

# Renewable Hybrid Systems for Water Pumping: a Review

I. Cruz, N. Batista, Paulo C. M. Carvalho

**Abstract**— Several studies and applications of renewable systems for water pumping are developed in the literature, but these are mostly plants operating with a single source, usually photovoltaic (PV). In this article we present a systematic literature review on hybrid renewable systems applied to water pumping, verifying the applicability and the different sources, serving as a reference for future research. PV is the dominant generation with a presence in 86% of the articles; wind appears in 81% and hydro power plants in 53% of the papers.

**Index Terms**—Hybrid Systems, Pumping Water, Renewable Energy

## Abbreviations/Siglas

AGMD	Air Gap Membrane Distillation
COE	Levelized Cost of Energy (Custo Nivelado de Energia)
FA	Firefly algorithm
FC	Fuel cell
FV	Fotovoltaica
GA	Genetic Algorithm (Algoritmo genético)
GAMS	General Algebraic Modeling System
GOA	Grasshopper optimization algorithm
GRG	Generalized Reduced Gradient
GWO	Grey Wolf Optimizer
HOGA	Hybrid Optimization by Genetic Algorithms
HOMER	Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources
LCA	Life Cycle Assessment
MFO	Moth flame optimization
MMRO	Modified Manta Ray Optimization
MOCSA	Multi-objective Crow Search Algorithm
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
MRFO	Manta Ray Foraging Optimization
NPC	Net Present Cost
NSGA-II	Non-dominated sorting Genetic Algorithm
OR	Osmose Reversa
PH-CA	Pumped-hydro-compressed air
PHES	Pumped Hydroelectric Energy Storage
PSO	Particle Swarm Optimization
RNAs	Redes Neurais Artificiais
RS	Revisão sistemática
SA	Simulated Annealing method
SAM	System Advisory Model
SHR	Sistemas Híbridos Renováveis
SQP	Algoritmo de Programação Quadrática Sequencial
SSA-CS	Salp Swarm Optimization - Cuckoo Search Algorithm
StArt	Estado da Arte através de Revisão Sistemática
WCA	Water Cycle Algorithm

## I. INTRODUÇÃO

Garantir o acesso à eletricidade e a água potável tem se tornado um desafio para a população mundial, com o

I. S. Cruz, Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC) (igorsouzaccruz@gmail.com). Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), bolsista Edital 08/2017. N. E. Batista, Paulo C. M. Carvalho, Departamento de Eng. Elétrica, UFC, Fortaleza/CE, Brasil (estevsnatasha@hotmail.com; carvalho@dee.ufc.br).

aumento do consumo e a escassez de recursos. Entretanto, com o avanço das novas tecnologias não poluentes de geração, inúmeras soluções vêm sendo estudadas nos últimos anos [1]–[3]. Existem diversas aplicações para sistemas de bombeamento de água, que podem ser abastecidos por energia limpa e renovável, destacando-se as aplicações para fins agrícolas [4], [5]. O bombeamento de água também pode ser usado em processos de dessalinização, bombeando água subterrânea para plantas de dessalinização com fontes renováveis [6]–[9]. Outra aplicação relevante é o armazenamento de energia em usinas hidroelétricas reversíveis com unidades que podem funcionar como bombas ou turbinas para geração de eletricidade, utilizando dois corpos de água em diferentes níveis [10]–[12]. As fontes renováveis, como a solar e a eólica, têm caráter intermitente devido à dependência das condições climáticas. Por esta razão, os sistemas de energia renovável precisam de arranjos favoráveis, considerando-se o grau de incerteza proporcionado por essas fontes [13]. Essa intermitência pode ser reduzida com o auxílio de SHR [14], [15], que apresentam maior confiabilidade do que os sistemas com apenas uma fonte, pois uma fonte compensa a ausência da outra [16]. Assim, o bombeamento de água por SHR pode aumentar a confiabilidade, diminuindo o impacto das flutuações causadas pela intermitência [17]. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo fazer um levantamento de aplicações de bombeamento de água acionadas por SHR por meio de uma revisão sistemática da literatura e uma análise comparativa dos trabalhos sobre o tema. A metodologia adotada na revisão da literatura e os principais resultados são obtidos utilizando a ferramenta de revisão sistemática StArt, desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) e utilizado desde 2006 por diversos usuários ao redor do mundo [18]–[20]. Tendo em vista que a RS pode ser um processo demorado, esta etapa depende da quantidade de estudos primários que precisam ser revisados. Uma forma de minimizar este problema é utilizar uma ferramenta especialmente desenvolvida para suportar a revisão [21]. Para o presente estudo foram pesquisados artigos de 2011 a 2021, utilizando as plataformas ScienceDirect e Scopes. Foram incluídos artigos da *International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ)*, obtendo a evolução do assunto nessa plataforma de 2003 a 2020; também foi utilizada a ferramenta de busca do *IEEE Latin America* com trabalhos de 2018 a 2021. Identificou-se que uma das principais áreas relacionadas com SHR para bombeamento de água é o armazenamento de energia, usando geração hídrica como estabilizador para a intermitência de fontes renováveis [22]–

[24]. SHR ligados indiretamente a aplicações de bombeamento podem ser encontrados em revisões anteriores [16], [25]–[27], estas focavam no SHR com ou sem PHES, visando o armazenamento de energia, sem ter o bombeamento como principal foco. Neste contexto, o presente artigo visa distinguir trabalhos correlacionados a aplicações para bombeamento incluindo PHES, mas também outras configurações, sendo uma nova contribuição para o tema. O estudo serve como fundamentação teórica para trabalhos posteriores, levantando as principais fontes utilizadas para o bombeamento de água e demonstrando quais aplicações de bombeamento podem ser encontradas em conjunto com um SHR. O PHES é uma das principais opções de armazenamento de energia utilizadas com sistemas de bombeamento em conjunto com SHR. Porém, outras aplicações como bombeamento de água em áreas isoladas, irrigação e dessalinização também foram identificadas na presente revisão. O presente artigo está dividido em quatro partes: a seção 1 é a introdução; a seção 2 enfoca a metodologia, quanto às fontes de pesquisa e aos critérios de seleção do material analisado; a seção 3 mostra os resultados relevantes por meio de uma seleção de acordo com o tema; A seção 4 apresenta as conclusões preliminares.

## II. ESTADO DA ARTE

### A. Revisão Sistemática

A RS é um método de pesquisa para agregar e avaliar as evidências disponíveis sobre um tema específico, adotando uma sequência precisa e rigorosa de etapas metodológicas com base em um protocolo definido [28], [29]. Desta forma, o suporte de uma ferramenta computacional como o StArt é essencial para melhorar a qualidade da pesquisa. As questões usadas na pesquisa para orientar a revisão são formuladas para caracterizar como SHR são aplicados para o bombeamento de água. Assim, a principal questão estabelecida é: “Quais SHR são aplicados para bombeamento de água?”. As buscas utilizam a seguinte *String* de busca considerando os títulos e resumos dos artigos: “*hybrid*” (híbrido) AND “*pump*” (bomba) AND “*renewable*” (renovável). As buscas realizadas nos artigos do ICREPQ são realizadas manualmente, pois a plataforma não possui ferramenta de busca. A definição dos critérios de seleção das fontes de pesquisa é se a plataforma possui artigos na área de SHR aplicados ao bombeamento de água e que pode exportar arquivos no formato RIS, BibTex, exceto pelo ICREPQ, uma vez que a busca ocorre manualmente. Aplicando-se a *string* de pesquisa definida às fontes de dados, os estudos resultantes são ordenados por uma pontuação de relevância, onde a recorrência de palavras-chave no título, resumo e palavras-chave é um fator determinante. Para ser incluído, o artigo deve propor ou discutir um SHR para bombeamento de água. Após a obtenção dos artigos nas plataformas de busca, é aplicado um filtro nos artigos obtidos utilizando, nesta primeira instância, o título, autores, resumo e palavras-chave. O primeiro filtro antes dos critérios de inclusão e exclusão é a remoção dos “artigos duplicados”, ou seja, aqueles que são publicados em bases de dados diferentes. O primeiro critério de inclusão é se o artigo aborda SHR para bombeamento de água. O segundo critério é

se o SHR inclui um sistema de bombeamento, mas o bombeamento não é a demanda central do sistema. O terceiro critério é se corresponde a programas ou formulações que incluem o projeto de um SHR para bombeamento de água. O primeiro critério de exclusão é quando o artigo não inclui um SHR para bombeamento de água. O segundo critério é quando o artigo, em vez de propor um SHR para bombeamento, propõe o uso de apenas uma fonte de geração. O terceiro critério de exclusão é quando não é possível se obter a versão completa do artigo. A busca considera os títulos do artigo, resumo e palavra-chave. O conjunto de trabalhos obtido é extenso, com média de 416 artigos

A Fig. 1 mostra os artigos rejeitados e aceitos, com base no título, resumo e palavras-chaves, ou seja, o resultado ao final da terceira etapa; dos 416 artigos obtidos na busca inicial somente 131 foram aceitos para seguir na RS.



Fig. 1. Artigos classificados de acordo com os critérios de exclusão, inclusão e duplicação.

