

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS HOLZBACH

**APLICAÇÃO DAS META-HEURÍSTICAS ALGORITMO GENÉTICO E BUSCA EM
VIZINHANÇA VARIÁVEL NO DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE UM SISTEMA DE
BACKUP HÍBRIDO PARA SERVIÇOS AUXILIARES EM SUBESTAÇÕES**



Ilha Solteira - SP
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS HOLZBACH

**APLICAÇÃO DAS META-HEURÍSTICAS ALGORITMO GENÉTICO E BUSCA EM
VIZINHANÇA VARIÁVEL NO DIMENSIONAMENTO ÓTIMO DE UM SISTEMA DE
BACKUP HÍBRIDO PARA SERVIÇOS AUXILIARES EM SUBESTAÇÕES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

H762a Holzbach, Matheus.
Aplicação das meta-heurísticas algoritmo genético e busca em vizinhança variável no dimensionamento ótimo de um sistema de backup híbrido para manutenção dos serviços auxiliares em subestações / Matheus Holzbach. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
74 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2025

Orientador: John Fredy Franco Baquero

Inclui bibliografia

1. Algoritmo genético. 2. Busca em vizinhança variável. 3. Dimensionamento ótimo. 4. Microrredes. 5. Serviços auxiliares. 6. Subestações.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa, focada em otimizar o dimensionamento de sistemas híbridos renováveis como uma opção de *backup* para subestações, alinha-se diretamente com os seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas: 7 – Energia Limpa e Acessível, 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura e 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima. Ao desenvolver algoritmos para dimensionamento otimizado, busca-se garantir acesso à energia confiável, impulsionar a inovação tecnológica no setor energético e mitigar as mudanças climáticas através da priorização de fontes renováveis. Espera-se que a pesquisa gere impactos sociais, econômicos, científicos e tecnológicos significativos, contribuindo para um futuro mais sustentável e resiliente.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research, focused on optimizing the sizing of renewable hybrid systems as a backup option for substations, is directly aligned with the following United Nations Sustainable Development Goals: 7 - Clean and Affordable Energy, 9 - Industry, Innovation and Infrastructure and 13 - Action Against Global Climate Change. By developing algorithms for optimized sizing, the aim is to guarantee access to reliable energy, promote technological innovation in the energy sector and mitigate climate change by prioritizing renewable sources. The research is expected to generate significant social, economic, scientific and technological impacts, contributing to a more sustainable and resilient future.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aplicação das meta-heurísticas Algoritmo Genético e Busca em Vizinhança Variável no dimensionamento de um sistema de backup híbrido para manutenção dos serviços auxiliares em subestações


AUTOR: MATHEUS HOLZBACH

ORIENTADOR: JOHN FREDY FRANCO BAQUERO


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOHN FREDY FRANCO BAQUERO**
Data: 11/03/2025 06:45:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOHN FREDY FRANCO BAQUERO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Eletrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo**
Data: 11/03/2025 11:04:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Energia / Faculdade de Engenharia e Ciencias - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDA CASENO TRINDADE ARIOLI**
Data: 11/03/2025 09:22:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. FERNANDA CASEÑO TRINDADE ARIOLI (Participação Virtual)
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ilha Solteira, 07 de março de 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema e amor incondicional, pela dádiva da vida, sabedoria e perseverança essenciais para esta jornada.

À minha família, e em especial aos meus pais Waldir e Joice, por todo o amor, ensinamentos, apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor John Fredy Franco, pela atenção e direcionamentos, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica, tendo iniciado a supervisão antes mesmo de eu entrar no programa de pós-graduação.

À professora Mariana Resener pela orientação durante meu estágio de pesquisa no exterior na Simon Fraser University (SFU) e pelas suas valiosas contribuições nesta pesquisa, bem como pela parceria e colaboração na publicação de trabalhos acadêmicos.

Aos professores Javier Contreras e Gregorio Muñoz-Delgado pela orientação durante meu estágio no exterior na Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), pela oportunidade de vivenciar uma nova experiência e pelo conhecimento compartilhado.

Aos professores do PPGE da FEIS que fizeram parte da minha jornada acadêmica, em especial aos professores Rubén Romero, Leonardo Possagnolo e Lucas Teles que me proporcionaram estimadas sugestões.

Aos meus colegas do LaPSEE da UNESP, do PES da SFU e do PEARL da UCLM, pela colaboração, amizade e momentos de descontração. Agradeço, em especial, a Enielma, Noberto e Dayara por sua presença e apoio desde o princípio e constante ao longo de todo este período.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através do apoio financeiro, concedido por meio dos Processos nº 2022/04826-0 e 2024/02027-8.

RESUMO

Os serviços auxiliares em subestações são compostos por sistemas fundamentais para a operação, segurança e coordenação do sistema elétrico. Em casos de contingência na alimentação principal, requerem a manutenção de suas cargas para garantir o processo de recomposição, motivo pelo qual são usados sistemas de *backup*, compostos por fontes de alimentação alternativas que, por muitas vezes, utilizam grupo gerador suprido por combustíveis fósseis. Outra opção de *backup* é a adoção de um sistema híbrido renovável, com fontes renováveis e baterias, que tornam o sistema mais sustentável. No entanto, essa opção requer uma análise criteriosa para sua implantação devido ao seu custo e à intermitência das fontes renováveis. Neste sentido, são propostos dois algoritmos para o dimensionamento de um sistema híbrido de *backup*, baseados nas meta-heurísticas Algoritmo Genético (GA) e Busca em Vizinhança Variável (VNS) que consideram as incertezas quanto à intermitência das fontes geradoras e a duração das faltas de energia por meio de simulações de Monte Carlo. O desempenho dos algoritmos desenvolvidos foi analisado através de sua aplicação no dimensionamento de duas configurações do sistema de *backup* híbrido, uma considerando apenas geração fotovoltaica e baterias e outra agregando a geração eólica. Os algoritmos GA e VNS demonstraram grande potencial para a resolução do problema de dimensionamento, alcançando soluções equivalentes às apresentadas na literatura. A validação dos algoritmos GA e VNS, por meio da comparação com o método de busca exaustiva, confirmou sua capacidade de encontrar o ótimo global ou soluções de alta qualidade para o problema de dimensionamento, com a vantagem de convergirem em segundos e um tempo de processamento significativamente menor em relação aos métodos utilizados na literatura. Através de uma comparação estatística entre os algoritmos GA e VNS, utilizando o teste de postos sinalizados de Wilcoxon a um nível de significância de 5%, confirmou a divergência significativa na qualidade das soluções finais, com o VNS apresentando consistentemente soluções de melhor qualidade em múltiplas execuções.

Palavras-chave: algoritmo genético; busca em vizinhança variável; dimensionamento ótimo; microrredes; serviços auxiliares; subestações.

ABSTRACT

Auxiliary services in substations comprise fundamental systems for the operation, security, and coordination of the electrical grid. In cases of main power supply contingencies, they require the maintenance of their loads to ensure the restoration process, for which backup systems are used, composed of alternative power sources that often utilize fossil fuel-powered generators. Another backup option is the adoption of a renewable hybrid system, with renewable sources and batteries, which makes the system more sustainable. However, this option requires careful analysis for its implementation due to its cost and the intermittency of renewable sources. In this context, two algorithms for the sizing of a hybrid backup system are proposed, based on the metaheuristics Genetic Algorithm (GA) and Variable Neighborhood Search (VNS), which consider uncertainties regarding the intermittency of generating sources and the duration of power outages through Monte Carlo simulations. The performance of the developed algorithms was analyzed through their application in the sizing of two configurations of the hybrid backup system, one considering only photovoltaic generation and batteries, and the other adding wind generation. The GA and VNS algorithms demonstrated great potential for solving the sizing problem, achieving solutions equivalent to those presented in the literature. The validation of the GA and VNS algorithms, through comparison with the exhaustive search method, confirmed their ability to find the global optimum or high-quality solutions for the sizing problem, with the advantage of converging in seconds and a significantly shorter processing time compared to the methods used in the literature. Through a statistical comparison between the GA and VNS algorithms, using the Wilcoxon signed-rank test at a significance level of 5%, a significant divergence in the quality of the final solutions was confirmed, with VNS consistently presenting better quality solutions across multiple executions.

Keywords: auxiliary services; genetic algorithm; microgrids; optimal sizing; substations; variable neighborhood search.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Prestação de serviços auxiliares na subestação durante uma situação de contingência (a) sem o SBH e (b) com o SBH.....	29
Figura 2 – Fluxos de potência no sistema de backup híbrido do ponto de vista do inversor bidirecional.....	34
Figura 3 – Tipos de carga e sua duração de contingência.....	36
Figura 4 – Relação entre o tempo de contingência e o tempo de autonomia do SBH.....	38
Figura 5 – Codificação de uma proposta de solução.	40
Figura 6 – Diagrama de fluxo para o algoritmo GA.	45
Figura 7 – Diagrama de fluxo para o algoritmo VNS.	48
Figura 8 – Desempenho dos algoritmos VNS e GA em relação: a função objetivo do VNS (a) e GA (b), o tempo de processamento do VNS (c) e do GA (d).....	55
Figura 9 – Efeito da quantidade de turbinas no custo total líquido do sistema através da busca exaustiva.	59
Figura 10 – Desempenho dos algoritmos VNS e GA em relação: a função objetivo do VNS (a) e GA (b), o tempo de processamento do VNS (c) e do GA (d).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas estimadas para os serviços auxiliares em subestações.	52
Tabela 2 – Cálculo de bases do fator de potência global.	52
Tabela 3 – Informações do painel fotovoltaico.	53
Tabela 4 – Dados para a turbina eólica e o inversor considerado no estudo.	54
Tabela 5 – Análise de dispersão para o primeiro caso de estudo.	57
Tabela 6 – Análise de dispersão para o segundo caso de estudo.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
GD	Gerador a diesel
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GVNS	<i>General Variable Neighborhood Search</i>
HOMER	<i>Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources</i>
NG	Número de Gerações
ONS	Operador Nacional do Sistema
PFs	Painéis Fotovoltaicos
RVNS	<i>Reduced Variable Neighborhood Search</i>
SBH	Sistema de <i>Backup</i> Híbrido
SHR	Sistema Híbrido Renovável
TEs	Turbinas Eólicas
TM	Taxa de Mutação
TP	Tamanho da População
TR	Taxa de Recombinação
TS	Taxa de Seleção
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Conjuntos

j	Contingências que afetam a alimentação principal dos serviços auxiliares
k	Meses do ano
s	Soluções factíveis para o dimensionamento do sistema híbrido

Parâmetros

α	Número não negativo utilizado no processo de agitação das estruturas RVNS
β	Número não negativo utilizado no processo de intensificação das estruturas VND
δ	Taxa de juros
η^{out}	Eficiência de carga e descarga da bateria
λ	Taxa de contingência média anual
ξ	Número de horas em um ano
π	Preço da energia vendida
ρ	Densidade do ar
τ	Vida útil dos equipamentos
A^r	Área de contato das pás do rotor
c^{bat}	Custo de aquisição de baterias
c^{DG}	Custo de operação horária do gerador a diesel
c^{in}	Custo de aquisição para o inversor bidirecional
c^{inv_wt}	Custo de aquisição para o inversor do sistema eólico
c^{pv}	Custo de aquisição de painéis fotovoltaicos
c^{wt}	Custo de aquisição de turbinas eólicas
Cp^{max}	Coefficiente de potência máxima da turbina
\underline{D}^{index}	Índice de disponibilidade mínima requerida
DoD	Profundidade de descarga da bateria
D^r	Diâmetro das pás do rotor
E^{sas}	Energia requerida pelos serviços auxiliares em subestações
f_i	Fator de carga individual
FC^g	Fator de carga global
G^{gh}	Índice de irradiação solar

I^{sc}	Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico
I^c	Corrente fornecida pela célula fotovoltaica
I^{MPPT}	Corrente no ponto de máxima potência
K^i	Coeficiente de temperatura para a corrente
K^v	Coeficiente de temperatura para a tensão
mc^{bat}	Custo de manutenção anual para as baterias
mc^{in}	Custo de manutenção anual para o inversor bidirecional
mc^{inv_wt}	Custo de manutenção anual o inversor do sistema eólico
mc^{pv}	Custo de manutenção anual para os painéis fotovoltaicos
mc^{wt}	Custo de manutenção anual para turbinas eólicas
N^{OT}	Temperatura nominal de funcionamento da célula
N^{SMC}	Número de simulações de Monte Carlo
NC^{bat}	Capacidade de energia nominal da bateria
P^{eq}	Potência equivalente para a carga dos serviços auxiliares
P^{nom}	Potência nominal para a carga dos serviços auxiliares
\bar{P}^{sas}	Potência média da carga dos serviços auxiliares
$\overline{P}^{sas\,max}$	Potência máxima demandada pela carga
P^{wt_nom}	Potência nominal da turbina eólica
t	Período analisado
t_{jk}^0	Tempo de início da contingência j no mês k
FF	Fator de forma
T^a	Temperatura ambiente
T^c	Temperatura na célula fotovoltaica
t_{jk}^{out}	Tempo de finalização da contingência j no mês k
\underline{V}	Velocidade de corte inferior da turbina
\overline{V}	Velocidade de corte superior da turbina
V^{MPPT}	Tensão no ponto de máxima potência
V^r	Velocidade nominal do vento

Variáveis

ω_s	Lucro obtido pela venda de energia excedente produzida pelos geradores renováveis
------------	---

D_s^{index}	Índice de disponibilidade para a configuração s do sistema híbrido
E^{bat}	Energia disponível nas baterias
E^{pv}	Energia instantânea gerada pelo sistema fotovoltaico
E^{wt}	Energia instantânea gerada pelo conjunto de turbinas eólicas
\bar{E}^{pv}	Energia gerada pelos painéis fotovoltaicos no período de um ano
\bar{E}^{wt}	Energia gerada pelas turbinas eólicas no período de um ano
E_{jk}^{pv}	Energia gerada pelos painéis fotovoltaicos durante a ocorrência de uma contingência j no mês k
I_s	Valor total do investimento para a configuração s do sistema híbrido
MC_s	Custos de manutenção anual para a configuração s do sistema híbrido
N_s^{bat}	Número de baterias na configuração s do sistema híbrido
N_s^{pv}	Número de painéis fotovoltaicos na configuração s do sistema híbrido
N_s^{wt}	Número de turbinas eólicas na configuração s do sistema híbrido
OC_s^{DG}	Custo anualizado da operação do gerador a diesel para a configuração s
P_s^{in}	Capacidade do inversor bidirecional do sistema
\bar{P}_s^{pv}	Potência instalada do gerador fotovoltaico
P^{wt}	Potência de saída do gerador eólico
P^{pv}	Potência de saída de um conjunto de células solares
TC_s	Custo total líquido para a configuração s do sistema híbrido
t_{jk}^{ind}	Tempo de indisponibilidade total do fornecimento dos serviços auxiliares para a contingência j no mês k
tm_{jk}^s	Tempo de indisponibilidade máxima do sistema híbrido para a contingência j no mês k
U_s^{index}	Índice de indisponibilidade para a configuração s do sistema híbrido
\mathcal{V}	Velocidade instantânea do vento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA	17
1.2	MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.4	CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	20
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
3	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	29
4	META-HEURÍSTICAS ESPECIALIZADAS NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BACKUP HÍBRIDO	40
4.1	REPRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO	40
4.2	FUNÇÃO OBJETIVO.....	41
4.3	CRITÉRIO DE FACTIBILIDADE.....	42
4.4	PROPOSTA DE SOLUÇÃO INICIAL.....	42
4.5	CRITÉRIOS DE PARADA	43
4.6	ALGORITMOS DESENVOLVIDOS PARA O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO DE BACKUP	43
4.6.1	Algoritmo genético.....	43
4.6.2	Busca em vizinhança variável.....	46
5	TESTES E RESULTADOS OBTIDOS	51
5.1	DADOS CONSIDERADOS.....	51
5.2	VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS DESENVOLVIDOS.....	54
5.2.1	Resultado para o dimensionamento.....	55
5.2.2	Análise do desempenho dos métodos	55
5.3	RESOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO	57
5.3.1	Resultado para o dimensionamento.....	58
5.3.2	Solução pelo método de busca exaustiva	58
5.3.3	Análise do desempenho dos métodos	60
6	CONCLUSÕES	63
6.1	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXO A - TRABALHOS CORRELATOS	73

1 INTRODUÇÃO

Devido à facilidade que possui de ser transformada em outras formas de energia, a eletricidade se tornou um componente fundamental para o desenvolvimento econômico, tecnológico e social em todo o mundo (Bichels, 2018). Conforme sua utilização e demanda se expandiram, originou-se um sistema robusto e complexo denominado de sistema elétrico de potência, o qual é composto por uma variedade de equipamentos e instalações destinados aos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O sistema elétrico de potência tem como seu objetivo principal levar a energia produzida pelas centrais geradoras até os consumidores, que por muitas vezes estão localizados distantes entre si. Para que estes processos desempenhem suas funções com eficiência, visando a redução de custos e segurança, os níveis de tensão ideais são diferentes em cada uma das etapas do sistema. Desse modo, os componentes essenciais que possibilitam a interconexão de todo o sistema são as subestações (Nunes; Silva, 2021; Souza, 2012).

Além disso, as subestações são responsáveis por comportar sistemas de proteção de transformadores e barramentos, dispositivos de manobras, sistema de comunicação, supervisão e aquisição de dados, monitoramento de sobrecarga e controle de tensão. Juntos, estes equipamentos compõem processos vitais para a operação, coordenação, estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico (Gomes, 2021; Nunes; Silva, 2021).

Todos os dispositivos e sistemas que não fazem parte do equipamento primário e secundário da subestação e que requerem alimentação em baixa tensão constituem um conjunto denominado de serviços auxiliares. Usualmente, os serviços auxiliares são divididos em serviços não essenciais, em que se pode citar a iluminação e a climatização, e serviços essenciais, que compõem os sistemas indispensáveis para a operação do sistema elétrico citados anteriormente. O suprimento dos serviços auxiliares essenciais deve ocorrer de forma ininterrupta, pois abrangem os serviços de emergência e recomposição do sistema em casos de falta (Soares, 2017).

Em geral, a alimentação em corrente alternada dos serviços auxiliares ocorre por meio dos transformadores de serviços auxiliares, conectados preferencialmente no barramento de menor tensão da própria subestação em ligações triângulo-estrela com neutro acessível. Já em corrente contínua, a alimentação acontece por meio de um conjunto retificador-bateria. Em casos de ocorrência de faltas na rede de

alimentação principal, é recorrente o uso de um grupo motor gerador a diesel para garantir o abastecimento dos serviços essenciais de forma independente até que o sistema elétrico retorne à sua operação normal (Bayliss; Hardy, 2006).

