

# Renewable Hybrid Systems: Characterization and Tendencies

D. Araujo, N. Batista, P. Carvalho, J. Reges, D. Costa, R. Dias, D. Freitas, S. Lima, K. Ramos, S. Ribeiro, and F. Soares

**Abstract**—A renewable hybrid system combines energy sources for electricity generation and its use is motivated by the call for diversification and decentralization of non-polluting sources and complementarity between renewable resources. This system is more reliable and cost-effective than a system based on a single source and among different combinations of components the most commonly used is solar wind. The operation of these systems depends on factors such as design, optimization, reliability and economic performance. Thus, the main objective of this article is to present the state of the art of renewable hybrid systems worldwide, highlighting its main characteristics. Among the 29 analyzed articles, Homer software is the most used for Hybrid System scaling; for optimization the most commonly used metaheuristic is the PSO. In addition, 36% of the articles did not use any type of energy storage, and the remaining used batteries, fuel cells or both technologies. As application, 36% of the plants supplied reverse osmosis systems; the others supplied the demand for remote rural areas or to charge electric cars.

**Index Terms**—Hybrid Systems, Optimization, Reliability, Economic performance.

## Abbreviations/Siglas

ACS	Annualized Cost of System (Custo Anualizado do Sistema)
AMPSO	Adaptive Modified Particle Swarm Optimization algorithm
CaC	Célula a Combustível
CC	Corrente Contínua
CEL	Carros Elétricos
COE	Cost of Energy (Custo de Energia)
CRF	Capital Recovery Factor (Fator de Recuperação de Capital)
DIRECT	Dividing Rectangles (Dividindo em Retângulos)
DPSP	Deficiency of Power Supply Probability (Probabilidade de deficiência no fornecimento de energia)
EENS	Expected Energy Not Served (Energia Não Servida Esperada)
FP	Fator de Potência
FV	Fotovoltaico
GA	Genetic Algorithm (Algoritmo Genético)

HRES	Hybrid Renewable Energy System (sistema híbrido de energia renovável)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
LCE	Levelized Cost of Energy (Custo Nivelado de Energia)
LLP	Loss of Load Probability (Perda de Probabilidade de Carga)
LOEE	Loss Of Expected Energy (Perda de Energia Esperada)
LPSP	Low of Power Supply Probability (Probabilidade de Perda de Fornecimento de Energia)
NPC	Net Present Cost (Custo Presente Líquido)
NWCMO	Normalised Weighted Constrained Multi-Objective (Múltiplas Objetivas com Limites Ponderados e Normalizados)
OR	Osmose Reversa
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PSO	Particle Swarm Optimization (Método por Enxame de Partículas)
RSM	Response Surface Methodology (Metodologia da Superfície de Resposta)
SA	Simulated Annealing (Recozimento Simulado)
SHFVEOL	Sistema Híbrido Fotovoltaico e Eólico
UL	Unmet Load (Carga Não Atendida)

## I. INTRODUÇÃO

OS impactos causados pelo uso de fontes fósseis na geração de energia elétrica são uma preocupação crescente devido, principalmente, às questões ambientais, como as mudanças climáticas na Terra, e econômicas.

Segundo o IPCC, em pouco mais do que duas décadas o planeta estará 1,5 °C mais quente, como consequência do aumento das emissões de gases de efeito estufa [1].

Com a necessidade de reduzir essas emissões e com os incentivos ao uso de tecnologias que utilizam fontes renováveis, se torna cada vez mais comum o uso de sistemas de produção de energia elétrica inteiramente renováveis.

O setor elétrico, um dos responsáveis por boa parte das emissões, vem procurando empregar fontes de baixa emissão de carbono, como, por exemplo, solar e eólica, as quais vêm sendo utilizadas de forma crescente [2]. Devido à intermitência dessas fontes, se faz necessária uma combinação entre estas, para uma maior confiabilidade na geração, o que é o caso dos HRES.

HRES combinam várias fontes de energia, o que os torna mais rentáveis e confiáveis do que um sistema baseado em

D. N. Araujo, N. E. Batista, P. C. M. Carvalho, J. P. Reges, R. S. Dias, D. M. Freitas, S. P. Lima, K. M. Ramos, S. B. J. Ribeiro and F. S. Soares were with the Department of Electrical Engineering, Federal University of Ceará, Fortaleza, CE, Brasil e-mails: (see danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br; estevesnatasha@hotmail.com; carvalho@dee.ufc.br; jonaspplatini1993@gmail.com; rdobsondias@gmail.com; deivid\_ce@hotmail.com; siomara.lima@ifce.edu.br; kaiomartins@dee.ufc.br; shakil.ribeiro@gmail.com; fellipe@dee.ufc.br).

D. A. C. Costa was with the Department of Electrical Engineering, University Center September 7, Fortaleza, CE, Brasil e-mail: (see douglas.aurelio84@gmail.com).

uma única fonte [3]. Na Fig. 1 é mostrada a topologia de um HRES baseado nas fontes de energia solar FV e eólica.

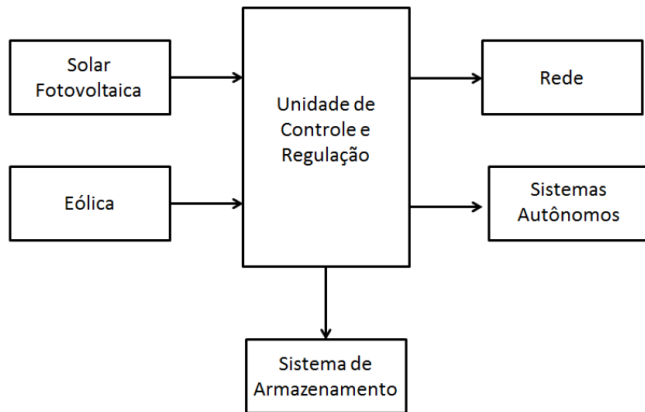


Fig. 1. Topologia de um sistema híbrido FV-Eólico, adaptado de [4].

A operação desses sistemas requer um estudo completo de diferentes parâmetros, como dimensionamento, posicionamento, projeto e controle ideais que afetam a geração de eletricidade (confiabilidade, qualidade de energia, eficiência) e desempenho econômico (custos de aquisição, operação e substituição).

Diferentes critérios de dimensionamento podem ser aplicados para escolher os componentes mais apropriados desse sistema. Exemplo disso são restrições econômicas e abordagens de otimização, usadas para comparar o desempenho de diferentes configurações.

Uma das aplicações mais importantes dos HRES é a instalação em áreas remotas onde a extensão da rede elétrica é muito difícil ou cara; nesse caso, os sistemas são mais dependentes da otimização do projeto para minimização do custo total.

Assim, a otimização se refere ao processo de seleção de componentes adequados, de uma estratégia de dimensionamento e controle para fornecer energia elétrica de forma eficiente, confiável e econômica.

Dados os inúmeros trabalhos que se propõem a minimizar o custo do HRES em seu estágio de dimensionamento dos componentes, assim como no processo de otimização, o presente artigo tem como objetivo apresentar as diferentes aplicações a nível mundial existentes na literatura, destacando as principais características dos HRES em relação ao dimensionamento, otimização, análise financeira e de confiabilidade.

