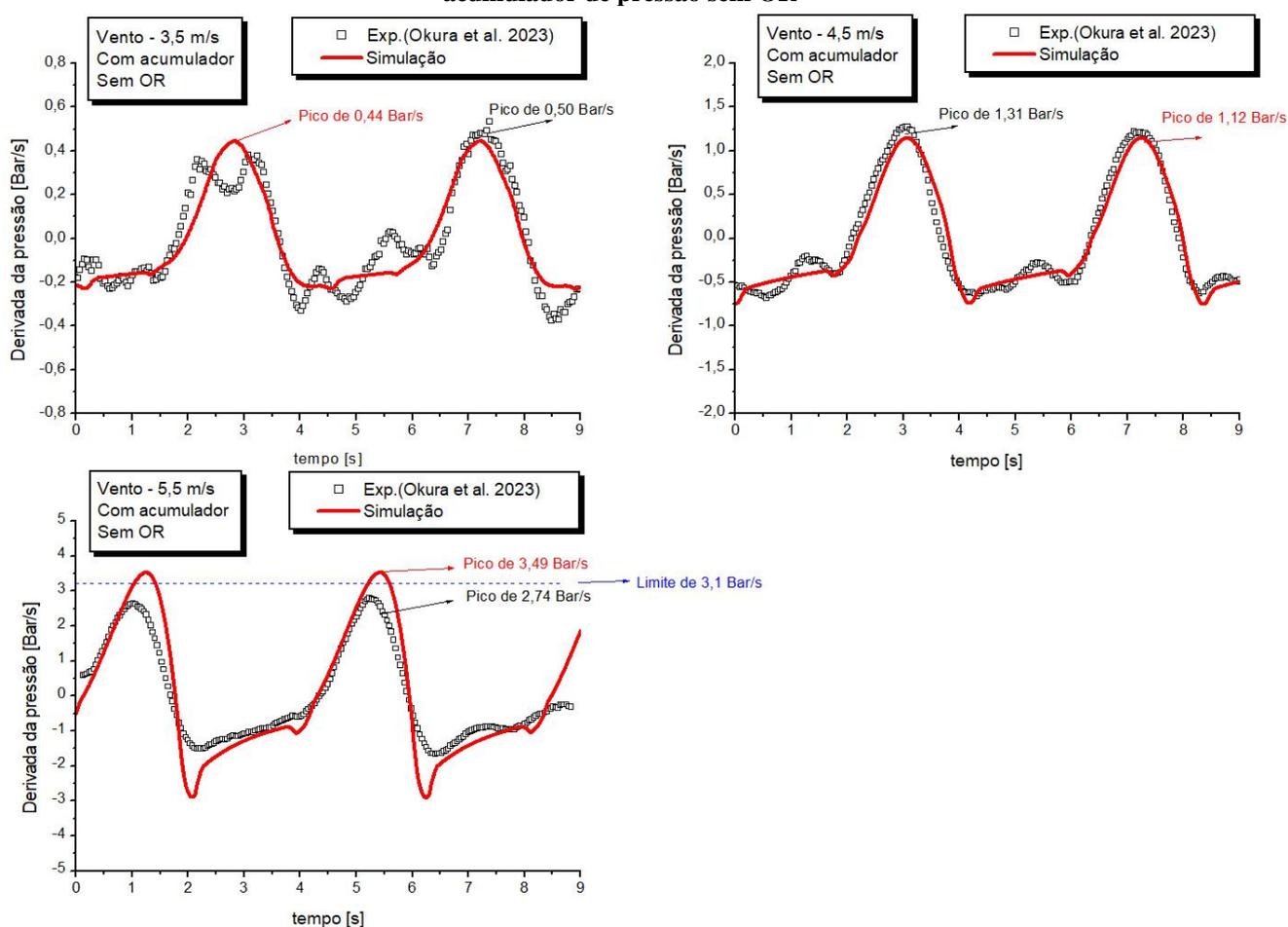


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 24 apresenta os resultados simulados e experimentais, usando acumulador de pressão, para uma velocidade do vento de 5,5 m/s. Nessa análise, o coeficiente perda de carga utilizada foi de 5000 e o volume do acumulador 1,6 L.

Para os resultados apresentados na Figura 24, os valores de RRMSE são de 9,00%, 5,87% e 0,40%, para a potência, pressão e vazão, respectivamente.

Figura 25 - Derivada da pressão para velocidade do vento de a) 3,5, b) 4,5 e c) 5,5 m/s, com acumulador de pressão sem OR



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 25 reúne os resultados das derivadas da pressão de três simulações que incluíram o uso de um acumulador de pressão. É perceptível que os dados experimentais mostram maior irregularidade em comparação aos simulados, indicando que o uso do acumulador pode ter introduzido flutuações nas taxas de variação da pressão não antecipadas pelos cálculos da simulação. No entanto, ao comparar estes

resultados com os da derivada da pressão sem o uso do acumulador (Figura 20), observa-se uma precisão significativamente melhorada na aproximação dos resultados. Essa melhoria se deve, em grande parte, à capacidade do acumulador de manter uma pressão constante no sistema, o que minimiza as interferências de fatores externos, como a vibração do sistema e, em especial, o acionamento da válvula na bomba alternativa, fatores esses que anteriormente afetavam a precisão dos resultados.

Além disso, pôde ser observado que os dados expostos nas Figura 25a e 24b evidenciam que, para as velocidades do vento de 3,5 e 4,5 m/s, o acumulador demonstrou eficácia na redução do gradiente de pressão, mantendo-o consistentemente abaixo de 3,1 Bar/s, conforme determinado por Liberman et al. (2020) como critério para a preservação da integridade da membrana. No entanto, a análise da Figura 24c revela que a simulação resultou em um gradiente de pressão excedendo esse limite, ao passo que os resultados experimentais não o fizeram.