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

De acordo com o submódulo 2.6 da legislação vigente dos procedimentos de rede do Operador Nacional Do Sistema Elétrico (ONS), e aprovados pela Resolução Normativa nº 903/2020 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os serviços auxiliares em subestações devem ter, no mínimo, duas fontes de alimentação, nas seguintes configurações: (a) uma fonte externa proveniente da distribuidora local e outra interna da própria subestação; ou (b) duas fontes internas da própria subestação (ANEEL, 2020; ONS, 2021).

No que concerne ao emprego de grupo motor gerador como sistema de *backup*, algumas desvantagens devem ser destacadas devido ao seu alto custo de manutenção e probabilidade de falhas, as quais podem gerar significativos impactos monetários (Tabares *et al.*, 2020). Ademais, a geração de energia por meio de combustíveis fósseis tem sido amplamente desencorajada em todo o mundo devido à preocupação com o meio ambiente e as mudanças climáticas, divergindo também do sétimo objetivo de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas e de tratados internacionais de redução das emissões de dióxido de carbono como o Acordo de Paris e o Pacto Climático de Glasgow (United Nations, 2016, 2022). Consoante a isso, a geração de energia por meio de fontes renováveis tem sido vastamente estudada e defendida por serem menos poluentes e aproveitarem de recursos inesgotáveis.

Embora as fontes renováveis proporcionem notáveis benefícios ambientais no processo de descarbonização da matriz energética, ainda devem ser ressaltadas suas características não despacháveis ocasionadas pela sua intermitência e incerteza de geração. Consequentemente, o emprego desse tipo de geração requer maior planejamento e análise adequada (Chen *et al.*, 2016). De acordo com Massiello (2012), a integração de geradores renováveis agregou ainda mais desafios e complexidade à operação do sistema elétrico pela sua imprevisibilidade, pois tornou mais difícil o equilíbrio entre as curvas de produção de energia e a carga nesse novo contexto. Entretanto, a adoção de sistemas de armazenamento de energia pode ser uma

solução adequada para esta problemática, pois as baterias podem atuar em casos de interrupção do gerador devido a condições climáticas ou de falhas na operação. Além disso, a qualidade da energia frente aos distúrbios de tensão e frequência é fortalecida com a adoção de um banco de baterias corretamente dimensionado (Jayashree; Malarvizhi, 2020).

Em adição a isso, a combinação de múltiplas fontes renováveis e baterias sob a forma de uma microrrede pode ser adotada para mitigar a ação da intermitência dos sistemas de geração renovável. Neste caso, quando houver a interrupção de uma fonte geradora, a segurança energética pode ser mantida por outras fontes ou pelo sistema de armazenamento até a sua normalização (Sarkar *et al.*, 2019). Também é possível otimizar o uso de recursos naturais disponíveis na região e aumentar a eficiência energética perante as variações climáticas de cada estação (onde normalmente há aumento da produção pela geração solar no verão e de geração eólica no inverno, por exemplo).

No atual estado da arte da literatura especializada, há bastante discussão acerca da adoção de microrredes devido à sua capacidade de potencializar a integração de recursos energéticos distribuídos. Embora as microrredes exijam maiores investimentos em sistemas de controle, a integração de geração renovável e armazenamento de energia em sistemas híbridos tem possibilitado melhores níveis de confiabilidade e eficiência, bem como a redução da dependência de fornecimento (Schneider *et al.*, 2017).

O aumento na eficiência de fontes renováveis de geração e de armazenamento de energia em baterias tem tornado viável a operação em modo isolado de redes formadas por sistemas híbridos (Parhizi *et al.*, 2015). Do ponto de vista prático, estes sistemas podem ter aplicações importantes para comunidades remotas que não possuem conexão com o sistema elétrico, como também para o suprimento de cargas essenciais em eventos de falta de energia, como sistemas de *backup*, que é o tema central desta pesquisa.

Neste sentido, nesta dissertação busca-se analisar a aplicabilidade algoritmos inteligentes no dimensionamento de um sistema de *backup* híbrido, contendo geração renovável (fotovoltaica e eólica) e baterias, que seja capaz de suprir os serviços auxiliares de subestações em casos de falhas ou faltas de energia. Estes algoritmos serão baseados em diferentes técnicas meta-heurísticas e terão como objetivo encontrar a combinação mais atrativa monetariamente que atenda aos requisitos de

confiabilidade. As variáveis estocásticas do problema (horário de início e duração de faltas e recursos para geração renovável disponível) serão tratadas por meio do método de Simulações de Monte Carlo.

1.2 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Os recentes trabalhos desenvolvidos para resolução desta problemática têm focado no desenvolvimento de métodos exaustivos e modelos de programação linear considerando um número reduzido de cenários. Embora estes métodos garantam a solução ótima global do problema, podem apresentar algumas desvantagens como a falta de flexibilidade, memória e grande esforço computacional requerido em problemas com grande quantidade de variáveis incertas. Neste caso, o uso de métodos de otimização baseados em heurísticas e meta-heurísticas pode ser uma opção vantajosa devido a sua flexibilidade e robustez.

As meta-heurísticas constituem algoritmos inteligentes que são inspirados em técnicas de otimização que podem partir de métodos clássicos ou inspirados em processos da natureza. A ideia central de algumas dessas técnicas não é explorar todo o espaço de soluções, mas encontrar a região com soluções candidatas de boa qualidade e realizar uma intensificação nas características que melhoram a função objetivo, a fim de encontrar soluções de alta qualidade para problemas complexos em pouco tempo e baixo custo computacional.

As meta-heurísticas podem ser bastante flexíveis, pois elas não dependem de um modelo matemático para realizar a busca, apenas de uma forma de avaliar a qualidade da solução, sua factibilidade e de gerar novas soluções candidatas a partir da solução (ou das soluções) correntes. Dessa maneira, os problemas tratados podem ter a sua complexidade aumentada pela inclusão de mais variáveis incertas sem que o custo computacional seja drasticamente afetado, como no caso de modelos matemáticos. Além disso, existem diferentes tipos de meta-heurísticas disponíveis na literatura que podem ser testadas a fim de verificar a técnica mais assertiva para o problema em estudo. Espera-se que esta aplicação obtenha resultados semelhantes aos métodos já estudados na literatura, do ponto de vista de encontrar soluções com o custo de funções objetivos próximos ou até mesmo iguais, mas com baixo esforço computacional e de rápida resposta para viabilizar a inclusão de novas fontes renováveis ao estudo.

1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo principal investigar a aplicação de diferentes técnicas meta-heurísticas para otimizar o dimensionamento de sistemas híbridos renováveis, compostos por geração eólica, fotovoltaica e baterias. O sistema dimensionado servirá como um sistema de *backup* híbrido, para o suprimento da demanda dos serviços auxiliares em subestações, durante faltas de energia que contingencie o alimentador principal.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação possui as seguintes contribuições:

- Um levantamento bibliográfico de revisão do estado da arte quanto a aplicação de técnicas de otimização no dimensionamento ótimo de sistemas híbridos renováveis e suas aplicações;
- Uma nova abordagem para o problema de dimensionamento de sistemas de *backup* híbrido para suprimento de serviços auxiliares em subestações, considerando as incertezas da geração de energia associadas às fontes renováveis e a duração das faltas;
- A análise da aplicação de duas técnicas meta-heurísticas consolidadas na literatura, que possuem contrastes em suas filosofias de busca e exploração do espaço de soluções no problema de dimensionamento de sistemas de *backup* híbrido para suprimento de serviços auxiliares em subestações;
- A incorporação da possibilidade de geração de energia por turbinas eólicas, que difere das atuais propostas encontradas na literatura, e discorre sobre os benefícios na melhora da função objetivo e resiliência do sistema.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta o tema central, sua relevância, justificativa e os objetivos do estudo. No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre o dimensionamento ótimo de sistemas

híbridos renováveis, abordando estratégias para lidar com a intermitência da geração renovável, técnicas de otimização para dimensionamento ótimo, aplicação de sistemas híbridos no fornecimento de energia durante a ocorrência de emergências e a lacuna de pesquisa investigada. O Capítulo 3 descreve a modelagem matemática proposta para o problema de dimensionamento de sistemas híbridos renováveis como sistema de *backup* para serviços auxiliares em subestações, incorporando a geração eólica e custos relacionados ao acionamento de geradores a diesel ao modelo original da literatura. No Capítulo 4, são apresentados a representação de uma proposta de solução para o problema, a função objetivo, os critérios de factibilidade, a geração da solução inicial, critérios de parada e detalhes sobre o desenvolvimento dos métodos de otimização propostos, por meio de fluxogramas dos algoritmos. O Capítulo 5 apresenta dois casos de estudo (um considerando apenas geração fotovoltaica e baterias, enquanto o segundo adiciona a geração eólica) e os respectivos resultados, validados pela comparação com um método exato. Por fim, o Capítulo 6 expõe as considerações finais sobre as vantagens e limitações dos métodos desenvolvidos e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos anos, a otimização do dimensionamento de sistemas híbridos renováveis (SHR) tem recebido atenção significativa como uma alternativa sustentável para várias aplicações. No entanto, os altos custos iniciais e operacionais representam o maior obstáculo à sua implementação. Além disso, muitos estudos consideraram o uso de SHRs para sistemas isolados. Portanto, o dimensionamento adequado dos sistemas de armazenamento de energia é fundamental para garantir a disponibilidade de energia durante os períodos de baixa geração renovável.

Uma abordagem baseada em um controlador de lógica difusa e em um algoritmo de busca gravitacional foi apresentada por Mahmoudi, Maleki e Ochbelagh (2022) para projetar o tamanho ideal do SHRs para comunidades remotas. Considerando o uso de painéis fotovoltaicos (PFs) e turbinas eólicas (TEs) em conjunto com baterias ou geradores a diesel (GDs), os autores realizaram análises econômicas e de sensibilidade detalhadas. Usando os mesmos recursos, Rehman *et al.* (2020) investigaram a aplicação de um SHR para abastecer uma comunidade isolada na Índia. Visando o suprimentos de cargas em estações de base 5G um SHR, composto de PFs, TEs e baterias, foi proposto por Yuan *et al.* (2022) promovendo economias substanciais de custo e alta eficiência de fornecimento. Feio *et al.* (2024) analisaram o dimensionamento de um SHR composto por PFs, TEs, baterias e GD, para abastecer uma comunidade isolada na Ilha de Trindade no Brasil. Usando o *software Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources* (HOMER) para o dimensionamento, os autores encontram o dimensionamento com custo mínimo. Os autores também concluíram que o uso de um sistema eólico com armazenamento hidrelétrico reverso foi considerado, neste caso, inviável devido a aspectos ambientais.

Além disso, também com o objetivo de atender a uma comunidade isolada, Kharrich *et al.* (2021) propuseram a aplicação da meta-heurística *Equilibrium Optimizer* para dimensionar um SHR com custo mínimo. No estudo, o desempenho do algoritmo proposto é comparado com várias outras técnicas de otimização baseadas em população, e sua superioridade é demonstrada por meio dos índices de custo nivelado da eletricidade e da influência da variação de tamanho na probabilidade de perda de fornecimento de energia. Uma abordagem de otimização para determinar o dimensionamento ideal de um sistema híbrido de geração de energia, composto por

PFs, GD e células de combustível, com o objetivo de minimizar o custo presente líquido total, foi desenvolvida por Ghaffari e Askarzadeh (2020). O estudo também considera restrições, como a probabilidade de perda de fornecimento de energia e a parcela de participação de energia renovável, aplicando um algoritmo *Crow Search* modificado, chamado de CSAadaptive-AP.

Usando uma abordagem de hibridização de meta-heurísticas, Elkholy *et al.* (2024a) propuseram um método de dois estágios baseado no *Turbulent Flow of Water-based Optimization* e no *Gorilla Troops Optimizer*. No primeiro estágio, o método visa otimizar o desempenho de fontes individuais de energia renovável e, posteriormente, otimiza o carregamento da bateria, a produção de hidrogênio e o gerenciamento das conexões *Vehicle-to-Grid* (V2G), minimizando os custos operacionais. Cetinbas, Tamyurek e Demirtas (2022) também propuseram um novo algoritmo meta-heurístico híbrido combinando o *Hybrid Harris Hawks Optimizer* e o Algoritmo de Otimização Aritmética para o dimensionamento de um SHR na forma de uma microrrede CA/CC para atender de forma autônoma às necessidades de energia de um edifício comercial na Universidade de Gazi, na Turquia, a um custo mínimo de instalação. Os algoritmos foram comparados por meio de testes estatísticos, como o teste de Friedman e o teste dos postos sinalizados de Wilcoxon. Os resultados mostram que o algoritmo híbrido obteve melhor desempenho e convergência do que os métodos puros.

Por outro lado, quando conectados à rede, os SHRs podem oferecer flexibilidade, sendo dimensionados de acordo com os requisitos de carga e demanda, conforme demonstrado por Sanni *et al.* (2021). Um SHR composto por PFs, GD e biogás foi projetado para suprir parte das necessidades de energia de um abatedouro central na Nigéria. A rede elétrica principal não oferecia um fornecimento de energia confiável. Usando o *software* HOMER, o SHR foi dimensionado para proporcionar benefícios econômicos e ambientais significativos, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa.

A intermitência das fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, dificulta o dimensionamento adequado dos sistemas híbridos de *backup*, uma vez que a produção de energia é variável e de difícil previsão, especialmente quando eventos climáticos extremos são levados em consideração. Com esse objetivo, um método para projetar e otimizar microrredes sob os impactos incertos de longo prazo da mudança climática foi desenvolvida por Macmillan *et al.* (2024). A abordagem

proposta inclui um método para gerar cenários para três fontes de incerteza: o impacto da mudança climática na disponibilidade de recursos variáveis de energia renovável; o impacto de fenômenos extremos de calor induzidos pela mudança climática; e tendências de longo prazo no crescimento populacional. Os autores formularam um modelo estocástico de dois estágios, em que o primeiro estágio determina o projeto ideal do sistema e o segundo estágio otimiza as decisões operacionais para cada cenário.

Para garantir que um SHR possa fornecer energia confiável e localmente sustentável, operando tanto conectado à rede quanto isoladamente, a integração de várias fontes de energia em um sistema híbrido exige técnicas avançadas de controle e gerenciamento de energia (Hamanah *et al.*, 2023). Por esse motivo, muitos autores dedicaram seus estudos ao desenvolvimento de sistemas para otimizar a operação e o controle de SHR.

Um esquema de controle e gerenciamento para SHR na forma de microrredes CC isoladas/conectadas à rede foi apresentado por Pannala *et al.* (2020). Uma estratégia de controle e gerenciamento é proposta para a forma isolada, usando GDs, fontes renováveis e um sistema híbrido de armazenamento de energia (composto de bateria e supercapacitor) para manter as tensões do barramento da microrrede dentro dos limites. Para o modo do SHR conectado à rede, um problema de otimização centralizada é formulado no nível do sistema avançado de gerenciamento de distribuição para manter todas as tensões dos nós do sistema de distribuição dentro dos limites. A eficácia dos esquemas propostos é validada por meio de simulação em tempo real e resultados experimentais, incluindo a análise de cenários extremos, como falha de GD, baixa geração renovável e interrupção do regulador de tensão/banco de capacitores no sistema de distribuição.

Liu *et al.* (2023) propuseram um modelo de programação linear inteira mista para o planejamento e a operação de um sistema de energia baseado em hidrogênio e água, com o objetivo de enfrentar os desafios da integração de energia renovável nos *data centers* da Internet. Os autores desenvolveram um método híbrido baseado em física e dados para capturar com precisão as características do consumo de energia elétrica e térmica nos *data centers* da Internet. Seu objetivo foi determinar a capacidade ideal das instalações de energia no sistema de hidrogênio e água, levando em conta a confiabilidade da operação. Os resultados numéricos mostram que o SHR

é eficiente em termos de energia e tem baixas emissões de carbono em comparação com os sistemas tradicionais.

Por outro lado, Majeed *et al.* (2023) utilizaram um Algoritmo Genético Adaptativo para o gerenciamento de energia em microrredes conectadas à rede que incorporam fontes de energia renováveis e GDs de reserva. O SHR em estudo consiste em um TE, PFs, um GD independente e baterias, juntamente com cargas flexíveis e não flexíveis conectadas à rede local. Os principais objetivos da abordagem proposta pelos autores foram otimizar a programação e a alocação de energia de diferentes fontes, maximizar o uso de recursos de energia renovável e minimizar os custos gerais de energia para a microrrede. Os autores validaram o desempenho do sistema de gerenciamento de energia proposto por meio de simulações MATLAB/Simulink. Os resultados mostram que o algoritmo proposto supera outras técnicas de otimização, como a otimização por enxame de partículas e o algoritmo *Firefly*, maximizando os benefícios da integração de fontes de energia renováveis e garantindo uma operação confiável e econômica.

Além disso, uma base metodológica de um modelo geral de espaço de estado para microrredes foi apresentada por Vivas *et al.* (2020). O modelo aborda o gerenciamento eficiente de energia, considerando a viabilidade técnica e econômica de microrredes baseadas em fontes renováveis, com hidrogênio como *backup*, e é capaz de se adaptar a diferentes topologias e arquiteturas. Além disso, o modelo incorpora parâmetros técnicos e econômicos essenciais para a otimização de curto e longo prazo. Os resultados dos testes experimentais demonstraram a precisão do modelo na quantificação de parâmetros técnicos e econômicos, com desempenho consideravelmente superior em comparação com os modelos tradicionais analisados na literatura.

Os SHRs podem aumentar a resiliência da rede elétrica, garantindo um fornecimento contínuo de energia durante emergências. Na literatura recente, vários autores propuseram abordagens para lidar com as interrupções de energia da rede principal e manter os serviços vitais para a sociedade. Para garantir a operação ininterrupta de infraestruturas essenciais durante falhas na rede, Chakraborty *et al.* (2023) apresentaram um projeto para um sistema de gerenciamento de energia de emergência. Primeiramente, um sistema de controle é empregado para inversores formadores de rede, permitindo transições suaves entre os modos conectado à rede e isolado, garantindo uma recuperação da operação rápida e ininterrupta. Além disso,

os mesmos autores propuseram um mecanismo centralizado no gerenciamento de carga líquida que coordena a geração e as cargas controláveis de forma rápida e eficiente. Por fim, um mecanismo inteligente de “horizonte de viabilidade” baseado em otimização é introduzido para garantir um fornecimento de energia sustentado e confiável para cargas críticas durante um horizonte de tempo estendido após uma falha na rede. O sistema foi validado por meio de experimentos abrangentes de *hardware-in-the-loop* usando um modelo realista de rede elétrica de um centro médico em escala comercial. Nesse sistema, os dispositivos e controladores inteligentes têm a capacidade de identificar falhas de energia, agindo em poucos instantes.