Desse modo, o artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o estado da arte, com a descrição das aplicações realizadas nos trabalhos e na Seção 3 as conclusões são discutidas.

## II. ESTADO DA ARTE

A metodologia para desenvolvimento do estado da arte é baseada na escolha de artigos desenvolvidos nos últimos 10 anos, classificados nos aspectos técnicos e financeiros. Os critérios tecnológicos de avaliação do trabalho são: a

utilização de software de dimensionamento, métodos de dimensionamento e a configuração do HRES.

Os efeitos de diferentes combinações de potência de um SHFVEOL sobre o comportamento de tensão em uma rede residencial, a carga de transformadores de baixa tensão e a redução de potência excedente pelo período de um ano (01/03/2015 a 29/02/2016) são analisados em [5]. Para este estudo, são consideradas 74 residências, que assumem cargas diárias semelhantes e perfis de potência constantes, mas com diferentes demandas de pico. O SHFVEOL é utilizado em todas as residências, com o dimensionamento baseado em dados de irradiância solar, temperatura ambiente e velocidade do vento, com uma resolução de 5 minutos. Para fins de cálculo, assume-se que os dados meteorológicos são os mesmos para todas as residências. Devido aos avanços tecnológicos dos CEL, o trabalho prevê um alto nível de penetração desta demanda nas redes residenciais, fazendo com que a futura curva de carga dos sistemas seja completamente diferente das atuais. O uso dos CEL aumentará a demanda da carga residencial, necessitando de um controle do período de carga para tornar a demanda mais flexível. 11 tipos diferentes de combinações para os SHFVEOL em uso residencial são desenvolvidos, com potência total máxima de 10 kVA. Para controlar a tensão da rede na presença de geração distribuída, alguns métodos são aplicados: reforço de rede, resposta de demanda, transformador ativo, sistema de armazenamento de energia, redução de energia ativa e controle de potência reativa. No estudo são propostos 4 cenários: para o cenário 1, inversores do SHFVEOL e CEL não possuem controladores, operando com FP unitário; para os cenários 2, 3 e 4, são usadas diferentes estratégias de controladores para a tensão no ponto de conexão com a rede. Resultados mostram que as diferentes combinações de potência para um SHFVEOL possuem um efeito marcante sobre a tensão em uma rede de distribuição, a carga de transformadores de baixa tensão e a redução de potência excedente.

Uma metodologia para dimensionar e simular um SHFVEOL autônomo com baterias, utilizando ferramentas de simulação e programação linear é desenvolvida em [6]. O modelo desenvolvido é útil para suprir a demanda de áreas rurais afastadas, aliando um custo mínimo e alta confiabilidade, baseado no conceito de LPSP, cujo valor varia de 0 a 1: 0 indica que sempre a demanda é satisfeita; 1 significa que nunca é satisfeita, ou seja, a energia fornecida pelas fontes somadas à carga das baterias não é suficiente para suprir a demanda. Cenários são calculados e comparados, usando diferentes períodos e valores de LPSP. Como resultado, são apresentados um completo dimensionamento do SHFVEOL e uma análise de custos. Um teste para calcular o dimensionamento ótimo de um SHFVEOL é realizado para uma pequena propriedade rural na região Sul do Brasil. Para efeito de cálculo são utilizados painéis FV de 50 Wp, aerogerador de 600 W, baterias com capacidade de 1,2 kWh (100 Ah, 12 V) e inversor com eficiência de 0,9. Para avaliar o dimensionamento são criados 6 cenários:

- Cenários 1, 2 e 3: caracterizados por apresentarem três diferentes períodos críticos (períodos de 24, 168 e 720 horas);

- Cenários 4, 5 e 6: caracterizados por apresentarem três diferentes LPSP (0%, 10% e 30%), considerando um período crítico de 168 horas.

Para o cenário 2 é realizada a análise financeira, com o custo de energia calculado através do custo inicial do equipamento, o custo de manutenção, o tempo de vida, o fator de carga e a taxa de desconto anual.

Em [7] são analisados 19 programas aplicados em HRES: HOMER, Hybrid2, RETScreen, iHOGA, INSEL, TRNSYS, iGRHYSO, HYBRIDS, RAPSIM, SOMES, SOLSTOR, HySim, HybSim, IPSYS, HySys, Dymola/Modelica, ARES, SOLSIM e HYBRID DESIGNER. O estado da arte de pesquisas realizadas com o uso destes programas também é apresentado. Os autores classificam essas ferramentas em quatro classes principais:

- Pré-viabilidade: utilizadas para o dimensionamento aproximado de um HRES e o valor financeiro;
- Dimensionamento: utilizadas para a determinação ideal dos componentes de um HRES;
- Simulação: simulação dos componentes do HRES, sendo necessária uma gama de informações;
- Pesquisa: possui um maior controle nos componentes, uma vez que pode modificar os algoritmos e as interações entre os componentes.

Os autores destacam que alguns programas são pagos e fechados, sendo até explanada a dificuldade de obter informações em alguns casos. Além do mais, alguns programas não recebem mais atualizações. A Tab. I relaciona os principais programas livres mencionados na pesquisa.

Os autores concluem que o HOMER é o programa mais utilizado mundialmente, por possuir uma gama máxima de combinações de sistemas renováveis aliada a uma análise de otimização e sensibilidade. Os autores deixam claro também que a inclusão de métodos de controle, gerenciamento de demanda da carga, planejamento econômico, novas fontes e tecnologias de armazenamento é essencial para a melhoria do desempenho dos programas.

Em [8] os autores desenvolvem uma metodologia visando a otimização do dimensionamento de um SHFVEOL autônomo com baterias baseado na avaliação de recursos renováveis, suas características e o perfil da carga. Para validar o algoritmo desenvolvido, é realizado um estudo de caso em uma fazenda na Tunísia. O dimensionamento do HRES está estruturado em torno de três eixos: estimativa de potenciais de energia renovável, avaliação de modelos de geração de energia renovável e caracterização do perfil de carga. O gerador FV utilizado é baseado no modelo de um diodo, fornecendo CC em função da irradiação solar e temperatura ambiente; um conversor *boost* é usado para aumentar a tensão de saída. O aerogerador é do tipo síncrono de ímã permanente, acoplado ao barramento CC através de um retificador. O potencial eólico é investigado com base nas variáveis  $k$  e  $c$ , parâmetros de forma e de escala da distribuição de Weibull. Como armazenador de energia, uma bateria é acoplada a um conversor bidirecional para abastecer a planta em caso de deficiência de energia. A fim de avaliar o desempenho do algoritmo de dimensionamento, a demanda mensal e a geração

são analisadas pelo cálculo do balanço de energia ao longo do ano. Os perfis de carga são definidos para o intervalo de tempo de um quarto de hora ao longo de todo o ano. Os autores utilizam um algoritmo de dimensionamento para calcular a superfície dos painéis FV e do aerogerador adotando uma superfície mínima inicial para cada. Em seguida, o algoritmo avalia o potencial energético em relação à superfície ( $kW/m^2$ ) para as fontes. A partir dos dados do potencial energético, é gerado um índice entre Potência máxima obtida sobre a Potência média de cada fonte, e deste mesmo índice é subtraída a demanda. Se a diferença for igual a zero, a capacidade da bateria e o volume do tanque são calculados, se não, as superfícies são retificadas com um cálculo iterativo adicionando um passo de  $0,5 m^2$ , até que a diferença atinja zero. Segundo este algoritmo, são encontradas as superfícies de  $96 m^2$  e  $46 m^2$  para os painéis FV e aerogerador, respectivamente. Para o dimensionamento do tanque e baterias, é calculado o excesso de energia produzido pelas fontes renováveis; posteriormente é usado o excesso de energia e a quantidade de água necessária para abastecimento do local para determinar o volume do tanque; para as baterias, o excedente é multiplicado pelo número de dias de autonomia necessário, sendo obtido um banco de baterias de capacidade de 1200 Ah, com profundidade de descarga máxima de 80%. A abordagem apresenta um erro relativo de 0,005%, mostrando assim a relevância do algoritmo utilizado para os dados climáticos da região estudada.