Após a quarta etapa, é considerado o nível de detalhamento e abordagem sobre os temas para inclusão na pesquisa. Durante a quarta e a quinta etapa, os dados-chaves são extraídos para análise posterior, fazendo assim um levantamento na pesquisa com os artigos que enfocam:

- Fontes utilizadas para bombeamento;
- SHR para *PHES*;
- SHR para suprir principalmente a demanda de bombeamento.

A Fig. 2 mostra uma redução do número total de artigos: inicialmente 416 artigos e após a RS foram aceitos 78 artigos. Os artigos que foram aceitos nessa etapa compõem o estado da arte do presente artigo e serviram de base para as conclusões.



Fig. 2. Número total de artigos aceitos para o estado da arte.

### B. SHR para Bombeamento de Agua como Armazenamento de Energia Conectados à Rede

Nas revisões [16], [25], [26] levantou-se sistemas com PHES e combinações com diferentes fontes de geração, onde

identifica-se que o armazenamento por bombeamento aumenta os níveis de penetração de energia renovável.

Em [30] é analisado um SHR com 1,8 kW hidrelétrica reversível, 600 W eólica e 600 W FV com dois circuitos de controle: o circuito de controle do nível do tanque de água e o circuito de controle de frequência dependente da carga. A eletricidade gerada é usada para abastecer uma bomba de água de 1 kW, bem como cargas conectadas. Os modelos desenvolvidos e o sistema SCADA se destacam como uma plataforma promissora para pesquisas em energias renováveis. Em [31] é investigada uma usina FV/PHEs como um sistema aberto (termodinâmico), que aproveita o potencial hídrico criado artificialmente sem impacto significativo nos recursos hídricos locais. O projeto é usado em diferentes necessidades de operação como nivelamento de carga de pico e produção de energia estável.

Em [32], um estudo de caso no Rio Grande do Sul, compara-se a operação de um sistema híbrido eólico/diesel com uma hidrelétrica convencional ou uma PHEs. Simulando com o software HOMER para 100 MWh/d e 500 MWh/d, o modelo com PHEs apresenta maiores custos iniciais; entretanto, esta opção tem menores custos de operação e requer uma área de inundação menor do que a solução ótima do sistema com hidrelétricas convencionais. Em [33] é proposto um algoritmo de otimização usando o GAMS/Cplex aplicado a um SHR com PHEs em vários cenários de produção eólica e FV um dia à frente do mercado de eletricidade. A unidade PHEs não apenas compensa a falta ou excedente de energia, mas também maximiza o lucro, aproveitando períodos de preço baixo.

Em [34] são realizadas simulações de otimização não lineares em um sistema híbrido (FV/eólico/PHEs/diesel), visando suprir a demanda de comunidades rurais na África do Sul. O sistema com PHEs proposto pode causar uma redução substancial no custo operacional diário do óleo diesel. Um modelo de programação de dois estágios de estocástica inteira mista é proposto em [35] para dimensionar um SHR (FV/PHEs) com diesel como fonte de *back-up*. Com os estudos de caso na Índia, são identificados o potencial do PHEs de diminuir a necessidade de recursos fósseis e o potencial aumento da capacidade de instalação FV.

Em [36] é desenvolvida uma estratégia de operação de um SHR (FV/Eólica) acoplada a PHEs utilizando quatro bombas reversíveis em paralelo para reduzir a carga de pico de energia, evitando a utilização de turbinas a combustível fóssil na Córsega. Buscando a máxima eficiência de acordo com o modo de operação e das condições meteorológicas em um intervalo de hora em hora. Um modelo matemático da operação de um SHR (FV/eólica/PHEs), que utiliza o mar como reservatório inferior, é apresentado em [37]. A capacidade máxima do reservatório superior é 375 MWh, o que equivale a 5 horas de demanda de carga média. 150 cenários são examinados; com base nos resultados, argumenta-se que o uso do SHR pode facilitar a integração com o sistema de energia.

Um modelo matemático é proposto em [38] para simular e otimizar a operação de um SHR (FV/eólico) de grande escala com PHEs na Polônia. O SHR forneceria mais de 40% da energia na região, se toda a energia fosse fornecida por geração

centralizada. Um modelo matemático não linear inteiro misto é desenvolvido em [39] para simular a operação de um SHR (FV/eólico/PHEs) que utiliza a vazão disponível do rio, no sul da Polônia. Os resultados indicam a redução da troca de energia com a rede, minimiza a taxa de aumento desses valores e facilita a integração de fontes renováveis no sistema de energia.

Em [40] são determinadas seis ilhas com potencial para utilização de SHR FV/eólica/PHEs/baterias. Realizou-se uma otimização por SQP em MATLAB/Simulink em [41], modelando a produção por hora. Os resultados mostram afinidade para investimento em energias renováveis, em comparação com a geração convencional. O armazenamento em bateria é favorável para baixas demandas; em todos os casos o PHEs é mais vantajoso que o armazenamento em bateria pois a penetração de energia renovável excede 70%.

Um SHR FV/eólico com PHEs na China é estudado em [42], incluindo o efeito de interação entre as flutuações da geração e as estratégias de governo. Uma análise de incerteza é apresentada para a estabilidade do SHR; observa-se que a energia hidrelétrica efetivamente suaviza as flutuações das energias renováveis, aumentando a capacidade de absorção da rede elétrica. Uma programação ideal de uma micro rede conectada à rede é proposta em [43], usando um SHR (FV/eólica/PHEs). A otimização matemática visa minimizar o custo operacional diário levando em consideração todas as restrições, usando o método de programação linear. O PHEs desempenha um papel importante no suporte do sistema, fornecendo uma integração eficaz entre as fontes de energia renováveis e a carga.

Em [44] é proposto um estudo de caso com duas operações de PHEs. Para isso, um sistema de cinco terminais é interconectado com 700 MW eólico, 400 MW FV, PHEs e dois mercados de energia. As flutuações da fonte de alimentação são reduzidas; a perda total de receita é reduzida em cerca de 30%. O foco em [45] é identificar um método de seleção de localidade ideal para um PHEs com água do mar e um SHR *offshore* FV/eólico. Um estudo de caso na China é analisado, sendo selecionado um local ideal para construir um SHR eólico/FV/PHEs integrado.

Um SHR autônomo (diesel/eólica/PHEs) nas Canárias com percentual de fontes renováveis de 95,4% em 2018 é analisado em [46]. Para atingir 100%, diversas estratégias de controle são simuladas do ponto de vista dinâmico e energético e esquemas de controle são propostos quando a potência eólica é elevada. Projeto, modelagem, análise e estudo de viabilidade de um SHR (hidroelétrico/eólico) com bombeamento de água para a represa King Talal, Jordânia são apresentados em [47]. A produção de eletricidade anual estimada é de 26.663 MWh, vindo de 10 MW eólico e 5,2 MW PHEs.

Uma análise de viabilidade técnico-econômica, com vários cenários de armazenamento, é proposta em [48] com uso do algoritmo GRG. Um total de 12 configurações de FV/eólico com ou sem FC e PHEs são analisadas para o Chipre do Norte. Os resultados mostram que a integração do PHEs com FC diminui o descompasso da demanda com a oferta; o sistema ideal tem um custo igual à tarifa nacional de serviço público (175 USD/MWh). Um SHR (solar/eólico) em Suez (Egito) com

PHES e bateria, vinculado à rede, é apresentado em [49]. A estratégia é baseada em um fator otimizado que rege o processo de cobrança por um GA de classificação não dominado (NSGA-II). O modelo de armazenamento reduz o custo de eletricidade em 22,2% e resulta em uma troca mínima de energia com a rede (5% da demanda anual).

Um método é desenvolvido em [50] para simular o desempenho e determinar o custo nivelado de SHR para o fornecimento de eletricidade em várias estratégias de pico de demanda, com a carga de base em três escalas diferentes. A análise do COE para SHR mostra que PHES são as mais econômicas nas escalas em massa e utilidade. Em [51] é proposto o dimensionamento de um SHR (FV/eólico/PHES) para uma comunidade urbana na Líbia, usando o software SAM. Com base no COE e no conjunto de restrições para atingir 100% do fornecimento de energia elétrica, é dimensionado um SHR de 1000 kWp FV, 5000 kW eólico e 27.954 kWh PHES de capacidade para uma carga elétrica de 1,2 MW de potência pico e 6,14 GWh de consumo anual de energia.

Um sistema de gestão de energia em um SHR(eólico/PHES) na Espanha é estudado em [52]; o excesso de energia dos parques eólicos é utilizado no bombeamento da água. Um total de 45 aerogeradores são considerados visando maximizar a rentabilidade do projeto e a eficiência da PHES; como resultado, o investimento no parque eólico seria recuperado em 8,4 anos. Em [53] é investigado um SHR (eólico/FV/PHES) combinado com uma usina de dessalinização na Grécia. O objetivo é atender necessidades de água, de irrigação e de energia de uma ilha. Para isso, uma simulação produzindo séries temporais sintéticas de 40 anos. O resultado indica um percentual de energia 30% eólica e 20% solar, integrados à rede; o restante é usado para dessalinização e bombeamento de água como armazenamento de energia.