Ghimire *et al.* (2024) realizaram uma avaliação técnica e econômica da substituição de um GD por um sistema combinado de energia e calor para atuar como um sistema de *backup* para um hospital no Nepal. Por meio de uma análise de incerteza e sensibilidade, foi revelado que a tarifa de eletricidade é o fator de custo mais significativo para o dimensionamento. Também utilizando do *software* HOMER, Jahangir, Javanshir e Kargarzadeh (2021) projetaram um sistema de *backup* de hidrogênio e GD para melhorar o abastecimento de complexos esportivos. O sistema provou ser capaz de aumentar a confiabilidade e a sustentabilidade do abastecimento das cargas, oferecendo vantagens econômicas e ambientais em comparação com o método tradicional que utiliza apenas GD.

Um modelo para a localização e instalação de geradores distribuídos renováveis foi proposto por Kizito *et al.* (2020), tendo como característica a possibilidade de, sob condições de falhas no sistema de energia, formar microrredes CA/CC e manter o fornecimento de energia dos principais serviços públicos. Com o mesmo objetivo, Xiao *et al.* (2023) analisaram a viabilidade de alocar veículos elétricos para suprir cargas essenciais após um grande desastre que contingenciaria o sistema elétrico, formando várias ilhas de cargas. Uma abordagem técnica e econômica baseada no algoritmo de otimização de abutres africanos foi proposta por Elkholy *et al.* (2024b) para avaliar a aplicação de um SHR como um sistema de *backup* composto por três fontes de armazenamento: baterias, hidrogênio e veículos sob conexão V2L.

Com relação ao foco deste trabalho, o dimensionamento ideal de SHRs para fornecer serviços auxiliares em subestações como um sistema de *backup*, apenas três trabalhos foram encontrados na literatura. O artigo de Tabares *et al.* (2020) propõe um método para dimensionar os componentes de uma microrrede CA/CC a fim de fornecer energia de reserva para os serviços auxiliares da subestação durante as

interrupções de energia. Esses serviços incluem sistemas de monitoramento, comunicação e controle, que são essenciais para o funcionamento adequado de todo o sistema elétrico. A microrrede CA/CC é apresentada como um sistema de *backup* alternativo, composto apenas por painéis fotovoltaicos e baterias, com o objetivo de aumentar a confiabilidade e reduzir a dependência de suprimentos externos. O método proposto usa uma busca exaustiva e simulações de Monte Carlo para avaliar várias alternativas e identificar a configuração ideal. Um índice de indisponibilidade é introduzido para medir a contribuição da microrrede na redução do tempo em que a subestação não está em operação durante contingências. As principais conclusões destacam a importância das baterias em relação aos painéis fotovoltaicos para aumentar a disponibilidade dos serviços auxiliares, bem como a dependência do tamanho ideal da microrrede em relação à meta de indisponibilidade. O artigo fornece um modelo matemático de programação linear inteira mista para dimensionar um SHR como um sistema de *backup*. Usando uma metodologia detalhada, ele é capaz de equilibrar os objetivos de investimento e disponibilidade por meio de uma avaliação exaustiva de alternativas e condições.

Letebele e Van Coller (2021) projetaram uma microrrede confiável e econômica para suprir as cargas auxiliares na subestação de comutação de transmissão usando recursos renováveis. O sistema híbrido, projetado utilizando o *software* comercial HOMER, atua em modo isolado e consiste em um sistema fotovoltaico, baterias de íon-lítio e um gerador a diesel de reserva. Recentemente Oliveira (2022), propôs um modelo de programação linear inteira mista para determinar o número de baterias e painéis fotovoltaicos em uma microrrede híbrida, visando atender os serviços auxiliares em situações de contingência. Este modelo considera uma discretização das curvas de geração fotovoltaica, para reduzir o número de cenários possíveis e diminuir o tempo de processamento, assim como utiliza diferentes restrições de investimento para avaliar a robustez da microrrede proposta. O autor conclui que à medida o limite de investimento aumenta, menor é a indisponibilidade do sistema.

Embora os custos iniciais possam ser altos, os sistemas híbridos renováveis oferecem economia de custos operacionais a longo prazo, conforme observado nas análises técnicas e econômicas de Cetinbas, Tamyurek e Demirtas (2022), Elkholy *et al.* (2024a, 2024b), Feio *et al.* (2024), Ghaffari e Askarzadeh (2020), Ghimire *et al.* (2024), Jahangir, Javanshir e Kargarzadeh (2021), Kharrich *et al.* (2021), Liu *et al.* (2023), Macmillan *et al.* (2024), Mahmoudi, Maleki e Ochbelagh (2022), Majeed *et al.*

(2023), Rehman *et al.* (2020), Sanni *et al.* (2021), Tabares *et al.* (2020), Vivas *et al.* (2020) e Yuan *et al.* (2022). A adoção de sistemas híbridos de *backup* pode reduzir significativamente a pegada de carbono e promover a sustentabilidade ambiental, conforme demonstrado por Liu *et al.* (2023), Sanni *et al.* (2021) e Yuan *et al.* (2022).

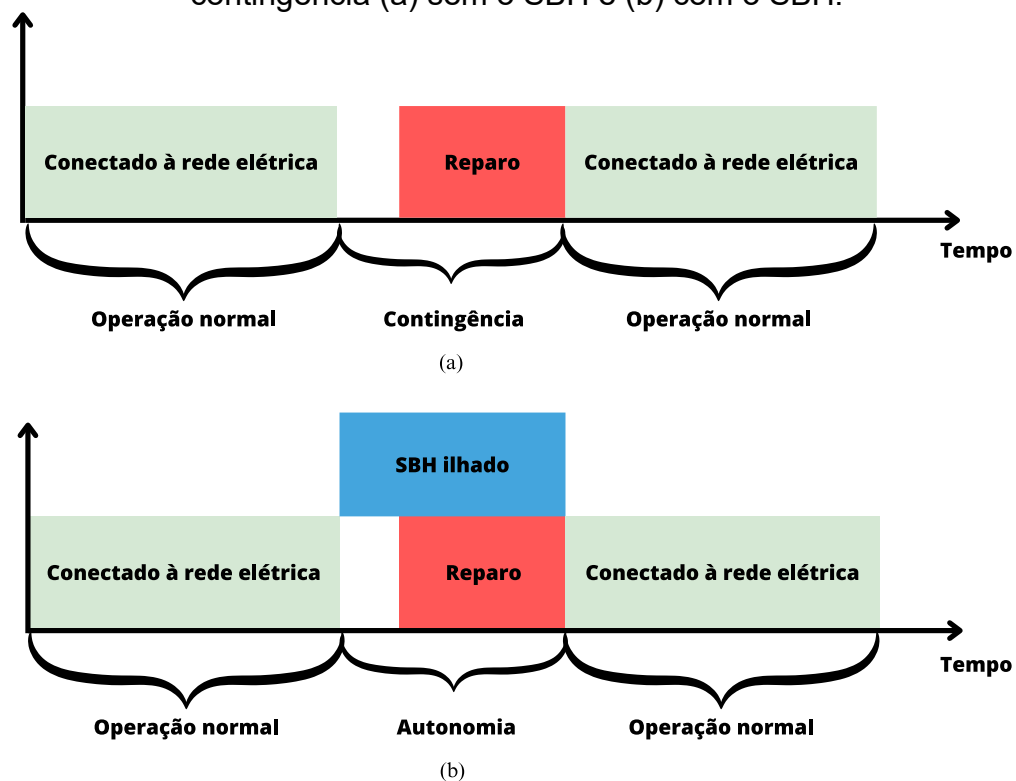
Em resumo, as principais técnicas usadas para o dimensionamento ideal de SHR, seja para aplicações isoladas ou conectadas à rede, o uso de ferramentas de otimização computacional, como o *software* HOMER: (Feio *et al.*, 2024; Jahangir; Javanshir; Kargarzadeh, 2021; Rehman *et al.*, 2020; Sanni *et al.*, 2021), tem sido predominante. Além disso, muitos autores também empregam métodos exatos, como modelos de programação linear e métodos de busca exaustiva (Ghimire *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023; Macmillan *et al.*, 2024; Tabares *et al.*, 2020). Poucos estudos mostraram variações, como o uso de modelos de lógica difusa (Mahmoudi; Maleki; Rezaei Ochbelagh, 2022), aprendizado por reforço profundo (Yuan *et al.*, 2022) e modelos de espaço de estado (Vivas *et al.*, 2020). No entanto, há um número notável de estudos que utilizam técnicas modernas baseadas em meta-heurísticas (Elkholy *et al.*, 2024b; Ghaffari; Askarzadeh, 2020; Majeed *et al.*, 2023), com ênfase especial nas melhorias obtidas por meio da hibridização dos métodos (Cetinbas; Tamyurek; Demirtas, 2022; Elkholy *et al.*, 2024a; Mahmoudi; Maleki; Rezaei Ochbelagh, 2022).

Estudos anteriores, focados em diversas aplicações de SHRs, demonstraram que a diversificação de fontes de geração pode otimizar a resiliência e reduzir custos de sua implementação, um aspecto crucial para sistemas de *backup* alternativos. No entanto, essa abordagem ainda não foi explorada no contexto específico de subestações. Pesquisas anteriores como as de Tabares *et al.* (2020), Letebele e Van Coller (2021) e Oliveira (2022), limitaram-se a analisar o uso de PFs e baterias para o suprimento emergencial dos serviços auxiliares em subestações. Além disso, embora métodos heurísticos sejam amplamente utilizados na literatura para o dimensionamento dos SHRs, não foi encontrado nenhum trabalho de aplicação de meta-heurísticas para este propósito específico, permanecendo um campo aberto. Essa lacuna de pesquisa justifica a investigação do potencial de meta-heurísticas para aprimorar a eficiência e a confiabilidade de sistemas de *backup* em subestações, considerando a crescente importância da resiliência em infraestruturas críticas.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo, apresenta-se a modelagem matemática para o problema de planejamento do dimensionamento de um sistema de *backup* híbrido (SBH). O sistema proposto é composto por fontes de geração renovável e baterias, destinadas ao suprimento de cargas de serviços auxiliares em subestações durante interrupções no fornecimento de energia elétrica. Em caso de contingência na rede elétrica principal, as cargas dos serviços auxiliares tornam-se inativas até que o reparo seja concluído e a operação normal seja restabelecida, conforme ilustrado na Figura 1 (a). Diante desse cenário, o sistema de *backup* proposto entra em operação de forma ilhada, atendendo às cargas de maneira autônoma até que a rede principal seja reativada, como representado na Figura 1 (b).

Figura 1 – Prestação de serviços auxiliares na subestação durante uma situação de contingência (a) sem o SBH e (b) com o SBH.



Fonte: Adaptado de Tabares *et al.* (2020), p. 6.

A autonomia desejada para o suprimento das cargas dos serviços auxiliares de subestações em condições de faltas depende do correto dimensionamento de seus recursos. Com o objetivo de otimizar esse dimensionamento, foi reformulado o modelo matemático proposto por Tabares *et al.* (2020), que estima o custo de investimento

líquido dos componentes do SBH composto apenas por geração fotovoltaica e baterias. As alterações propostas nesta dissertação abrangem a inclusão da geração eólica, a consideração dos custos de acionamento do gerador a diesel como fonte secundária e a modificação do tratamento estocástico dos cenários de geração.

O custo líquido total do sistema (TC_s), para uma determinada configuração s , é definido pela soma algébrica do investimento bruto inicial (I_s) e os custos retornados ao valor presente líquido da manutenção (MC_s), operação do gerador a diesel (OC_s^{DG}), subtraído pelo lucro obtido pela venda de energia produzida pelos geradores renováveis (ω_s), utilizando uma taxa de juros (δ) conhecida ao longo da vida útil estimada para os equipamentos (τ), conforme formulado na equação (1).

$$TC_s = I_s + \sum_{i=1}^{\tau} \frac{1}{(1 + \delta)^i} \cdot [MC_s + OC_s^{DG} - \omega_s] \quad (1)$$

O investimento inicial (I_s) é determinado pela quantidade de componentes presentes no SBH dimensionado. Para a unidade de armazenamento, composta por baterias, o custo é calculado multiplicando-se o número de baterias necessárias (N_s^{bat}) pelo seu custo unitário (c^{bat}). O custo de implantação do gerador fotovoltaico é dado pela quantidade de módulos utilizados (N_s^{pv}) multiplicada pelo custo unitário de cada painel (c^{pv}) para uma configuração s do SBH. O custo do inversor bidirecional (c^{in}) é calculado de acordo com sua potência requerida (P_s^{in}). O custo de aquisição de turbinas eólicas (c^{wt}) é calculado multiplicando-se o número de turbinas presentes na configurações projetada (N_s^{wt}). Assim, o valor total do investimento inicial para uma configuração s do SBH é determinado pela equação (2).

$$I_s = N_s^{pv} \cdot c^{pv} + N_s^{wt} \cdot c^{wt} + N_s^{bat} \cdot c^{bat} + P_s^{inv} \cdot c^{inv} \quad (2)$$

Além disso, o custo de manutenção (MC_s) também é considerado para cada equipamento, correspondendo a uma fração de seu investimento inicial, conforme descrito na equação (3), onde mc^{bat} , mc^{pv} , mc^{in} e mc^{wt} são percentuais de manutenção respectivos das baterias, painéis fotovoltaicos, inversor bidirecional e turbinas eólicas, relativos aos seus custos iniciais.

$$MC_s = N_s^{pv} \cdot c^{pv} \cdot mc^{pv} + N_s^{wt} \cdot c^{wt} \cdot mc^{wt} + N_s^{bat} \cdot c^{bat} \cdot mc^{bat} + P_s^{in} \cdot c^{in} \cdot mc^{in} \quad (3)$$

A reformulação proposta nesta pesquisa integra ao dimensionamento o custo operacional do acionamento de geradores a diesel como opção de *backup* secundária, apresentado em (4), para situações em que o SBH não suprir a demanda total dos serviços auxiliares. Essa situação ocorre quando a energia disponível nas baterias for insuficiente ou a capacidade de geração renovável estiver muito baixa. Os custos anuais de operação da geração a diesel (OC_s^{DG}), para garantir a continuidade do fornecimento de energia, são calculados multiplicando-se o custo de operação horária do gerador a diesel (c^{DG}), em \$/kWh, pela potência média da carga (\bar{P}^{sas}), em kW, e pelo índice de indisponibilidade do serviço (U_s^{index}), ao longo da quantidade de horas presente no período de um ano (ξ).

$$OC_s^{DG} = c^{DG} \cdot \bar{P}^{sas} \cdot U_s^{index} \cdot \xi \quad (4)$$

O incentivo ao uso de geração renovável é calculado a partir do lucro anual obtido com a venda do excedente de energia gerada por recursos renováveis (ω_s) que é estimado através do número de painéis fotovoltaicos (N_s^{pv}) e de turbinas eólicas (N_s^{wt}) que compõem o sistema de *backup* pela energia gerada estimada por cada unidade (\bar{E}^{pv} e \bar{E}^{wt} , respectivamente) ao longo de um ano. O resultado dessa operação é multiplicado pelo preço da eletricidade (π), apresentado na equação (5).

$$\omega_s = (N_s^{pv} \cdot \bar{E}^{pv} + N_s^{wt} \cdot \bar{E}^{wt}) \cdot \pi \quad (5)$$

A operação do sistema fotovoltaico determina a energia gerada pelos painéis com base nas condições climáticas dada pelos valores de irradiação solar e da temperatura da célula solar. A relação entre a irradiância solar e a potência de saída de uma fonte geradora solar pode ser descrita pelo conjunto de equações (6)–(10), conforme apresentado por Atwa *et al.* (2010).

$$T^c = T^a + \left(\frac{N^{OT} - 20}{0,8} \right) \cdot G^{gh} \quad (6)$$

$$I^c = G^{gh} \cdot [I^{sc} + K^i \cdot (T^c - 25)] \quad (7)$$

$$V^c = V^{oc} + K^v \cdot T^c \quad (8)$$

$$FF = \frac{V^{MPPT} \cdot I^{MPPT}}{V^{oc} \cdot I^{sc}} \quad (9)$$

$$P^{pv} = FF \cdot V^c \cdot I^c \quad (10)$$

A temperatura na célula fotovoltaica (T^c) é determinada na equação (6) em relação à temperatura ambiente (T^a), temperatura nominal de funcionamento da célula (N^{OT}) e irradiação solar (G^{gh}). A equação (7) determina a corrente fornecida pela célula fotovoltaica (I^c) em função da sua temperatura (T^c) e do coeficiente de temperatura para a corrente (K^i). Da mesma forma, a tensão da célula fotovoltaica (V^c) é calculada por meio de (8) em função da tensão de circuito aberto (V^{oc}) e somando o coeficiente de temperatura para a tensão (K^v) multiplicada pela sua temperatura (T^c). A eficiência da célula é determinada pelo fator de forma, determinado por (9), na qual o produto da corrente no ponto de potência máxima (I^{MPPT}) pela tensão no ponto de potência máxima (V^{MPPT}) é dividido pelo produto da tensão de circuito aberto (V^{oc}) pela corrente de curto-circuito do painel (I^{sc}).

O cálculo da potência de saída de um conjunto de células solares (P^{pv}) é determinado, com o auxílio das equações anteriores, conforme demonstrado em (10). Dessa forma, torna-se possível ainda calcular a energia gerada pelos painéis em intervalo de tempo, como por exemplo, no modo operação ilhado do SBH, conforme demonstrado na equação (11), sendo t_{jk}^0 o momento de início da contingência e tm_{jk}^s o tempo de disponibilidade ofertado pelo sistema proposto durante o período de falta simulado, pelo produto da potência de saída de cada célula pelo número de painéis da configuração (N_s^{pv}).

$$E_{jk}^{pv} = \int_{t_{jk}^0}^{tm_{jk}^s} P^{pv} \cdot N_s^{pv} \cdot t \cdot dt \quad (11)$$

Por sua vez, a produção por meio de turbinas eólicas é usualmente determinada pelo conjunto de equações que representam suas quatro condições de operação, dependendo da velocidade instantânea do vento (V), conforme apresentado na equação (12).

$$P^{wt} = \begin{cases} 0, & v < \underline{v} \\ v^3 \cdot \left(\frac{P^{wt_nom}}{v^{r3} - \underline{v}^3} \right) - P^{wt_nom} \cdot \left(\frac{\underline{v}^3}{v^{r3} - \underline{v}^3} \right), & \underline{v} \leq v < v^r \\ P^{wt_nom}, & v^r \leq v < \bar{v} \\ 0, & v > \bar{v} \end{cases} \quad (12)$$

Na primeira condição, a potência de saída é zero, pois a turbina não funcionará se velocidade do vento estiver abaixo da velocidade de corte inferior necessária (\underline{v}). Na segunda condição, a turbina produzirá energia, pois a velocidade do vento está na faixa entre a velocidade do vento de corte inferior (\underline{v}) e da velocidade nominal (v^r). A potência obtida pelo gerador eólico nessa região é determinada pela velocidade instantânea do vento (v), velocidade de corte inferior (\underline{v}), velocidade de corte superior (\bar{v}) e a potência nominal da turbina (P^{wt_nom}) selecionada. O aumento da velocidade do vento para a faixa entre a velocidade nominal do vento (v^r) e a velocidade de corte superior (\bar{v}) corresponde à terceira condição de operação, onde a potência nominal da turbina (P^{wt_nom}) é produzida.