A pesquisa de [9] é realizada na Tunísia visando uma análise de estimativa de produção de energia e água potável de um SHFVEOL sem baterias que aciona uma unidade de dessalinização por OR seguindo os critérios da Organização Mundial da Saúde (OMS). A água salobra usada tem salinidade de 6 g/l e uma temperatura variando de 25 °C no inverno a 35 °C no verão. A planta FV é instalada em uma área de  $400 m^2$  e o aerogerador utilizado é de 10 kW. Os painéis FV e o aerogerador são interligados a um barramento CC através de conversores *boost*, com a tensão do barramento CC fixada em 600 V. A unidade de OR inclui uma bomba centrífuga de alta pressão acionada por um motor acoplado, sendo utilizada uma membrana em espiral. A membrana deve ser escolhida de acordo com a concentração salina da água, dessa forma se calcula a pressão necessária para conduzir o processo. Baseado nos estudos, é calculado um ângulo ideal de inclinação dos módulos FV de 33,9°. Diante da limitação de área ( $400 m^2$ ) e da característica da inclinação dos painéis, é utilizado um programa para calcular a distância necessária entre as fileiras, separando-as de acordo com o tamanho do módulo, a inclinação e a posição do Sol. De acordo com os dados, 154 painéis FV de 200 Wp podem ser instalados na área reservada, resultando em uma capacidade instalada total de 30,8 kWp. Para o local em análise, a potência máxima estimada do SHFVEOL é de 33,6 kW. Para simular o desempenho da unidade de OR e estimar a produção de água potável, é utilizado um programa que pode projetar, dimensionar e simular plantas de dessalinização, apresentando a relação entre a energia elétrica necessária e a quantidade de água potável produzida. A produção de água potável pela unidade de OR varia ao longo do ano de  $57 m^3/dia$  a 111

TABELA I  
ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES DE LIVRE ACESSO

Programas	Vantagens	Desvantagens
HOMER	Interface Amigável	Código fechado
	Fornecer representação gráfica eficiente dos resultados Fácil entendimento Capacidade de manipulação de dados horários	Modelos baseados em equações lineares de primeiro grau Dados de séries temporais em forma de média diária não podem ser importados
RETScreen	Banco de dados de produtos e banco de dados meteorológicos da NASA	Opções limitadas para recursos de pesquisa, recuperação e visualização
	Análise financeira é o ponto principal Fácil de usar, pois é baseado em Excel	Opções reduzidas de dados de entrada Não há opção de séries temporais
HYBRID 2	Várias opções de cargas	Não funciona em plataformas Windows posteriores ao Windows XP
	Interface Amigável Saída detalhada dos dados	Apresenta alguns erros de simulação embora o projeto seja escrito com sucesso
HOGA	Otimização de multiobjetivo usando GA e análise de sensibilidade	Versão gratuita educacional tem algumas limitações na análise
	Tempo computacional baixo Compra e venda de opções de energia para a rede elétrica com sistema de compensação disponível	Conexão com a internet é necessária para ativar a licença

Fonte: Adaptado de [7].

$m^3/\text{dia}$ .

Em [10] os autores fazem uma revisão da literatura acerca dos algoritmos de dimensionamento ótimo para HRES, detalhando características, perdas de carga e energia como também métodos de armazenamento. Os principais e a quantidade de artigos citados são:

- DIRECT com 3 artigos citados;
- GA E FUZZY GA com 4 artigos citados;
- PSO com 6 artigos citados;
- SA com 1 artigo citado;
- INTEGER AND LINEAR PROGRAMMING com 3 artigos citados;
- RSM com 2 artigos descritos;
- ALGORITMOS HÍBRIDOS (Método que considera dois ou mais algoritmos de otimização) com 2 artigos citados;
- PROGRAMAS COMERCIAIS com 2 artigos citados que utilizam o programa HOMER.

Em uma segunda etapa, os autores abordam os índices de desempenho usualmente empregados:

- Índices para quantificar a confiabilidade do sistema, como a LLP ou a EENS;
- Índices para determinar a viabilidade econômica do projeto, como o ACS e o LCE.

O projeto de um SHFVEOL otimizado com uso de conversores e baterias, empregando o programa IHOGA é apresentado em [11]. Os autores também desenvolvem uma análise de sensibilidade do HRES, visando avaliar o efeito de incertezas ou mudanças nas variáveis. Assim, a ferramenta calcula a configuração ideal do HRES e permite que o projetista avalie a viabilidade financeira e técnica de um grande número de opções. O custo total é representado pelo NPC, sendo a função a ser otimizada, composto pelo custo de capital, custo de reposição e outros. A metodologia utilizada para coleta de dados é dividida em duas partes: fontes primárias e secundárias. Fontes primárias consistem principalmente em entrevistas e questionários com os moradores da região do estudo (Maharashtra, Índia). Fontes secundárias consistem em uma pesquisa bibliográfica, artigos revisados, trabalhos de pesquisa e documentos publicados pelo governo. Em relação

à carga, o perfil é considerado de acordo com a variação das estações. Já os dados de entrada de recursos utilizam a irradiação solar e a velocidade do vento. A estratégia de operação do HRES é definida para duas situações:

- Energia total gerada pelo HRES maior que a energia requerida pela carga: excesso de energia armazenado na bateria, que entra em condição de carga. Quando a bateria atinge o nível máximo de carga, a unidade de controle para o processo de carga.
- Energia total gerada pelo HRES menor que a energia requerida pela carga: bateria alimenta a carga, que entra em condição de descarga. Quando a bateria atinge o nível mínimo de carga, a unidade de controle desconecta a carga.

Neste estudo, IHOGA realiza uma função mono objetiva, que é minimizar o custo para o usuário definir restrições, tais como, carga máxima não atendida permitida, número mínimo de dias de reserva, capacidade nominal do banco de baterias, fração renovável mínima e custo nivelado máximo de energia. O processo de otimização considera duas análises: uma por meio da análise de sensibilidade e a outra sem considerar a sensibilidade das variáveis. As variáveis selecionadas para fazer a otimização por meio da análise de sensibilidade são inicialmente a mudança de irradiação solar global e a média anual da velocidade do vento, conduzindo a uma variação de custo de energia entre 0,42 e 0,35 \$/kWh. Em uma segunda análise, a variável de sensibilidade considerada é o preço do painel FV, considerando avanço de material e melhor processo de fabricação. Resultados mostram que reduzindo o valor do painel FV em 20%, o custo da energia reduz de 0,4 para 0,1 \$/kWh.