Em [54] é proposto um estudo de viabilidade de um SHR (turbina a gás/FV/PHES) com caldeiras em uma universidade do Irã, visando atender à demanda térmica e elétrica. Após simulações realizadas no HOMER, a melhor configuração é de 2000 kW para calor e energia pela turbina a gás, 8328 kW FV e conversor de 3150 kW. O armazenamento hidrelétrico bombeado é necessário no sistema integrado para aumentar a estabilidade e melhor aproveitamento das energias renováveis. Um SHR (eólico offshore/PHES) na China é analisado em [55]. O estudo desenvolve um modelo de otimização com NSGA-II, revelando que o aumento da receita de vendas de eletricidade é insuficiente para equilibrar o aumento do custo de investimento.

### C. SHR para Bombeamento de Água como Armazenamento de Energia Autônomos

Um SHR (FV/eólico/PHES) autônomo para abastecer uma ilha remota em Hong Kong, com cerca de 100 habitantes, é analisado em [56] com uso do HOMER, com carga estimada em 200 kWh/dia. O resultado é um sistema com 110 kWp FV, 10,4 kW eólico e armazenamento de usina reversível com 5.106 m<sup>3</sup>. O sistema de bombeamento e geração funcionam separadamente, portanto, os dois processos, carga e descarga, podem ocorrer simultaneamente. A geração FV possui maior

participação que a eólica, devido ao recurso solar corresponder melhor ao padrão de carga. Um SHR (FV/eólico) para comunidades remotas com PHES em Hong Kong, com consumo estimado em 250 kWh/dia, é proposto em [57]; adicionalmente, é realizada uma otimização com GA usando uma avaliação técnico-econômica. Podendo fornecer energia estável e contínua para áreas remotas.

Um SHR(PHES/FV/Eólico) autônomo em uma ilha no Mar Egeu é analisado em [58], com o excedente de energia sendo usado para produzir hidrogênio. O software THESIS é usado para calcular os fluxos de energia do sistema; a análise em nível de componentes é realizada em Python. Uma geração anual de hidrogênio de 95 toneladas é obtida. Um projeto técnico-econômico otimizado de um SHR (FV/biogás/PHES/baterias) é analisado em [59] em uma estação transmissora de rádio na Índia. Duas técnicas, WCA e o MFO são comparadas com o GA. Os dados de carga são incorporados na ferramenta HOMER, como conclusão, os resultados de WCA apresentam menor assimetria e curtose em comparação com MFO e GA e o projeto mais otimizado tem 69,2 kW FV, Gerador Biogás 16 kW, 21 baterias e aproximadamente 2000 m<sup>3</sup> no reservatório superior.

Em [60] é proposta uma estratégia de gerenciamento de energia com armazenamento híbrido PHES/baterias em um SHR (FV/eólico) autônomo na Argélia. Uma otimização multiobjetivo é realizada usando um GWO implementado no MATLAB. Os resultados indicam que o armazenamento híbrido alcança maior confiabilidade a um menor custo.

Um SHR (FV/eólico/baterias/PHES) usando um controlador híbrido para controle de fluxo de energia e minimização do custo de produção é analisado em [61], utilizando RNAs para prever a demanda de energia. A análise demonstra que o custo de produção é menor e a técnica proposta com a abordagem SSA-CS possui menor tempo computacional.

Um SHR (hidroelétrica/eólica/FV) para suprir a demanda de carga de um edifício autônomo é investigado em [62]. O sistema hidrelétrico incluiu dois reservatórios de água em cascata com PHES e armazenamento de hidrogênio. Tecnologias de armazenamento para Redes elétricas autônomas, integradas com SHR (FV/Eólico/baterias/PHES), são investigadas em [63]. Três ilhas gregas são escolhidas para estudo de caso com pico de demanda anual de 4,0 MW, 2,2 MW e 0,9 MW, com locais ideais para a instalação de PHES com água do mar. Após a simulação, identifica-se que a viabilidade econômica pode ser assegurada mesmo para sistemas de pequeno porte.

Um SHR (FV/eólico/PHES/baterias) autônomo para uma área remota na Suécia é projetado em [64]. Variáveis de sistema e GA modificado são empregados para otimização, suprimindo a demanda de energia. Em [10] um SHR com PHES é proposto para uma ilha remota em Xangai, com demanda média diária de 255,6 kWh. O sistema possui 53 kWp FV, 15,6 kW eólico, 192 kWh de baterias e 766,8 kWh a partir do reservatório superior. Apesar de não ser uma solução ideal de uma perspectiva técnico-operacional-econômica, atende ao fornecimento.

Em [65] é realizado um estudo de caso na China com SHR (hidrelétrico/FV/eólico/PHES) autônomo em áreas remotas.

Aplica a teoria da otimização de Pareto por meio da MOPSO para analisar objetivos múltiplos com uma relação de jogo por meio de MOPSO e WSA. Resulta em o SHR ser a combinação mais econômica. Os desempenhos dos três métodos, incluindo PSO, GA e SA, são comparados e analisados; os resultados otimizados obtidos por PSO correspondem ao mínimo COE. Em [66] é estudada uma estratégia operacional de otimização para um SHR (eólico/solar) autônomo com PHES/baterias em Xangai. A análise estatística revela que FA e PSO são os otimizadores mais promissores, pois a estabilidade é indicada em execuções repetidas e com o menor valor de função objetivo e erro.

Um SHR (FV/eólico) com PHES em uma comunidade na Nigéria é proposto em [67]. O GA é adotado para otimizar e minimizar a diferença entre a demanda e a geração. Com modelos econômicos desenvolvidos é obtido o menor COE de 0,27 \$/kWh. Em [68] é proposto uma otimização com PSO de um SHR (FV/eólico) com PHES/baterias em Xangai. Os resultados evidenciam que considerar a auto descarga tem uma influência significativa no custo dos sistemas. Assim, o armazenamento híbrido tem funcionalidade complementar nos modos de excedente e déficit de energia.

Um SHR (FV/eólico/hidráulico/PHES) para uma comunidade no Canadá é analisado em [69], com uma carga diária estimada para 50 (famílias) e com base no perfil de carga, obtendo a carga de pico de 577,84 kW. HOMER é usado para analisar o potencial técnico econômico; o resultado indica que o SHR é a melhor solução, comparando com sistemas com baterias e diesel. Um SHR (PV/Diesel/PHES) para atender a demanda de carga de uma comunidade remota em Bangladesh é estudado em [24]. A otimização avalia diferentes configurações em termos de seus custos, emissões e indicadores de desempenho. Uma análise comparativa dos resultados otimizados baseados no HOMER e GA sugere que a maior contribuição renovável e as menores emissões de CO<sub>2</sub> são obtidas no processo de otimização GA.

Um SHR (FV/diesel/PHES) é proposto em [70]; a técnica MMRO é utilizada e comparada com MRFO, PSO e GA. O objetivo é uma menor contribuição do gerador a diesel e economia de combustível; o valor obtido foi de 208,720 L/h sendo inferior aos obtidos nos outros métodos. Em [7] é investigada a viabilidade de diferentes SHR (diesel/eólico/FV)

com PHES/baterias para suprir uma planta de OR para abastecimento de água no Egito. HOMER e um modelo de decisão multicritério baseado em Fuzzy são utilizados; os resultados indicam que o sistema 100% renovável apresenta viabilidade e o sistema eólica/FV/diesel/baterias é o mais econômico.

Fatores socioambientais, custo da terra e penalidade de emissão de carbono são integrados a fatores técnico-econômicos para um projeto SHR (FV/Biogás/PHES) em [71]. A abordagem é realizada em uma área remota na Índia e a otimização é baseada em GOA e comparada com PSO. A taxa de convergência de GOA é mais rápida do que a do PSO; a configuração obtida é: 57,5 kW FV, 8 kW de Biogás, reservatório superior de 1.913 m<sup>3</sup>. Visando geração de eletricidade, hidrogênio e armazenamento de energia, um SHR (eólico/PH-CA) é examinado no Irã [72]. Utilizado o MATLAB obteve-se um sistema que precisava de 512,6 W para gerar 5 mol/h de hidrogênio combustível, fornecido por um aerogerador de 10 kW. A eficiência do processo foi de 74,93%.

Em [73] são comparados dois SHR (diesel/FV/PHES e diesel/FV/FC) com rastreamento solar no Irã. O algoritmo MOCSA é implementado no MATLAB. O resultado indica que o PHES é mais econômico do que FC. Além disso, usar um rastreador solar não é econômico em comparação com painéis FV fixos. Visando desenvolver um PHES com ajuste de velocidade para melhorar a eficiência de armazenamento, um SHR FV/eólica/diesel/PHES, com duas diferentes estratégias de PHES, é analisado em [22]. As simulações são realizadas usando Cplex (Matlab). A PHES com velocidade variável tem 46,7% de economia de diesel em um dia de verão e 11,24% em dia de inverno em comparação com o PHES de velocidade fixa.

Estudo em [74] visa o dimensionamento ideal de um SHR FV/eólico/biomassa, com e sem armazenamento, com base no aumento da fração demanda-oferta e de energia renovável, em um campo universitário no Chipre. O algoritmo GRG é utilizado; o sistema ideal consiste em 1,79 MW FV, 2 MW eólicos e 0,92 MW de sistemas de biomassa, além de 24,39 MWh PHES e banco de baterias de 148,64 kWh.