Na última região, quando a velocidade do vento excede a velocidade de corte superior (\bar{v}), a turbina é desligada por motivos de segurança e a potência de saída é zero. Assim, a potência nominal de um gerador eólico, apresentada na equação (13), é determinada pelo coeficiente de potência máxima (Cp^{max}), pela densidade do ar (ρ), pela área coberta pelas pás do rotor (A^r), do diâmetro das pás (D^r), e a velocidade nominal do vento (v^r) (Saint-Drenan *et al.*, 2019).

$$P^{wt_nom} = Cp^{max} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{A^r \cdot D^{r2}}{4} \right) \cdot v^{r3} \quad (13)$$

$$E_{jk}^{wt} = \int_{t_{jk}^0}^{tm_{jk}^s} P^{wt} \cdot N_s^{wt} \cdot t \cdot dt \quad (14)$$

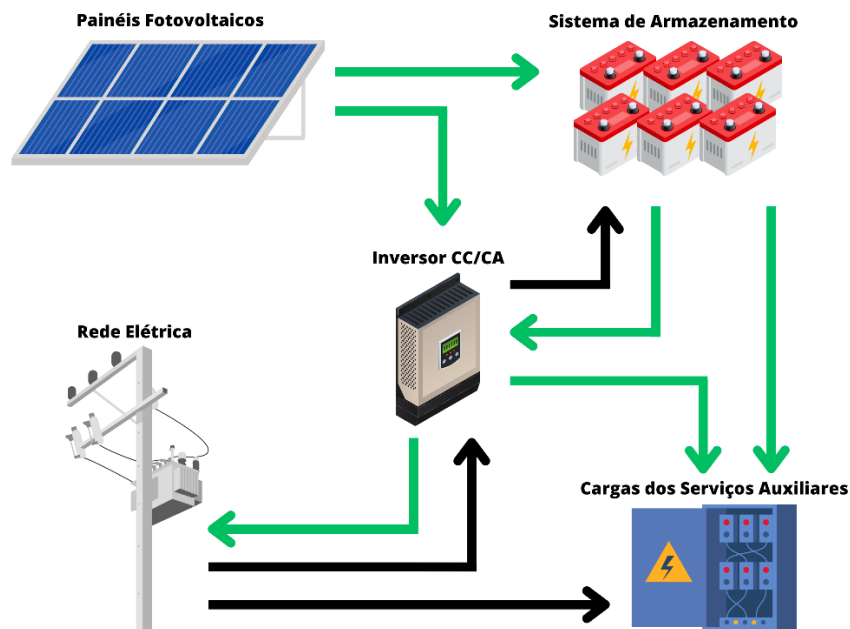
Tendo em vista o efeito de intermitência e característica não despachável da geração renovável, se faz necessário o acréscimo de baterias para garantir a autonomia do sistema a ser dimensionado, seja perante as variações climáticas ou do momento de início e duração da ocorrência da falta. Assim, a energia disponível da

bateria (E^{bat}) é expressa na equação (15), na qual η^{out} representa a eficiência de carga e descarga da bateria, NC^{bat} é a capacidade nominal da bateria e DoD representa a profundidade de descarga.

$$E^{bat} = \eta^{out} \cdot DoD \cdot NC^{bat} \cdot N_s^{bat} \quad (15)$$

A implementação do SBH exige um inversor bidirecional, capaz de operá-lo tanto conectado à rede quanto em modo isolado. Essa versatilidade garante o funcionamento autônomo do sistema, aumentando a disponibilidade dos serviços auxiliares da subestação. Além disso, o inversor permite o carregamento das baterias a partir da rede principal e a injeção da energia excedente dos recursos renováveis na rede, sob condições normais de operação. A Figura 2 ilustra o funcionamento perante os fluxos bidirecionais que permitem ao inversor alimentar as cargas dos serviços auxiliares no SBH ou injetar energia excedente na rede elétrica.

Figura 2 – Fluxos de potência no sistema de *backup* híbrido do ponto de vista do inversor bidirecional.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para definir a capacidade do inversor no SBH proposto é necessário considerar duas grandezas: a potência instalada dos sistemas de geração (\bar{P}_s^{pv}) e a potência máxima demandada pela carga (\bar{P}_{sas}^{max}). Portanto, o dimensionamento do inversor

bidirecional é realizado de acordo com a maior potência do sistema, conforme exposto na equação (16).

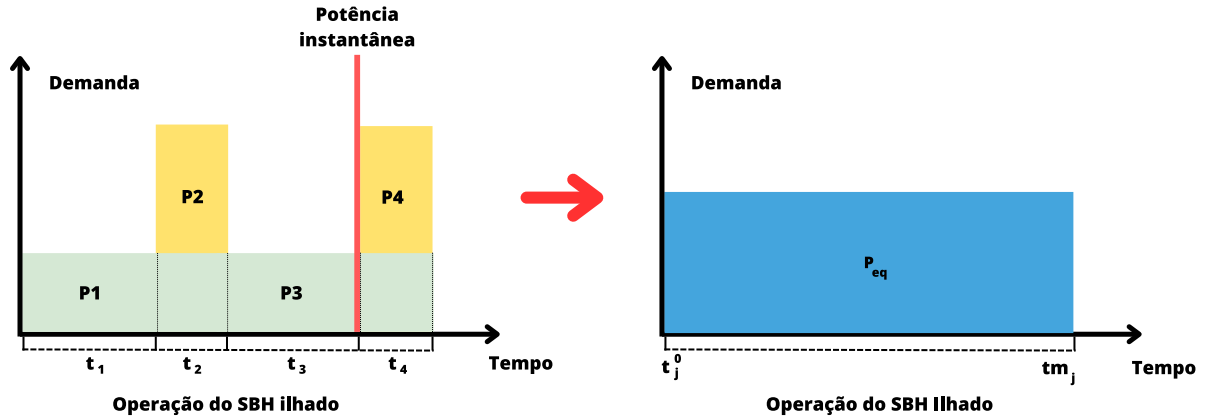
$$P_s^{in} = \max \{ \bar{P}_s^{pv}, \overline{P_{sas}^{max}} \} \quad (16)$$

Dessa forma, o inversor bidirecional possibilita o funcionamento do SBH em seus distintos modos de operação, sob o comando de um sistema controlador mestre, conforme apresentado por Holzbach *et al.* (2025). Esse sistema é responsável por determinar o estado de operação do SBH e gerenciar os fluxos de energia de entrada e saída, de modo a suprir as cargas dos serviços auxiliares. No modo de operação ilhado, o balanço energético, expresso na equação (17), deve ser respeitado.

$$E^{sas} = E^{bat} + E_{jk}^{pv} + E_{jk}^{wt} \quad (17)$$

Por sua vez, a demanda dos serviços auxiliares em subestações pode ser dividida em três subgrupos de cargas: cargas permanentes que estão relacionadas ao equipamento conectado continuamente como os dispositivos de proteção, medição e comunicação; cargas temporárias com elevados requisitos de potência de curta duração e necessárias para o restabelecimento do serviço na subestação, por exemplo, motores de acionamento; e cargas instantâneas que possuem altas demandas de energia em períodos extremamente curtos, como o acionamento de disjuntores para realização de manobras. Uma representação desses tipos de cargas e suas durações é ilustrada à esquerda na Figura 3, na qual as cargas permanentes são representadas por barras verdes, cargas temporárias por barras amarelas e cargas instantâneas por barras vermelhas.

Figura 3 – Tipos de carga e sua duração de contingência.



Fonte: Adaptado de Tabares *et al.* (2020), p. 10.

De acordo com Tabares *et al.* (2020), do ponto de vista do planejamento não é eficaz a representação da duração da contingência em diferentes intervalos, cada um com seu próprio nível de potência solicitado e tempo requerido, quando se considera a incerteza na duração da contingência. Devido a isso, um fator de carga equivalente é adotado para aproximar os requisitos de carga dos serviços auxiliares. Este fator é obtido utilizando a equivalência entre o consumo de energia na Figura 3 da seguinte forma:

- Cada nível de demanda para o período t , no lado esquerdo da Figura 3, pode ser representado em termos de um fator de carga relacionado à potência nominal dos serviços auxiliares, ou seja, $f_i \cdot P_t = f_t \cdot P^{nom}$. Assim, a energia total requerida pelos serviços auxiliares (E^{sas}) para a contingência ilustrada na Figura 3 é igual a $E^{sas} = P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + P_3 \cdot t_3 + P_4 \cdot t_4 = P^{nom}(f_1 \cdot t_1 + f_2 \cdot t_2 + f_3 \cdot t_3 + f_4 \cdot t_4)$;
- Da mesma forma, o nível de potência relacionado ao lado direito da Figura 3 pode ser expresso em termos de um fator global (FC^g) relacionado à potência nominal demandada pelos serviços auxiliares (P^{nom}), ou seja, $FC^g \cdot P^{eq} = FC^g \cdot P^{nom}$. Consequentemente, a energia total requerida durante a contingência da Figura 4 é igual a $E^{sas} = P^{eq} \cdot (tm_j^s - t_j^0) = FC^g \cdot P^{nom} \cdot (tm_j^s - t_j^0)$;
- Como a energia requerida pelos serviços auxiliares é a mesma para ambas as representações na Figura 3, o fator de carga para este exemplo pode ser compreendido como: $FC^g = (f_1 \cdot t_1 + f_2 \cdot t_2 + f_3 \cdot t_3 + f_4 \cdot t_4) / (tm_j^s - t_j^0)$.

A partir disso, o fator de carga geral (FC^g) pode ser escrito como mostrado na equação (18):

$$FC^g = \frac{\sum_{t=i}^{\bar{T}} f_t \cdot t_t}{(tm_j^s - t_j^0)} \quad (18)$$

Assim, na aproximação proposta por Tabares *et al.* (2020), a potência nominal dos serviços auxiliares (P^{nom}) e o fator de carga global (FC^g) permitem determinar a energia requerida pelas cargas dos serviços auxiliares (E^{sas}) para a simulação, de forma constante, durante o período de duração da falta ($tm_{jk}^s - t_{jk}^0$), de acordo com a equação (19).

$$E^{sas} = FC^g \cdot P^{nom} \cdot (tm_{jk}^s - t_{jk}^0) \quad (19)$$

As equações que estimam a operação do sistema proposto permitem avaliar a efetividade da proposta *s* de *backup* dimensionado. Essa avaliação pode ser feita por meio de um índice de disponibilidade, que representa a capacidade do sistema de absorver ou reduzir o impacto das contingências do sistema de distribuição na operação dos serviços auxiliares. O índice de indisponibilidade, por sua vez, indica a proporção esperada de horas em que os serviços auxiliares da subestação estarão fora de operação para uma proposta de configuração do SBH.

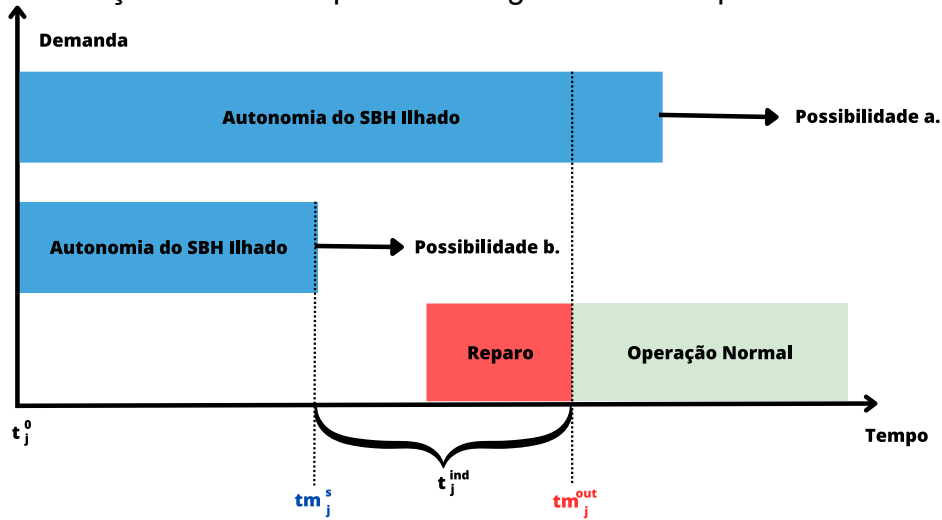
Para calcular esse índice, conforme proposto por Tabares *et al.* (2020), se presume que o alimentador principal da carga da subestação possui uma taxa de contingência anual conhecida. Esses valores podem ser obtidos a partir de estudos estatísticos realizados pelo operador da rede de distribuição. Na ausência de dados específicos, pode-se considerar um valor médio esperado para a ocorrência de contingências. A duração de cada contingência é modelada como uma variável aleatória, que segue uma função de probabilidade.

Devido ao comportamento aleatório da duração da contingência e da energia gerada pelas fontes renováveis, não se pode garantir que a energia disponível no SBH seja sempre suficiente para suprir a carga dos serviços auxiliares durante uma falta de energia. A Figura 4 mostra as duas possibilidades em que o SBH atua como de forma autônoma para suprir a demanda dos serviços auxiliares: (a) a energia

disponível no SBH é suficiente para suprir a demanda durante toda a contingência, garantindo a continuidade dos serviços auxiliares e (b) a energia disponível no SBH é insuficiente para suprir a demanda durante toda a contingência, resultando na interrupção dos serviços auxiliares por um período menor que a duração total da contingência.

Em ambos os casos, o SBH dimensionado contribui para aumentar a disponibilidade dos serviços auxiliares, seja garantindo a operação ininterrupta ou reduzindo o tempo de indisponibilidade.

Figura 4 – Relação entre o tempo de contingência e o tempo de autonomia do SBH.



Fonte: Adaptado de Tabares *et al.* (2020), p. 8.

O cálculo do tempo de indisponibilidade do fornecimento dos serviços auxiliares (t_{jk}^{ind}) em uma dada contingência j , de um determinado mês k é detalhado na equação (20) para uma configuração s do SBH. Esta contingência j possui uma duração máxima ou total (t_{jk}^{out}), onde a configuração do sistema tem um tempo de disponibilidade (tm_{jk}^s) dependente das condições meteorológicas no momento da contingência para produção de energia renovável e energia disponível nas baterias. O horário de início da contingência (t_j^0) é um parâmetro aleatório. Assim, a cada instante simulado a operação do sistema proposto possui as seguintes possibilidades:

- O tempo de disponibilidade do sistema híbrido é igual ou maior que o tempo de duração da contingência. Neste caso não há indisponibilidade de atendimento e $t_{jk}^{ind} = 0$;

- b. O tempo de disponibilidade do sistema híbrido é menor do que a duração da contingência. Nesse caso, a indisponibilidade total é igual à diferença entre a duração da contingência e o tempo de disponibilidade proporcionado pelo SBH, ou seja, $t_{jk}^{ind} = t_{jk}^{out} - tm_{jk}^s$.

$$t_{jk}^{ind} = \begin{cases} 0, & \forall tm_{jk}^s \geq t_{jk}^{out} \\ t_{jk}^{out} - tm_{jk}^s, & \forall tm_{jk}^s < t_{jk}^{out} \end{cases} \quad (20)$$

O índice de disponibilidade (D_s^{index}) expresso na equação (21), avalia a proporção do tempo em que o SBH conseguiu manter os serviços auxiliares em operação em relação ao número total de horas. O número de contingências avaliadas é definido como o produto da quantidade de faltas esperada do alimentador da rede de distribuição (λ) e o número de simulações de Monte Carlo (N^{SMC}). As simulações de Monte Carlo permitem amostrar aleatoriamente o espaço de eventos e obter uma estimativa estatisticamente significativa para a incerteza relacionada as faltas e produção dos recursos renováveis. Cada falta de energia simulada representa um evento específico que pode causar a indisponibilidade do SBH, e o tempo de indisponibilidade associado a essa contingência é denotada por t_{jk}^{ind} . O numerador da equação (21) calcula, então, o tempo total de indisponibilidade do SBH, considerando todas as possíveis circunstâncias de não atendimento que podem levar à falha do sistema. Por sua vez, o denominador da equação (21) é o parâmetro ξ , que representa o número de horas no período de um ano

$$D_s^{index} = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{N^{SMC}} \cdot \lambda \sum_{k=1}^{12} t_{jk}^{ind}}{\xi} \right) \cdot 100\% \quad (21)$$

Propõe-se, neste estudo, uma abordagem distinta daquela apresentada por Tabares *et al.* (2020). As simulações são divididas de forma igualitária entre os meses do ano, utilizando o subíndice k para representar os diferentes meses do ano. Essa divisão garante a consideração de todas as condições de variabilidade climática ao longo do ano, evitando favorecimento indevido de condições de alta qualidade de geração renovável e proporcionando uma avaliação mais abrangente e precisa do sistema proposto.

4 META-HEURÍSTICAS ESPECIALIZADAS NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BACKUP HÍBRIDO

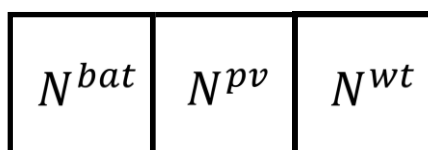
Neste capítulo são apresentados os detalhes do desenvolvimento dos algoritmos baseados em meta-heurísticas para o dimensionamento do sistema de *backup* híbrido. No estudo elaborado, propõe-se a aplicação de duas técnicas com contrastes em suas filosofias, a meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS), que realiza uma busca local por meio da melhoria de uma solução corrente com base nas soluções vizinhas, e o Algoritmo Genético (GA) que percorre regiões dispersas do espaço de soluções através de uma população diversificada de soluções e operadores genéticos.

Inicialmente, são descritos de forma geral a proposta de codificação para este problema, a função objetivo, os critérios de factibilidade das soluções candidatas, a forma de gerar soluções iniciais e os critérios de parada. Em sequência, os detalhes particulares de cada um dos algoritmos desenvolvidos considerando as meta-heurísticas utilizadas serão tratados de forma individual.