Em [12] os autores propõem dimensionar um SHFVEOL com uso do TRNSYS, programa muito utilizado em vários estudos de dimensionamento e simulação do desempenho de HRES, que inclui muitos dos componentes comumente encontrados em sistemas de energia renovável térmica e elétrica. O objetivo é o dimensionamento otimizado de um SHFVEOL, atendendo à demanda de carga elétrica sob condições de confiabilidade máxima de energia e do

custo mínimo do sistema. Uma abordagem determinista é usada como técnica de dimensionamento para fornecer o melhor compromisso entre confiabilidade e custos, em que os dados meteorológicos da série temporal ajudam a avaliar o desempenho do sistema a longo prazo. Um estudo comparativo entre dois métodos baseados na abordagem determinista é apresentado. O primeiro é o método “mês médio anual” (*YAM - Yearly Average Month*), que consiste no dimensionamento de módulos FV e aerogeradores a partir dos valores mensais médios anuais. No segundo método, denominado “pior mês” (*WM - Worst Month*), os piores meses para o recurso solar e eólico são escolhidos separadamente. O pior mês escolhido corresponde ao mês do ano em que é proposta a maior área total de módulos FV e aerogeradores. O comportamento do SHFVEOL é calculado com base nos dados meteorológicos (velocidade do vento, irradiância e temperatura), que geralmente têm intervalo de 1 hora. Em relação à determinação do perfil de demanda elétrica, foram realizados cálculos estimativos; assim, foi obtida uma média total de energia elétrica demandada por dia de 29,4 kWh. A partir disso, a produção anual de energia elétrica do HRES foi obtida usando TRNSYS. A configuração proposta do HRES é composta de 9 kWp de módulos FV e aerogerador de 1 kW. Assim, a configuração pode garantir 10.822,85 kWh/ano para abastecer a carga. A comparação entre os métodos *YAM* e *WM* mostra que o número de módulos FV necessários é de 36 unidades para o *YAM*, enquanto para o *WM* é de 48 unidades.

A potência do aerogerador de 1 kW é a mesma devido ao baixo potencial eólico. Assim, o método *WM* requer maior potência em comparação com o *YAM*. Em relação ao custo de integração, o método *YAM* utiliza inversor ON-OFF, com objetivo de alternar para a rede elétrica quando o HRES não é capaz de satisfazer a demanda. Já no método *WM*, um inversor simples é utilizado para converter a energia elétrica para o valor apropriado de tensão e frequência sem conexão com a rede, que explica o preço mais baixo em relação ao *YAM*. Devido ao número de módulos FV, custo de integração e sistema de baterias, o método *WM* tem o custo total de 42.782,00 €, enquanto *YAM* tem de 29.540,00 €. Assim, *YAM* é caracterizado pelo menor custo de investimento, podendo ser usado somente em sistemas com rede elétrica; *WM* pode servir para dimensionar uma aplicação no modo autônomo.

Uma revisão sobre modelagem, dimensionamento, técnicas de otimização, índices de confiabilidade e análise de custos para HRES é apresentada em [4]. Na modelagem de um SHFVEOL é necessário inicialmente desenvolver os modelos matemáticos de cada componente; posteriormente, esses modelos são otimizados por diferentes métodos para minimizar o custo total. Os autores destacam que as condições ambientais são fundamentais para determinação do nível de potência solar e eólico de um local. Para as baterias, alguns artigos utilizam parâmetros químicos, outros elétricos. O programa mais amplamente utilizado para dimensionamento e otimização de SHFVEOL autônomos é o HOMER. Os principais índices de confiabilidade utilizados são LPSP, UL, LLP, DPSP e LOEE. O índice mais utilizado é o LPSP,

amplamente empregado onde a probabilidade de fornecimento inadequado de energia para a demanda de uma carga é considerada para o planejamento e projeto do HRES. A função custo total consiste em custos de instalação, operação e manutenção anuais. Os índices de custos mais utilizados são NPC, ACS, COE e LCE. Segundo os autores, o índice para análise de custos mais utilizado é o NPC, que demonstra a relação entre o custo agregado anual do sistema e a energia anual produzida, representando uma estimativa completa do custo, com o custo inicial, a despesa de substituição e o custo de manutenção. As técnicas de otimização podem ser classificadas em clássicas e modernas; entre as clássicas, as mais conhecidas são: abordagem iterativa, abordagem probabilística e programação linear; já as modernas mais conhecidas são GA, PSO, SA e algoritmos de colônia de formigas (*ACA - ant colony algorithm*). Como conclusão, os autores citam tendências para estudos de otimização: escolha dos recursos energéticos alternativos, introdução de novos métodos para geração e análise de vários métodos de otimização. Além disso, a maior parte dos autores tem recomendado a hibridação de mais de dois algoritmos para aumentar a precisão de um determinado algoritmo ou técnica.

Em [13] os autores desenvolvem um sistema de gerenciamento de energia para um SHFVEOL (aerogerador de 1,5 kW, planta FV de 1,62 kWp) com diferentes opções de armazenamento de energia (banco de baterias e hidrogênio: CaC, tanque de hidrogênio e eletrolisador) que permitem operação em modo autônomo. O gerenciamento proposto considera modelos de degradação dos componentes ao longo da vida útil, função do número de horas de operação e do perfil da potência. O HRES pode trabalhar em dois modos: 1) modo de carga, quando a energia gerada pelas fontes renováveis é maior que a demanda da carga e o excesso é armazenado; e 2) modo de descarga, quando a energia gerada pelas fontes renováveis não é suficiente para atender a demanda, levando à necessidade de descarregar. O dimensionamento das fontes de energia se baseia na premissa de que o sistema de hidrogênio deve ser capaz de suprir a potência demandada pela carga por um período de um ano. O sistema de gerenciamento desenvolvido é baseado em um problema de minimização cujo vetor de variáveis representa a potência de cada fonte (a ser determinado pela solução do problema), o vetor de coeficientes representa seu custo de geração (que leva em conta o número de substituições desses componentes devido a sua operação e o custo das substituições movido para o ano em que isto ocorre) e as restrições dependem das limitações de energia das diferentes fontes. As restrições de limitação de energia são fixadas pela potência máxima que os diferentes componentes podem fornecer ou absorver. Os resultados mostram a melhora desse gerenciamento contra os métodos convencionais mais utilizados, suportados por diferentes parâmetros observados durante a operação: o custo médio por unidade de energia é minimizado durante a operação do sistema de gerenciamento, proporcionando resultados positivos significativos de eficiência média. Especificamente para a abordagem apresentada, os resultados estão sujeitos à precisão dos modelos de degradação ao longo da vida, uma vez que o gerenciamento é altamente dependente deles.

Em [14] os autores apresentam o projeto e simulação de um HRES FV com CaC aplicado a uma planta de dessalinização por OR. Os módulos FV fornecem eletricidade à carga e o excesso de energia produz hidrogênio por meio de um eletrolisador; este hidrogênio é usado pelas unidades de CaC para produzir energia elétrica na ausência de energia solar. O objetivo é estimar o custo de cada configuração, o custo da eletricidade gerada e estimar a vida útil de tais instalações. As etapas do estudo são um dimensionamento de cada componente, simulações que permitem observar as transferências de energia e otimização do dimensionamento.