Tabela I resume os artigos sobre SHR para bombeamento de água como armazenamento de energia, identificando as fontes abordadas e a localização.

TABELA I  
A. SHR COM BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Autor	Fontes Abordadas	Autônomo	Armazenamento	Localização	Metodologia
[25]	Hidráulica/Eólica/FV/ Diesel/Biomassa	-	PHES + Hidrogênio + baterias	-	Revisão
[16]	Hidráulica/Eólica/FV	-	PHES/Baterias/PHES	-	Revisão
[26]	Hidráulica/Eólica/FV	-	PHES/Baterias/Hidrogênio	-	Revisão
[37]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Egito	Operação por rendimento e demanda da carga
[45]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	China	Seleção por veto, TODIM Fuzzy
[47]	Hidráulica/Eólica	Não	PHES	Jordânia	Software Windfarm, protocolo DNP3
[32]	Hidráulica/Eólica/Diesel	Não	PHES	Brasil	HOMER
[46]	Hidráulica/Eólica/Diesel	Não	PHES	Espanha	Esquemas de controle dinâmico no Matlab/Simulink
[33]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Grécia	GAMS/Cplex estocástica baseada em cenário
[36]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	França	Ferramenta para determinar o fluxo de energia e água
[38]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Polônia	Otimização sob várias restrições
[39]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Polônia	Modelo não linear inteiro misto da operação

[42]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	China	Controlador combinando ANN e Fuzzy
[43]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Índia	Programação linear modificada em MATLAB
[44]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	China	Otimização de operação combinada ideal
[51]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Líbia	SAM
[34]	Hidráulica/Eólica/FV/Diesel	Não	PHES	África	Otimização não linear com Matlab
[35]	Hidráulica/FV/Diesel	Não	PHES	Himalaia	Modelo de dois estágios de estocástica inteira mista
[40]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES/Baterias	-	SQP
[50]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES/Baterias	Suíça	Desenvolvimento de métodos para avaliar os custos nivelados e identificar armazenamento.
[49]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES/Baterias	Egito	NSGA-II
[48]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES/Hidrogênio	Chipre do Norte	GRG
[30]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	-	Arquitetura lógica do switch do sistema SCADA
[31]	Hidráulica/FV	Não	PHES	Croácia	Precipitação artificial anual e potencial hídrico
[56]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES	Hong Kong	HOMER
[57]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES	Hong Kong	GA
[65]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES	China	Otimização de Pareto por MOPSO, PSO, GA e SA
[67]	Hidráulica/Eólica/FV/Diesel	Sim	PHES	África	Uso de GA, HOMER, MATLAB
[75]	Hidráulica/FV/Diesel	Sim	PHES	China	Otimização de MMRO, MRFO, PSO e GA.
[63]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	Grécia	Séries temporais anuais por softwares desenvolvidos
[60]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	Argélia	Otimização multiobjetivo com GWO
[61]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	-	RNAs, algoritmo de otimização do SSA-CS
[64]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	Suécia	Variáveis de sistema, GA modificada
[10]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	China	Simulada estratégia de operação em MATLAB
[66]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	China	FA e PSO
[68]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	China	PSO.
[69]	Hidráulica/Eólica/FV/Diesel	Sim	PHES/Baterias	Canadá	HOMER
[59]	Hidráulica/FV/Biogás	Sim	PHES/Baterias	Índia	WCA, MFO, GA/HOMER
[24]	Hidráulica/FV/Diesel	Sim	PHES/Baterias	Bangladesh	HOMER, GA
[58]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Hidrogênio	Grécia	THESIS, Análise em nível em Python
[62]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Hidrogênio	-	Programação de otimização final linear inteira mista
[52]	Hidráulica/Eólica	Não	PHES	Espanha	Modelagem linear
[53]	Hidráulica/Eólica/FV	Não	PHES	Grécia	Modelo de simulação séries temporais sintéticas
[54]	Hidráulica/FV/Turbinas a gás	Não	PHES	Irã	HOMER
[55]	Hidráulica/Eólica	Não	PHES	China	NSGA-II
[7]	Hidráulica/Eólica/FV	Sim	PHES/Baterias	Egito	HOMER
[71]	Hidráulica/Biogás	Sim	PHES	Índia	GOA
[72]	Hidráulica/Eólica	Sim	PH-CA/Hidrogênio	Irã	Modelagem numérica do processo energético
[73]	Hidráulica/FV/Diesel	Sim	PHES/Hidrogênio	Irã	MOCSA
[22]	Hidráulica/FV/Diesel	Sim	PHES	África	Cplex (Matlab)
[74]	Hidráulica/Eólica/FV/Biomassa	Sim	PHES/Baterias	Chipre do Norte	GRG

#### D. SHR para Suprir a Demanda de Bombeamento

Uma revisão relacionada ao uso de energias renováveis para bombeamento é encontrada em [27]. SHR para bombeamento são menos citados, porém apresentam melhor desempenho.

Os programas HIIER e CIBER são apresentados em [76], analisam com aspectos técnicos e econômicos a integração de fontes renováveis isoladas e combinadas em estações elevatórias para irrigação. Em [77], um SHR (FV/Eólico) para bombeamento de água na Bolívia usa HOGA com o objetivo de minimizar o NPC. O sistema ótimo usa somente fonte eólica, devido ao custo e às condições meteorológicas para este caso.

SHR (eólico/FV) para bombeamento sem armazenamento e autônomo é analisado individualmente e combinado em [78]. Resultados obtidos indicam uma instabilidade de tensão entre os componentes e a geração eólica ocorre fora do período de maior demanda. Um SHR (FV/eólico) para bombeamento e dessalinização de água com uma estratégia de gerenciamento de energia por meio de modelos dinâmicos e semi-estáticos é analisado em [79]. Uma estratégia de despacho ótima é proposta para compartilhar a energia de entrada intermitente entre diferentes bombas, se mostrando uma solução robusta.

Um SHR (eólico/FV) autônomo na Etiópia com sistemas de bombeamento de água e uma demanda da comunidade de 78 kWh é investigado utilizando HOMER em [80]. A tarifa de eletricidade no país é inferior ao calculado; porém são comentadas as vantagens de uma geração limpa e segura para considerar a viabilização. O ciclo de vida em termos de energia incorporada de um processo de bombeamento e dessalinização de água alimentado por um SHR (FV/eólico) é estudado em [81]. São desenvolvidos modelos de energia incorporados com base em uma variedade de fabricantes industriais do processo de dessalinização de água salobra alimentado por SHR, realizando a avaliação do LCA.

Um SHR (eólico/FV) e um FV para bombeamento aplicado à irrigação de mandioca na Guangxi, China são comparados em [4]. Com base na disponibilidade de recursos climáticos e na demanda de água para a cultura, abastecendo totalmente a demanda. Um SHR (diesel/FV) autônomo para irrigação de algodão na Austrália é analisado em [82]. Cálculos de emissões revelam uma redução de 26%, ou 35 kg de CO<sub>2</sub> por fardo de algodão, e um abatimento de 2665 t/CO<sub>2</sub> durante a vida do projeto.

Duas configurações com e sem bombas de calor, com sistema

de cogeração (FV/solares térmicos/eólico), são comparadas em [83], usando a otimização estocástica multiobjetivo, avaliando o dimensionamento ótimo integrado e a operação. Utiliza-se GA com um método de simulação de Monte Carlo para otimizar o dimensionamento e o despacho de energia dos sistemas. No melhor cenário, as bombas de calor reduzem o consumo de combustível fóssil de 1121 MWh/ano para 770 MWh/ano e a produção de energia elétrica renovável aumenta de 92 MWh/ano para 118 MWh/ano. Um estudo de caso em um hotel na Itália, com bomba de calor para água e geração por SHR (FV/Eólico), simulado no TRNSYS, é analisado em [84]. Os resultados mostram que a combinação de fontes de geração aumenta a estabilidade da produção renovável; a energia elétrica produzida corresponde a 61% da demanda total do hotel.

Um sistema SHR (eólico/FV/Diesel) é dimensionado em [85], visando reduzir custos de eletricidade na operação de uma estação elevatória de esgoto no Brasil. O HOMER é utilizado para avaliar a viabilidade do SHR e estudar diferentes cenários. O sistema ideal é conectado à rede e possui: 7,5 kW aerogerador e 1 kW diesel com COE US\$ 0,291. Em [86] é proposto um estudo comparativo dos impactos ambientais de um SHR (FV/micro hidroelétrica) na Espanha em substituição ao modelo convencional com diesel para fornecimento sazonal de energia em uma fazenda. Devido à baixa demanda anual de energia há uma grande capacidade em explorar essa energia e abastecer outras demandas.

#### E. SHR para Suprir Principalmente a Demanda de Bombeamento com Armazenamento

Três sistemas de bombeamento autônomos na Espanha são analisados em [87], com a otimização utilizando HOGA; considera-se um SHR (diesel/FV/eólico) com armazenamento. A temporada de irrigação coincide com os meses de maior irradiação solar, o que reduz as emissões de gases e o funcionamento do gerador a diesel. Em [88] é analisado um sistema de abastecimento com SHR (Hidro/FV/Eólico) na Etiópia, sendo identificados seis locais com potenciais hidrelétricos, com uso do HOMER para otimização; estimam-se as cargas de bombeamento e armazenamento de água. Um COE variando de US\$ 0,1/kWh a US\$ 0,121/kWh é obtido, ligeiramente mais alto do que a tarifa de energia atual do país (< US\$ 0,04/kWh).