4.1 REPRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Tendo como referência o modelo matemático exposto no capítulo anterior, a determinação da capacidade do SBH depende do custo líquido de investimento associado ao correto dimensionamento das fontes que irão suprir as cargas em casos de contingências ou falhas no alimentador principal dos serviços auxiliares. Desta forma, uma proposta de solução para o problema original tem apenas três variáveis: o número de baterias (N^{bat}), o número de painéis fotovoltaicos (N^{pv}) e o número de turbinas eólicas (N^{wt}) que integram o sistema, organizadas em um vetor com três elementos, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Representação de uma proposta de solução.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 FUNÇÃO OBJETIVO

O objetivo desta aplicação é dimensionar a capacidade de um sistema híbrido para atender às cargas de forma contínua e financeiramente atrativa, reduzindo ao máximo os custos de investimento. Para isso, o problema de otimização proposto consiste em minimizar o custo líquido de instalação total, expresso na equação (1), respeitando as condições de operação impostas pela modelagem matemática apresentada no capítulo anterior, sendo estruturado ilustrativamente da seguinte maneira:

$$\text{minimizar } TC_s \quad (22)$$

sujeito a:

$$(2)-(17) \quad (23)$$

$$(20)-(21) \quad (24)$$

Observa-se que as parcelas do investimento total e da manutenção do sistema aumentam proporcionalmente de acordo com o número de equipamentos que o compõe; entretanto, a parcela de lucro obtida pela venda de energia produzida pelos recursos renováveis possibilita uma pequena redução no montante final. Sendo assim, espera-se que a solução encontrada tenha por preferência o máximo aproveitamento dos recursos renováveis que a região possa oferecer, uma vez que investir em baterias, mesmo que imprescindível para a autonomia do sistema, torna-se um investimento passivo e sem retorno monetário a longo prazo.

Por outro lado, a parcela associada à operação do gerador a diesel na função objetivo assegura o atendimento das cargas mesmo em situações de falha do sistema híbrido. Esse custo operacional está diretamente relacionado ao índice de disponibilidade oferecido pelo sistema, penalizando soluções que apresentem baixa capacidade de sustentar as cargas durante períodos de interrupção na alimentação principal. Assim, a inclusão desse custo visa garantir a confiabilidade do sistema, incentivando soluções que equilibrem eficiência econômica e resiliência operacional.

Visando uma maior robustez da solução encontrada perante as incertezas, a variabilidade climática, o horário de início e duração das faltas são incorporadas à análise do problema por meio do índice de disponibilidade, apresentado na equação (21).

Para estimar este índice é necessário utilizar um método estocástico que permita realizar uma previsão do estado de operação, considerando uma grande variedade de cenários de geração renovável e incerteza relacionada as faltas de energia ocorridas no alimentador. Assim, a técnica de simulações de Monte Carlo é utilizada. Este método matemático foi desenvolvido por Richmeyer e Von Neumann (1947), sendo inicialmente aplicado à natureza probabilística do coeficiente de difusão do nêutron em determinados materiais durante a Segunda Guerra Mundial. Seu nome é uma homenagem à cidade de Monte Carlo, famosa por seus cassinos e jogos de azar, pois a técnica de amostragem aleatória lembra os jogos de roleta.

O método tem sido aplicado em diversos estudos que envolvem tomadas de decisões por meio de estimativas de resultados sob condições de incerteza e que necessitam de análises estocásticas. Consiste em dividir um problema complexo em uma grande quantidade de simulações mais simples. Cada simulação utiliza números aleatórios para modelar as incertezas, sendo executada várias vezes para gerar uma grande quantidade de resultados. Estes resultados são analisados estatisticamente ao final, de forma a reduzir a incerteza relacionada ao problema, fornecendo soluções numéricas eficientes e robustas na avaliação de sistemas (Dias *et al.*, 2019; Roberts, 2016).

4.3 CRITÉRIO DE FACTIBILIDADE

O problema em questão requer que as variáveis de decisão N^{bat} , N^{pv} e N^{wt} assumam valores não negativos e inteiros, uma vez que não seria factível adquirir uma quantidade de equipamentos inferior a zero ou de forma fracionária.

4.4 PROPOSTA DE SOLUÇÃO INICIAL

Para inicialização dos algoritmos é necessário que uma solução inicial (para a busca em vizinhança variável) ou conjunto de soluções (para o algoritmo genético) seja entregue como ponto de partida para que sejam realizadas operações de busca e melhoria da solução incumbente. Neste estudo, a solução inicial ou o conjunto de soluções iniciais foram geradas aleatoriamente dentro de limites estabelecidos, entre 0 e 100, para cada variável da proposta de solução.

4.5 CRITÉRIOS DE PARADA

Neste trabalho foram escolhidos dois critérios de parada para os algoritmos: parar o processo após um número máximo de iterações (I^{max} ou NG^{max}) ou a partir de um número de iterações sem melhoria da função objetivo (W^{max}). Este critério máximo é determinado de acordo com a número de avaliações de qualidade de soluções candidatas, para que ambas as técnicas tenham a mesma capacidade de busca. Este critério pode variar de acordo com a técnica, pois o algoritmo genético, por exemplo, avalia a cada iteração uma quantidade de soluções candidatas igual ao tamanho de sua população. A maneira que esta definição foi adotada dentro de cada algoritmo será elucidado com particularidade para cada técnica na próxima seção.

4.6 ALGORITMOS DESENVOLVIDOS PARA O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO DE BACKUP

O termo meta-heurística foi introduzido por Glover (1986), sendo definido como uma heurística de nível superior que é empregada na resolução de problemas de maximização ou minimização sujeitos a determinadas restrições. De modo geral, as meta-heurísticas partem de uma abordagem intuitiva e inspirada em conhecimentos adquiridos que realizam manipulações, combinações e escolhas em um determinado espaço de soluções (viáveis ou não), a fim de localizar uma resposta ótima a um problema complexo, que muitas vezes não se conhece o seu modelo matemático exato, promovendo redução de tempo e esforço (Reis, 2013). As meta-heurísticas podem ser divididas em classes, de acordo com o tipo de procedimento que adotam, sendo as mais fundamentais: meta-heurísticas de relaxação, construtivas, busca local (ou por entornos) e evolutivas (Melián; Pérez; Vega, 2003).

4.6.1 Algoritmo genético

As técnicas evolutivas englobam uma família particular de modelos computacionais inspirados na teoria evolutiva do pesquisador britânico Charles Robert Darwin, que formulou o princípio de seleção natural. Em sua tese, os organismos que melhor se adaptam às condições do ambiente possuem maiores chances de reproduzir, gerando descendentes férteis que perpetuem suas características

genéticas aprimoradas (Reeves, 2003). Os primeiros conceitos desta técnica de computação inteligente foram introduzidos por Holland (1975) e denominados Algoritmo Genético (do inglês *Genetic Algorithm* – GA). Esta classe difere em relação às demais pela sua técnica de recombinação e a linha de conhecimento histórico que cria uma exploração orientada do espaço de soluções (Resende, 2014).

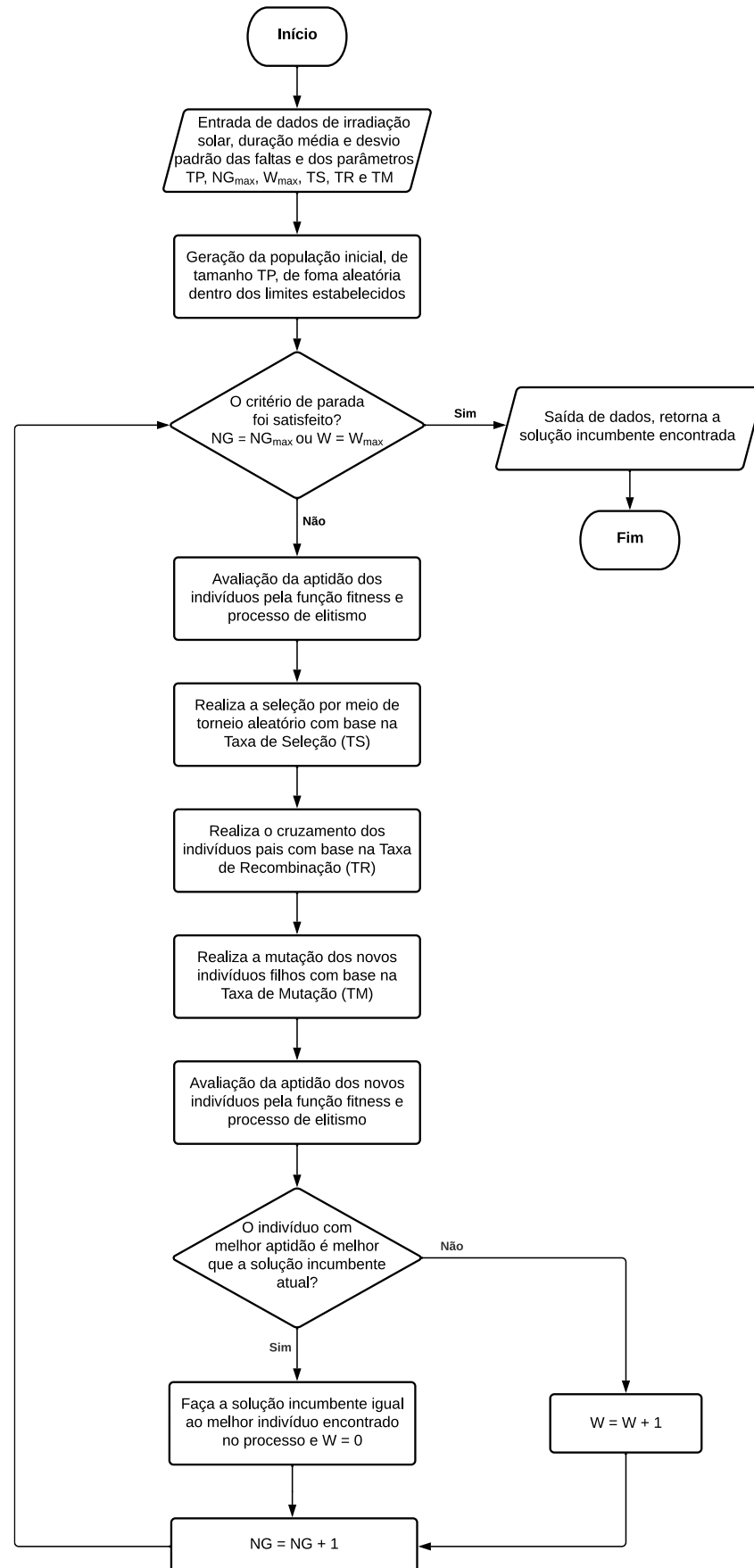
O algoritmo baseado na meta-heurística GA desenvolvido para este estudo pode ser observado no diagrama de fluxo apresentado na Figura 6. A inicialização ocorre por meio da criação de um conjunto de soluções aleatórias, de tamanho de população TP, dentro dos limites estabelecidos. Após isso, é realizada a verificação de qualidade cada um dos indivíduos pela função de adaptação ou *fitness*, a qual concede um valor para cada um dos indivíduos e os ordena desde a melhor solução para a pior.

Em seguida, o processo de seleção de indivíduos por torneio é adotado. Este processo consiste em escolher os indivíduos para reproduzir e perpetuar as suas características. São sorteados aleatoriamente dois indivíduos dentro de toda a população atual e gerado um número, também de forma aleatória, entre 0 e 1. O valor deste número é comparado com o valor atribuído para a taxa de seleção (TS), caso o valor seja menor ou igual que TS, o indivíduo mais adaptado dos escolhidos seguirá para a fase seguinte, caso contrário o outro indivíduo, de pior qualidade, terá a oportunidade de participar.

A próxima fase é conhecida como processo de recombinação, onde um par de indivíduos pais (indivíduos da população atual) trocam informações genéticas originando um par de indivíduos filhos (indivíduos da nova população). Esta recombinação ocorre por meio da divisão das soluções atuais em um ponto comum dentro da codificação proposta, onde cada indivíduo filho é uma combinação das partes dívidas de cada indivíduo pai que o originou.

O processo de recombinação também está atrelado à geração de um valor aleatório entre 0 e 1, que é comparado a uma taxa de recombinação (TR) inicialmente definida. Caso o valor sorteado seja menor ou igual a TR, o processo de recombinação ocorre e são gerados dois indivíduos filhos como combinação dos indivíduos pais para a próxima população. Em caso contrário, onde o valor aleatório é maior que TR, os indivíduos que entram na nova população são os próprios da população atual.

Figura 6 – Diagrama de fluxo para o algoritmo GA.



Fonte: Produção do próprio autor.

Em sequência, o operador da mutação é aplicado em todos os novos indivíduos com o objetivo de realizar uma pequena modificação na nova solução. A perturbação considerada no estudo é o acréscimo ou decréscimo de uma unidade de equipamento em apenas uma variável aleatória do vetor solução. Neste processo são sorteados dois números entre 0 e 1, o primeiro é comparado com o valor definido para taxa de mutação (TM), caso o valor seja menor ou igual o processo ocorre no indivíduo analisado, caso contrário não. O segundo valor é utilizado para definir se a pequena alteração será de acréscimo ($> 0,5$) ou decréscimo ($\leq 0,5$).

Ao final deste processo, o algoritmo terá uma nova população de soluções, na qual deve ser realizada novamente a verificação de qualidade de cada um dos indivíduos pela função de adaptação ou *fitness* e sua respectiva ordenação. O indivíduo mais adaptado da solução atual é comparado com a solução armazenada na solução incumbente. Caso ele seja melhor, a solução é atualizada e o contador de insucesso de melhoria da função objetivo (W) é zerado. Caso o melhor indivíduo seja pior que a solução incumbente do processo atual, W é atualizado como: $W \leftarrow W + 1$. O número da geração (NG) atual deve ser atualizado neste passo, $NG \leftarrow NG + 1$.

O algoritmo repetirá os processos de seleção, recombinação e mutação até que o critério de parada seja satisfeito. Seja pelo número da geração atual ter atingido o máximo de gerações possíveis ($NG = NG^{max}$) ou caso o contador de insucesso de melhoria da função objetivo atingir o valor máximo definido ($W = W^{max}$).

O número de iterações do algoritmo genético é definido pelo número de gerações (NG) que o algoritmo irá percorrer. A cada uma dessas gerações todas as funções objetivo da população de tamanho (TP) são avaliadas no processo de elitização. Dessa forma a quantidade total de avaliações de qualidade de solução da meta-heurística é determinada como $NG \cdot TP$. Os valores das variáveis que controlam os operadores genéticos são informados ao algoritmo antes do processo de inicialização, como dados de entrada.

4.6.2 Busca em vizinhança variável

Outra classe importante de meta-heurísticas são as que realizam busca local, constituindo uma estratégia aplicada a problemas de otimização combinatória que busca a melhoria de uma solução corrente através da exploração de suas vizinhas.

Geralmente, este tipo de método começa a partir de uma solução inicial onde são examinadas respostas vizinhas como candidatas a resolução do problema. Caso seja encontrada uma candidata com uma solução melhor que a incumbente, o processo de busca é reiniciado até que um valor ótimo local seja identificado e não seja possível encontrar outra concorrente superior dentro dos critérios de parada estabelecidos (Costa, 2016).

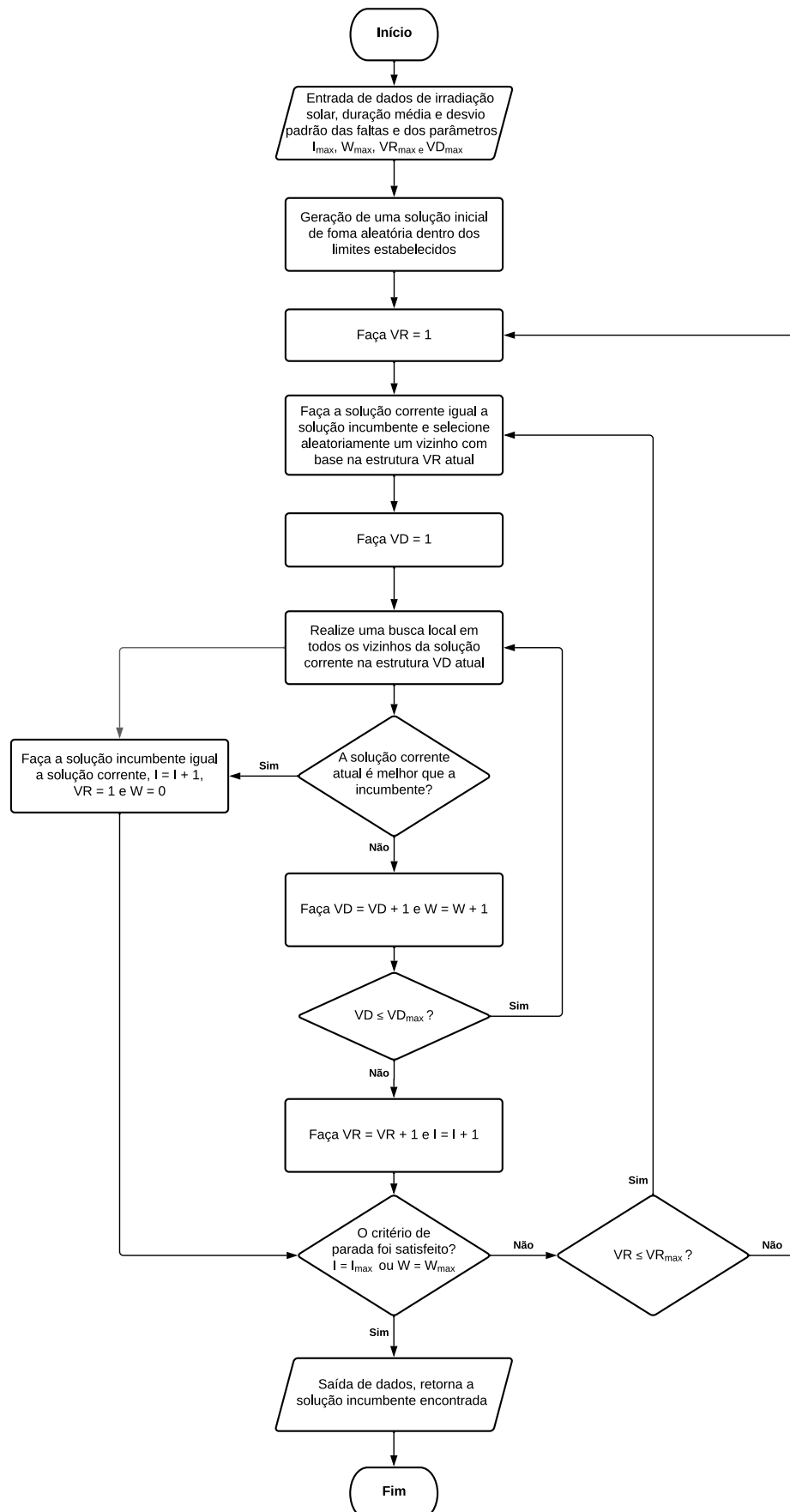
Proposta por Mladenovic e Hansen (1997), a meta-heurística de Busca em Vizinhaça Variável (do inglês *Variable Neighborhood Search* – VNS) é uma técnica de busca local que possui o diferencial de realizar trocas sistemáticas de vizinhanças gradativamente mais distantes da solução incumbente, com o objetivo de explorar mais o espaço de soluções e escapar de ótimos locais. Muitas vezes, os algoritmos baseados nesse tipo de meta-heurística requerem poucos parâmetros, tornando sua implementação mais simplificada e eficiente, assim como oferecendo excelentes resultados (Possagnolo, 2015). A idealização desta técnica parte de três propriedades importantes:

1. Uma solução ótima local de uma estrutura de vizinhança não é necessariamente a mesma solução ótima local para outra estrutura de vizinhança;
2. Uma solução ótima global é uma ótima local de todas as estruturas de vizinhança possíveis;
3. Em alguns problemas, ótimos locais com relação a uma ou várias estruturas de vizinhança são relativamente próximos uns dos outros.