O objetivo de [15] não é apenas suprir a energia demandada com fontes renováveis, mas também garantir a autossuficiência em termos de atendimento às demandas de água de uma população, com uso de uma planta de OR. Assim, a inovação do SHFVEOL proposto está no uso de água e hidrogênio como sistemas de armazenamento de energia. A meta é garantir o suprimento dos 672.314 kWh/ano consumidos pelos 219 habitantes da área em estudo, bem como atender a demanda de água de 15.987 m<sup>3</sup>/ano. Durante os períodos de alta demanda de eletricidade, a energia produzida é alimentada em uma rede autônoma para suprir as necessidades de energia da população; durante períodos de baixa demanda, o SHFVEOL usa a energia excedente para produzir hidrogênio por meio de eletrolisador; o hidrogênio é armazenado e as CaC são usadas para produzir energia elétrica quando as condições de vento e solar são insuficientes para atender diretamente a demanda de energia da população. O programa HOMER avalia diferentes opções de energia simulando hora a hora fluxos de energia e faz cálculos de balanço de energia para cada uma das 8760 horas do ano. Após simular as configurações do SHFVEOL, o programa exibe uma lista de sistemas viáveis classificados de acordo com o NPC. Então, com base nos resultados, é possível escolher entre os sistemas viáveis os menos onerosos. Os resultados obtidos a partir dos estudos de simulação e otimização demonstram a viabilidade do sistema, tanto de forma financeira quanto técnica: uma produção anual de energia de 1.743.031 kWh/ano e um volume de água potável de 46.546 m<sup>3</sup>/ano a partir da planta de OR. Além disso, o custo da eletricidade é de 0,107 €/kWh, enquanto que a geração utilizando combustíveis fósseis eleva-se a 0,18 €/kWh.

Uma metodologia para dimensionamento de um SHFVEOL que pode ser aplicada a diferentes configurações e expandida para incluir outras fontes renováveis é apresentada em [16]. Para simular o comportamento do HRES é utilizado o programa TRNSYS. A metodologia inicia com a criação do perfil de carga da comunidade suprida; em seguida, baseado em dados meteorológicos, é verificado se o local é viável para a alocação do HRES. O período usado para dimensionar o sistema de geração é encontrado através da comparação da curva de carga anual e carga média anual; no caso, o período escolhido em que as curvas possuem valores próximos é de 15 de setembro a 15 de outubro. A meta de geração é definida como a meta de geração do mês considerando as perdas. Quatro modelos são listados para os aerogeradores (de 225 kW a 900 kW) e cinco modelos de painéis FV (de 100 kW a 400 kW). Para o estudo de

caso, aproximadamente metade dos valores de velocidade do vento está abaixo da velocidade de entrada e poucas medições atingem a velocidade referente à potência nominal. Dois métodos diferentes são usados para determinar a potência média, o método da velocidade média e o método da potência direta, e em seguida, calcular a quantidade de aerogeradores. A configuração final do sistema FV é calculada usando o fator de geração do módulo, que representa o potencial de geração levando em consideração a influência da temperatura, ângulo de inclinação, sujeira e tempo de uso do sistema. A capacidade e configuração do armazenamento são calculadas de forma que a menor porcentagem de carga do sistema de armazenamento seja de 50%. A partir dos resultados, o método da potência direta dimensiona os aerogeradores com mais precisão do que o método da velocidade média. O fator de geração do painel encontrado é de 5,3, confirmando que a localidade tem um alto potencial solar. Mediante observação das simulações, verifica-se que a metodologia proposta apresenta bons resultados, suprimindo a carga durante a maior parte do dia. Por mais que a geração total possa ser próxima de zero em certas partes da noite, a carga armazenada durante o período com excesso de geração consegue suprir a demanda por um determinado tempo.

Na Coreia existe um modelo típico de planta para edificações escolares. Devido à criação de uma regulação nacional que obriga a utilização de energias renováveis em prédios públicos, em que mais de 5% dos gastos na construção das edificações deve ser investido nesta geração, a determinação de um modelo de otimização é importante, considerando o alto investimento. Estes estudos de otimização se ampliaram para HRES, combinando coletores solares, bombas de calor geotérmicas e plantas FV com a geração convencional. Na metodologia proposta por [17] para simplificar o dimensionamento de HRES são considerados o perfil de consumo das escolas com variações de acordo com o número de salas de aula e de alunos, o preço da energia elétrica e a tipologia das construções. As cargas das escolas são simplificadas de acordo com o número de salas de aula através de inúmeras simulações que usam valores estatísticos obtidos nacionalmente, sendo isto possível devido às mudanças climáticas na Coreia não serem muito significativas em diferentes regiões e as edificações terem a mesma tipologia. A otimização inicial para dimensionamento do HRES usa como critério a demanda e oferta de energia com base no número de salas de aulas e o orçamento disponível, sendo necessários vários cálculos iterativos para se chegar ao dimensionamento ótimo. A simplificação do método de otimização do HRES proposta vem através do uso de regressão linear, em que as equações que dimensionam são funções apenas do número de salas de aulas da edificação, sendo os custos dos sistemas calculados apenas após o dimensionamento, não sendo uma preocupação inicial.

Pequenas ilhas usam geradores a diesel como principal fonte de energia elétrica, com dois grandes problemas: aumento do preço dos combustíveis fósseis a longo prazo e alta emissão dos gases do efeito estufa. Com o uso de energias renováveis, estes problemas podem ser minimizados, tendo as pequenas ilhas boas condições para o uso da tecnologia

FV e aerogeradores, além de se ter viabilidade política e técnica para HRES. Em [18] os autores desenvolvem uma metodologia para a viabilização técnica e financeira de um SHFVEOL com baterias para 1.785 pequenas ilhas pelo mundo, caracterizadas por terem entre 1.000 e 100.000 habitantes. O programa Matlab é usado para calcular o menor custo do HRES para cada ilha, sendo este modelo validado por comparação com o HOMER. A primeira etapa é o uso de um sistema de informação geográfica para identificação do tamanho, população, localização e país pertencente de cada pequena ilha. A segunda etapa cria um perfil de carga para cada pequena ilha, sendo os três principais fatores para este perfil o consumo anual de energia, baseado no produto interno bruto (PIB), variações sazonais, que podem afetar a carga devido ao uso de aquecedores ou refrigeradores de ar e, por fim, variações horárias, que servem para uma curva de carga mais realística. A terceira etapa analisa a produção de eletricidade para cada pequena ilha, sendo os dados de irradiação horizontal e velocidade do vento a 50 m conseguidos com o banco de dados da NASA. A transformação dos dados de irradiação em geração FV é baseada em um modelo de painel FV de silício cristalino com degradação de 0,3% ao ano. Para os aerogeradores é escolhida uma turbina modelo V52, com altura de 65 m e potência de 850 kW, sendo a velocidade do vento transformada em valores de geração de eletricidade através da aplicação da curva de potência. As baterias para o sistema de armazenamento são de íons de lítio, com descarga máxima de 80%. A etapa final analisa o preço médio do diesel em cada ilha nos próximos 20 anos, ressaltando que é considerado que as plantas a diesel já existem nas ilhas como principal fonte de energia elétrica.