Na Nigéria um SHR (FV/bateria/biomassa com gaseificador) com AGMD, com consumo estimado em 259 kWh por dia, é analisado em [89]. O objetivo é produzir energia elétrica e água pura, com a análise sendo feita com o HOMER; o resultado é um sistema com custo de US\$ 0,11/kWh, abaixo da capacidade de pagamento da comunidade. Um SHR (diesel/FV) para bombeamento para seis instalações de irrigação no Mediterrâneo é analisado em [90]. A geração a diesel tem baixo custo de investimento e evita um sobre dimensionamento FV; as baterias não se mostram como solução ótima por causa dos vários meses sem demanda.

Um SHR (1kW eólica/ 348Wp FV) autônomo com baterias para bombeamento de água é estudado em [91], conforme Fig. 3, em Fortaleza, Brasil. O SHR proposto é capaz de suprir a

demanda de bombeamento, apresentando baixa intermitência e com isso pode aumentar o ciclo de vida e reduzir os custos de reposição.

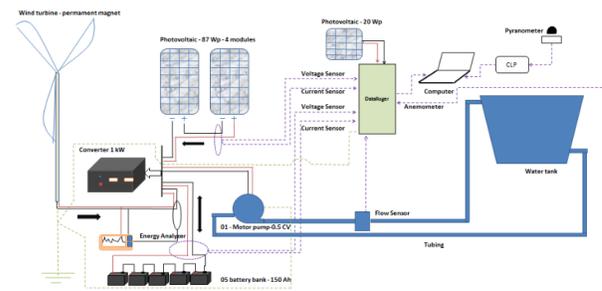


Fig. 3. SHR para bombeamento com armazenamento, adaptado de [91].

Uma estratégia de gerenciamento de um SHR (eólico/FV/FC) ligado à rede com demanda de carga elétrica e um aquecedor de água com bomba de calor é proposta em [92]. Uma programação binária mista e uma programação linear real são utilizadas. O estudo de caso na África do Sul revela que o sistema fornece a demanda de água quente necessária, minimizando o custo de energia. Algoritmos de gerenciamento para SHR (FV/eólico/baterias) para atender a demanda de bombeamento autônoma em uma área rural são investigados em [93], utilizando TOR, lógica Fuzzy e GA. A lógica Fuzzy permite que o estado de carga do banco de baterias seja mais elevado e a geração eólica seja utilizada na sua totalidade.

Um SHR (FV/biodiesel) para demanda de 104 kWh/dia de eletricidade e um sistema de bombeamento de água no Gana é examinado em [94]. Utilizando o HOMER para simulação e análise, é obtido um COE de US\$ 0,20/kWh, que indica baixa viabilidade econômica para a proposta. Porém, o sistema apresenta incentivo com base nas vantagens ambientais. Em [17] um SHR (FV/eólico) para bombeamento com armazenamento em baterias e hidrogênio é investigado visando uma melhor eficiência e estabilidade. O armazenamento conjunto aumenta a economia em baterias devido ao hidrogênio enquanto o SHR fornece estabilidade para o bombeamento e a demanda.

Um SHR (FV/eólico) para bombeamento de água em Konya é analisado em [95]. A demanda de irrigação é suprida pelo SHR, sendo obtida uma economia de US\$ 10410 por vinte anos após o período de retorno básico de 5,7 anos. Como conclusão, o SHR é adequado para áreas remotas sem conexão à rede elétrica como alternativa ao diesel. Um SHR (FV/diesel) com baterias para bombeamento de água na Nigéria é investigado em [96] com uso do HOMER, sendo obtido um \$468.914 NPC e 0,667 \$/kWh COE.

Um SHR (FV/ eólico/bombas de calor) com baterias para o abastecimento de sistemas de aquecimento, resfriamento e geração elétrica é pesquisado em [97]. No inverno a principal demanda são os carros elétricos; no verão, é o sistema de bombeamento de calor para o sistema de refrigeração. Os resultados indicam que a fonte FV prevalece sobre o aerogerador. Na Tailândia, um SHR (FV flutuante/FV/eólico) autônomo e conectado à rede é desenvolvido em [98]. O consumo anual da fazenda de camarão analisada é de 230 MWh. A planta FV flutuante mostra redução das perdas por

evaporação; FV representa a melhor solução a ser integrada em um SHR devido à abundância de recursos em comparação com os recursos eólicos moderados.

Um SHR (FV/Eólico) autônomo para bombeamento de água salobra e obtenção de água potável por OR é investigado em [99]. Para isso, uma estratégia de gerenciamento baseada em modelo quase estático específico é desenvolvida. O objetivo é

alcançado, aumentando a capacidade do tanque de armazenamento de água salobra e melhorando a eficiência energética do sistema.

Tabela II apresenta um resumo dos artigos com SHR para suprir demanda de bombeamento de água identificando as fontes abordadas e a localização.

TABELA II  
B. SHR PARA SUPRIR A DEMANDA DE BOMBEAMENTO

Autor	Fontes Abordadas	Autônomo	Armazenamento	Localização	Metodologia
[84]	Eólica/FV	Não	-	Itália	TRNSYS
[83]	Eólica/FV/ Térmica	Não	-	Itália	GA
[76]	Hidráulica/Eólica	Não	-	Espanha	Otimização com HIER e CIBER
[77]	Eólica/FV	Não	-	Bolívia	HOGA
[100]	Eólica/FV	Sim	-	Etiópia	HOMER.
[79]	Eólica/FV	Sim	-	França	Modelo dinâmico formalismo do <i>Bond Graph</i> , modelo quase estático para validação
[78]	Eólica/FV	Sim	-	EUA	Método estatístico Bins
[81]	Eólica/FV	Sim	-	África	LCA
[4]	Eólica/FV	Sim	-	China	Método de gestão com base em materiais de produção local
[82]	FV/Diesel	Sim	-	Austrália	HOMER
[89]	FV/Biomassa	Não	Baterias	Nigéria	HOMER
[98]	Eólica/FV/Diesel	-	Baterias	Tailândia	Otimização para analisar a relação entre COE, confiabilidade e penetração de energias renováveis
[87]	Eólica/FV/Diesel	Sim	Baterias	Espanha	HOGA
[90]	FV/Diesel	Sim	Baterias	Espanha	HOGA
[91]	Eólica/FV	Sim	Baterias	Brasil	Teste experimental e metodologia estatística para caracterizar velocidade do vento e irradiância
[93]	Eólica/FV	Sim	Baterias	-	TOR, Logica Fuzzy e GA
[94]	FV/Biodiesel	Sim	Baterias	África	HOMER
[95]	Eólica/FV	Sim	Baterias	Turquia	Determinar da quantidade de área por cultura para irrigação
[96]	Eólica/FV/Otto	Sim	Baterias	África	HOMER.
[97]	Eólica/FV	Não	Baterias	Itália	Uso de ferramenta em ambiente TRNSYS
[92]	Eólica/FV	Não	Hidrogênio	África	Programação binária mista e uma programação linear real
[27]	Hidráulica/Eólica/FV/ Diesel/Biomassa	-	Hidrogênio/Baterias	-	Revisão
[17]	Eólica/FV	Sim	Hidrogênio/Baterias	África	Dimensionamento ideal com técnica iterativa
[88]	Hidráulica/Eólica/ FV/Diesel	Sim	PHES	Etiópia	HOMER
[99]	Eólica/FV	Sim	PHES	África	Estratégia de gerenciamento em modelo quase estático específico
[85]	Eólica/FV/Diesel	Não	-	Brasil	HOMER
[86]	Hidráulica/FV	Sim	-	Espanha	Estudo comparativos dos impactos ambientais

### III. RESULTADOS

Fig. 4 mostra os resultados da pergunta “Quais fontes de geração são mais utilizadas para aplicações de bombeamento?”. Observa-se uma forte presença nos artigos das fontes solar e eólica, aplicadas em geração distribuída. Em seguida, destaca-se a hidroelétrica devido à presença de usinas reversíveis com PHES. O tema de bombeamento concatenado com sistemas híbridos apresenta forte relação com o tema de PHES devido ao aumento da estabilidade da rede elétrica com fontes renováveis. Destaque também para aplicações de sistemas híbridos para bombeamento para irrigação, sistemas de dessalinização e aquecimento.

Fig. 5 apresenta o número de artigos com combinações de fontes nos trabalhos revisados. Destaca-se a combinação solar e eólica, que aparece em 24 dos 78 artigos selecionados. A complementaridade da geração FV e eólica é um dos principais fatores para a forte presença do SHR. Em segundo lugar aparece

a combinação FV, eólica e hidroelétrica, normalmente proveniente da PHES que pode tanto gerar como armazenar energia hidroelétrica; além disso o PHES proporciona um maior controle e auxilia na estabilidade da rede.