Na literatura existem várias propostas de algoritmos inspirados na VNS, que podem ser utilizados de forma independente, combinada ou em conjunto com outras classes de meta-heurísticas. Para este trabalho, foi escolhida a aplicação do algoritmo VNS Geral (GVNS) que é uma técnica combinada de duas outras estruturas clássicas do VNS, o VNS de Descida (VND) e o VNS Reduzido (RVNS).

Este algoritmo tem sido aplicado com sucesso na literatura e alcançado resultados significativos, pois ele combina estruturas de busca local intensa (VND), que realizam uma varredura em busca da melhor solução vizinha, com a busca aleatória (RVNS), para explorar vizinhos mais distantes da solução corrente para fugir de ótimos locais. O algoritmo elaborado para este estudo é exposto na forma de diagrama de fluxo na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de fluxo para o algoritmo VNS.



Fonte: Produção do próprio autor.

Inicialmente, deve ser informado ao algoritmo o número de estruturas de vizinhança do tipo RVNS e VND e o seu critério de parada como parâmetros de entrada. A obtenção da solução inicial ocorre de forma aleatória dentro dos limites estabelecidos na seção anterior. Após a inicialização, a primeira estrutura de vizinhança RVNS ($VR = 1$) é aplicada na solução inicial, sendo escolhida aleatoriamente uma solução candidata nesta vizinhança, que pode ser de melhor ou pior qualidade, tornando-a a solução corrente (X').

Em seguida a primeira estrutura de VND ($VD = 1$) é aplicada na solução corrente com o objetivo de encontrar a melhor solução vizinha nesta estrutura (X''). Caso o X'' seja melhor que X' , é realizada a substituição da solução corrente para o melhor vizinho ($X' = X''$), o contador de iteração é incrementado ($I = I + 1$), o contador de insucesso de melhoria da função objetivo (W) é zerado e a primeira estrutura VND é reiniciada no novo X' até que não se possam mais encontrar vizinhos melhores nesta estrutura.

Caso X'' seja pior que X' , o contador de iteração é incrementado ($I = I + 1$), W é incrementado ($W = W + 1$) e a estrutura de VND seguinte é aplicada ($VD = VD + 1$). Este processo se repete sucessivamente até que seja encontrado o melhor vizinho de todas as soluções VND ($VD = VD^{max}$).

Quando a melhor solução para todas as estruturas VND consideradas ($VD = VD^{max}$) é encontrada, é realizado novamente o processo de agitação, ou seja, é aplicado a próxima estrutura de RVNS ($VR = VR + 1$) e o processo de busca através das estruturas VND é reinicializado ($VD = 1$). Caso todas as estruturas de RVNS já tenham sido visitadas anteriormente ($VR = VR^{max}$) e o processo de parada não tenha sido alcançado ainda, basta retornar à primeira estrutura de vizinhança do tipo RVNS ($VR = 1$) e continuar a busca.

O algoritmo sempre irá alternar entre o processo de agitação e busca local intensa em torno da melhor solução encontrada até o momento (solução incumbente) e irá finalizar quando os critérios de parada forem satisfeitos.

Neste estudo, foram implementadas as seguintes estruturas de vizinhança do tipo RVNS no algoritmo desenvolvido:

- VR_1 : Diminuir o valor de uma variável aleatória, em até α unidades, mantendo as outras variáveis fixas;

- VR_2 : Diminuir o valor de duas variáveis aleatórias, em até α unidades, mantendo a outra variável fixa;
- VR_3 : Diminuir o valor das três variáveis em até α unidades;
- VR_4 : Aumentar o valor de uma variável aleatória, em até α unidades, mantendo as outras variáveis fixas;
- VR_5 : Aumentar o valor de duas variáveis aleatórias, em até α unidades, mantendo a outra variável fixa;
- VR_6 : Aumentar o valor das três variáveis em até α unidades;
- VR_7 : Diminuir o valor de uma variável aleatória em até α unidades, aumentar o valor de uma segunda variável aleatória em até α unidades, mantendo a terceira variável fixa;
- VR_8 : Diminuir o valor de uma variável aleatória em até α unidades, aumentar o valor das demais variáveis em até α unidades;

Para encontrar uma solução candidata atual dentro das estruturas RVNS, um número inteiro do intervalo $[0, \alpha]$ é selecionado aleatoriamente e adicionado ou subtraído à variável que está sendo modificada na solução atual. A solução resultante será a solução corrente após o processo de agitação.

Em relação às estruturas de vizinhança do tipo VND, foram consideradas as seguintes estratégias de busca:

- VD_1 : Diminuir unitariamente uma única variável aleatória da solução, até o valor absoluto de β unidades;
- VD_2 : Aumentar unitariamente uma única variável aleatória da solução, até o valor absoluto de β unidades;

Por sua vez, as estruturas do tipo VND exploram todas as soluções vizinhas da solução corrente, diminuindo ou aumentando unitariamente uma única variável da solução encontrada pela estrutura RVNS, em uma unidade de cada vez, até o valor absoluto definido por β .

5 TESTES E RESULTADOS OBTIDOS

A eficiência dos métodos propostos foi avaliada e está apresentada neste Capítulo por meio da análise do dimensionamento de duas configurações do SBH. A primeira configuração considera que o SBH pode ser composto somente por geração fotovoltaica e baterias, análogo ao estudo realizado por Tabares *et al.* (2020). Já na segunda configuração estudada, a inclusão de geração eólica no sistema híbrido é investigada como uma alternativa para redução do número de baterias, melhora no índice de indisponibilidade e redução de custos. Além de serem considerados os custos associados à operação do gerador a diesel.

Os parâmetros dos algoritmos foram definidos arbitrariamente, mantendo-se os mesmos nos dois casos analisados neste estudo, sendo que para o algoritmo GA utilizou-se: $TS = 0,85$, $TR = 0,95$, $TM = 0,05$, $TP = 20$ e $NG^{max} = 1000$. Já para o algoritmo VNS foram usados: $\alpha = 20$, $\beta = 10$ e $I^{max} = 1000$. Ademais, caso os algoritmos não consigam uma melhoria da função objetivo da solução corrente em até 200 iterações ($W^{max} = 200$), o processo de busca será finalizado. Cabe ressaltar ainda que ambos os algoritmos foram desenvolvidos e executados no ambiente de programação do Matlab®, em um computador com processador AMD Ryzen 7 5800X com 3,80 GHz e 32 GB de RAM.

O desempenho dos algoritmos desenvolvidos foi avaliado através de uma sequência de repetições de execução, assumindo uma semente fixa para gerar os números aleatórios usados nas simulações de Monte Carlo. Para a análise, foi considerada a qualidade de solução encontrada ao final de cada execução e tempo médio de processamento. Ao final, um teste estatístico não-paramétrico é utilizado para comprovar a divergência de desempenho dos métodos.

5.1 DADOS CONSIDERADOS

Para que seja possível realizar a comparação entre os resultados obtidos pelas meta-heurísticas com a literatura, os mesmos dados e condições propostas pelos autores em Tabares *et al.* (2020) devem ser adotados. A estimativa das cargas requeridas pelos serviços auxiliares pelos autores é mostrada na Tabela 1. Com base nesses dados e assumindo que o tempo de disponibilidade do sistema híbrido pode

ser dividido em quatro intervalos, conforme ilustrado na Figura 3, o fator de potência global é calculado conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 1 – Cargas estimadas para os serviços auxiliares em subestações.

Descrição da Carga	Tipo de Carga	Potência Nominal (W)	Potência Total (W)	Fator de Carga
Monitorização	Permanente	70,00	74,90	0,005
Disjuntor	Temporária	5.000,00	5.850,00	0,362
Proteções	Permanente	250,00	235,00	0,015
Medição	Permanente	120,00	139,20	0,009
Comunicação	Permanente	320,00	291,20	0,018
Iluminação e climatização	Permanente	10.000,00	10.300,00	0,637
Motores de acionamento	Temporária	400,00	396,00	0,025
Bobinas de acionamento	Instantânea	6.200,00	7.440,00	0,460

Fonte: Tabares *et al.* (2020), p. 15.

Os fatores de carga para os respectivos tipos de cargas (permanentes e temporárias) foram divididos pelos autores em intervalos, sendo eles: cargas temporárias são compreendidas nos períodos 2 e 4, em que a potência do disjuntor está no intervalo 2 e os motores de acionamento estão no período 4. Cabe ressaltar que para o cálculo da taxa de ocupação global, as cargas instantâneas não são consideradas pelos autores, mas estão incluídas no dimensionamento do inversor. Dessa forma, a carga de potência equivalente e constante determinada pelos autores é igual a 11.918,70 W, que é aproximada para 12 kW.

Tabela 2 – Cálculo de bases do fator de potência global.

Período	% de Tempo	Fator de Carga	Fator de Carga Global
1	60	0,689	0,738
2	15	0,998	
3	15	0,689	
4	10	0,713	

Fonte: Tabares *et al.* (2020), p. 15.

O painel fotovoltaico considerado é da marca Panasonic, modelo VBHN330SJ47. Cada painel possui 0,33 kWp, um custo por unidade igual a US\$ 312/painel e 1% do custo de manutenção por ano do custo total de instalação,

considerando o setor comercial brasileiro em 2018 (IRENA, 2019). Os dados requeridos para a obtenção da potência de saída para o modelo de painel Panasonic, são apresentados na Tabela 3, com base na ficha técnica de Panasonic (2019).

Tabela 3 – Informações do painel fotovoltaico.

Característica	Dados
Custo	312 (\$/unidade)
K^v	-0,174 (V/°C)
K^i	1,82 (mA/°C)
N^{OT}	44 (°C)
V^{oc}	65,8 (V)
I^{sc}	4,89 (A)
V^{MPPT}	58,0 (V)
I^{MPPT}	5,7 (A)

Fonte: Panasonic (2019).

As baterias de lítio-óxido-mangânês-cobalto, também conhecida como NMC, foram consideradas pelos autores do estudo devido à sua maior densidade de energia (735 Wh/L) e à sua baixa autodescarga de 0,1% ao dia (Ralon, 2017). Essas baterias têm uma capacidade modular de 2 kWh, um custo por kWh igual a US\$ 420/kWh, uma profundidade de descarga igual a 90 % e uma eficiência de carga e descarga de 95%.

O custo do inversor bidirecional é de US\$ 105/kW, sugerido por Ralon (2017). Além disso, o custo de manutenção para as baterias e inversores é assumido como 1,5% ao ano do custo de instalação. Adotando-se uma vida útil de 20 anos; os custos de manutenção dos equipamentos são calculados usando uma taxa de juros de 6% e o preço da energia é considerado US\$ 0,05/kWh, como feito por Tabares *et al.* (2020).

Para o cálculo do índice de disponibilidade se considera que as durações de contingência seguem uma distribuição normal com média igual a 5 horas e desvio padrão igual a 3 horas (Tabares *et al.*, 2020). São considerados 1.200 perfis de irradiação fotovoltaica, com resolução minuto a minuto, os quais foram gerados usando a ferramenta desenvolvida por Richardson e Thomson (2019), correspondendo a 100 perfis para cada mês. Os dados de temperatura com resolução horária por foram obtidos a partir da ferramenta online Renewables Ninja (Staffell; Pfenninger, 2016), a partir das informações geográficas da cidade de São Paulo (20.4210°S;51.3328°W).

A ferramenta online Renewables Ninja (Staffell; Pfenninger, 2016) foi utilizada também para obter os dados da velocidade do vento, com resolução horária, para as informações geográficas da cidade de São Paulo (20.4210°S;51.3328°W), utilizada especificamente a segunda configuração dimensionada neste estudo. A turbina eólica de pequeno porte considerada neste estudo é baseada no modelo Ryse Energy de 10 kW, projetada especificamente para aplicações de microrredes para fornecer cargas de forma ilhada, sendo capaz de operar nos modos *on-grid* e *off-grid*. O preço da turbina eólica é de US\$ 1.000 por kW e os parâmetros necessários para determinação da energia produzida pelas turbinas são descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados para a turbina eólica e o inversor considerado no estudo.

Característica	Turbina Eólica	Inversor
Custo de aquisição	US\$10.000/unidade	US\$141,49/kW
Custo de manutenção	1,5%	1,0%
P_{wt_nom} (kW)	10	-
v^r (m/s)	9	-
\underline{v} (m/s)	2	-
\overline{v} (m/s)	30	-

Fonte: Ryse Energy (2023).

5.2 VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS DESENVOLVIDOS

Tendo o objetivo de avaliar as soluções encontradas pelas técnicas desenvolvidas por meio de uma comparação com resultados encontrados na literatura, será adotado o mesmo padrão de simulação utilizado por Tabares *et al.* (2020) e o número de turbinas eólicas (N^{wt}) da solução foi fixado em zero. No caso I do estudo desenvolvido pelos autores, foram utilizadas 5.000 simulações de Monte Carlo para determinar a indisponibilidade do sistema, sendo que este não deveria ser inferior a 0,003%. Dessa forma, uma restrição adicional será considerada para garantir esta consideração da literatura, conforme apresentado na equação (25).

$$D_s^{index} \geq \underline{D}^{index} \quad (25)$$

Desta forma o valor definido para o índice mínimo de disponibilidade que o sistema híbrido deve apresentar (\underline{D}^{index}) será de 99,997%.

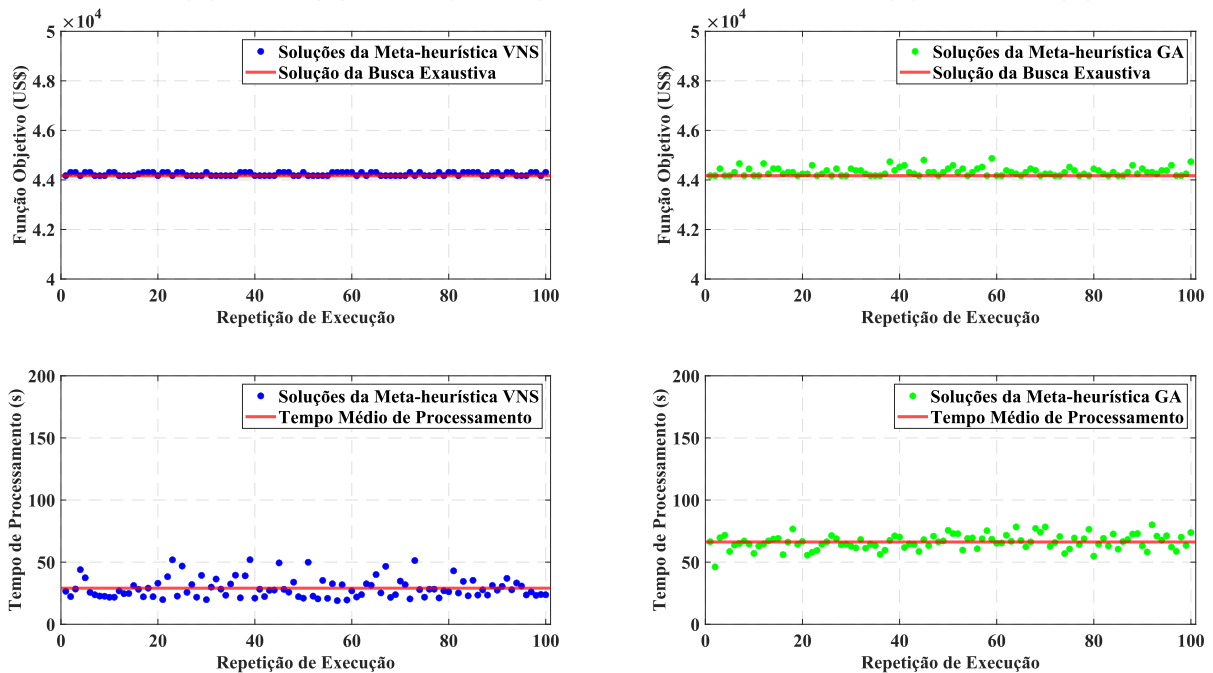
5.2.1 Resultado para o dimensionamento

Ambas as meta-heurísticas utilizadas obtiveram sucesso ao encontrar o ótimo global apresentado na literatura com custo total líquido para o sistema de US\$44.172,00, considerando os custos de investimento, manutenção e receita pela geração renovável ao longo da vida útil do sistema. A solução de dimensionamento do SBH é composta por 48 unidades de baterias (96,00 kWh) e 51 painéis fotovoltaicos (16,83 kW). O índice de disponibilidade para os serviços auxiliares é de 99,997%.

5.2.2 Análise do desempenho dos métodos

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos através de uma sequência de 100 repetições de execuções de cada algoritmo desenvolvido. A Figura 8 apresenta os valores da função objetivo e o tempo de processamento para cada execução independente das meta-heurísticas (VNS e GA).

Figura 8 – Desempenho dos algoritmos VNS e GA em relação: a função objetivo do VNS (a) e GA (b), o tempo de processamento do VNS (c) e do GA (d).



Fonte: Produção do próprio autor.

É possível observar pela análise do gráfico que ambas as técnicas conseguem encontrar soluções de boa qualidade em quase todas as suas execuções, na qual a taxa de acerto da solução ótima global registrada foi de 54% para o VNS e de 32% para o GA. Já em relação ao tempo de processamento, pode-se observar que o VNS conseguiu encontrar soluções de forma mais ágil que o GA, apresentando um tempo médio de processamento de 29,06 segundos, contra 66,24 segundos para o GA. De maneira geral, os algoritmos desenvolvidos conseguiram solucionar o problema proposto de maneira eficiente e em poucos segundos, sem precisar analisar todas as combinações possíveis.