Em [19] analisou-se o impacto causado do ponto de vista energético e financeiro pelos sistemas de baterias para armazenamento quando estes estão integrados à operação das micro-redes com a presença de plantas renováveis.

Em [20] foi proposto um modelo de minimização do custo anualizado dos sistemas híbridos eólico, FV e CaC com base na confiabilidade da demanda ao longo de 20 anos de operação, sendo constatado que a confiabilidade dos inversores é a mais importante.

Com o intuito de otimizar a potência total demandada no ponto de acoplamento comum em micro redes que incluem fontes de energia renováveis, [21] propõe uma solução baseada no fluxo de potência ideal que considera todo o sistema levando em conta os limites dos dispositivos de armazenamento, limites de tensão, corrente e energia.

Em [22] analisou-se o avanço tecnológico recente em relação às micro-redes e seus componentes, visando uma inevitável mudança na indústria de energia elétrica, sendo que o aumento do custo de energia, a eletrificação em grande escala e as mudanças climáticas são os principais fatores que irão determinar a velocidade em que tais transformações ocorrerão.

Em [23] foi proposto um algoritmo de otimização meta-heurístico de NWCMO para alcançar um compromisso entre objetivos técnicos, financeiros, ambientais e sociopolíticos conflitantes, a fim de simular e otimizar um sistema de energia renovável.

Em [24] são determinados a capacidade e o projeto ideal

com fontes renováveis híbridas, eólica e solar FV, em uma micro-rede inteligente para aumentar a disponibilidade e reduzir os custos da rede. Para demonstrar a possibilidade da abordagem proposta, um método otimizado é projetado, implementado e aplicado sobre um caso de estudo real.

Em [25] é apresentado um algoritmo PSO modificado e adaptativo AMPPO, para gerenciar e controlar o funcionamento de uma micro geração híbrida eólica, CaC com baterias, a fim de otimizar o sistema de geração e consumo.

Em [26] foi desenvolvido um GA para determinar a configuração ideal de um sistema híbrido (FV/eólico/bateria/OR). A ferramenta integra todos os parâmetros envolvidos e compara os possíveis cenários. O GA tem como função objetivo todos os custos ao longo da vida útil do sistema, utilizando taxas de juros efetivas com procedimentos financeiros padrões. Para validação do modelo foram realizadas simulações em um sistema real, localizado na aldeia de Ksar Ghilène, na Tunísia.

Em [27] são projetados e modelados através do PSO, seis cenários diferentes. Dos resultados, vê-se que o armazenamento de energia por baterias é mais econômico do que o armazenamento de energia baseado no hidrogênio. A combinação entre bateria, energia solar e OR configura o sistema de energia de mais baixo custo.

Em [28] são usados dezenove algoritmos evolutivos, incluindo algoritmos de otimização simples e híbridos, para determinar o dimensionamento ideal de um HRES que é composto por uma turbina eólica, um módulo FV, um banco de baterias e uma unidade de dessalinização por OR. Os resultados mostram que as técnicas de otimização híbrida fornecem o melhor desempenho entre os algoritmos evolutivos considerados e que o uso do HRES reduz os custos e aumenta a confiabilidade do sistema em geral e a disponibilidade de água potável.

Em [29] foi proposto um controle hierárquico em três níveis, compreendendo controle de microfuentes, controlador central instalado nas subestações secundárias e um controlador alojado na central autônoma. É utilizada uma análise multicritério para a tomada de decisão, levando em conta principalmente análises financeiras, técnicas e ambientais do sistema.

Em [30] é proposto um modelo de micro-rede híbrida conectada à rede com capacidade de planejar a geração de energia e operar de forma paralela independente ou alimentando a rede pública de distribuição. O modelo consiste em algoritmos evolutivos baseados em população. O foco é o armazenamento de energia, sendo comparados tipos diferentes de baterias para obter o menor custo aliado ao menor impacto ambiental. Para uma avaliação mais real, foram utilizados cenários urbanos e os dados como irradiação e velocidade do vento.

A proposta de [31] envolve utilizar evolução diferencial e lógica Fuzzy para encontrar o gerenciamento de energia ótimo de sistemas autônomos, contendo vários tipos de geradores e dispositivos de armazenamento, combinado com o dimensionamento ideal dos componentes do sistema. O objetivo do problema é a minimização simultânea do custo total do sistema, da carga não atendida e da emissão de



combustível, considerando as incertezas associadas às fontes de energia renovável. Essas incertezas são aplicadas através da geração de cenários baseados nas funções de distribuição Weibull e Beta para velocidade do vento e irradiação solar, respectivamente.

Em [32] é utilizado um método para minimizar três objetivos: probabilidade de perda de carga, emissão de CO<sub>2</sub> e o custo total do sistema. A abordagem proposta utilizou o método PSO para resolver o problema de otimização multiobjetivo e foi avaliada em um estudo de caso incluindo turbina eólica, painéis FV, gerador a diesel, CaC, eletrolisador, baterias e tanque de hidrogênio.

Em [33] é realizado um sumário do uso de fontes para HRES e o estudo co-relativo de técnicas de otimização. A otimização é alcançada por diferentes técnicas que estão em uso, como: Construção Gráfica, Abordagem Probabilística, Abordagem Determinística, Abordagem Iterativa, Escalada, Programação Dinâmica, Programação Linear e Inteligência Artificial, dentre eles: GA, PSO, Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais.

No trabalho de [34] é proposto uma análise de projeto e viabilidade financeira de um sistema autônomo rural híbrido de energia para Bangladesh. O sistema híbrido proposto consiste de uma planta FV, biogás, Geradores a diesel e baterias. É dada ênfase na confiabilidade do sistema híbrido autônomo, através da otimização do dimensionamento dos componentes e a melhoria do custo de capital.

### III. CONCLUSÃO

Entre as diferentes configurações, o HRES mais utilizado foi o eólico-solar, devido aspectos tais como a necessidade de descentralização e diversificação da geração de eletricidade, tornando o sistema de geração mais confiável ao diminuir a dependência de um tipo de fonte da matriz de energia elétrica, principalmente em países com uma grande parcela desta matriz dependente de um tipo de fonte de energia. Este é o caso do Brasil, que tem a geração hidroelétrica predominante, ou da matriz de eletricidade mundial, que tem predominância da geração termelétrica.

Outros fatores que mostram as vantagens dos SHFVEOL são o custo decrescente das tecnologias, o que pode ser explicado pela economia de escala, uso de recurso renovável e abundante, o atendimento a parâmetros de sustentabilidade, tal como baixas emissões de CO<sub>2</sub> e atendimento de comunidades não abastecidas pela rede elétrica.

Com relação ao dimensionamento, HOMER é o *software* mais utilizado devido a sua interface amigável e de fácil utilização, além de possuir uma gama máxima de combinações de sistemas renováveis aliada a uma análise de otimização e sensibilidade.

Quanto à otimização, a metaheurística mais utilizada para dimensionamento de HRES é a PSO, que é de fácil implementação e possui rapidez de convergência.