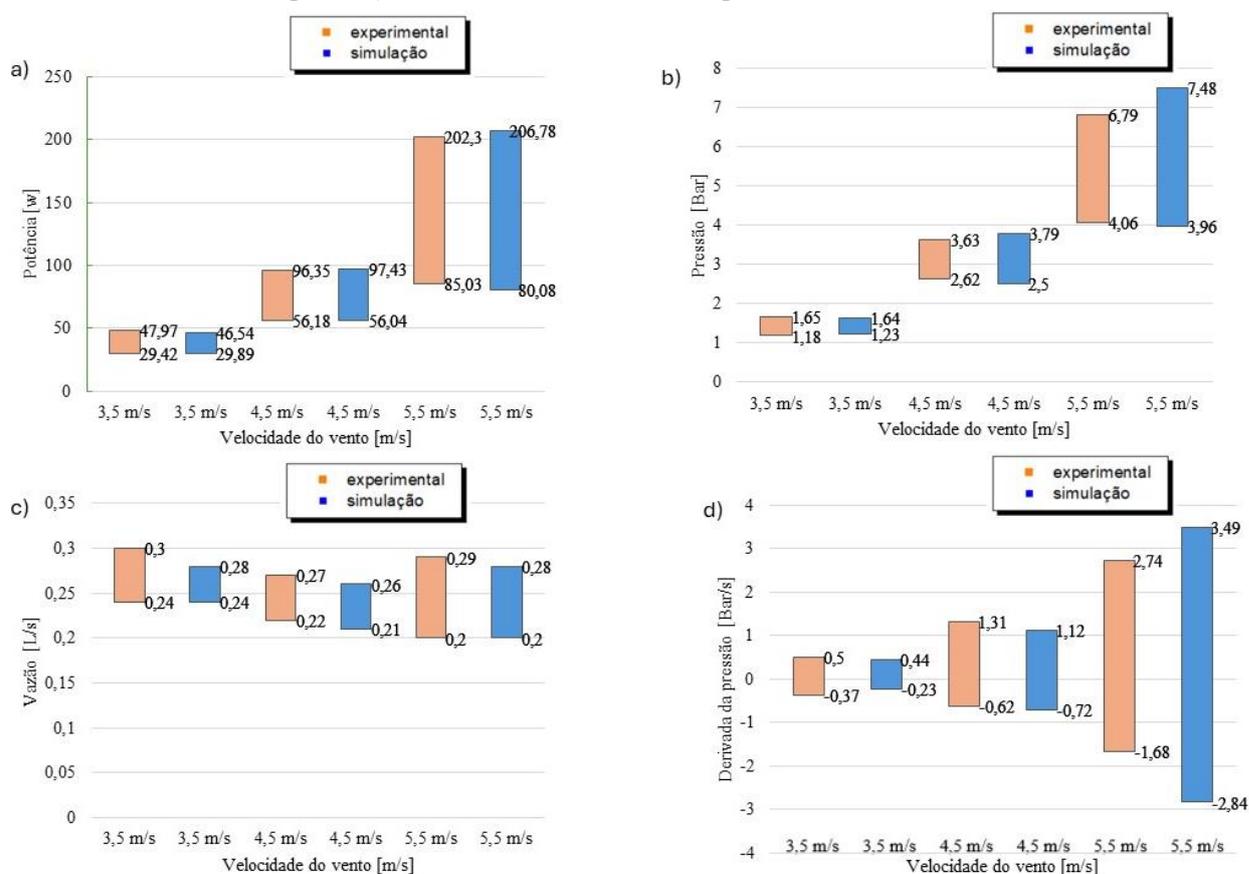
Uma justificativa para essa divergência reside no fato de que, para o caso analisado, a pressão simulada apresentou uma leve elevação em relação à pressão experimental, como observado na Figura 24b, o que resultou em uma variação maior da pressão ao longo do tempo.

Os valores máximos da derivada da pressão ao longo do tempo são destacados nas Figura 25, no entanto, não há necessidade de ressaltar limites inferiores nessas representações, uma vez que variações negativas na pressão indicam uma diminuição da pressão no sistema. Como discutido por Okura et al. (2023), tais quedas de pressão não representam riscos para a membrana, pois são indicativas de alívio de pressão.

De modo geral, observa-se na Figura 25 uma redução das oscilações nos gráficos experimentais acompanha o aumento da velocidade do vento. Esse padrão confirma as descobertas das simulações computacionais, que indicaram a necessidade de ajustar o volume do acumulador para menos à medida que a velocidade do vento aumenta. Em outras palavras, para velocidades mais altas do vento, o volume utilizado do acumulador é menor, resultando em menos flutuações nos resultados.

A Figura 26 exhibe os valores máximos e mínimos para potência, pressão, vazão e a derivada da pressão. Observa-se que os intervalos máximos e mínimos para as duas primeiras variáveis são os mais próximos entre os dados experimentais e os simulados.

Figura 26 - Intervalor de máximos e mínimos para a a) potência, b) pressão, c) vazão e d) derivada da pressão, com o uso de acumulador de pressão sem OR



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 26a, nota-se que a amplitude da potência dobra ao comparar os resultados para velocidades do vento de 3,5 m/s e 4,5 m/s. Esse aumento na amplitude é ainda mais significativo, alcançando um incremento de 3,15 vezes, ao comparar as velocidades de 4,5 m/s e 5,5 m/s. Esse padrão se repete ao examinar a pressão na Figura 26b e a derivada da pressão na Figura 26d. Tal comportamento ocorre devido à redução da eficiência máxima do acumulador de pressão à medida que se aumenta a pressão máxima do sistema, conforme evidenciado no estudo de Zhang et al. (2019). Esse estudo demonstrou como o volume disponível do acumulador pode impactar na diminuição da amplitude dos resultados ao variar a velocidade do vento e as rotações da bomba.

Em todos os casos analisados, o volume de água deslocado a cada ciclo da bomba permanece constante em 1,01 L. No entanto, ao examinar a Figura 26c, destaca-se uma discrepância mais pronunciada entre os limites dos dados experimentais e

simulados para a vazão em comparação com a pressão e a potência. Essa disparidade resulta do problema anteriormente mencionado: a não modelagem matemática da válvula de descarga da bomba. Isso é mais evidente no caso em que a velocidade do vento é de 5,5 m/s, devido aos maiores esforços submetidos ao equipamento e às maiores pressões. Ainda assim, o acumulador de pressão conseguiu gerar um bom amortecimento desse efeito causado pela válvula de descarga, como pode ser percebido ao comparar os gráficos da derivada da pressão sem o acumulador com aqueles que utilizam o acumulador.

Por fim, ao analisar a Figura 26d, verifica-se que a diferença na amplitude entre os resultados experimentais e simulados para a derivada da pressão é significativamente menor nos casos simulados com acumulador em comparação com os resultados sem o acumulador de pressão apresentados na Figura 21d. Isso se deve ao fato de que, nos casos simulados com acumulador, a pressão reproduz de maneira mais precisa a curva experimental.

5.4 Análise comparativa com acumulador de pressão e sistema de OR

Apenas os resultados para a velocidade do vento de 5,5 m/s, dentre todas as testadas no estudo de Okura et al. (2023), demonstrou ser capaz de superar a pressão osmótica associada à mistura com uma salinidade de entrada de 3000 ppm e gerar permeado. Consequentemente, os resultados relativos às velocidades do vento de 3,5 m/s e 4,5 m/s não foram discutidos pelos autores, conforme anteriormente explicado. Portanto, o foco das simulações foi em reproduzir esses achados para efeitos comparativos nessa seção.