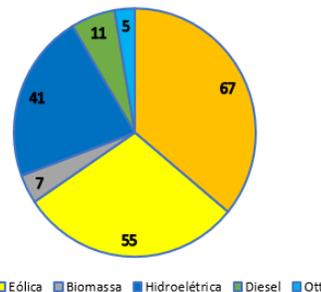


Fig. 4. Número de artigos com fontes renováveis e não renováveis para bombeamento.

Em terceiro lugar se encontra a combinação eólica com hídrica, com uma presença de 7 artigos; essa combinação melhora a participação da eólica na matriz energética. No

contexto brasileiro, o SHR FV-eólico se mostra com grande potencial para regiões com elevado recurso solar e eólico, como o Nordeste. Quando possível de ser implementada, PHES se apresenta como uma solução para melhorar a intermitência de sistemas de geração renováveis, aumentando a eficiência. O número de artigos que abordam SHR cujo bombeamento é um sistema adjacente são predominantes, normalmente correlacionados a PHES, visando o armazenamento de energia hidroelétrica, como observado na Fig. 6. Em seguida, os artigos com o objetivo de suprir a demanda de bombeamento através da geração de SHR. Por fim artigos que visam a desenvolver métodos de dimensionamento para SHR podendo abordar sistemas para bombeamento de água.

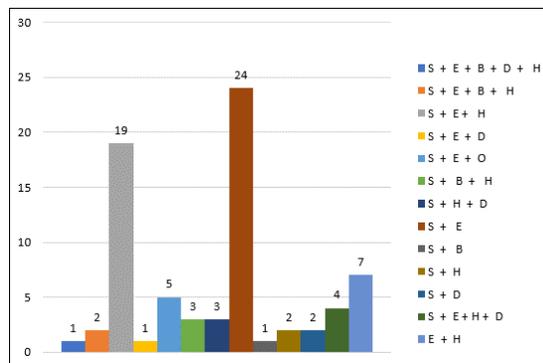


Fig. 5. Número de artigos com combinações de fontes para bombeamento. (S: Solar, E: Eólica, B: Biocombustível, D: Diesel e H: Hidroelétrica).

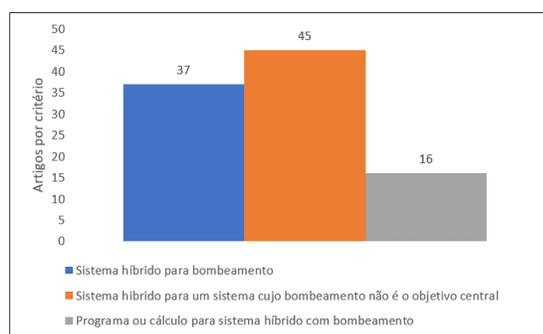


Fig. 6. Número de artigos com SHR para bombeamento, cujo bombeamento é um sistema adjacente e técnicas para dimensionamento.

#### IV. CONCLUSÃO

Diferentes combinações de fontes estão ligadas, diretamente ou indiretamente, ao bombeamento. Em alguns casos, a demanda principal está diretamente ligada ao bombeamento; em outros, como PHES, a demanda do bombeamento agrega na demanda total do sistema. SHR apresentam diversas vantagens para a geração elétrica e, quando associados a PHES, proporcionam maior estabilidade na disponibilidade de carga. Poucos estudos apresentam SHR como solução para a demanda proporcionada exclusivamente pelos sistemas de bombeamento devido ao alto custo inicial do sistema; frequentemente, SHR são associados a outras justificativas como obter uma menor emissão de gases do efeito estufa ou uma melhor estabilidade na geração de sistemas autônomos.

Dentre as fontes, a predominância é da geração FV com presença em 86% dos artigos; em segundo lugar a eólica em

81% dos artigos e em terceiro lugar a hidráulica em 53% dos artigos. A energia hidráulica normalmente está associada ao armazenamento de energia. SHR aplicados a sistemas de bombeamento contêm geração FV ou eólica em 72% dos trabalhos. Dentre as vantagens dessa combinação, podem ser citadas a complementaridade da geração solar e eólica e a associação a sistemas de geração distribuída. SHR com o bombeamento de água como principal demanda aparecem em 47% dos artigos; a água é usada para irrigação, aquecimento, dessalinização e para consumo.

Sistemas de armazenamento de energia, principalmente com a utilização de PHES, aparecem em 65% dos trabalhos, tanto para sistemas conectados à rede como autônomos. Devido a sua ampla faixa de operação, PHES é uma das principais soluções, principalmente em grande escala. Sistemas autônomos normalmente necessitam de um abastecimento constante; uma das principais soluções usadas é a geração a diesel. Em 14% dos trabalhos observa-se SHR para bombeamento comparados ou funcionando paralelamente à geração a diesel, visando atingir uma redução significativa no consumo de combustível.

#### AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica e em Eng. Elétrica da UFC. A CAPES/FUNCAP pela bolsa de estudo do primeiro autor. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa do terceiro autor. Ao CNPq pela bolsa de doutorado sanduíche para o segundo autor.

#### REFERENCES

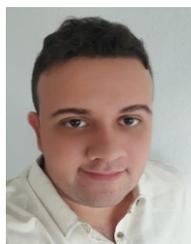
- [1] United Nations / UNESCO, "Water And Energy: Information Brief," *Unesco*, vol. 1, pp. 1–230, 2014, [Online]. Available: <http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en>.
- [2] I. Staffell and S. Pfenninger, "The increasing impact of weather on electricity supply and demand," *Energy*, vol. 145, pp. 65–78, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.051.
- [3] B. Ramkiran, "Solar powered Reverse Osmosis - A solution for Energy and Water Crisis," Aug. 2015, doi: 10.1109/ICIECS.2015.7193218.
- [4] C. Xiang, J. Liu, Y. Yu, W. Shao, C. Mei, and L. Xia, "Feasibility assessment of renewable energies for cassava irrigation in China," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 17–22, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.004.
- [5] P. Abhilash, R. N. Kumar, and R. P. Kumar, "Solar powered water pump with single axis tracking system for irrigation purpose," in *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 39, pp. 553–557, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.336.
- [6] P. C. M. M. Carvalho, L. A. D. D. Carvalho, J. J. H. Filho, and R. S. H. H. Oliveira, "Feasibility study of photovoltaic powered reverse osmosis and pumping plant configurations," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 7, no. 2, pp. 134–143, 2013, doi: 10.1049/iet-rpg.2012.0228.
- [7] K. M. Kotb, "A fuzzy decision-making model for optimal design of solar, wind, diesel-based RO desalination integrating flow-battery and pumped-hydro storage: Case study in Baltim, Egypt," *Energy Convers. Manag.*, vol. 235, p. 113962, May 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.113962.
- [8] P. C. M. De Carvalho *et al.*, "The Brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 5, pp. 373–385, 2004, doi: 10.1002/pip.543.
- [9] E. J. Okampo and N. Nwulu, "Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 140, no. January, p. 110712, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110712.
- [10] M. S. Javed, D. Zhong, T. Ma, A. Song, and S. Ahmed, "Hybrid pumped hydro and battery storage for renewable energy based power