No aspecto financeiro, a análise está ligada à combinação de componentes dos HRES que possuem o melhor nível de confiabilidade na geração de energia elétrica e o melhor retorno do investimento, que, normalmente, é feito com base em um tempo pré-definido.

No tocante aos sistemas com armazenamento de energia, baterias eletroquímicas são bastante utilizadas, sendo dimensionadas, heurísticamente, para que a menor porcentagem de carga do sistema de armazenamento seja em torno de 40%, a fim de se aumentar a vida útil das baterias. Os sistemas sem armazenamento de energia são empregados conectados à rede de energia elétrica.

Quanto às aplicações, são encontrados sistemas conectados à rede elétrica, com um sistema de compensação em parceria com a concessionária de distribuição de energia elétrica local, e sistemas autônomos, que visam gerar energia elétrica para comunidades isoladas e de difícil acesso às redes de distribuição e transmissão de energia elétrica.

Dentre os 29 artigos analisados sobre SHFVEOL, a análise gráfica é apresentada na Fig. 2:

- 14% dos artigos são no formato de *review* tendo como assuntos: 2 sobre algoritmos de otimização e 2 sobre programas de dimensionamento;
- 3% dos artigos utilizam programação linear;
- 38% dos artigos utilizam algoritmos inteligentes, como metaheurística;
- 24% dos artigos utilizam programas computacionais para o dimensionamento (HOMER, TRNSYS, IHOGA, MATLAB);
- 21% dos artigos utilizam algoritmos simples baseados em equações convencionais para a modelagem de geração de energia.

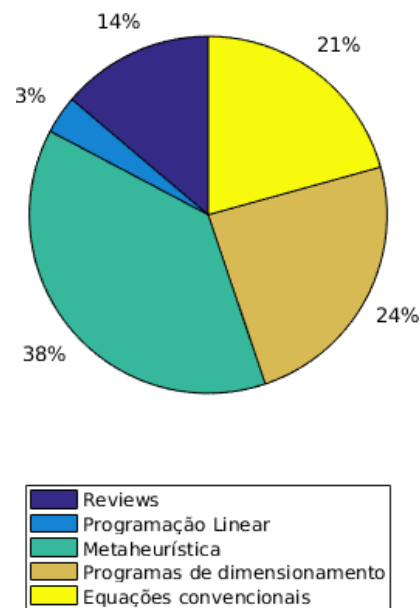


Fig. 2. Tipos dos artigos desenvolvidos.

Com relação ao armazenamento de energia (descartando os 4 *reviews*) 36% dos artigos não usaram nenhum tipo, e os 64% restantes utilizaram as seguintes categorias, a análise gráfica é apresentada na Fig. 3:

- 28% com baterias;
- 8% com hidrogênio (CaC, tanque de hidrogênio e eletrolisador);
- 28% com ambas as tecnologias mencionadas.



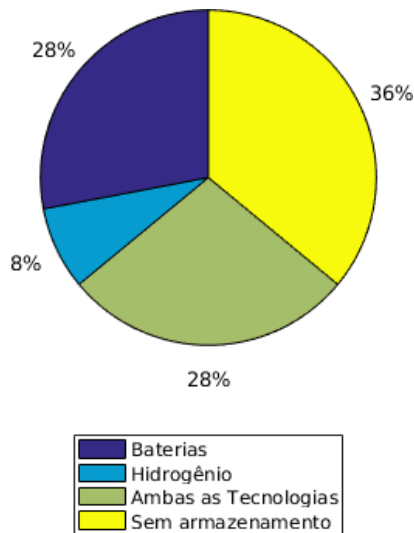


Fig. 3. Artigos separados por armazenamento.

Quanto à finalidade do SHFVEOL, a análise gráfica é apresentada na Fig. 4:

- 36% dos artigos abastecem sistemas de OR;
- 28% abastecem cargas residenciais;
- 8% atendem a demanda de áreas rurais afastadas;
- 24% atendem micro-redes
- 4% atendem ao carregamento de carros elétricos.

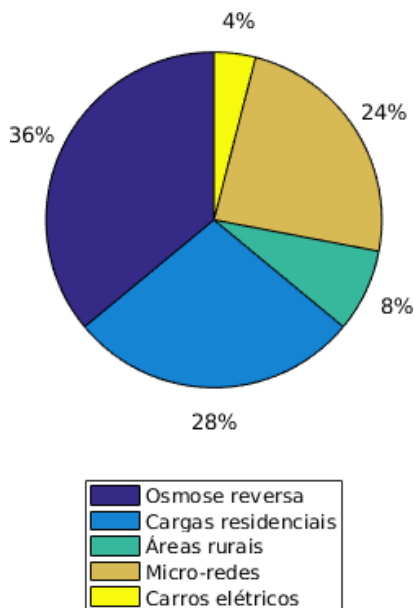


Fig. 4. Artigos separados pela finalidade.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, pelos conhecimentos e competências que facilitaram a pesquisa. A CAPES/FUNCAP pelas bolsas de estudos do primeiro, quarto, nono, décimo e décimo primeiro autor. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa 2 para o terceiro autor.

#### REFERÊNCIAS

- [1] IPCC, *Global Warming of 1,5 °C*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland, 2018.
- [2] J. P. Reges, F. D. L. Moreira, L. D. S. Bezerra, A. R. de Alexandria, and P. P. Rebouças Filho, "Thermographic image processing application in solar followers," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 10, pp. 3350–3358, 2015.
- [3] C. G. Marcelino, M. Baumann, P. E. M. de Almeida, E. F. Wanner, and M. Weil, "A new model for optimization of hybrid microgrids using evolutionary algorithms," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 3, pp. 799–805, 2018.
- [4] F. A. Khan, N. Pal, and S. H. Saeed, "Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, no. 1, pp. 937–947, 2018.
- [5] V. Behraves, A. A. Foroud, and R. Keypour, "Optimal sizing methodology for photovoltaic and wind hybrid rooftop generation systems in residential low voltage distribution networks," *Solar Energy*, vol. 173, no. 1, pp. 17–33, 2018.
- [6] C. E. C. Nogueira, M. L. Vidotto, R. K. Niedzialkoski, S. N. M. de Souza, L. I. Chaves, T. Edwiges, D. B. dos Santos, and I. Werncke, "Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, no. 1, pp. 151–157, 2014.
- [7] S. Sinha and S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, no. 1, pp. 192–205, 2014.
- [8] N. Brahma and M. Chaabene, "Sizing optimization tool for wind/photovoltaic/battery plant considering potentials assessment and load profile," in *Renewable Energy Congress (IREC), 2015 6th International*. IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [9] H. Cherif and J. Belhadj, "Large-scale time evaluation for energy estimation of stand-alone hybrid photovoltaic-wind system feeding a reverse osmosis desalination unit," *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6058–6067, 2011.
- [10] V. O. Okinda and N. A. Odero, "A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 11, pp. 153–163, 2015.
- [11] J. B. Fulzele and M. B. Daigavane, "Design and optimization of hybrid pv-wind renewable energy system," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, pp. 810–818, 2018.
- [12] K. Anoune, A. Laknizi, M. Bouya, A. Astito, and A. B. Abdellah, "Sizing a pv-wind based hybrid system using deterministic approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 169, no. 1, pp. 137–148, 2018.
- [13] J. P. Torreglosa, P. García-Triviño, L. M. Fernández-Ramirez, and F. Jurado, "Control based on techno-economic optimization of renewable hybrid energy system for stand-alone applications," *Expert Systems with Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 59–75, 2016.
- [14] S. Touati, A. Belkaid, R. Benabid, K. Halbaoui, and M. Chelali, "Pre-feasibility design and simulation of hybrid pv/fuel cell energy system for application to desalination plants loads," *Procedia engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 366–376, 2012.
- [15] I. Prieto-Prado, B. Del Río-Gamero, A. Gómez-Gotor, and S. Pérez-Báez, "Water and energy self-supply in isolated areas through renewable energies using hydrogen and water as a double storage system," *Desalination*, vol. 430, pp. 1–14, 2018.
- [16] J. Swartz, A. Ghofrani, and M. Jafari, "Sizing methodology for combined renewable energy systems," in *Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017 IEEE*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [17] J. Kim and E.-J. Kim, "Simplified method of optimal sizing of a renewable energy hybrid system for schools," *Sustainability*, vol. 8, no. 11, p. 1134, 2016.
- [18] P. Blechinger, C. Cader, P. Bertheau, H. Huyskens, R. Seguin, and C. Breyer, "Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands," *Energy Policy*, vol. 98, no. 1, pp. 674–687, 2016.
- [19] L. Barelli, G. Bidini, and F. Bonucci, "A micro-grid operation analysis for cost-effective battery energy storage and res plants integration," *Energy*, vol. 113, pp. 831–844, 2016.
- [20] A. K. Kaviani, G. Riahy, and S. M. Kouhsari, "Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/pv generating system, considering component outages," *Renewable energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2380–2390, 2009.