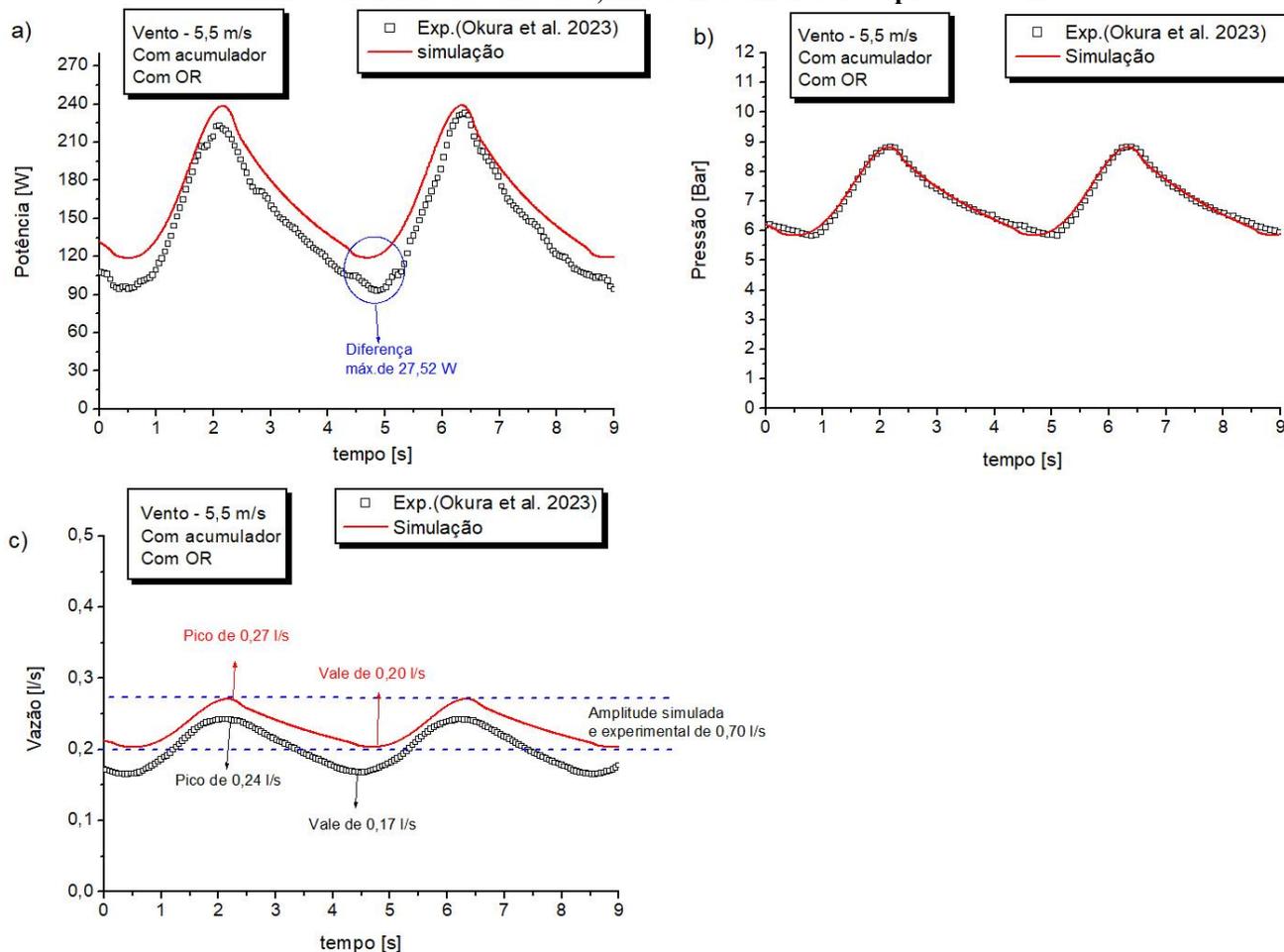
Como mencionado por Okura et al. (2023), essas outras velocidades não apenas falharam em produzir permeado, mas também exibiram gradientes de pressão constantemente abaixo do limite de Liberman et al. (2020), como demonstrado na Figura 24, o que elimina a necessidade de preocupação com a integridade da membrana para essas velocidades. As Figura 27a, Figura 27b e Figura 27c, ilustram os resultados obtidos para a velocidade do vento de 5,5 m/s em relação à potência, pressão e vazão, respectivamente.

Durante o experimento, a válvula na tubulação foi mantida completamente aberta, sendo que a principal perda de carga no sistema decorreu tanto da própria

membrana de osmose reversa quanto de uma válvula localizada na saída do rejeito. Para manter a consistência, a simulação adotou a mesma abordagem nos cálculos, atribuindo um coeficiente de perda de carga na saída do rejeito, com um fator k de 5000 (o mesmo valor de coeficiente utilizado na simulação da Figura 24), juntamente com um volume de 9 L para o acumulador.

Como evidenciado pela Figura 27b, a pressão simulada se alinhou perfeitamente com os resultados experimentais após os ajustes do coeficiente de perda de carga, obtendo uma RRMSE de 1,83 %.

Figura 27 - Variação da a) Potência, b) Pressão e c) Vazão para dados experimentais e simulados com a velocidade do vento de 5,5m/s com acumulador de pressão e OR



Fonte: Elaborado pelo autor

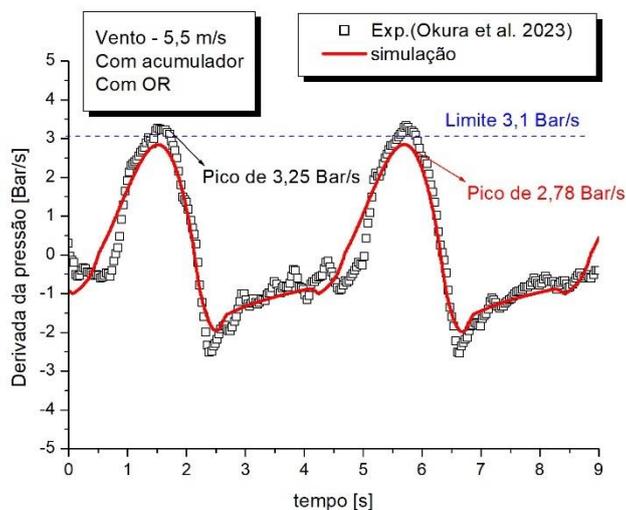
Entretanto, a vazão apresentou uma ligeira redução comparada com a experimental, resultando consequentemente em uma diminuição na potência, que por sua vez, exibiu uma diferença máxima de 27,52 W entre os limites inferiores do gráfico.

Para tanto, os valores de RRMSE para a vazão e potência foram de 15,60% e 13,65%, o que segundo os critérios estabelecidos na tabela 2 são excelentes.

Embora a Figura 27c mostre uma discrepância entre a vazão experimental e a simulada, a amplitude das duas se manteve idêntica, ambas atingindo 0,7 L/s. Esta variação indica que a ligeira redução na vazão observada ao utilizar o acumulador de pressão é resultado da subtração de uma constante.

A Figura 28 oferece uma visão dos resultados da derivada da pressão ao longo do tempo para o cenário em que foi estimada uma velocidade do vento de 5,5 m/s, empregando um acumulador de pressão no sistema de osmose reversa. Nela, pôde ser observado que o valor de pico experimental é de 3,25 Bar/s e o simulado de 2,78 Bar/s. Desse modo, somente os resultados experimentais ultrapassam o limite de 3,1 Bar/s apontado por de Liberman et al. (2020).

Figura 28- Derivada da pressão para velocidade do vento de 5,5 m/s, com acumulador de pressão e sistema de OR

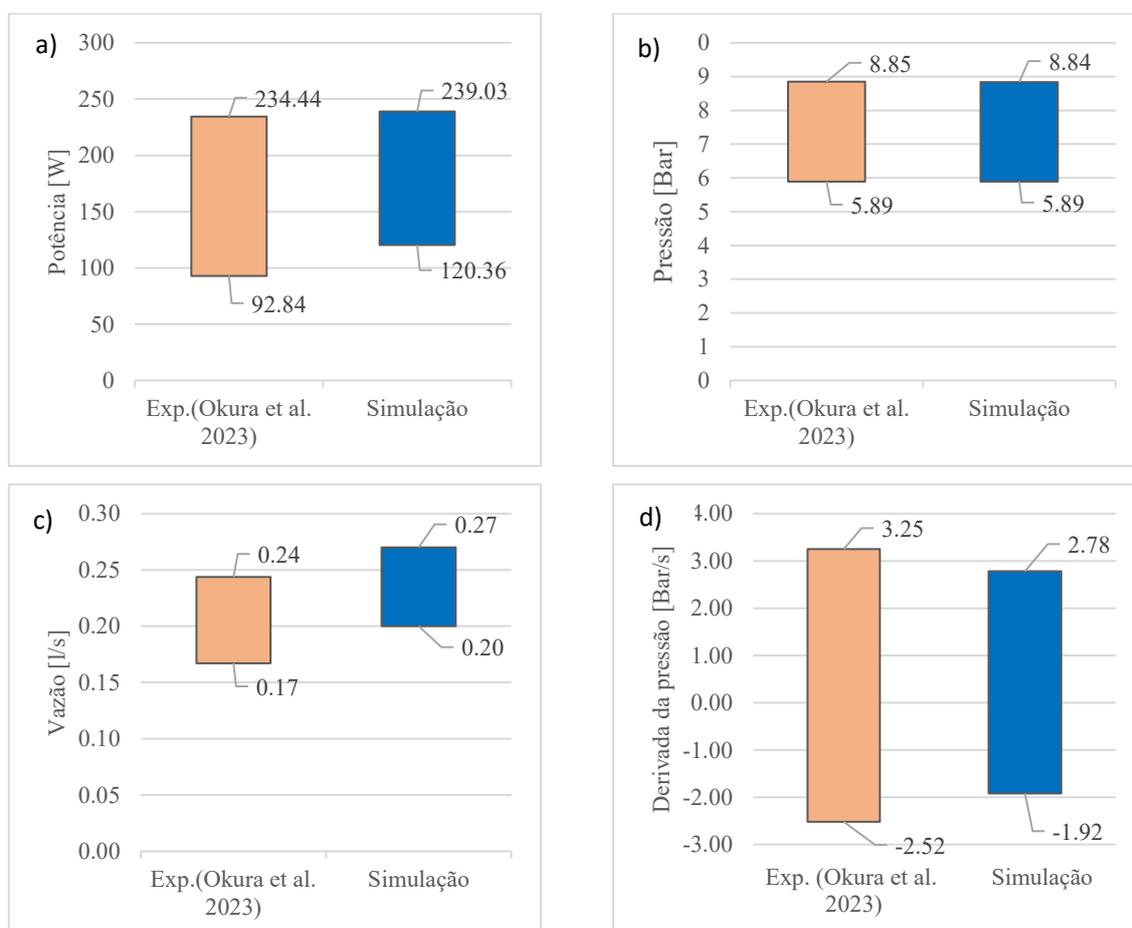


Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema que utiliza o acumulador de pressão é reproduzido com maior precisão pelo algoritmo de simulação em comparação ao sistema sem acumulador. Isso ocorre porque o acumulador mascara certas variáveis não contempladas pelos cálculos, especialmente a abertura da válvula da bomba d'água, conforme mencionado anteriormente. Por essa razão, a diferença entre os resultados simulados e experimentais é reduzida, como demonstrado no gráfico da Figura 28.

Na Figura 29, apresentam-se os valores máximos e mínimos para os resultados simulados e experimentais de potência, pressão, vazão e derivada da pressão, respectivamente, nas subfiguras Figura 29a, Figura 29b, Figura 29c e Figura 29d. A análise destes gráficos revela que a amplitude entre os resultados experimentais e simulados é consistentemente baixa, indicando uma precisão notável na simulação dos parâmetros estudados.

Figura 29 - Intervalo de máximos e mínimos para a a) potência, b) pressão, c) vazão e d) derivada da pressão, com o uso de acumulador de pressão e OR



Fonte: Elaborado pelo autor

Especificamente na vazão, as amplitudes dos resultados experimentais e simulados mostraram-se idênticas; no entanto, observou-se uma discrepância constante de 0,3 L/s, com os valores experimentais inferiores aos simulados. Essa variação sugere que a perda de carga causada pela membrana de osmose reversa afeta essa variável de maneira similar ao observado nos resultados da Figura 24c.

A precisão alcançada na medição da pressão foi particularmente alta, com uma diferença mínima de apenas 0,01 Bar entre os resultados simulados e experimentais. Dado que esta diferença é tão reduzida, é plausível considerar que seja resultado das flutuações menores na coleta dos dados, apesar dos esforços de suavização dos ruídos nos resultados, como discutido no início do Capítulo 5 deste trabalho.

Por outro lado, a potência, que depende diretamente da vazão e da pressão, mostrou que os valores experimentais foram ligeiramente mais baixos que os simulados. A diferença constante copia o erro oriundo dos resultados da vazão.

5.5 Análise comparativas dos resultados experimentais e simulados.

A Tabela 4 fornece uma análise concatenada dos valores da média do erro quadrático para todos os casos simulados neste trabalho. Na Tabela 1, os resultados foram divididos em três grupos.

Tabela 4 - Resumo dos valores de RRMSE

Grupo	Características simuladas	Velocidade do vento [m/s]	RRMSE da Potência	RRMSE da Pressão	RRMSE da Vazão
1	Sem acumulador Sem OR	3,5	1,25%	6,81%	7,34%
		4,5	2,94%	12,76%	10,17%
		5,5	4,62%	27,55%	29,84%
2	Com acumulador Sem OR	3,5	0,03%	3,25%	3,90%
		4,5	3,32%	3,62%	4,79%
		5,5	9,00%	5,87%	0,40%
3	Com acumulador Com OR	5,5	13,65%	1,81%	15,60%

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 4, os resultados de RRMSE do Grupo 1 para uma velocidade do vento de 3,5 m/s foram todos classificados como excelentes. Ao aumentar a velocidade para 4,5 m/s, esperava-se que a potência mantivesse o menor erro, indicando uma excelente precisão, uma vez que a simulação ajustou o coeficiente de perda de carga para nivelar os dois valores de potência com o experimento. No entanto, isso não se confirmou devido à discrepância nos picos de potência experimental, conforme destacado na

Figura 18, influenciada por variáveis externas não controladas pela simulação. Prosseguindo com a análise para a velocidade de 5,5 m/s no mesmo grupo, o erro associado à potência ainda apresenta uma excelente aproximação, enquanto a pressão e a vazão são classificadas como "justas" segundo os critérios de Padhma (2023), indicando uma aproximação regular, mas aceitável.

Para o Grupo 2, que inclui resultados com o uso do acumulador de pressão e sem o sistema de osmose reversa (OR), observou-se que os valores de RRMSE foram classificados com excelentes em todas as condições simuladas. Houve um leve aumento no erro com o incremento da velocidade dos ventos, porém, não foi suficiente para alterar a classificação dos resultados.

Adicionalmente, a incorporação da membrana de osmose reversa na simulação demonstrou ser eficaz, alcançando um RRMSE considerado excelente para a pressão, apesar de a pressão experimental ter ficado ligeiramente abaixo do esperado. Os demais resultados foram classificados como bons, evidenciando o sucesso da simulação em replicar as condições experimentais com precisão.

A Tabela 5 compila os coeficientes perda de carga e o volume do acumulador de pressão usadas nas simulações.

Tabela 5 - Resumo dos valores de perdas de carga e volume do acumulador usado na nas simulações

Grupo	Características simuladas	Vento [m/s]	Coefficiente de perda de carga	Volume do acumulador [L]
1	Sem acumulador Sem OR	3,5	655	0
		4,5	1430	0
		5,5	2830	0
2	Com acumulador Sem OR	3,5	1050	6
		4,5	2950	2
		5,5	5000	1,6
3	Com acumulador com OR	5,5	5000	9

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme previsto pela Eq. (25), o coeficiente de perda de carga tende a aumentar com maiores velocidades do vento. No entanto, foi observado que, para uma mesma velocidade, as perdas de carga no Grupo 2, que utilizou acumulador de pressão, foram superiores às do Grupo 1, que não usaram. Esta diferença pode ser atribuída à

eficácia do acumulador em aliviar a pressão do sistema no Grupo 2, exigindo ajustes na perda de carga para atingir as potências esperadas nas respectivas velocidades de vento.

O Grupo 3, que combinou o uso de acumulador de pressão com o sistema de osmose reversa, foi analisado em um único caso com velocidade de vento de 5,5 m/s. Como esperado, adotou-se o mesmo coeficiente perda de carga do Grupo 2 para essa velocidade, indicando consistência nas condições de simulação.

Adicionalmente, foi necessário ajustar o volume do acumulador de pressão nos casos simulados. A falta de um método para separar os volumes líquido e gasoso dentro do acumulador implicou que, dependendo do coeficiente de perda de carga do sistema, o volume útil variou significativamente. Conforme mostrado na Tabela 5, quanto maior esse coeficiente, menor o volume útil do acumulador.

O Grupo 3 conseguiu utilizar o maior volume do acumulador, alcançando 9 L. Este aumento se deve à localização da perda de carga, concentrada tanto nas membranas de osmose reversa quanto em uma válvula próxima ao sistema de OR, resultando em um maior uso do volume do acumulador em comparação com os outros grupos, onde a perda de carga se concentrava principalmente em uma válvula próxima aos acumuladores.

6. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver e apresentar um programa em linguagem Fortran para a simulação do bombeamento de água por meio de uma bomba alternativa monocilíndrica. A simulação incorporou o processo direto de bombeamento, a integração com um acumulador de pressão e um sistema de osmose reversa, ampliando significativamente a aplicabilidade do modelo.

O primeiro objetivo específico foi gerar gráficos que mostrassem as principais características de fluxo, potência, pressão e vazão sob diferentes condições de velocidade do vento. Esse objetivo foi atingido, com resultados apresentados nas Figuras 17 a 29, onde, além das representações gráficas, foi realizada a comparação entre os resultados simulados e os experimentais de Okura et al. (2023) para validação dos cálculos.

Para avaliar a proximidade entre os resultados simulados e experimentais, foi aplicado o método analítico RRMSE. Essa comparação demonstrou que o programa simulou as condições experimentais com alta precisão, classificando cerca de 66,7% dos resultados como excelentes ($RRMSE < 10\%$). As simulações envolvendo o uso de acumuladores de pressão destacaram-se, alcançando precisão classificada como excelente segundo os requisitos de Padhma (2023), especialmente na simulação de potência para a velocidade do vento de 3,5 m/s no Grupo 2 da Tabela 4, com erro de apenas 0,03%. Apenas 11,5% dos resultados foram considerados justos ($RRMSE$ entre 20% e 30%), o que demonstra a robustez do modelo desenvolvido.

O segundo objetivo específico, que foi analisar o gradiente de pressão no sistema, e o terceiro, que analisou como os acumuladores de pressão poderiam atenuar altos gradientes de pressão, foram abordados de forma complementar. Inicialmente, gráficos da derivada da pressão foram gerados para os casos sem acumuladores, revelando altos gradientes de pressão superiores a 3,1 Bar/s, o que inviabilizaria o acoplamento direto do sistema de bombeamento ao de dessalinização. Após a inclusão dos acumuladores de pressão, observou-se uma redução significativa no gradiente de pressão, com picos de 0,44 e 1,31 Bar/s para velocidades de 3,5 m/s e 4,5 m/s, respectivamente, compatíveis com os limites de resistência da membrana.

No entanto, para a velocidade de 5,5 m/s, houve uma divergência, com a simulação calculando um gradiente de 3,49 Bar/s, enquanto o resultado experimental foi de 2,74 Bar/s. Embora essa diferença seja pequena, ela é suficiente para inviabilizar o acoplamento direto do sistema de OR com este modelo de bomba, caso apenas o resultado simulado seja considerado, indicando a necessidade de um possível ajuste na simulação para melhorar a precisão em velocidades de vento mais elevadas.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O trabalho deixa duas propostas de trabalhos futuros, sendo o primeiro o aprimoramento dos acumuladores de pressão usado na bancada, implementando acumuladores de pressão mais avançados que possam ajustar seu volume interno de forma mais eficaz, e distinguindo o volume de gás e água que circula dentro do acumulador, de modo simular ao usado no trabalho de Zhang et al. (2019). Isso permitiria simulações que apliquem cargas de pressão específicas de maneira mais precisa e comparável.

O segundo seria uma investigação aprofundada sobre o impacto da válvula da bomba alternativa sobre as variações de pressão, que parece ser um fator crítico para a precisão do modelo, especialmente sem o uso de acumuladores. Um modelo matemático mais detalhado para a válvula, acompanhado de novos dados experimentais com diferentes configurações de bomba, seria essencial para entender e mitigar as discrepâncias observadas.

7. BIBLIOGRAFIA

Bae, J. H., Chung, W. J., Kim, S. B. & Jang, J. H., 2014. A study on pressure and flow pulsation of swash plate type variable piston pump through analysis of pulsation variables and valve plate notch design for automation of hydraulic system. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 418-423.

BBI Filtrações, 2024. *Bombas para aparelhos de osmose reversa*. [Online] Available at: https://bbifiltracao.com.br/produto/bombas-para-aparelhos-de-osmose-reversa/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAopuvBhBCEiwAm8jaMSGAlx6E0VT1pjqlpJITN20TezfiJAHSxIJ116NJ4mcbh5lZJCKWxhoCLkoQAvD_BwE [Acesso em 05 março 2024].

Blazek, J., 2005. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. 3ª ed. Oxford: elsevier.

Buros, O., 2000. *The ABCs of Desalting*. Topsfield(Massachusetts): International Desalination Association.

Carta, J. A., Subiela, V. & Subiela, V., 2003. Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands. *Solar Energy*, 3 July, pp. 153-168.

Castro, M. A. H. d., Campos, N. & Sturdant, T., 2001. *Gestão das águas: Princípio e práticas*, Porto Alegre: ABRH.

Çengel, Y. A. & Boles, M. A., 2013. *Termodinâmica*. 7º ed. Porto Alegre: AMGH,.

Çengel, Y. A. & Cimbala, J. M., 2007. s.l.:Mc Graw Hill.

Dastgerdi, H. R., Whittaker, P. B. & Chua, H. T., 2016. New MED based desalination process for low grade waste heat. *Desalination*, Volume 395, pp. 57-71.

Dias, N. d. S. et al., 2018. Cultivo de Erva Sal Fertirrigado com Efluente da piscicultura de viveiros preenchidos com rejeito de dessalinização. *Winotec*, 20 março, pp. 40-46.

DUPONT, 2019. *FILMTEC™ Membranes - Large Commercial 4040 Reverse Osmosis Elements*. s.l.:s.n.

EPA, 2023. *Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Water Quality Standards.* [Online]

Available at: <https://www.epa.gov/water-quality-standards>
[Acesso em 18 junho 2023].

Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2014. *Introdução à mecânica dos fluidos.* 8ª ed. s.l.:Gen.

Fritzmann, C., Lowenberg, J., Wintgens, T. & Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, pp. 1-76.

Ghaffour, N., Missimer, T. M. & Amy, G. L., 2013. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 15 janeiro, Volume 309, pp. 197-207.

Gomes, J. C., 2022. Desenvolvimento e implementação de um sistema supervisorio aplicado no acionamento e monitoramento de um sistema de tratamento de água por osmose reversa. *Trabalho de conclusão de curso, Curso de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.*

Heijman, S. et al., 2009. Sustainable seawater desalination: Stand-alone small scale. *Desalination*, 15 maio, pp. 114-117.

IBGE, 2021. *No pré-pandemia, quase 38% da população tinha alguma dificuldade de acesso à água.* [Online]

Available at: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/30986-no-pre-pandemia-quase-38-da-populacao-tinha-alguma-dificuldade-de-acesso-a-agua>

[Acesso em 13 fevereiro 2024].

INESP, 2019. *Plano estratégico dos recursos hídricos do Ceará.* Fortaleza, s.n.

John, D. & Anderson, J., 1995. *Computational Fluid Dynamics, the basics with applications.* New York: McGraw-Hill, Inc.

Kim, J.-H. & Dempsey, B. A., 2008. Desalination by reverse osmosis. *Water Resources Management*, Volume 22, pp. 1361-1386.

Liberman, B., Eshedb, L. & Greenberg, B., 2020. Pulse Flow RO - The new RO technology for waste and brackish water application. *Desalination*.

Li, L., Lee, K.-M., Lee, K.-M. & Yang, H., 2017. Attenuating characteristics of a multi-element buffer bottle in an aircraft piston pump. *Proc. IME C J Mech Eng Sci*, 231(10), pp. 1791-1803.

Liu, C. C. K., 2009. Wind-powered reverse osmosis water desalination for pacific Islands and remote coastal communities. *US Department of the Interior*.

Liu, C. C. K., 2013. The Development of a Renewable-Energy-Driven Reverse Osmosis System for Water Desalination and Aquaculture Production. *Journal of Integrative Agriculture*, pp. 1357-1362.

Liu, Y. et al., 2017. Thermodynamic modeling, simulation and experiments of a water hydraulic piston pump in water hydraulic variable ballast system. *Ocean Engineering*, 01 julho, Volume 138, pp. 35-44.

Lund, P. D., 2006. Energy storage options for improving wind power quality. *Proceedings of the Nordic Wind Power*, maio, pp. 22-23.

Maliska, D. B. d., 2012. *Finite Volume Methods*. 4ª: s.n.

Mathioulakis, E., Belessiotis, V. & Delyannis, E., 2006. Desalination by using alternative energy: review and state of the art. *Desalination*, Volume 203, pp. 349-365.

Matos, F. F. d. S. et al., 2021. A methodology to obtain the performance curves of windmills associated with piston pumps: application in water desalination systems by reverse osmosis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 31 maio, p. 14.

Meel, J. V. & Smulders, P., 1987. *Wind Pumping: Handbook*. s.l.:Amersfoort: Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.

Ministério da Saúde; Secretaria de Vigilância em Saúde, 2006. *Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano*. Brasília: Editora MS.

Ministério do Desenvolvimento Regional, 2018. *Observatório da Escassez Hídrica no Semiárido aponta melhora relativa nas condições da região*. [Online] Available at: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias/observatorio-da-escassez->

hidrica-no-semiarido-aponta-melhora-relativa-nas-condicoes-da-regiao-1

[Acesso em 25 junho 2022].

Moura, J. P. d. et al., 2008. Aplicação do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do semiárido nordestino. *Águas Subterrâneas*.

Norton, R. L., 2009. *Cinemática e dinâmica dos mecanismos*. 1ª ed. Nova York: Marilene Gomes.

Okura, S. S. et al., 2023. Evaluation of direct coupling between conventional windmills and reverse osmosis desalination systems at low wind speeds. *Energy Conversion and Management*, 1 Novembro, Volume 295.

ONU, 2022. *Organização das Nações Unidas*. [Online] Available at: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/14>

Padhma, M., 2023. *A Comprehensive Introduction to Evaluating Regression Models*. [Online]

Available at: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/10/evaluation-metric-for-regression-models/>

[Acesso em 6 jan 2024].

Patankar, S. V., 1980. *Numerical Heat Transfer and FluidFlow*. Nova Iorque: s.n.

Perfurante, 2020. *Perfurante poços profundos*. [Online] Available at: <https://www.perfurarte.com.br/post/poco-artesiano-profundidade#:~:text=Po%C3%A7os%20simples%20de%20capta%C3%A7%C3%A3o%20fre%C3%A1tica,necessitando%20de%20filtros%20e%20tratamento.>

[Acesso em 19 fevereiro 2024].

Polido, W., 2005. Seguro para ríscos ambientais. *Revista dos Tribunais*, p. 74.

Ribeiro, L., Sanches-Pagliarussi, M. & Ribeiro, J., 2016. Reutilização da sobra da água permeada e de rejeiro de uma central de tratamento de água por osmose reversa de uma unidade de hemodiálise hospitalar. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, setembro, 10(3), pp. 259-272.

Rodrigues, A. B., 2022. Valorização e destinação final dos resíduos produzidos na dessalinização de água por membrana de osmose inversa. *Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina*.

Rodríguez, G. L., Ternero, R. V. & Camacho, G. C., 2001. Economic analysis of wind powered desalination. *Desalination*, Volume 137, pp. 259-265.

Sandia, 2003. *Desalination and Water Purification Roadmap*. [Online] Available at: <https://www.usbr.gov/research/dwpr/reportpdfs/report095.pdf> [Acesso em 02 Abril 2023].

Schneider Motobombas, 2022. *Tabela de seleção de bombas e motobombas*. Rueil-Malmaison: Franklin Eletric.

Silva, A. V., 2022. Desenvolvimento de um sistema embarcado para controle e monitoramento de uma estação de tratamento de água por osmose reversa. *Trabalho de conclusão de curso, Curso de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará*.

Silva, C. D., Seraphim, O. J. & Teixeira, N. M., 2000. Potencial eólico para bombeamento de água na fazenda lageado. *An. 3. Enc. Energ. Meio Rural 2003*, pp. 0-14.

Silva, F. J. A. d., Araújo, A. L. d. & Souza, R. O. d., 2007. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e. *Rev. Fortaleza*, dezembro, Volume 28, pp. 136-159.

Silva, L. S. et al., 2023. *Modelagem computacional de sistema de bombeamento de água acionado por catavento para dessalinização por osmose reversa*. Maracanaú: s.n.

Silva, M. M. M. L. & Laursen, C. B., 2019. Transient CFD Simulation of a Single-Acting Reciprocating Piston Pump. *Proceedings of the ASME/BATH 2019 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2019-1664*.

Sung, H.-J., Min, H.-K., Nam, Y.-J. & Park, M.-K., 2018. Design and experimental verification of a port plate in a gerotor pump to reduce pressure pulsation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Volume 32, p. 671–678.

White, F. M., 2011. *Mecânica dos fluidos*. sexta edição ed. New York: AMGH Editora LTDA.

Zhang, Z. et al., 2019. The approach on reducing the pressure pulsation and vibration of seawater. *Ocean Engineering*, pp. 319-330.

ESTADO DO CEARÁ

SECRETARIA DA SEGURANÇA PÚBLICA E DEFESA SOCIAL

PERICIA FORENSE DO ESTADO DO CEARÁ

COORDENADORIA DE IDENTIFICAÇÃO HUMANA E PERÍCIAS BIOMÉTRICAS



Polgar Direito



André Luiz Medeiros Lopes

ASSINATURA DO TITULAR

CARTEIRA DE IDENTIDADE

THOMAS DRUG & BOND

VÁLIDA EM TODO O TERRITÓRIO NACIONAL

REGISTRO
GERAL 2007323542-8

DATA DE
EXPEDIÇÃO 01/03/2013

NOME
ANDRÉ LUIZ MELGAÇO LOPES

FILIAÇÃO
FRANCISCO RONALDO RIBEIRO LOPES
MARIA IRINEIDE MELGAÇO LOPES

NATURALIDADE
FORTALEZA - CE

DATA DE NASCIMENTO
04/04/1997

DOC. ORIGEM

CERT. NASCIMENTO - CARTÓRIO:3 ZONA TERMO:208366 FOLHA:456
LIVRO:A-164 FORTALEZA - CE

CPF

2 VIA



Assimilado de Barato



ASSINATURA DO DIRETOR

P.: 1

LEI Nº 7.116 DE 29/08/83

THOMAS GREI & SOUZA

MINISTÉRIO DA FAZENDA



Receita Federal
Cadastro de Pessoas Físicas



COMPROVANTE DE INSCRIÇÃO

Número

054.810.093-40

Nome

ANDRE LUIZ MELGACO LOPES

Nascimento

04/04/1997

VÁLIDO SOMENTE COM COMPROVANTE DE IDENTIFICAÇÃO

CÓDIGO DE CONTROLE
ED2F.C28E.CC3D.BBB4

**A autenticidade deste comprovante deverá
ser confirmada na Internet, no endereço**

www.receita.fazenda.gov.br

**Comprovante emitido pela
Secretaria da Receita Federal do Brasil**

às 10:09:08 do dia 05/01/2015 (hora e data de Brasília)
digito verificador: 00



JUSTIÇA ELEITORAL
TRIBUNAL SUPERIOR ELEITORAL
CERTIDÃO

Certifico que, de acordo com os assentamentos do Cadastro Eleitoral e com o que dispõe a Res.-TSE nº 21.823/2004, o(a) eleitor(a) abaixo qualificado(a) está QUITO com a Justiça Eleitoral na presente data .

Eleitor(a): **ANDRE LUIZ MELGAÇO LOPES**

Inscrição: **0869 5519 0752**

Zona: 118 Seção: 0452

Município: 13897 - FORTALEZA

UF: CE

Data de nascimento: 04/04/1997

Domicílio desde: 05/01/2015

Filiação: - MARIA IRINEIDE MELGAÇO LOPES
- FRANCISCO RONALDO RIBEIRO LOPES

Ocupação declarada pelo(a) eleitor(a): ESTUDANTE, BOLSISTA,
ESTAGIÁRIA/ESTAGIÁRIO E ASSEMELHADOS

Certidão emitida às 21:52 em 17/11/2024

Res.-TSE nº 21.823/2004:

O conceito de quitação eleitoral reúne a plenitude do gozo dos direitos políticos, o regular exercício do voto, salvo quando facultativo, o atendimento a convocações da Justiça Eleitoral para auxiliar os trabalhos relativos ao pleito, a inexistência de multas aplicadas, em caráter definitivo, pela Justiça eleitoral e não remetidas, excetuadas as anistias legais, e a regular prestação de contas de campanha eleitoral, quando se tratar de candidatos.

A plenitude do gozo de direitos políticos decorre da inoccorrência de perda de nacionalidade; cancelamento de naturalização por sentença transitada em julgado; interdição por incapacidade civil absoluta; condenação criminal transitada em julgado, enquanto durarem seus efeitos; recusa de cumprir obrigação a todos imposta ou prestação alternativa; condenação por improbidade administrativa; conscrição; e opção, em Portugal, pelo estatuto da igualdade.



Esta **certidão de quitação eleitoral** é expedida gratuitamente.
Sua autenticidade poderá ser confirmada na página do Tribunal Superior Eleitoral na Internet, no endereço: <http://www.tse.jus.br> ou pelo aplicativo e-Título, por meio do código:

H53H.I23N.YYNC.XOCT



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
REGISTRO CIVIL DAS PESSOAS NATURAIS
Certidão de Casamento

NOMES:

ANDRÉ LUIZ MELGAÇO LOPES

CPF

054.810.093-40

LILIAN THAIS FERNANDES ALBUQUERQUE

CPF

609.634.783-54

MATRÍCULA:

020818 01 55 2019 2 00080 078 0025478 33

NOMES COMPLETOS DE SOLTEIRO, DATAS E LOCAIS DE NASCIMENTO, NACIONALIDADE E FILIAÇÃO DOS CÔNJUGES

ANDRÉ LUIZ MELGAÇO LOPES,
nacionalidade brasileira, natural de
Fortaleza-CE, nascido no dia 04 de abril de
1997, filho de FRANCISCO RONALDO
RIBEIRO LOPES e MARIA IRINEIDE
MELGAÇO LOPES

LILIAN THAIS FERNANDES ALBUQUERQUE,
nacionalidade brasileira, natural de Fortaleza-CE,
nascida no dia 07 de outubro de 1996, filha de
ARNALDO FERNANDES DA SILVA e
FRANCILENE ALBUQUERQUE FERNANDES

DATA DE REGISTRO DO CASAMENTO POR EXTENSO

Dois de dezembro de dois mil e dezenove

DIA

02

MÊS

12

ANO

2019

REGIME DE BENS DO CASAMENTO

comunhão parcial de bens

NOME QUE CADA UM DOS CÔNJUGES PASSOU A UTILIZAR (QUANDO HOUVER ALTERAÇÃO)

LILIAN THAIS FERNANDES ALBUQUERQUE MELGAÇO

AVERBAÇÕES/ANOTAÇÕES A ACRESER

Ato registrado no livro B-80, fls. 78, sob o nº 25478.

ANOTAÇÕES DE CADASTRO

SEM INFORMAÇÕES.



SERVIÇO REGISTRAL
DO DISTRITO MUCURIFE

MARIA ELENIR LIMA SALES LIBERATO
Av. Senador Virgílio Távora, 318, Lj 01, Meireles -
Fortaleza-CE - CEP: 60.170-250, Fone: (85)3242-2232
E-mail: atendimento@cartoriomucuripe.com.br

VALIDO SOMENTE COM O SELO DE AUTENTICIDADE

Valor Recebido: EMOLUMENTOS: R\$ 31,61, Fermoju: R\$ 3,99, Faadep: R\$ 1,58, Selo:

R\$ 7,70, Frmp: R\$ 1,58, TOTAL: R\$ 46,46

O conteúdo da certidão é verdadeiro. Dou fé.
Fortaleza, 02 de dezembro de 2019.

Kelvia Brenda Macedo do Carmo
KELVIA BRENDA MACEDO DO CARMO - Escrevente

PODER JUDICIAL
Estado do Ceará
Selo Tipo: 10
Registro de
Casamento
Nº
AAA232867-ASV9



SELO DIGITAL DE
AUTENTICIDADE

Consulte a validade do selo em
selodigital.tjc.jus.br/gov.br

arpenceara AA 001184398 P





MINISTÉRIO DA DEFESA
CERTIFICADO DE DISPENSA
DE INCORPORAÇÃO

2ª C S M

Nº 857632 SÉRIE: C

RA251424352903

FILIAÇÃO
PAI FRANCISCO RONALDO RIBEIRO LOPES
MÃE MARIA IRINEIDE MELGACO LOPES

DATA NASC. 04/04/1987 NATURALIDADE FORTALEZA - CE

Dispensado do Serviço Militar inicial em 09 de julho de 2015.

por ter sido incluído no excesso de contingente

Cm/Ch ou Dit

JOSÉ ELICIANO FARIAS DE SEMMA - 2. TEN
Delegado de Serviço Militar da 7ª Dal Sr MILITAR CSM
PROIBIDO PLASTIFICAR

NOME

ANDRE LUIZ MELGACO LOPES

EM CASO DE CONVOCAÇÃO DEVE APRESENTAR-SE IMEDIATAMENTE
Emissão: Fortaleza, CE, 20/04/2015

POLEGAR
(caso de analfabetismo)

André Luiz Melgaco Lopes
DISPENSADO

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DAS CIDADES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSITO
CARTEIRA NACIONAL DE HABILITACAO

NOME
ANDRE LUIZ MELGACO LOPES



DOC. IDENTIDADE / ORG. EMISSOR UF
20073235428 SSP CE

CPF DATA NASCIMENTO
054.810.093-40 04/04/1997

FILIAÇÃO
FRACISCO RONALDO
RIBEIRO LOPES
MARIA IRINEIDE MELGACO
LOPES

PERMISSÃO ACC CAT.HAB.
[Pattern] [Pattern] AB

Nº REGISTRO
06405899130

VALIDADE
07/04/2020

1º HABILITAÇÃO
03/07/2015

OBSERVAÇÕES
EXERCE ATIV REMUNERADA;

Andre Luiz Melgaco Lopes
ASSINATURA DO PORTADOR

LOCAL
FORTALEZA, CE

DATA EMISSÃO
19/08/2016

Igor Vasconcelos Ponte
IGOR VASCONCELOS PONTE
ASSINATURA DO EMISSOR

41054648681
CE155024060

DETRAN - CE (CEARA)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSITO

VÁLIDA EM TODO
O TERRITÓRIO NACIONAL
1290076179

PROIBIDO PLASTIFICAR
1290076179