A análise de dispersão dos resultados, obtidos a partir de execuções de repetição independente com ponto inicial aleatório, é utilizada para quantificar e comparar o desempenho dos métodos no problema em estudo. A Tabela 5 apresenta as métricas utilizadas, como amplitude, variância, desvio padrão, intervalo interquartil e coeficiente de variação, que fornecem diferentes perspectivas sobre a variabilidade dos dados. A partir da análise de dispersão apresentada, é possível identificar diferenças numéricas para o desempenho dos métodos desenvolvidos. O GA apresenta maior variabilidade em seus resultados, com amplitude, variância, desvio padrão e intervalo interquartil relativamente maiores que os do VNS. Este fato sugere que o VNS apresente maior consistência em seus resultados, mesmo partindo de pontos iniciais aleatórios, o que denota uma maior aderência ao problema em estudo.

No entanto, para confirmar que a variação entre os métodos é estatisticamente significativa, um teste de hipóteses deve ser considerado. Inicialmente o teste de Shapiro-Wilk deve ser utilizado para determinar se os dados seguem uma distribuição normal, com a finalidade de determinar o teste de comparação amostral mais indicado para a análise (Shapiro; Wilk, 1965). Conforme os dados apresentados na Tabela 5, ambos os conjuntos de dados obtidos pelo teste de repetição não seguem uma curva de distribuição normal ($p < 0,01$). A partir desta informação, o teste não paramétrico de postos sinalizados de Wilcoxon é considerado a opção ideal para a análise de amostras relacionadas ou medidas repetidas (Cetinbas; Tamyurek; Demirtas, 2022). Os resultados para este teste de hipótese, considerando uma margem de erro de 5%, confirmam que há uma diferença estatística significativa entre os desempenhos observados ($Z_{val} = -5,13$; $p < 0,05$).

Tabela 5 – Análise de dispersão para o primeiro caso de estudo.

Meta-heurística	VNS	GA
Amplitude	136	701
Variância	4.587,03	26.746,80
Desvio padrão	67,73	163,54
Intervalo interquartil	136	275
Coefficiente de variação	0,15%	0,37%
Teste Shapiro-Wilk	0,001	0,001
Teste pareado de Wilcoxon	2,94x10 ⁻⁰⁷	

Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 RESOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Nesta seção, o modelo completo proposto, que considera turbinas eólicas e o custo de operação dos geradores a diesel, é utilizado. Para isso, o custo de operação do gerador a diesel de US\$0,03201/kW por hora acionado é considerado, conforme proposto por Nejabatkhah *et al.* (2018). Este custo será adicionado à função objetivo caso o SBH não consiga suprir a demanda durante todo o período de interrupção, servindo como penalização pelo não fornecimento de energia aos serviços auxiliares.

Dessa forma, o modelo não necessita da imposição de um índice mínimo de disponibilidade apresentada na equação (25), pois o custo de operação do gerador a diesel, ao penalizar a falta de atendimento à demanda, influencia diretamente o índice de disponibilidade do sistema, estabelecendo uma métrica natural para soluções de péssima qualidade.

Além disso, para garantir uma amostragem mais robusta, o número de simulações de Monte Carlo (*SMC*) foi corrigido para 6.000, sendo divididas igualmente entre os 12 meses do ano, resultando em 500 simulações por mês. Esta medida tem o objetivo de garantir uma maior aderência e participação justa entre as condições climáticas das diferentes estações do ano no dimensionamento proposto.

Além dos métodos desenvolvidos, o método de busca exaustiva também foi executado neste estudo de caso, com o objetivo de verificar se as meta-heurísticas foram capazes de encontrar o ótimo global para o sistema proposto e comparar o tempo de processamento necessário pelos diferentes métodos de maneira justa, utilizando a mesma máquina.

5.3.1 Resultado para o dimensionamento

Novamente, ambas as meta-heurísticas utilizadas neste estudo foram capazes de encontrar o ótimo global para o sistema proposto, com custo total líquido para o sistema de US\$33.588,00, considerando os custos de investimento, manutenção, receita pela geração renovável e operação do gerador a diesel ao longo da vida útil do sistema. A solução de dimensionamento do SBH é composta por 16 unidades de baterias (32,00 kWh) e 41 painéis fotovoltaicos (13,53 kW) e 7 turbinas eólicas (70,00 kW). O índice de disponibilidade para os serviços auxiliares é de 99,977%. Do custo total líquido para o sistema híbrido, US\$863,31 representam o custo, em valor presente líquido, do acionamento da geração a diesel como sistema secundário de *backup*, utilizado em situações emergenciais para garantir o suprimento das cargas.

5.3.2 Solução pelo método de busca exaustiva

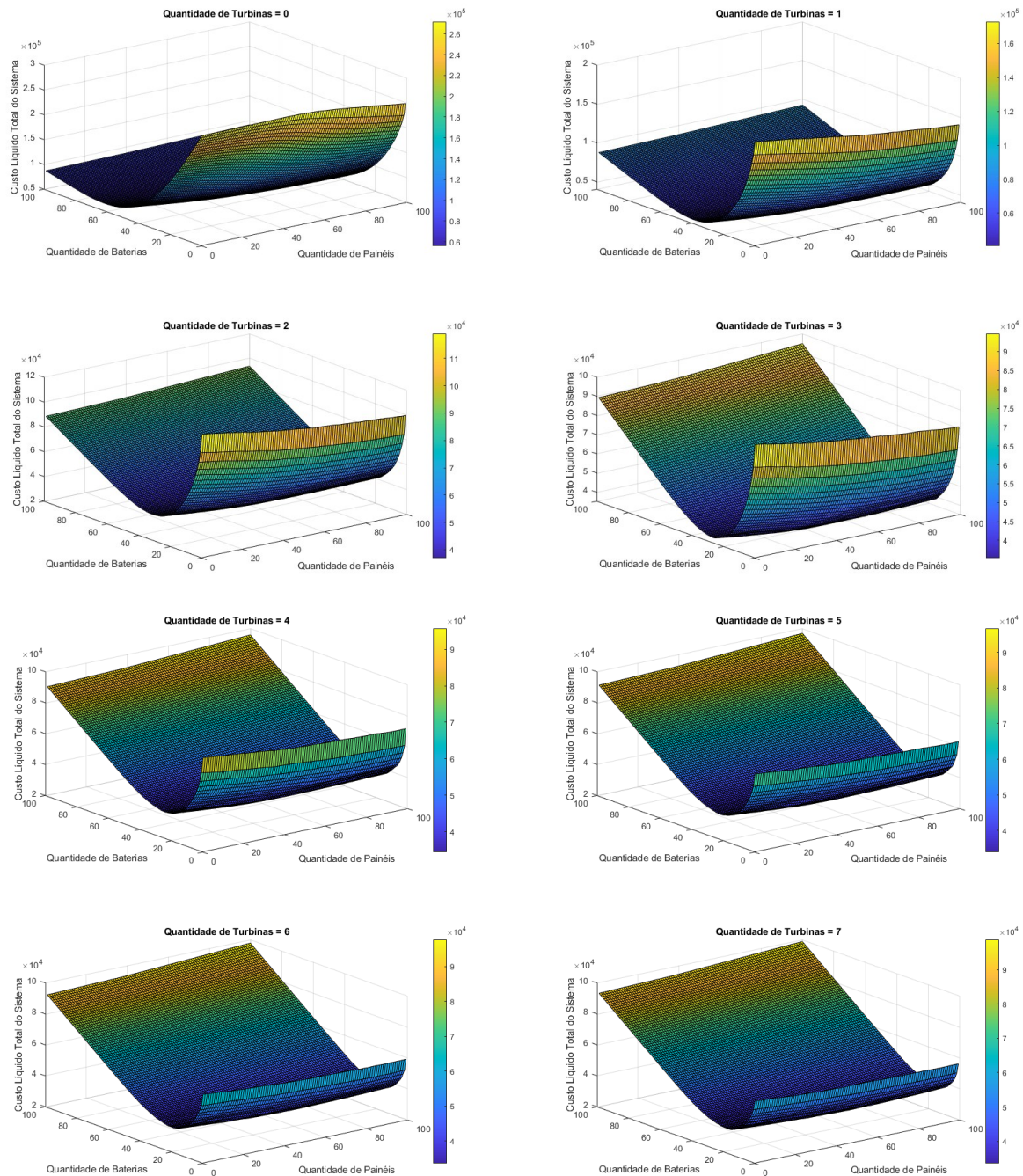
O método de busca exaustiva foi executado para avaliar todas as possíveis combinações de soluções para o modelo proposto, no intervalo $[0,100]$ para as variáveis N^{bat} , N^{pv} e N^{wt} . Assumindo que cada variável só pode assumir números inteiros (critério de factibilidade) cada variável tem 101 possibilidades. Dessa forma o número total de combinações que o método avaliou foram 1.030.301 alternativas. O tempo de execução total para o processo foi de 703.414 segundos, equivalente a aproximadamente 8 dias, 3 horas, 23 minutos e 34 segundos.

Os gráficos apresentados na Figura 9 mostram os resultados da busca exaustiva para o modelo proposto de sistema, variando a quantidade de turbinas eólicas, baterias e painéis fotovoltaicos. Cada gráfico representa um número fixo de turbinas (0 a 7) e mostra a variação do custo líquido total do sistema em função da quantidade de baterias e painéis fotovoltaicos.

No primeiro gráfico são ilustradas as soluções para o sistema sem turbinas eólicas, ou seja, composto apenas por baterias e painéis fotovoltaicos. Observa-se que o custo líquido total é maior nas extremidades do gráfico, onde há poucas baterias e poucos painéis. A região de menor custo (coloração mais fria) se concentra em uma faixa intermediária de quantidade de baterias e painéis, indicando um ponto de equilíbrio entre os dois componentes. Também se ressalta que a variação da

quantidade de baterias possui maior impacto na função objetivo que os painéis fotovoltaicos.

Figura 9 – Efeito da quantidade de turbinas no custo total líquido do sistema através da busca exaustiva.



Fonte: Produção do próprio autor.

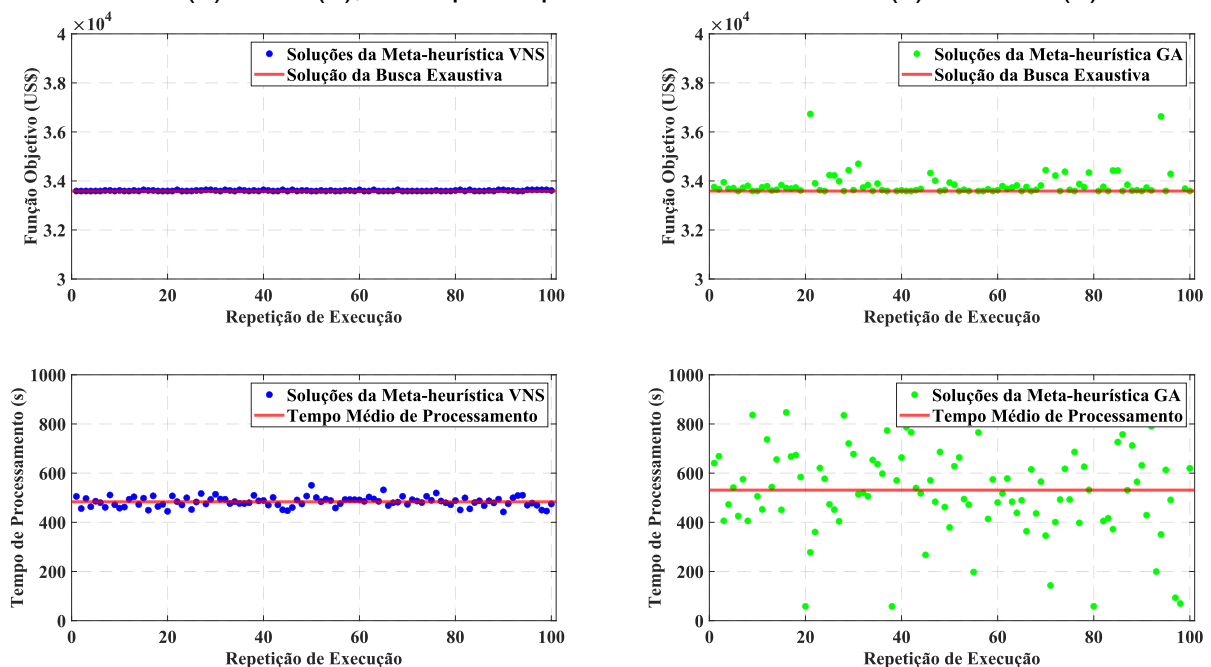
A partir do segundo gráfico, nota-se que a inclusão de turbinas eólicas impacta significativamente o perfil de custos do sistema. Observa-se uma redução geral nos

valores em comparação com o primeiro gráfico, evidenciando o benefício da geração eólica na diminuição do custo total do sistema. Igualmente, a área de menor custo se expande, sugerindo que há mais combinações de baterias e painéis que resultam em valores competitivos. As ilustrações evidenciam que a adição de turbinas eólicas não apenas reduz o custo total do sistema, mas também aumenta a flexibilidade na escolha da quantidade de baterias e painéis, permitindo otimizar o sistema para diferentes necessidades e condições. Em suma, a geração eólica se mostra uma alternativa promissora para sistemas híbridos, oferecendo tanto economia quanto versatilidade e resiliência.

5.3.3 Análise do desempenho dos métodos

Em sequência, na Figura 10, são apresentados os resultados para o desempenho os dois algoritmos desenvolvidos através de um processo de 100 repetições de execução para cada técnica (VNS e GA).

Figura 10 – Desempenho dos algoritmos VNS e GA em relação: a função objetivo do VNS (a) e GA (b), o tempo de processamento do VNS (c) e do GA (d).



Fonte: Produção do próprio autor.

Em relação à função objetivo, o VNS demonstra uma notável consistência, com a maioria dos resultados agrupados em uma faixa de valores próximos à solução ótima

da Busca Exaustiva, apresentando 20% de acerto da solução ótima global. Apesar de alguns pontos se distanciarem um pouco da faixa principal, indicando convergência para soluções subótimas em algumas execuções, o VNS se mostra robusto na busca pelo ótimo global. O GA, por sua vez, apresenta uma maior dispersão nos valores da função objetivo, com pontos mais distantes da solução da Busca Exaustiva, embora tenha obtido 16% de acerto da solução ótima global. Essa variabilidade sugere que o GA é menos consistente que o VNS para este problema em estudo, com maior chance de convergência para soluções subótimas.

Em relação ao tempo de processamento, o VNS também tem seu destaque evidenciado apresentando uma média de 483,51 segundos para convergir. Já o GA, além de apresentar uma média mais elevada, de 531,02 segundos, o algoritmo também exibe uma maior variabilidade no tempo de processamento, com alguns pontos indicando tempos significativamente maiores. Estes padrões se devem principalmente as características aleatórias do método.

As afirmações anteriores são apoiadas pela análise de dispersão de dados apresentada na Tabela 6, onde observa-se a notável diferença entre as métricas dos métodos GA e VNS aplicados ao problema de dimensionado do SBH. Para este segundo caso de estudo, o GA apresentou uma divergência entre os seus resultados finais ainda maiores que no caso anterior. O VNS novamente apresenta excepcionais índices de convergência para soluções de alta qualidade, com consistência nos resultados finais de cada execução.

Além disso, os testes de Shapiro-Wilk, para análise de normalidade, e de postos sinalizados de Wilcoxon também atestam que os dados para o desempenho dos métodos possuem diferença estatística significativa ($Z_{val} = -6.82$; $p < 0,05$), conforme os dados apresentados na Tabela 6.

Além disso, também deve-se destacar o incremento no tempo de processamento observado entre o primeiro caso de estudo e o segundo (de aproximadamente vinte vezes para o VNS e dez vezes para o GA). Fato que se deve pela adesão das turbinas eólicas e a análise de seus respectivos cenários de geração. Em síntese, ambas as meta-heurísticas estudadas demonstraram capacidade de encontrar soluções próximas do ótimo global e em um tempo razoável para o problema em questão. No entanto, o método baseado em VNS se destaca pela maior consistência nos resultados da função objetivo e menor variabilidade no tempo de processamento.

Tabela 6 – Análise de dispersão para o segundo caso de estudo.

Meta-heurística	VNS	GA
Amplitude	48	50.386
Variância	351,82	93.501.026,92
Desvio padrão	18,76	9.669,60
Intervalo interquartil	22	379
Coeficiente de variação	0,06%	26,52%
Teste Shapiro-Wilk	0,001	0,001
Teste pareado de Wilcoxon	9,26x10 ⁻¹²	

Fonte: Produção do próprio autor.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma nova abordagem para o problema de dimensionamento de um sistema de *backup* híbrido (SBH) para o atendimento de serviços auxiliares em subestações em situações de contingência. A aplicação de algoritmos baseados em meta-heurísticas apresenta algumas vantagens em relação aos métodos atualmente propostos na literatura para este problema, como a possibilidade de trabalhar com vários cenários de geração renovável de maneira estocástica, sem a perda de representatividade e granularidade dos dados como em modelos de otimização matemática que podem exigir simplificações para manter a tratabilidade, e na redução do tempo de processamento e esforço computacional, necessitando avaliar menos combinações que em métodos exaustivos, por exemplo. Todavia, possui a desvantagem de não garantir a solução ótima global e, em certos casos, não garante que o mesmo ótimo local seja encontrado todas as vezes que o algoritmo for executado (considerando pontos iniciais diferentes).

O modelo matemático, classificado como de programação linear inteira mista, emprega três variáveis de decisão para representar o sistema. A função objetivo, embora de cálculo direto a partir do custo líquido total do sistema, apresenta o desafio de avaliar soluções sob a incerteza inerente à geração renovável, momento de início e à duração das faltas. Essa avaliação é crucial, visto que o sistema deve operar com a menor probabilidade de falhas possível, dada a importância das cargas do sistema elétrico que irá suportar. A aplicação de meta-heurísticas, como o Algoritmo Genético (GA) e a Busca em Vizinhança Variável (VNS), justifica-se pela necessidade de explorar um espaço de soluções mais amplo, visando configurações que permitam a integração de outras fontes de geração renovável, como a eólica. Essa integração possibilita a criação de sistemas híbridos mais atrativos, adaptáveis à disponibilidade de recursos específicos do local de instalação, promovendo soluções mais eficientes e sustentáveis.

A partir da possibilidade de adesão de turbinas eólicas ao problema original, analisado no segundo caso, observa-se o benefício da integração de diferentes fontes renováveis dentro do mesmo sistema. Esta nova variável permitiu que o número de baterias tivesse uma pequena diminuição, bem como no custo total do sistema, pois a longo prazo o lucro pela venda de energia excedente produzida pelas turbinas também reduz o valor da função objetivo. Além disso, a geração eólica não opera

apenas em uma faixa de horários restrita durante o dia, como a geração fotovoltaica, o que também auxilia na resiliência da do sistema híbrido.

Ademais, a inclusão do custo de operação do gerador a diesel como sistema de *backup* secundário permitiu que o índice de disponibilidade do SBH fosse definido endogenamente pelo modelo, em vez de ser imposto como uma restrição mínima. Essa abordagem, mais alinhada com a realidade operacional, possibilita a avaliação e penalização de soluções de baixa qualidade no suprimento das cargas, refletindo o custo real da indisponibilidade. Afinal, em situações de falha do sistema híbrido proposto, uma fonte auxiliar deve ser acionada para garantir a continuidade e ininterrupção do fornecimento de energia aos serviços auxiliares, e o modelo proposto captura essa dinâmica de forma precisa.

Em relação ao desempenho dos algoritmos desenvolvidos pela análise dos resultados obtidos para o primeiro caso de estudo, que é idêntico ao problema abordado pela busca exaustiva proposta na literatura, indica que quase todas as soluções encontradas pelos dois algoritmos desenvolvidos foram monetariamente atrativas, assegurando o mesmo índice de disponibilidade exigido para a subestação em casos de falta. Este fato denota que, embora não garantam a melhor solução em todas as suas execuções, devido à natureza estocástica das variáveis, as meta-heurísticas conseguem ter um bom desempenho de forma geral, pois focalizam a sua busca de forma mais intensa na região com maior probabilidade de encontrar soluções de boa qualidade (subótimos).

A aplicação dos algoritmos desenvolvidos para o segundo caso de estudo, conclui que ambas as meta-heurísticas demonstraram capacidade de encontrar soluções próximas do ótimo global para o modelo em questão. No entanto, o VNS se destaca pela maior consistência nos resultados da função objetivo e menor variabilidade no tempo de processamento, sugerindo uma robustez superior em comparação com o GA para este problema específico. A escolha da melhor meta-heurística dependerá das características do problema. Neste estudo, a técnica de busca por vizinhanças prevaleceu devido as características do problema, onde não se observou a presença de inúmeros vales e picos no espaço de soluções para serem explorados.

Embora o tempo de processamento para encontrar a solução seja importante, ele não é a principal preocupação neste problema de planejamento. Isso porque, em problemas de planejamento, o foco principal reside na qualidade da solução e na

garantia de que a melhor decisão seja tomada, mesmo que isso demande um tempo de processamento maior. No entanto, métodos como a busca exaustiva podem apresentar tempos de processamento excessivamente elevados, especialmente quando novas variáveis, como fontes de geração renovável ou armazenamento, são adicionadas ao modelo. Essa limitação se deve à natureza combinatória do problema, onde o número de soluções possíveis cresce exponencialmente com a adição de novas variáveis. Nesse sentido, a aplicação de meta-heurísticas se justifica pela necessidade de encontrar um equilíbrio entre a qualidade da solução e o tempo de processamento. Dessa forma, é possível obter soluções de alta qualidade em um tempo razoável, permitindo que o problema seja resolvido de forma eficiente mesmo em cenários mais complexos.

Por fim, neste estudo foram abordadas apenas duas meta-heurísticas clássicas da literatura, ambas possuindo mais de duas décadas de sucesso na resolução de vários problemas de otimização em diversas áreas do conhecimento, inclusive na engenharia elétrica onde são encontradas situações de alta complexidade. Porém, existem inúmeras outras propostas clássicas e modernas disponíveis na literatura contemporânea que podem ser aplicadas a este problema, que possibilitariam alcançar resultados promissores em futuras aplicações.

6.1 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Por fim, é essencial mencionar as limitações do modelo proposto, as quais poderão ser aperfeiçoadas em futuros direcionamentos da pesquisa:

- Duração da contingência: A premissa de que a contingência segue uma distribuição normal, com média e desvio padrão conhecidos pode não ser aplicável na prática. Estudos de caso específicos podem aprimorar a adequação deste dado ao problema em cenários reais.
- Custo de energia diferenciados: O modelo deve incorporar diferentes custos de energia para o cálculo de energia que deixou de ser comprada e pela venda de energia excedente. O lucro obtido pela venda da energia excedente gerada pelas fontes renováveis deve considerar as tarifas pelo uso do sistema de distribuição, resultando em um valor de venda inferior ao preço de compra da energia.

- Restrições de espaço: O modelo deve incorporar restrições adicionais relacionadas às limitações de espaço para a instalação de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, visto que a subestação pode não comportar a instalação do sistema dimensionado.
- Atualização de dados: Os dados dos equipamentos utilizados, como as baterias de lítio-óxido-mangânese-cobalto, devem ser atualizados para tecnologias mais recentes. A rápida evolução tecnológica pode impactar na solução do problema, seja pela redução de custos ou pela melhoria de desempenho no índice de disponibilidade do SBH.

Adicionalmente, aproveitando o potencial das meta-heurísticas na resolução de problemas complexos, tecnologias emergentes de geração renovável e armazenamento, como sistemas de hidrogênio verde, podem ser integradas ao modelo para otimizar ainda mais tomada de decisão em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa ANEEL no 903, de 8 de dezembro de 2020**. 2020. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020903.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ATWA, Yasser Moustafa *et al.* Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 25, n. 1, p. 360-370, 2010. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2030276.

BAYLISS, Colin; HARDY, Brian. **Transmission and distribution electrical engineering**. 3. ed. Boston: Newnes, 2006.

BICHELS, Arlei. **Sistemas elétricos de potência: Métodos de análise e solução**. Curitiba: Editora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

CETINBAS, Ipek; TAMYUREK, Bunyamin; DEMIRTAS, Mehmet. The hybrid harris hawks optimizer-arithmetic optimization algorithm: A new hybrid algorithm for sizing optimization and design of microgrids. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 19254–19283, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3151119.

CHAKRABORTY, Soham *et al.* Emergency power supply system for critical infrastructures: Design and large-scale hardware demonstration. **IEEE Access**, Piscataway, v. 11, p. 114509–114526, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3325198.

CHEN, Runze *et al.* A generation-interval-based mechanism for managing the power generation uncertainties of variable generation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, Piscataway, v. 7, n. 3, p. 1060–1070, 2016. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2517659.

COSTA, Leandro Rochink. **Abordagem heurística baseada em busca em vizinhança variável para o agrupamento balanceado de dados pelo critério da soma mínima das distâncias quadráticas**. 2016. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

DIAS, Márcio *et al.* Utilização de simulações pelo método Monte Carlo para avaliação dos índices de confiabilidade num sistema fictício de geração de energia. **Revista Processos Químicos**, Goiânia, v. 13, n. 25, p. 55-62, 2019. DOI: 10.19142/rpq.v13i25.480.

ELKHOLY, Mahmoud *et al.* Maximizing microgrid resilience: A two-stage AI-enhanced system with an integrated backup system using a novel hybrid optimization algorithm. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 446, p. 141281, 2024a. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141281.

ELKHOLY, Mahmoud *et al.* Techno-economic configuration of a hybrid backup system within a microgrid considering vehicle-to-grid technology: A case study of a

remote area. **Energy Conversion and Management**, London, v. 301, p. 118032, 2024b. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100638.

FEIO, Andrey Dias *et al.* Viability of renewable energy integration in isolated systems in Brazil – A case study at Trindade Island (Espírito Santo, Brazil). **Renewable Energy**, Oxford, v. 222, p. 119805, 2024. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119805.

GHAFFARI, Abolfazl; ASKARZADEH, Alireza. Design optimization of a hybrid system subject to reliability level and renewable energy penetration. **Energy**, London, v. 193, p. 116754, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116754.

GHIMIRE, Rahul *et al.* Techno-economic assessment of fuel cell-based power backup system as an alternative to diesel generators in Nepal: A case study for hospital applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 56, p. 289–301, 2024. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.174.

GLOVER, Fred. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, Oxford, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986. DOI: 10.1016/0305-0548(86)90048-1.

GOMES, B. **Otimização de serviços auxiliares de comando e controle de subestações móveis - estudo da inclusão de novos sistemas de alimentação**. 2021. 1–87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2021.

HAMANAH, Waleed M. *et al.* AC microgrid protection schemes: A comprehensive review. **IEEE Access**, Piscataway, v. 11, p. 76842–76868, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3298306.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

HOLZBACH, Matheus *et al.* Optimal hybrid backup systems for substation auxiliary services during outages through stochastic programming. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 239, p. 111191, 2025. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.111191.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation Costs in 2019**. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>. Acesso em: 16 ago. 2024.

JAHANGIR, Mohammad Hossein; JAVANSHIR, Fatemeh; KARGARZADEH, Arash. Economic analysis and optimal design of hydrogen/diesel backup system to improve energy hubs providing the demands of sport complexes. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 46, n. 27, p. 14109–14129, 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.187.

JAYASHREE, S.; MALARVIZHI, K. Methodologies for optimal sizing of battery energy storage in microgrids: A comprehensive review. In: International Conference

on Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2020, Coimbatore. **Anais...** Índia: ICCCI, 2020. p. 20–24. DOI: 10.1109/ICCCI48352.2020.9104131

KHARRICH, Mohammed *et al.* Developed approach based on Equilibrium Optimizer for optimal design of hybrid PV/wind/diesel/battery microgrid in Dakhla, Morocco. **IEEE Access**, Piscataway, v. 9, p. 13655–13670, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051573.

KIZITO, Rodney *et al.* Optimal distributed generator placement in utility-based microgrids during a large-scale grid disturbance. **IEEE Access**, Piscataway, v. 8, p. 21333–21344, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968871.

LETEBELE, Mpai; VAN COLLER, John. Grid independent (renewable) hybrid power sources for the supply of transmission switching substation auxiliaries. In: IEEE PES/IAS PowerAfrica, 2021, Nairobi, Kenya. **Anais...** Kenya: IEEE, 2021. p. 1–5. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543124.

LIU, Jinhui *et al.* Optimal planning of internet data centers decarbonized by hydrogen-water-based energy systems. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 1577–1590, 2023. DOI: 10.1109/TASE.2022.3213672.

MACMILLAN, Madeline *et al.* Microgrid design and multi-year dispatch optimization under climate-informed load and renewable resource uncertainty. **Applied Energy**, Oxford, v. 368, p. 123355, 2024. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123355.

MAHMOUDI, Sayyed Mostafa; MALEKI, Akbar; REZAEI OCHBELAGH, Dariush. A novel method based on fuzzy logic to evaluate the storage and backup systems in determining the optimal size of a hybrid renewable energy system. **Journal of Energy Storage**, Amsterdam, v. 49, p. 104015, 2022. DOI: 10.1016/j.est.2022.104015.

MAJEED, Muhammad *et al.* Optimal energy management system for grid-tied microgrid: An improved adaptive genetic algorithm. **IEEE Access**, Piscataway, v. 11, p. 117351–117361, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3326505.

MASSIELO, R. Energy Storage. In: MCDONALD, J. D. (org.). **Electric power substations engineering**. New York: Taylor & Francis Group, 2012. p. 472–493.

MELIÁN, Belén; PÉREZ, José A. Moreno; VEGA, Marcos Moreno. Metaheurísticas: Una visión global. **Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial**. Asociación Española para la Inteligencia Artificial, Valencia, v. 19, p. 7–28, 2003.

MLADENOVIC, Nenad; HANSEN, Pierre. Variable neighborhood search. **Computers and operations research**, Oxford, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997. DOI: 10.1016/S0305-0548(97)00031-2.

NEJABATKHAH, Farzam *et al.* Optimal design and operation of a remote hybrid microgrid. **CPSS Transactions on Power Electronics and Applications**, Piscataway, v. 3, n. 1, p. 3–13, 2018. DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2018.00001.

NUNES, A. C.; SILVA, R. N. **Subestação de energia elétrica: viabilidade e confiabilidade na instalação**. 2021. 5 f. Artigo Científico (Especialização em Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2021.

OLIVEIRA, Lucas Ginez Leão. **Modelo matemático para o dimensionamento ótimo de uma microrrede para suprir a demanda de serviços auxiliares de subestações em períodos de falhas**. 2022. 43 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2022.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.6**. Procedimentos de rede. Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. Disponível em: <http://www.ons.org.br:80/paginas/sobre-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 10 fev. 2025.

PANASONIC. **Photovoltaic module N330_325_320SA17 - Datasheet**. 2019. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/ecodirect_docs/Panasonic/Panasonic-VBHN330SA17-330-325-datasheet.pdf. Acesso em: 16 fev. 2024.

PANNALA, Sanjeev *et al.* Effective control and management scheme for isolated and grid connected DC microgrid. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Piscataway, v. 56, n. 6, p. 6767–6780, 2020. DOI: 10.1109/TIA.2020.3015819.

PARHIZI, Sina *et al.* State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE Access**, Piscataway, v. 3, p. 890–925, 2015. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2443119.

POSSAGNOLO, Leonardo Henrique Faria Macedo. **Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2015.

RALON, Pablo *et al.* **Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030**. 2017. International Renewable Energy Agency. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf. Acesso em: 16 fev. 2024.

REEVES, C. Genetic algorithms. In: GLOVER, F; KOCHENBERGER, G. A (org.). **Handbook of metaheuristics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 55–83.

REHMAN, Shafiqur *et al.* Feasibility study of hybrid power systems for remote dwellings in Tamil Nadu, India. **IEEE Access**, Piscataway, v. 8, p. 143881–143890, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3014164.

REIS, Jorge. **Meta-heurísticas baseadas em busca em vizinhança variável aplicadas a problemas de operação de transportes**. 2013. 221 f. Tese (Doutorado

em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

RESENDE, Adriana Souza. **Particle swarm optimization aplicada ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão**. 2014. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2014.

RICHARDSON, Ian; THOMSON, Murray. **Integrated domestic electricity demand and PV micro-generation model**. Loughborough University, 2019. Disponível em: https://repository.lboro.ac.uk/articles/dataset/Integrated_domestic_electricity_demand_and_PV_micro-generation_model/9513176/1. Acesso em: 26 out. 2024.

RICHMEYER, Robert Davis; VON NEUMANN, John. **Statistical methods in neutron diffusion**. Princeton: The Institute for Advanced Study, 1947.

ROBERTS, Justo José. **Otimização de sistemas híbridos de geração de energia solar-eólico-diesel através de métodos metaheurísticos e função multiobjetivo**. 2016. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2016.

RYSE ENERGY. **10kW small wind turbine for renewable on-grid & off-grid energy systems**. 2023. Disponível em: <https://www.ryse.energy/10kw-wind-turbines/>. Acesso em: 13 ago. 2024.

SAINT-DRENAN, Yves-Marie *et al.* **A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions**. arXiv, [S. l.], 2019. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1909.13780>. Acesso em: 13 fev. 2024.

SANNI, Shereefdeen Oladapo *et al.* Analysis of backup power supply for unreliable grid using hybrid solar PV/diesel/biogas system. **Energy**, London, v. 227, p. 120506, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120506.

SARKAR, Tathagata *et al.* Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability. **Energy Conversion and Management**, London, v. 191, p. 102–118, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.04.025

SCHNEIDER, Kevin Paul. *et al.* Evaluating the feasibility to use microgrids as a resiliency resource. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 8, n. 2, p. 687–696, 2017. DOI: 10.1109/TSG.2015.2494867.

SHAPIRO, Samuel Sanford; WILK, Martin Bradbury. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3-4, p. 591–611, 1965. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.

SOARES, Bruno Barros Pereira de Moraes. **Sistema de controlo serviços auxiliares de uma subestação**. 2017. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017.

SOUZA, Teófilo. **Eletrotécnica geral**. São Paulo: Páginas & Letras, 2012.

STAFFELL, Iain; PFENNINGER, Stefan. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. **Energy**, London, v. 114, p. 1224–1239, 2016. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.068.

TABARES, Alejandra *et al.* Optimal capacity sizing for the integration of a battery and photovoltaic microgrid to supply auxiliary services in substations under a contingency. **Energies**, Basel, v. 13, n. 22, p. 6037, 2020. DOI: 10.3390/en13226037.

UNITED NATIONS. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session**, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. 2016. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2022.

UNITED NATIONS. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-sixth session**, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021. 2022. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cp2021_01_adv%20..pdf. Acesso em: 30 mar. 2022.

VIVAS, F.J. *et al.* A suitable state-space model for renewable source-based microgrids with hydrogen as backup for the design of energy management systems. **Energy Conversion and Management**, London, v. 219, p. 113053, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113053.

XIAO, Jing *et al.* Electric vehicle support distribution grid emergency power protection strategy after a major power outage. In: International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), 3., 2023, Dali. **Anais...** China: EEPS, 2023. p. 902-906. DOI: 10.1109/EEPS58791.2023.10257165.

YUAN, Hao *et al.* BESS aided renewable energy supply using deep reinforcement learning for 5G and beyond. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, Piscataway, v. 6, n. 2, p. 669–684, 2022. DOI: 10.1109/TGCN.2021.3136363.

ANEXO A - TRABALHOS CORRELATOS

Neste anexo são relacionados os trabalhos associados à pesquisa, apresentados em congressos e revistas.

Os seguintes trabalhos foram apresentados em congressos nacionais:

1. HOLZBACH, M.; FRANCO, J. F.; BASSO, D. P.; FARIA, L. T. Aplicação de meta-heurísticas no dimensionamento de sistemas de backup híbridos para a manutenção de serviços auxiliares em subestações. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos** (SBSE 2023), 2023, Manaus-AM. DOI: 10.20906/SBAI-SBSE-2023/3811.
2. HOLZBACH, M.; FRANCO, J. F.; RESENER, M. Abordagem meta-heurística hibridizando Busca em Vizinhança Variável e Algoritmo Genético para dimensionar sistemas de backup híbridos renováveis. In: **LVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional** (SBPO 2024), 2024, Fortaleza-CE.

Os seguintes trabalhos foram apresentados em congressos internacionais:

3. HOLZBACH, M.; FRANCO, J. F.; ASCHIDAMINI, G. L.; RESENER, M. Metaheuristics applied to the optimal renewable microgrid sizing to supply remote communities. In: **2024 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering** (CCECE), 2024, Kingston. p. 518. DOI: 10.1109/CCECE59415.2024.10667220.
4. HOLZBACH, M.; FRANCO, J. F.; RESENER, M. Metaheuristic approach hybridizing variable neighborhood search and genetic algorithm to size hybrid backup systems for power outages. In: **2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems** (WCNPS), 2024, Brasília-DF. p. 1. DOI: 10.1109/WCNPS65035.2024.10814194.

O seguinte artigo foi publicado em periódico:

5. HOLZBACH, M.; MARTINEZ, N. A.; FARIA, L. T. TABARES, A.; RESENDE, J. F.; FRANCO, J. F. Optimal hybrid backup systems for substation auxiliary services during outages through stochastic programming. **Electric Power Systems Research**, v. 239, p. 111191, 2025. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.111191.

O seguinte artigo foi submetido em periódico e está sendo preparada a primeira revisão após os comentários dos revisores:

6. HOLZBACH, M.; FRANCO, J. F.; RESENER, M. Optimal sizing of a hybrid renewable energy system for auxiliary services in substations through genetic algorithm and variable neighborhood search. **IEEE Access**.