- supply system,” *Appl. Energy*, vol. 257, p. 114026, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114026.
- [11] J. D. Hunt, M. A. V. Freitas, and A. O. Pereira Junior, “Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil,” *Energy*, vol. 78, pp. 513–523, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.10.038.
- [12] F. A. Canales, A. Beluco, and C. A. B. Mendes, “Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas,” *Rev. Eletrônica em Gestão, Educ. e Tecnol. Ambient. - Rev. do Cent. Ciências Nat. e Exatas – UFSM*, vol. 19, no. 2, pp. 1230–1249, 2015, doi: 10.5902/2236117016002.
- [13] K. P. Kumar and B. Saravanan, “Recent techniques to model uncertainties in power generation from renewable energy sources and loads in microgrids – A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, no. December 2016, pp. 348–358, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.063.
- [14] D. Araujo, “Renewable Hybrid Systems: Characterization and Tendencies,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 1, pp. 102–112, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9049467.
- [15] M. A. M. Khan, S. Rehman, and F. A. Al-Sulaiman, “A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 97, no. August, pp. 456–477, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.049.
- [16] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, “Pumped hydro energy storage system: A technological review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, Elsevier Ltd, pp. 586–598, Apr. 01, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.040.
- [17] A. Khiareddine, C. Ben Salah, D. Rekioua, and M. F. Mimouni, *Sizing methodology for hybrid photovoltaic /wind/ hydrogen/battery integrated to energy management strategy for pumping system*, vol. 153, Elsevier Ltd, 2018, pp. 743–762.
- [18] D. M. Campos, D. L. Ferreira, G. H. Gonçalves, A. C. S. Farche, J. C. de Oliveira, and J. H. Ansai, “Effects of aquatic physical exercise on neuropsychological factors in older people: A systematic review,” *Archives of Gerontology and Geriatrics*, vol. 96, p. 104435, 2021, doi: 10.1016/j.archger.2021.104435.
- [19] M. R. Oliveira, “Covid-19 and the impact on the physical activity level of elderly people: A systematic review,” *Exp. Gerontol.*, vol. 159, p. 111675, 2021, doi: 10.1016/j.exger.2021.111675.
- [20] C. Bustos Navarrete, M. G. Morales Malverde, P. Salcedo Lagos, and A. Díaz Mujica, “Buhos: A web-based systematic literature review management software,” *SoftwareX*, vol. 7, pp. 360–372, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.softx.2018.10.004.
- [21] S. Fabbri, C. Silva, E. Hernandez, F. Octaviano, A. Di Thommazo, and A. Belgamo, “Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, vol. 01-03-June, 2016, doi: 10.1145/2915970.2916013.
- [22] C. Feng, Y. Zheng, C. Li, Z. Mai, W. Wu, and H. Chen, “Cost advantage of adjustable-speed pumped storage unit for daily operation in distributed hybrid system,” *Renew. Energy*, vol. 176, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.05.082.
- [23] K. M. Tan, T. S. Babu, V. K. Ramachandaramurthy, P. Kasinathan, S. G. Solanki, and S. K. Raveendran, “Empowering smart grid: A comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration,” *Journal of Energy Storage*, vol. 39, p. 102591, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102591.
- [24] B. K. Das, M. Hasan, and F. Rashid, “Optimal sizing of a grid-independent PV/diesel/pump-hydro hybrid system: A case study in Bangladesh,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 44, p. 100997, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.100997.
- [25] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, “A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. September, p. 112027, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112027.
- [26] M. Shahzad Javed, T. Ma, J. Jurasz, and M. Yasir Amin, “Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives,” 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.157.
- [27] C. Gopal, M. Mohanraj, P. Chandramohan, and P. Chandrasekar, “Renewable energy source water pumping systems - A literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, Pergamon, pp. 351–370, Sep. 01, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.04.012.
- [28] S. Fabbri, “Managing Literature reviews information through visualization,” *ICEIS 2012 - Proc. 14th Int. Conf. Enterp. Inf. Syst.*, vol. 2 ISAS, no. SAIC/-, pp. 36–45, 2012, doi: 10.5220/00040040000360045.
- [29] S. Fabbri, C. Silva, E. Hernandez, F. Octaviano, A. Di Thommazo, and A. Belgamo, “Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2016, vol. 01-03-June, doi: 10.1145/2915970.2916013.
- [30] D. Delimustafic, J. Islambegovic, A. Aksamovic, and S. Masic, “Model of a hybrid renewable energy system: Control, supervision and energy distribution,” in *Proceedings - ISIE 2011: 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011, pp. 1081–1086, doi: 10.1109/ISIE.2011.5984310.
- [31] J. Margeta and Z. Glasnovic, “Theoretical settings of photovoltaic-hydro energy system for sustainable energy production,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 972–982, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.01.007.
- [32] F. A. Canales, A. Beluco, and C. A. B. Mendes, “A comparative study of a wind hydro hybrid system with water storage capacity: Conventional reservoir or pumped storage plant?,” *J. Energy Storage*, vol. 4, pp. 96–105, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.est.2015.09.007.
- [33] M. Zare Oskouei and A. Sadeghi Yazdankhah, “Scenario-based stochastic optimal operation of wind, photovoltaic, pump-storage hybrid system in frequency- based pricing,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 1105–1114, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.08.062.
- [34] K. Kusakana, “Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 253–260, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.081.
- [35] A. S. Kocaman and V. Modi, “Value of pumped hydro storage in a hybrid energy generation and allocation system,” *Appl. Energy*, vol. 205, pp. 1202–1215, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.129.
- [36] G. Notton, D. Mistrushi, L. Stoyanov, and P. Berberi, “Operation of a photovoltaic-wind plant with a hydro pumping-storage for electricity peak-shaving in an island context,” *Sol. Energy*, vol. 157, pp. 20–34, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.016.
- [37] H. M. Sultan, A. A. Z. Diab, O. N. Kuznetsov, and I. S. Subkova, “Design and evaluation of PV-wind hybrid system with hydroelectric pumped storage on the National Power System of Egypt,” *www.geidco.org Glob. Energy Interconnect. Full-length Artic.*, vol. 1, no. 3, 2018, doi: 10.14171/j.2096-5117.gei.2018.03.001.
- [38] J. Jurasz, “Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland),” *Energy*, vol. 161, pp. 183–192, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.085.
- [39] J. Jurasz, J. Mikulik, M. Krzywda, B. Ciapała, and M. Janowski, “Integrating a wind- and solar-powered hybrid to the power system by coupling it with a hydroelectric power station with pumping installation,” *Energy*, vol. 144, pp. 549–563, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.011.
- [40] D. M. Gioutsos, K. Blok, L. van Velzen, and S. Moorman, “Cost-optimal electricity systems with increasing renewable energy penetration for islands across the globe,” *Appl. Energy*, vol. 226, pp. 437–449, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.108.
- [41] “Simulink” “Documentation,” “Simulink - Simulation and Model-Based Design - MATLAB & Simulink,” *Simulation and Model-Based Design, MathWorks.*, 2022, <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (accessed Jan. 13, 2022).
- [42] B. Xu, “Modeling a pumped storage hydropower integrated to a hybrid power system with solar-wind power and its stability analysis,” *Appl. Energy*, vol. 248, pp. 446–462, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.125.
- [43] B. Shyam, B. H. Krishna, and P. Kanakasabapathy, “Optimal scheduling of hybrid pumped hydro storage system using linear programming,” *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 2 Special Issue 8, pp. 1575–1580, 2019, doi: 10.35940/ijrte.B1107.0882S819.
- [44] K. Sun, K. J. Li, J. Pan, Y. Liu, and Y. Liu, “An optimal combined operation scheme for pumped storage and hybrid wind-photovoltaic complementary power generation system,” *Appl. Energy*, vol. 242, pp. 1155–1163, May 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.171.
- [45] Y. Wu, “Optimal location selection for offshore wind-PV-seawater pumped storage power plant using a hybrid MCDM approach: A two-stage framework,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. September, p. 112066, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112066.