[21] Y. Levron, J. M. Guerrero, and Y. Beck, "Optimal power flow in microgrids with energy storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3226–3234, 2013.

[22] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE power and energy magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010.

[23] E. Eriksson and E. M. Gray, "Optimization of renewable hybrid energy systems—a multi-objective approach," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 971–999, 2019.

[24] M. Ghiasi, "Detailed study, multi-objective optimization, and design of an ac-dc smart microgrid with hybrid renewable energy resources," *Energy*, vol. 169, pp. 496–507, 2019.

[25] A. A. Moghaddam, A. Seifi, T. Niknam, and M. R. A. Pahlavani, "Multi-objective operation management of a renewable mg (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6490–6507, 2011.

[26] K. Bourouni, T. B. M'Barek, and A. Al Taei, "Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms," *Renewable energy*, vol. 36, no. 3, pp. 936–950, 2011.

[27] A. Maleki, "Design and optimization of autonomous solar-wind-reverse osmosis desalination systems coupling battery and hydrogen energy storage by an improved bee algorithm," *Desalination*, vol. 435, pp. 221–234, 2018.

[28] W. Peng, A. Maleki, M. A. Rosen, and P. Azarikhah, "Optimization of a hybrid system for solar-wind-based water desalination by reverse osmosis: Comparison of approaches," *Desalination*, vol. 442, pp. 16–31, 2018.

[29] J. Vasiljevska, J. P. Lopes, and M. Matos, "Evaluating the impacts of the multi-microgrid concept using multicriteria decision aid," *Electric Power Systems Research*, vol. 91, pp. 44–51, 2012.

[30] C. G. Marcelino, C. E. Pedreira, M. Baumann, M. Weil, P. E. M. Almeida, and F. Wanner, E, "A viability study of renewables and energy storage systems using multicriteria decision making and an evolutionary approach," in *Lecture Notes in Computer Science*, 1st ed. Springer International Publishing, 2019, pp. 655–668.

[31] S. Abedi, A. Alimardani, G. Gharehpetian, G. Riahy, and S. Hosseinian, "A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid res-based autonomous energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1577–1587, 2012.

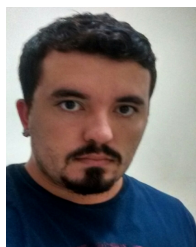
[32] M. Sharafi and T. Y. ELMekkawy, "Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using pso-simulation based approach," *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 67–79, 2014.

[33] M. Pranav, K. Karunanithi, M. Akhil, S. S. Vanan, V. Afsal, and A. Krishnan, "Hybrid renewable energy sources (hres)—a review," in *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*. IEEE, 2017, pp. 162–165.

[34] H. R. Leon, M. A. Shoeb, M. S. Rahman, M. U. Ahmed, and M. S. Islam, "Design and economic feasibility analysis of autonomous hybrid energy system for rural bangladesh," in *2016 4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.



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



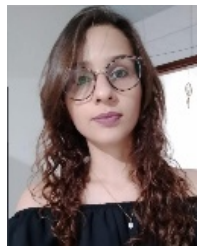
**Jonas Platini Reges** possui Graduação em Mecatrônica Industrial pelo IFCE (2014), Especialização em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Automação pela Universidade Cândido Mendes (2017), Mestrado em Energias Renováveis pelo IFCE (2017), Doutorando em Engenharia Elétrica pela UFC.



**Douglas Aurélio Carvalho Costa** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFC (2011) e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFC (2018). Professor adjunto do Centro Universitário 7 de Setembro. Suas pesquisas se concentram na área energias renováveis, geração distribuída e sistemas de potência.



**Robson da Silva Dias** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFC (2010). Mestrando em Engenharia Elétrica na UFC na área de energias renováveis e desempenha a função de Analista de Regulação da Enel, antiga COELCE (Companhia Energética do Ceará).



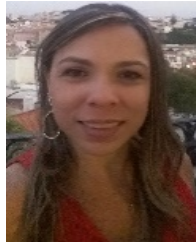
**Danielly Norberto Araújo** possui graduação em Engenharia Elétrica (2017), com ênfase em eletrotécnica, pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Mestranda em Engenharia Elétrica na UFC, na área de sistemas elétricos de potência. Seus interesses são: geração distribuída, geração solar fotovoltaica e sistemas de armazenamento de energia.



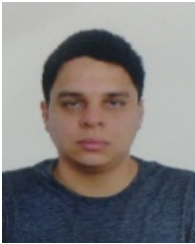
**Deivid Matias De Freitas** possui graduação de Tecnólogo em Mecatrônica pelo IFCE (2010). Servidor técnico administrativo e mestrando em engenharia elétrica pela UFC, atuando na área de Energias Alternativas.



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



**Siomara Peixoto Lima** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFC (2003), Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFC (2006). Doutoranda em Engenharia Elétrica na UFC e trabalha como Engenheira Eletricista no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.



**Kaio Martins Ramos** possui graduação em Engenharia de Energias pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) (2017). Mestrando em Engenharia Elétrica pela UFC atuando nas áreas de inteligência computacional, automação e controle.



**Shakil Bonnet Jossib Ribeiro** possui graduação em Engenharia de Energias pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) (2018). Mestrando em Engenharia Elétrica na UFC.



**Fellipe Souto Soares** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFCG (2016) e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFC (2018). Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFC. Suas pesquisas se concentram na área de métodos computacionais aplicados a sistemas de potência.