- [46] J. I. Sarasúa, G. Martínez-Lucas, and M. Lafoz, "Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, pp. 807–823, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.06.008.
- [47] M. Al-Addous, S. Al Hmidan, M. Jaradat, E. Alasis, and N. Barbana, "Potential and feasibility study of hybrid wind-hydroelectric power system with water-pumping storage: Jordan as a case study," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/app10093332.
- [48] L. Al-Ghussain, R. Samu, O. Taylan, and M. Fahrioglu, "Sizing renewable energy systems with energy storage systems in microgrids for maximum cost-efficient utilization of renewable energy resources," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 55, p. 102059, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102059.
- [49] A. M. Abdelshafy, J. Jurasz, H. Hassan, and A. M. Mohamed, "Optimized energy management strategy for grid connected double storage (pumped storage-battery) system powered by renewable energy resources," *Energy*, vol. 192, p. 116615, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116615.
- [50] R. Gupta, M. C. Soini, M. K. Patel, and D. Parra, "Levelized cost of solar photovoltaics and wind supported by storage technologies to supply firm electricity," *J. Energy Storage*, vol. 27, p. 101027, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101027.
- [51] Y. F. Nassar, "Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 229, p. 113744, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113744.
- [52] C. Serrano-Canalejo, R. Sarrías-Mena, P. Garcia-Trivino, and L. M. Fernandez-Ramirez, "Energy management system design and economic feasibility evaluation for a hybrid wind power/pumped hydroelectric power plant," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 10, pp. 1686–1693, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986447.
- [53] S. Skroufouta and E. Baltas, "Investigation of hybrid renewable energy system (HRES) for covering energy and water needs on the Island of Karpathos in Aegean Sea," *Renew. Energy*, vol. 173, pp. 141–150, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.113.
- [54] A. H. Eisapour, K. Jafarpur, and E. Farjah, "Feasibility study of a smart hybrid renewable energy system to supply the electricity and heat demand of Eram Campus, Shiraz University; simulation, optimization, and sensitivity analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 248, p. 114779, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114779.
- [55] X. Liu, N. Li, H. Mu, M. Li, and X. Liu, "Techno-energy-economic assessment of a high capacity offshore wind-pumped-storage hybrid power system for regional power system," *J. Energy Storage*, vol. 41, no. April, p. 102892, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102892.
- [56] T. Ma, H. Yang, L. Lu, and J. Peng, "Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong," *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 7–15, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.028.
- [57] T. Ma, H. Yang, L. Lu, and J. Peng, "Optimal design of an autonomous solar-wind-pumped storage power supply system," *Appl. Energy*, vol. 160, pp. 728–736, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.11.026.
- [58] F. Petrakopoulou, A. Robinson, and M. Loizidou, "Simulation and analysis of a stand-alone solar-wind and pumped-storage hydropower plant," *Energy*, vol. 96, pp. 676–683, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.049.
- [59] M. Das, M. A. K. Singh, and A. Biswas, "Techno-economic optimization of an off-grid hybrid renewable energy system using metaheuristic optimization approaches – Case of a radio transmitter station in India," *Energy Convers. Manag.*, vol. 185, pp. 339–352, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.107.
- [60] M. Guezgouz, "Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, p. 112046, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112046.
- [61] R. R. Lingamuthu and R. Mariappan, "Power flow control of grid connected hybrid renewable energy system using hybrid controller with pumped storage," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 7, pp. 3790–3802, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.092.
- [62] R. Hemmati, "Stochastic energy investment in off-grid renewable energy hub for autonomous building," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 13, no. 12, pp. 2232–2239, Sep. 2019, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.6254.
- [63] D. Al Katsaprakakis, I. Dakanali, C. Condaxakis, and D. G. Christakis, "Comparing electricity storage technologies for small insular grids," *Appl. Energy*, vol. 251, no. May, p. 113332, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113332.
- [64] M. Shabani, E. Dahlquist, F. Wallin, and J. Yan, "Techno-economic comparison of optimal design of renewable-battery storage and renewable micro pumped hydro storage power supply systems: A case study in Sweden," *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115830, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115830.
- [65] X. Xu, W. Hu, D. Cao, Q. Huang, C. Chen, and Z. Chen, "Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1418–1431, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099.
- [66] M. Shahzad Javed, T. Ma, J. Jurasz, S. Ahmed, and J. Mikulik, "Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems," 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118599.
- [67] E. N. Nyeche and E. O. Diemuodeke, "Modelling and optimisation of a hybrid PV-wind turbine-pumped hydro storage energy system for mini-grid application in coastline communities," *J. Clean. Prod.*, vol. 250, p. 119578, Mar. , doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119578.
- [68] M. S. Javed, "Economic analysis and optimization of a renewable energy based power supply system with different energy storages for a remote island," *Renew. Energy*, vol. 164, pp. 1376–1394, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.063.
- [69] M. S. Islam, B. K. Das, P. Das, and M. H. Rahaman, "Techno-economic optimization of a zero emission energy system for a coastal community in Newfoundland, Canada," *Energy*, vol. 220, p. 119709, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119709.
- [70] B. Liu, Z. Wang, L. Feng, and K. Jermisittiparsert, "Optimal operation of photovoltaic/diesel generator/pumped water reservoir power system using modified manta ray optimization," *J. Clean. Prod.*, vol. 289, p. 125733, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125733.
- [71] A. K. S. Maisanam, A. Biswas, and K. K. Sharma, "Integrated socio-environmental and techno-economic factors for designing and sizing of a sustainable hybrid renewable energy system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 247, p. 114709, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114709.
- [72] X. Guo and M. Sepanta, "Evaluation of a new combined energy system performance to produce electricity and hydrogen with energy storage option," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1697–1711, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.03.026.
- [73] S. Makhdoomi and A. Askarzadeh, "Impact of solar tracker and energy storage system on sizing of hybrid energy systems: A comparison between diesel/PV/PHS and diesel/PV/FC," *Energy*, vol. 231, p. 120920, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120920.
- [74] L. Al-Ghussain, A. Darwish Ahmad, A. M. Abubaker, and M. A. Mohamed, "An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 46, no. December 2020, p. 101273, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101273.
- [75] J. Liu, L. Jian, W. Wang, Z. Qiu, J. Zhang, and P. Dastbaz, "The role of energy storage systems in resilience enhancement of health care centers with critical loads," *J. Energy Storage*, vol. 33, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102086.
- [76] D. Botero, M. Navarro, M. Sanz, and J. F. Sanz Osorio, "Computer science tool for the calculation of technical-economical viability for the integration of renewable energies in pumping stations (HIIER & CIBER)," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 453–460, 2003, doi: 10.24084/repqj01.400.
- [77] J. L. Bernal-Agustín, R. Dufó-López, J. A. Domínguez-Navarro, and J. M. Yusta-Loyo, "Optimal design of a PV-wind system for water pumping," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 6, pp. 788–793, Mar. 2008, doi: 10.24084/repqj06.450.
- [78] B. D. Vick and B. A. Neal, "Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1197–1207, May 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.01.012.
- [79] X. Roboam, B. Sareni, D. T. Nguyen, and J. Belhadj, "Optimal system management of a water pumping and desalination process supplied with intermittent renewable sources," in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, Jan. 2012, vol. 8, no. PART 1, pp. 369–374, doi: 10.3182/20120902-4-fr-2032.00066.
- [80] G. Bekele and G. Boneya, "Energy Procedia Energy Procedia 00 (2011) 000-000 Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area," *Energy Procedia*,

- vol. 14, pp. 1760–1765, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1164.
- [81] H. Cherif, G. Champenois, and J. Belhadj, “Environmental life cycle analysis of a water pumping and desalination process powered by intermittent renewable energy sources,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, Elsevier Ltd, pp. 1504–1513, Jun. 01, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.094.
- [82] J. W. Powell, J. M. Welsh, and R. Farquharson, “Investment analysis of solar energy in a hybrid diesel irrigation pumping system in New South Wales, Australia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 224, pp. 444–454, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.071.
- [83] D. Testi, L. Urbanucci, C. Giola, E. Schito, and P. Conti, “Stochastic optimal integration of decentralized heat pumps in a smart thermal and electric micro-grid,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 210, p. 112734, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112734.
- [84] F. Calise, F. L. Cappiello, M. Dentice D’accadia, and M. Vicidomini, “Dynamic modelling and thermoeconomic analysis of micro wind turbines and building integrated photovoltaic panels,” 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.06.075.
- [85] and G. D. L. da Silva, A. Beluco, “A wind PV diesel hybrid system for energizing a sewage station in Santa Rosa, in southern Brazil,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 4, pp. 773–780, 2020, Accessed: Aug. 01, 2021. [Online]. Available: <https://latam.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/1931/457>.
- [86] A. Merida García, J. Gallagher, M. Crespo Chacón, and A. Mc Nabola, “The environmental and economic benefits of a hybrid hydropower energy recovery and solar energy system (PAT-PV), under varying energy demands in the agricultural sector,” *J. Clean. Prod.*, vol. 303, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127078.
- [87] J. Carroquino, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, “Sizing stand-alone hybrid generation for seasonal irrigation pumping,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 9, pp. 389–401, 2011, doi: 10.24084/repqj09.346.
- [88] G. Bekele and G. Tadesse, “Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia,” *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 5–15, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.059.
- [89] I. Eziyi and A. Krothapalli, “Sustainable rural development: Solar/Biomass hybrid renewable energy system,” in *Energy Procedia*, Jan. 2014, vol. 57, pp. 1492–1501, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.141.
- [90] J. Carroquino, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, “Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops,” *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 566–574, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.069.
- [91] M. F. D. Arruda, P. C. M. Carvalho, D. J. Albiero, F. J. F. Canafistula, and A. S. Teixeira, “Solar and wind powered stand alone water pumping system,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 13, pp. 114–119, 2015, doi: 10.24084/repqj13.253.
- [92] S. Sichilalu, H. Tazvinga, and X. Xia, “Optimal control of a fuel cell/wind/PV/grid hybrid system with thermal heat pump load,” *Sol. Energy*, vol. 135, pp. 59–69, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.05.028.
- [93] I. Ouachani, A. Rabhi, I. Yahyaoui, B. Tidhaf, and T. F. Tadeo, “Renewable Energy Management Algorithm for a Water Pumping System,” in *Energy Procedia*, Mar. 2017, vol. 111, pp. 1030–1039, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.266.
- [94] M. S. Adaramola, D. A. Quansah, M. Agelin-Chaab, and S. S. Paul, “Multipurpose renewable energy resources based hybrid energy system for remote community in northern Ghana,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 22, pp. 161–170, 2017, doi: 10.1016/j.seta.2017.02.011.
- [95] F. Kose, M. H. Aksoy, and M. Ozgoren, “Experimental investigation of solar/wind hybrid system for irrigation in Konya, Turkey,” *Therm. Sci.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.2298/TSCI180515293K.
- [96] E. Ayodele, S. Misra, R. Damasevicius, and R. Maskeliunas, “Hybrid microgrid for microfinance institutions in rural areas – A field demonstration in West Africa,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 35, pp. 89–97, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.06.009.
- [97] D. Mazzeo, “Solar and wind assisted heat pump to meet the building air conditioning and electric energy demand in the presence of an electric vehicle charging station and battery storage,” *J. Clean. Prod.*, vol. 213, pp. 1228–1250, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.212.

- [98] P. E. Campana, L. Wästhage, W. Nookuea, Y. Tan, and J. Yan, “Optimization and assessment of floating and floating-tracking PV systems integrated in on- and off-grid hybrid energy systems,” *Solar Energy*, Jan. 01, 2019. .
- [99] I. Ben Ali, M. Turki, J. Belhadj, and X. Roboam, “Systemic design and energy management of a standalone battery-less PV/Wind driven brackish water reverse osmosis desalination system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 42, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100884.
- [100] G. Bekele and G. Boneya, “Design of a Photovoltaic-Wind Hybrid Power Generation System for Ethiopian Remote Area,” *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1760–1765, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2011.12.1164.



**Igor Souza Cruz** possui graduação em Engenharia de Energias Renováveis pela UFC (2019). Mestrando em Engenharia Mecânica com ênfase em Eólica na UFC.



**Natasha Esteves Batista** possui graduação em Física - Licenciatura pela Universidade Estadual do Ceará (UECE)(2014) e Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas UECE (2017).



**Paulo Cesar Marques de Carvalho** possui graduação em Eng. Elétrica, UFC (1989), mestrado em Eng. Elétrica, UFPB (1992) e doutorado em Eng. Elétrica, Universidade de Paderborn, Alemanha (1997). Professor titular do Departamento de Eng. Elétrica da UFC. Coordena o Laboratório de Energias Alternativas da UFC. Bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq.