

Sistema FIEB



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
INDUSTRIAL  
MESTRADO EM GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA  
DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO HÍBRIDO COM  
ARMAZENAMENTO: ESTUDO DE CASO DE CASA  
NOVA - BAHIA

ANA TEREZA ANDRADE BORBA

ORIENTADOR: PROF. DR. ALEX ÁLISON BANDEIRA DOS SANTOS  
COORIENTADORA: PROFA. DRA. THAMILES RODRIGUES DE MELO

Salvador - Bahia

MARÇO DE 2024

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA  
DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO HÍBRIDO COM  
ARMAZENAMENTO: ESTUDO DE CASO DE CASA  
NOVA - BAHIA

ANA TEREZA ANDRADE BORBA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial, Curso de Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

**Orientador:** Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira dos Santos

**Coorientadora:** Profa. Dra. Thamiles Rodrigues de Melo

**Salvador - Bahia**

Março de 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

B726a Borba, Ana Tereza Andrade

Análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema de geração híbrido com armazenamento: estudo de caso de Casa Nova - Bahia / Ana Tereza Andrade Borba. – Salvador, 2024.

105 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira dos Santos.  
Coorientadora: Profa. Dra. Thamiles Rodrigues de Melo.





Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024.  
Inclui referências.

1. Usinas híbridas de energia (UHE). 2. Sistemas híbridos - Energia. 3. Geração de energia. 4. Fontes de energia. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Santos, Alex Álisson Bandeira dos. III. Melo, Thamiles Rodrigues de. IV. Título.

CDD 621.31

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC****Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada **“ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO HÍBRIDO COM ARMAZENAMENTO: ESTUDO DE CASO DE CASA NOVA - BAHIA”** apresentada no dia 18 de março de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:	<p>Electronically signed by: Alex Alisson Bandeira Santos CPF: ***.191.765-** Date: 3/20/2024 3:52:07 PM -03:00 </p> <p><b>Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos</b> SENAI CIMATEC</p>
Coorientadora:	<p>Assinado eletronicamente por: Thamiles Rodrigues de Melo CPF: ***.061.634-** Data: 20/03/2024 14:42:18 -03:00 </p> <p><b>Prof.ª Dr.ª Thamiles Rodrigues de Melo</b> FIEB</p>
Membro Interno:	<p>Assinado eletronicamente por: Renelson Ribeiro Sampaio CPF: ***.051.205-** Data: 20/03/2024 15:39:58 -03:00 </p> <p><b>Prof. Dr. Renelson Ribeiro Sampaio</b> SENAI CIMATEC</p>
Membro Externo:	<p>Assinado eletronicamente por: José Bione de Melo Filho CPF: ***.655.604-** Data: 20/03/2024 17:39:33 -03:00 </p> <p><b>Prof. Dr. José Bione de Melo Filho</b> CHESF</p>



*Aos que caminham junto comigo nas estradas dessa vida.*

# Agradecimentos

A gratidão é uma palavra forte e que eu, particularmente, costumo utilizar muito. Ser verdadeiramente grato é entender que diante das dúvidas, precisamos agradecer por elas existirem, pois só assim mudamos os rumos dos nossos caminhos. É entender também que diante das adversidades, agradecemos, por saber que elas nos tornam mais fortes e seguros para enfrentar o mundo em prol dos nossos objetivos. Ser grato é todos os dias dar graças ao universo por ele nos permitir estar vivos e ao lado dos que amamos. Então, nessa conquista, porque SIM, terminar o mestrado foi uma baita conquista pra mim, eu AGRADEÇO. Gratidão a minha família tão especial e que me lembra todos os dias o quão privilegiada eu sou em tê-los comigo; a meus pais, Aida e Orlando, que sempre foram meus incentivadores, me mostrando o poder que a educação tem de transformar a nossa realidade; ao meu amor, Ryan, que verdadeiramente compreendeu por todas as noites e finais de semana que precisei ficar estudando e ele sempre me apoiando, me mimando e me dando o incentivo que eu precisava para finalizar. Amo muito todos vocês! Preciso muito agradecer ao SENAI CIMATEC e as pessoas que fazem parte da minha vida através desse lugar especial. Instituição que me recebeu por tantos anos, onde amadureci enquanto profissional, conquistei meu espaço, encontrei pessoas extremamente competentes e que ocupam um grande espaço no meu coração. Não posso de forma alguma deixar de falar da minha dupla de orientadores, Thamiles e Alex, que parece que escolhi a dedo, e fui privilegiadíssima de contar com a sabedoria, motivação e acompanhamento deles. Definitivamente, sem eles eu não teria terminado. Preciso

também agradecer a ajuda de Léo, que fez parte desse processo junto comigo e foi um braço direito na escrita dos artigos. Por fim, agradeço a minha eu do passado que topou se inscrever no mestrado, que viveu 2 anos de uma montanha russa profissional, mas que, ainda assim, continuou no curso, que publicou artigo em revista, conseguiu terminar de escrever esse trabalho e que agora sente um baita alívio e realização. Venha o que vier daqui para frente, a Ana Tereza do presente aprendeu que ela consegue resolver e esse é só mais um passo. Rumo aos desafios do futuro!

*“As pessoas se convencem  
De que a sorte me ajudou  
Mas plantei cada semente  
Que o meu coração desejou”.*  
*Coração Pirata - Roupa Nova*

# Resumo

A instalação de sistemas híbridos com armazenamento é uma maneira de maximizar a quantidade de energia gerada através da exploração da complementaridade de diferentes fontes de geração. Compreender o funcionamento das usinas híbridas de energia (UHE) é crucial para otimizar novos sistemas e reconfigurar plantas existentes, visando aumentar sua eficiência. Além dos aspectos técnicos, a viabilidade econômica também é uma característica fundamental na construção destes sistemas. Dessa forma, o objetivo neste trabalho de dissertação de mestrado foi analisar os aspectos técnicos e econômicos para implementação de uma UHE em suprimento a um município do estado do Bahia. Inicialmente, foi realizada uma revisão do estado da arte sobre as tendências em sistemas híbridos de energia. Como estudo de caso, simulou-se uma UHE *off-grid* para considerar o consumo de energia do município de Casa Nova na Bahia, Brasil, com base no projeto de P&D CHESF Planta Híbrida. A metodologia consistiu na seleção de fontes de energia, escolha de um local de referência, aquisição de dados de geração e operação, modelagem e simulação do sistema em diferentes cenários, seguida por uma análise financeira de viabilidade. Foi utilizado o software HOMER Pro para otimizar a UHE, sendo os resultados avaliados a partir do custo nivelado de energia (LCOE), payback simples do investimento e atendimento à demanda da carga. Como resultado, o cenário de 25% de consumo da UHE por este município foi o mais competitivo, apresentando que o uso de diferentes fontes de energia aumentou a capacidade de geração do sistema. No entanto, a adição de sistemas de armazenamento de energia em bateria resultou em um LCOE alto quando comparado a fontes individuais, o que demonstrou que o custo da integração de bateria ainda não é competitivo nacionalmente. Além disso, os resultados destacaram a importância de investimentos em pesquisa, governança energética e regulamentação para promover a adoção de sistemas híbridos e no incentivo à transição energética.

# Abstract

Installation of hybrid systems with storage is a way to maximize the amount of energy generated through exploring the complementarity of different sources. Understanding hybrid power plant (HPP) operation is crucial for optimizing new systems and reconfiguring existing plants, to their enhance efficiency. Alongside technical aspects, economic feasibility is also a fundamental feature in the construction of these systems. In this way, the objective of this master's thesis work was to analyze the technical and economic aspects for implementing a HPP to supply a municipality in the state of Bahia. Initially, a state-of-the-art review of trends in hybrid energy systems was done. As a case study, we simulated an off-grid HPP to consider the energy consumption of the county of Casa Nova in Bahia, Brazil, based on the R&D project CHESF Hybrid Plant. The methodology consisted of the selection of energy sources, choosing a reference location, acquisition of generation and operational data, modeling and simulating the system in different scenarios, and a financial analysis. HOMER Pro software was used to optimize the HPP, and the outputs were evaluated from the levelized cost of energy (LCOE), simple payback, and power load fulfillment. As a result, the scenario of 25% HPP consumption by this county was the most competitive, emphasizing that the use of different energy sources increased the system generation capacity. However, the addition of battery energy system storage resulted in a high LCOE when compared to individual sources, which demonstrated that the cost of battery integration is not yet nationally competitive. Moreover, the results highlighted the importance of research investments, energy governance, and regulation in promoting hybrid system adoption and incentivizing energy transition.

# Lista de Figuras

1.1	Panorama mundial de geração de eletricidade, de acordo com tipo de fonte de energia utilizada ao longo dos anos. . . . .	10
1.2	Matriz elétrica brasileira: comparativo dos tipos de fontes de energia utilizadas entre os anos de 2016 e 2022. . . . .	11
1.3	Impacto nas emissões de carbono através da substituição da geração por fontes renováveis. . . . .	13
1.4	Vias tecnológicas para redução das emissões até 2050. . . . .	13
2.1	Esquemático geral de um SEP. . . . .	20
2.2	Balanco de geração de energia elétrica no Brasil no período de 2013 a 2022. . . . .	22
2.3	Estrutura típica de uma célula fotovoltaica. . . . .	25
2.4	Participação das tecnologias de placa fotovoltaica em leilões de energia solar 2015-2019 . . . . .	26
2.5	Gráfico de irradiação global horizontal por estado e região do Brasil, no histórico dos leilões. . . . .	27
2.6	Atlas Solar da Bahia, com a representação da Irradiação Global Horizontal (IGH) anual do estado. . . . .	28
2.7	Áreas de Intersecção Entre Mapas Solar e Eólica da Bahia. . .	29
2.8	Curva de Geração Solar Média Horária (MWmed) - Bahia. . .	30
2.9	Curva de Geração Eólica Média Horária (MWmed) - Bahia. . .	31
2.10	Potencial Eólico Anual da Bahia, a 100m de altura . . . . .	33
2.11	Principais componentes de um aerogerador. . . . .	34
2.12	Sistema de conversão de um aerogerador. . . . .	35

2.13 Modelos de Turbinas Eólicas: (a) Eixo Horizontal, (b) Eixo Vertical. . . . .	36
2.14 Instalação de Armazenamento de Energia Acumulada no Mundo	38
2.15 Tempo de Descarga <i>vs</i> Potência Nominal de Sistemas de Armazenamento. . . . .	40
2.16 Tipos de Sistemas de Armazenamento de Energia. . . . .	41
2.17 Custo das tecnologias de armazenamento para apoiar a integração com fontes renováveis. . . . .	42
2.18 Custo das tecnologias de armazenamento para regulação rápida e para apoiar a integração com fontes renováveis. . . . .	42
2.19 Representação de Usinas Adjacentes. . . . .	47
2.20 Representação de Usinas Associadas. . . . .	48
2.21 Representação de Usinas Híbridas. . . . .	49
2.22 Representação de Portifólios Comerciais. . . . .	50
2.23 Evolução Histórica do LCOE da geração fotovoltaica. . . . .	54
2.24 LCOE de arranjos híbridos de fontes renováveis de energia . .	56
2.25 Lista das 10 principais produções acadêmicas encontradas na plataforma de busca Dimensions AI para viabilidade técnico-econômica de UHEs. . . . .	61



# Lista de Tabelas

2.1	Evolução da Capacidade Instalada no SIN (MW)/ Participação na Matriz Elétrica (%). . . . .	22
2.2	Modelos de aerogeradores de 4.2MW . . . . .	36
2.3	Metodologias para avaliação de viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos de energia. . . . .	57

# Lista de Siglas

**ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica

**BESS** Battery Energy Storage System

**CA** Corrente Alternada

**CCEE** Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

**CC** Corrente Contínua

**CGH** Central Geradora Híbrida

**CUSD** Contrato de Uso do Sistema de Distribuição

**CUST** Contrato de Uso do Sistema de Transmissão

**EPE** Empresa de Pesquisa Energética

**FV** Fotovoltaico

**GD** Geração Distribuída

**GEE** Gases de Efeito Estufa

**HOMER** Hybrid Optimization Model for Electric Renewable

**HPP** Hybrid Power Plant

**HRES** Hybrid Renewable Energy System

**IEA** International Energy Agency

**IGH** Irradiação Global Horizontal

**IRENA** Agência Internacional de Energia Renovável

**LCC** Custo do Ciclo de Vida

**LCOE** Custo Nivelado da Energia

**MUSD** Montante de Uso do Sistema de Distribuição

**MUST** Montante de Uso do Sistema de Transmissão

**O&M** Operação & Manutenção

**ONS** Operador Nacional do Sistema

**P&D** Pesquisa & Desenvolvimento

**PSO** Particle Swarm Optimization

**RN** Resolução Normativa

**SEP** Sistema Elétricos de Potência

**SIN** Sistema Interligado Nacional

**TIR** Taxa Interna de Retorno

**TLBO** Teaching-learning-based Optimization

**UHE** Usina Híbrida de Energia

**VPL** Valor Presente Líquido

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>9</b>
1.1	Definição do Problema . . . . .	15
1.2	Objetivos . . . . .	17
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	17
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	17
1.3	Organização da Dissertação de Mestrado . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	<b>20</b>
2.1	Geração de Energia Renovável . . . . .	20
2.1.1	Fonte solar . . . . .	24
2.1.2	Fonte eólica . . . . .	30
2.1.3	Armazenamento por Baterias . . . . .	36
2.2	Usinas de Geração Híbridas . . . . .	44
2.2.1	Tipos de Arranjos de Usinas Híbridas . . . . .	45
2.2.2	Avaliação de Normativos Nacionais . . . . .	50
2.3	Avaliação de Viabilidade Técnico-Econômica de Usinas Híbridas	53
2.3.1	Conceitos Gerais . . . . .	53
2.3.2	Trabalhos Correlatos . . . . .	56
<b>3</b>	<b>Artigo 1</b>	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>Artigo 2</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>95</b>



# Capítulo 1

## Introdução

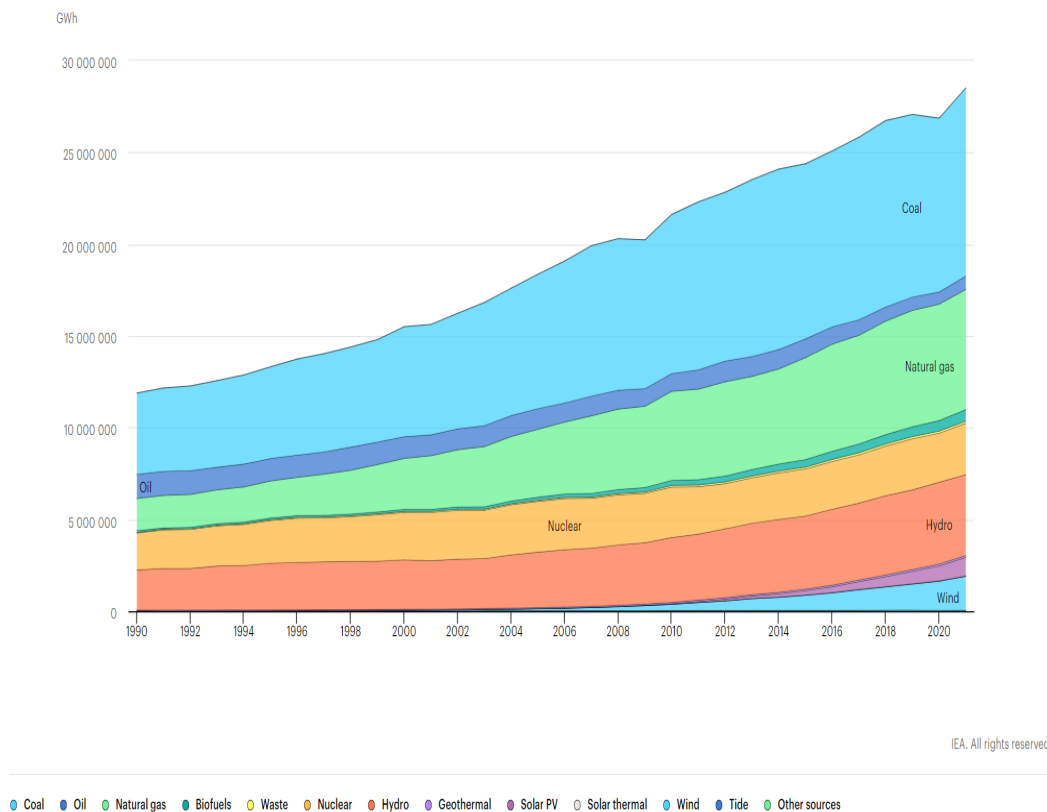
Desde o advento da Revolução Industrial, a energia elétrica pode ser tratada como um protagonista no desenvolvimento socioeconômico das principais sociedades modernas [1]. Nesse contexto, observa-se uma mudança de paradigma na construção e operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), impulsionada pela necessidade de soluções energéticas que atendam aos princípios dos 3D's: descarbonização, descentralização e digitalização. A finalidade dessa mudança se embasa na maior necessidade de monitoramento em tempo real dos SEP, aliados aos sensores e medidores inteligentes, bem como a utilização de fontes de energia renováveis de baixo carbono, com o objetivo de avançar no desenvolvimento sustentável e corroborarem para o processo de transição energética em pauta vigente dos últimos anos [2].

As fontes de energia, por sua vez, podem ser classificadas em: renováveis e não renováveis. As fontes não renováveis são aquelas consideradas como finitas ou esgotáveis, de modo que a maioria possui reposição lenta na natureza. Essas fontes são responsáveis por grande parte da energia produzida em todo o mundo e também são conhecidas como fontes de energia convencionais. São exemplos de fontes não renováveis: o petróleo, o carvão mineral e o gás natural [3, 4]. Por sua vez, as fontes de energia renováveis são aquelas consideradas inesgotáveis e limpas, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas e emitem menos gases de efeito estufa do que

as fontes não renováveis. São exemplos de fontes renováveis: hídrica, solar, biomassa, geotérmica e oceânica [3].

Conforme dados disponibilizados pela Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency - IEA*), organização mundial que atua no levantamento de dados, análises e soluções que contribuem com a ação de transição energética, a participação na geração de energia pelas fontes renováveis e não-renováveis podem ser observadas na Figura 1.1.

Figura 1.1: Panorama mundial de geração de eletricidade, de acordo com tipo de fonte de energia utilizada ao longo dos anos.



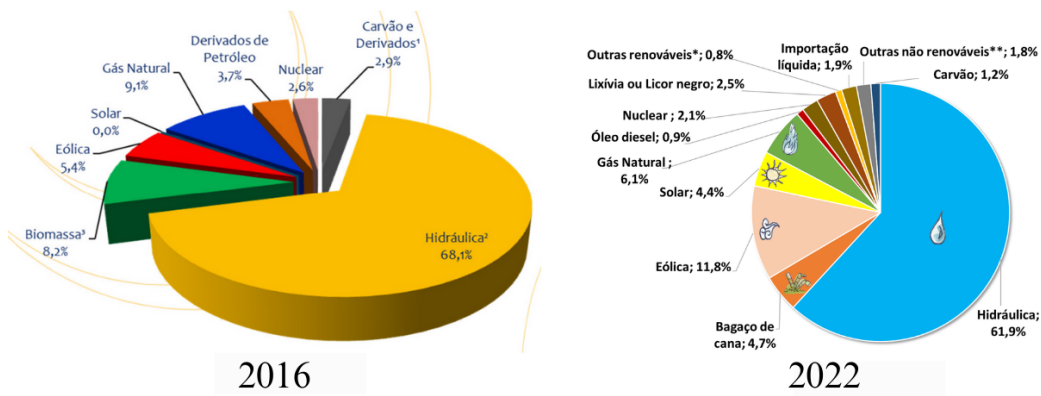
Fonte: IEA, 2023 [5]

Com base neste panorama, nota-se que as fontes não renováveis “carvão”, “petróleo”, “gás natural” e “nuclear” são responsáveis por mais de 70% da geração de energia mundial. A partir dos anos 2000, começou a participação

das fontes geotérmica, eólica e solar, bem como aumentar a geração hídrica devido possuírem papel fundamental na transição energética, em detrimento da redução da geração de energia por petróleo e energia nuclear. Além disso, observa-se o crescimento do uso das fontes renováveis para geração de energia nos últimos anos, a partir da análise gráfica de matriz elétrica.

Por exemplo, segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (do inglês, *International Renewable Energy Agency* - IRENA), houve um aumento de mais de 60% da capacidade instalada de fontes renováveis entre 2016 (2,02 TW) e 2021 (3,37 TW) na matriz elétrica mundial [6]. E em relação ao Brasil neste aspecto, foi feito um levantamento da matriz elétrica do país entre os anos de 2016 a 2022, conforme apresentada na Figura 1.2.

Figura 1.2: Matriz elétrica brasileira: comparativo dos tipos de fontes de energia utilizadas entre os anos de 2016 e 2022.



Fonte: EPE, 2023 [7]

Nota-se nesta matriz que, a maior parte da energia gerada no Brasil é oriunda de fontes renováveis, principalmente da fonte hidráulica, que contempla mais de 60% do valor total, enquanto que as fontes não renováveis são, individualmente, inferiores a 10%. Além disso, é válido destacar a evidente participação crescente das fontes renováveis eólica e a solar, sendo que em 2016 essas fontes representaram aproximadamente 0,0% e 5,4%, respectivamente, e em 2022 representaram 4,4% e 11,8%, respectivamente [7, 8].



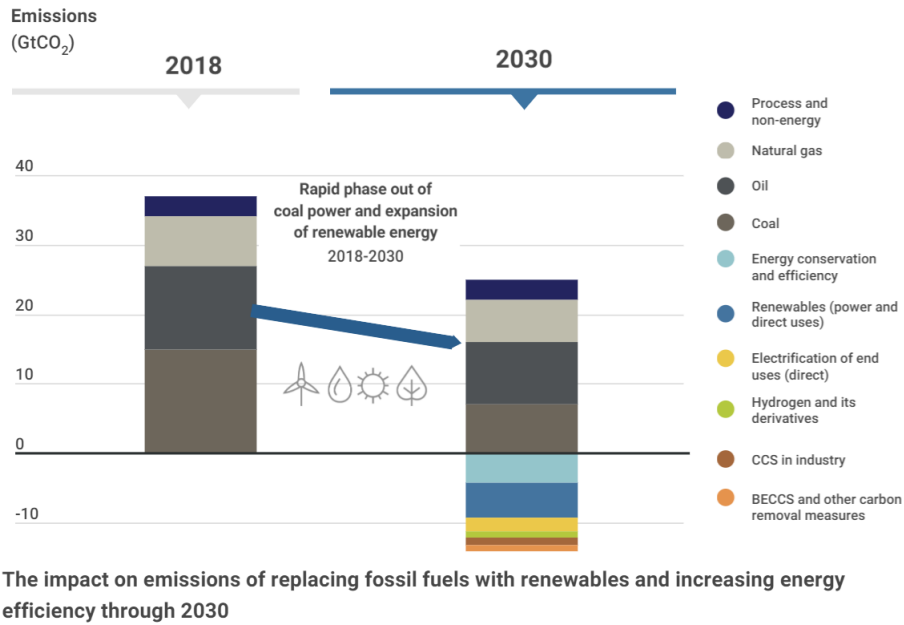
Em prol da descarbonização nesse âmbito, diferentes países do mundo se unem no estabelecimento de metas para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Uma dessas iniciativas é o Acordo de Paris, em que 195 países concordaram em 2015 em atuar de forma conjunta para impedir que a temperatura do planeta suba mais do que 1,5 °C até o final do século XXI [9]. Para efetivação do Acordo, cada país apresenta às Nações Unidas o seu plano de metas, conforme características socio-econômicas do local. No caso brasileiro, foram estabelecidas as seguintes metas em prol da redução das emissões:

- Reduzir as emissões de GEEs em 37% até 2025, em relação à 2005;
- Até 2030 essa redução terá de ser de 43%, relativa ao valor de 2005;
- Aumentar a participação de bioenergia sustentável para cerca de 18% na matriz energética brasileira até 2030;
- Chegar a uma participação de 45% de energias renováveis na matriz;
- Reflorestar 12 milhões de hectares.

Em função da escalabilidade dessas metas para os diferentes países participantes do Acordo de Paris, estima-se que até 2030 o parâmetro mundial seja, não somente de redução nas emissões de carbono pelas fontes convencionais, como também na geração de carbono negativo, através de fontes renováveis de e tecnologias de captura de carbono. Esses parâmetros de redução são demonstrados na Figura 1.3, com o comparativo entre o cenário de 2018 e os objetivos de redução estimados para 2030. Para se atingir essas metas, apresenta-se na Figura 1.4 as possíveis vias tecnológicas e suas participações para redução das emissões de carbono até 2050.

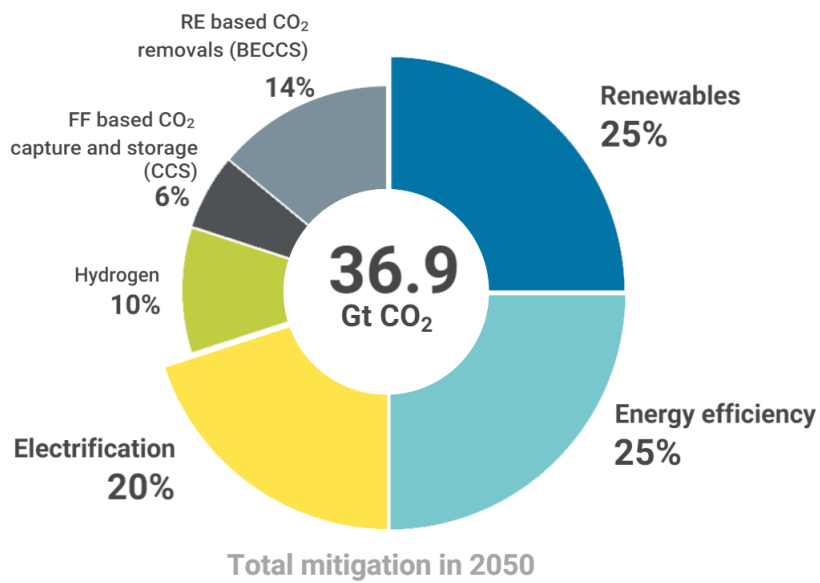
Observa-se a importância das fontes renováveis, bem como da aplicação de técnicas de eficiência energética correspondendo a metade da participação para se atingir os objetivos de redução das emissões. Além disso, as inovações associadas à eletrificação, tecnologias de hidrogênio e técnicas de captura de carbono serão essenciais para mitigação das emissões até 2050 [10].

Figura 1.3: Impacto nas emissões de carbono através da substituição da geração por fontes renováveis.



Fonte: IRENA, 2023 [10]

Figura 1.4: Vias tecnológicas para redução das emissões até 2050.



Fonte: IRENA, 2023 [10]

Nesse contexto do aumento da participação da geração renovável, a exploração individual dessas fontes, seja fotovoltaica, eólica ou outras, enfrenta limitações de sazonalidade e intermitência na produção. Dessa forma, sistemas híbridos surgem como uma alternativa para otimizar a quantidade de energia que pode ser produzida [11]. De acordo com a WindEurope [12], as Usinas Híbridas de Energia (UHEs) são instalações responsáveis pela geração de energia, consistindo em mais de um método de geração de energia conectado a uma rede em um ponto de conexão. Além disso, sistemas de geração distribuída, sejam híbridos ou não, podem ser categorizados com base em sua conexão com a rede elétrica. Sistemas conectados à rede estão interligados com a rede elétrica convencional, intitulados como *on-grid*, enquanto sistemas isolados que operam de forma independente e geram energia em áreas isoladas, são denominados como *off-grid* [13].

Mundialmente as usinas híbridas já estão sendo exploradas desde o início dos anos 2000. Em 2008, Deshmukh et al apresentou uma revisão de literatura para modelagem de sistemas híbridos renováveis, onde destacou o fato desses sistemas surgirem como uma alternativa promissora na geração de energia, em especial para locais remotos. Esse trabalho também relatou que os aspectos econômicos dessas tecnologias já se demonstravam como suficientemente promissores para incluí-las no desenvolvimento da capacidade de geração de energia para países em desenvolvimento [14]. Com o passar dos anos, observou-se que os estudos citados já em 2008 eram assertivos e o avanço da tecnologia das fontes de geração propiciou que os sistemas híbridos ganhassem espaço em diferentes países, incluindo o Brasil.

No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) introduz também conceitos de usinas híbridas adjacentes e associadas. Todos eles, de alguma forma, combinam diferentes tipos de geração de energia e podem ser referidos como sistemas híbridos, sejam eles de fontes renováveis ou não. Usinas de energia adjacentes são caracterizadas por terem duas fontes de geração construídas próximas uma da outra, compartilhando o mesmo terreno, com conexões separadamente contratadas com a rede básica. Por outro lado, usu-

nas associadas, embora compartilhem conexões de infraestrutura e acesso à rede básica, têm medidores individuais para cada fonte. Por fim, usinas híbridas, ao contrário dos tipos anteriores, têm fontes de energia que se combinam no processo de geração. Dessa forma, elas se conectam à rede com apenas um medidor, e a origem da energia não é diferenciada [15].

Quando as fontes são consideradas de forma independente, o dimensionamento da rede elétrica exige levar em consideração os picos de geração de cada uma, levando ao dimensionamento excessivo das fontes e ao aumento dos custos de energia [16]. Por esse motivo, é fundamental compreender não somente os aspectos técnicos de dimensionamento das fontes, como também os aspectos econômicos envolvidos no empreendimento, pois estes desempenham um papel crucial na tomada de decisões relativas à implementação de uma usina híbrida com base em sua viabilidade financeira.

Para esse tipo de avaliação, existem indicadores no setor elétrico que podem ser usados como parâmetros para quantificar as características econômicas de uma planta de geração. Como por exemplo, o custo nivelado de energia (LCOE), que é um indicador que quantifica o custo unitário da eletricidade (kWh ou MWh) ao longo de um projeto [17].

Sendo assim, o estudo de viabilidade técnico-econômica para SEPs contribui para a implementação de usinas híbridas no Brasil, mas também agrega uma abordagem científica ao longo desse desenvolvimento. Ele traz o viés teórico que permite o estudo de arranjos ótimos para novas plantas híbridas; complementa a avaliação de plantas existentes, que podem ser reconfiguradas como híbridas para alcançar maior eficiência energética; e possibilita explorar a utilização de novos ativos renováveis em sistemas híbridos.

## 1.1 Definição do Problema

A intermitência solar e eólica em usinas elétricas pode causar instabilidades em todo sistema elétrico e na rede local, podendo prejudicar o fornecimento de energia para o sistema, seja ele integrado à rede elétrica ou em

regiões isoladas. Soluções tecnológicas recentes apontam para o uso combinado de plantas eólicas e solares em um mesmo local, considerando as soluções de integração com bateria como uma alternativa para o armazenamento de energia e despacho programado.

Nessa circunstância, para a tomada de decisão mais assertiva a respeito da implementação de UHEs, faz-se necessário avaliar os possíveis ativos a serem utilizados como fonte de energia conjunta, bem como entender as estratégias de otimização de fontes, a contribuição de cada uma delas para a geração de energia, o investimento necessário para implementação desses sistemas e o retorno financeiro envolvido no projeto.

Com o intuito de investigar esses aspectos técnicos que permeiam a instalação de sistemas híbridos e a respectiva viabilidade financeira, bem como explorar uma forma de aliar os estudos de hibridização ainda iminentes no Brasil e o viés prático de implementação de plantas híbridas, esse trabalho de dissertação de mestrado faz parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento PD-0048-0217/2020 entre a Eletrobras CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), SENAI CIMATEC (Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia) e instituições parceiras, intitulado “Sistema Inteligente de Geração Híbrida com Armazenamento”, sob as diretrizes e as orientações de projetos de P&D regulados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Trata-se de uma planta piloto a ser instalada no município de Casa Nova, no estado da Bahia, onde já existe uma planta de geração eólica da Eletrobras CHESF que opera em condições reais. Esta planta eólica será integrada fisicamente a um sistema fotovoltaico em construção, com um banco de baterias para armazenamento de energia, no intuito de complementar e trazer alternativas de equilíbrio do despacho da energia gerada.

Este projeto de P&D configura-se como uma oportunidade para implantação de uma plataforma de investigação técnico-científica, em escala real, para o desenvolvimento de novas soluções em sistemas híbridos no Brasil, objetivando-se a melhoria da gestão, operação, supervisão e controle dos

sistemas de geração, com novas metodologias aplicadas e possíveis de serem reproduzidas para outros sistemas similares. Dentre as soluções possíveis de serem exploradas, a hibridização apresenta-se como um novo mercado no setor elétrico, agregando possibilidades de rentabilização através de serviços de arbitragem, controle de frequência, controle de reativos, entre outras promissoras soluções que ganham destaque em especial no Nordeste do Brasil, devido ao alto poder de geração eólica e solar da região.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral neste trabalho é analisar os aspectos técnicos e econômicos para implementação de um sistema híbrido de geração de energia em suprimento a um município do estado da Bahia, estudando as alternativas de atendimento *off-grid* no local e a viabilidade financeira desta implementação.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar o estado da arte de sistemas de energia híbridos renováveis;
- Investigar os arranjos e configurações de sistemas híbridos de geração;
- Simular a otimização de um caso real de projeto de implementação de planta híbrida;
- Contribuir na melhoria do modelo de gestão de usinas híbridas conectadas ao sistema elétrico nacional, a partir da avaliação de viabilidade técnico-econômica.

## **1.3 Organização da Dissertação de Mestrado**

Este documento apresenta 5 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 - Introdução: Contextualiza o âmbito, no qual a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, objetivos e justificativas da pesquisa e como esta dissertação de mestrado está estruturada;
- Capítulo 2 - Revisão da Literatura: Retrata a busca de produções acadêmicas já publicadas nos últimos anos, apresentando os principais fundamentos e trabalhos correlatos que norteiam a pesquisa;
- Capítulo 3 - Artigo I: *Hybrid Renewable Energy Systems: An analysis from the state-of-the-art review* - submetido em JBTH 2024, retratando a metodologia adotada e os resultados obtidos na revisão do estado da arte sobre plantas híbridas;
- Capítulo 4 - Artigo II: *Techno-Economic Assessment of a Hybrid Renewable Energy System for a County in the State of Bahia* - publicado em *Energies* - MDPI, 2024, retratando a metodologia adotada e os resultados obtidos na análise técnico-econômica da planta híbrida proposta no P&D para o município de Casa Nova-BA;
- Capítulo 5 - Conclusões: Apresenta as conclusões, contribuições e algumas sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas no futuro.





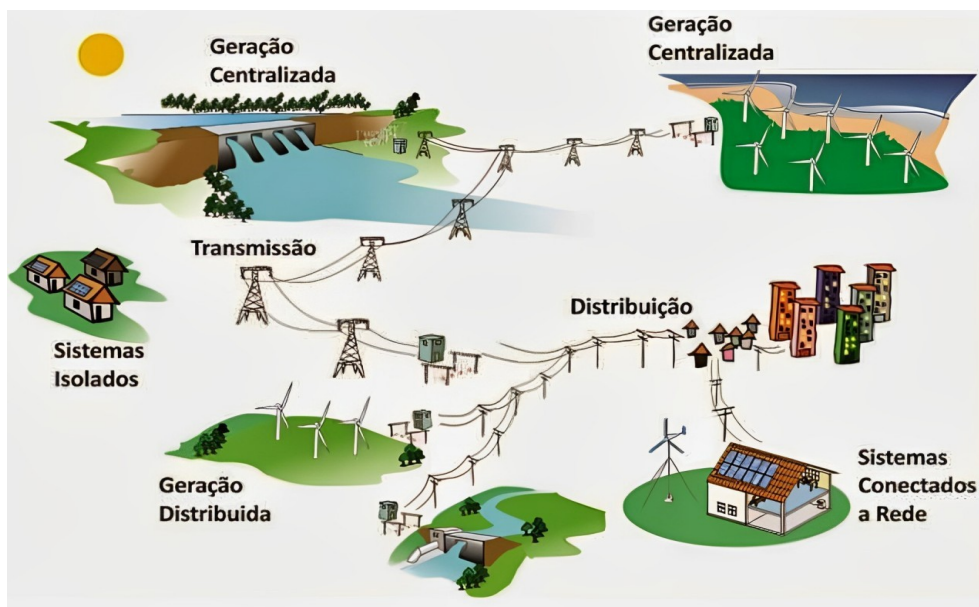
# Capítulo 2

## Revisão da Literatura

### 2.1 Geração de Energia Renovável

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) corresponde ao conjunto de instalações e equipamentos que vão da geração, transmissão e distribuição de energia até o consumo de eletricidade, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Esquemático geral de um SEP.



Fonte: BIOENERG, 2018 [18]

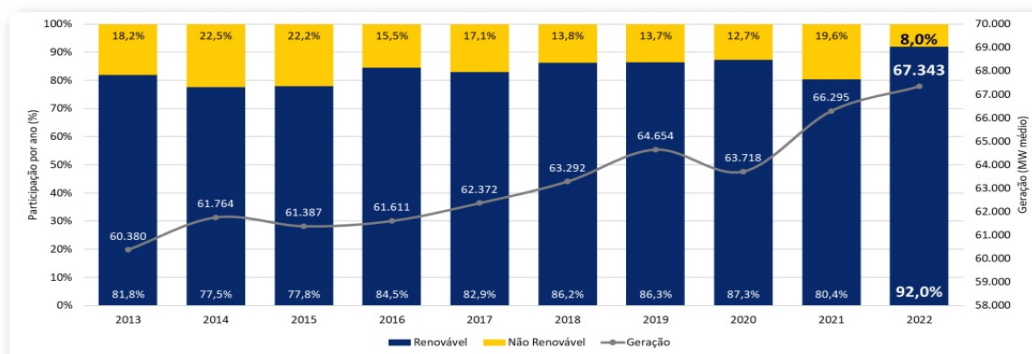
A estrutura adotada para o funcionamento do SEP é um fator crucial para um bom desempenho da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Esses sistemas surgiram como sendo caracterizados por grandes usinas, sendo elas hidrelétricas, termelétricas e nucleares, e foram desenvolvidos em torno de grandes centros de carga distantes das fontes de geração [19].

Na primeira década do século XXI, foram realizadas mudanças significativas na geração e no consumo de energia elétrica. Novas formas de geração passaram a ser adotadas, como a eólica e a solar, incluindo também iniciativas em menor escala, através da geração distribuída (GD). A partir disso, passou-se a observar novos comportamento de consumo e distribuição, impulsionados pela evolução e implementação das redes inteligentes (*smart grids*). Essas transformações demandam uma revisão nos paradigmas do desenvolvimento dos sistemas elétricos, exigindo planejamento estratégico para expansão [19].

Nesse contexto, torna-se ainda mais relevante realizar análise de custo/benefício para esse planejamento, avaliando os investimentos necessários no sistema para otimizar o desempenho com custos mínimos. Além de parâmetros técnico e financeiros, fatores como políticas de emissões, impactos socioambientais e aspectos subjetivos, como impactos visuais, também refletem na tomada de decisão de novos projetos de expansão [19].

No que se refere ao setor de geração, o ano de 2022 foi marcado pelo avanço da geração de energia renovável no Brasil, de acordo com o levantamento feito pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica). Nesse ano, o país alcançou 92% de participação de usinas hidrelétricas, eólicas, solares e de biomassa no total gerado pelo SIN (Sistema Interligado Nacional) [20], conforme apontado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Balanço de geração de energia elétrica no Brasil no período de 2013 a 2022.



Fonte: CCEE, 2022 [20]

Na Tabela 2.1 são apresentados os dados do ONS (Operador Nacional do Sistema) referentes à capacidade instalada de fontes renováveis até fevereiro de 2024, com projeção de crescimento por tipo de geração até 2028.

Tabela 2.1: Evolução da Capacidade Instalada no SIN (MW)/ Participação na Matriz Elétrica (%).

Fonte Renovável	Fevereiro/2024	Dezembro/2028
Hidroelétrica	108.461 MW/ 50%	109.104 MW/ 42,8%
Eólica	28.813 MW/ 13,3%	35.031 MW/ 13,7%
Solar	11.480 MW/ 5,3%	20.823 MW/ 8,2%
Biomassa	15.491 MW/ 7,1%	16.702 MW/ 6,5%
Geração Distribuída	26.982 MW / 12,4%	42.657 MW/ 16,7%

Fonte: [21]

A energia produzida por essas usinas é proveniente de diferentes fontes renováveis, que são melhores descritas a seguir:

- **Geração Solar** - a energia solar corresponde à energia proveniente da luz e do calor emitidos pelo Sol, e pode ser aproveitada de forma

fotovoltaica ou térmica, gerando energia elétrica e térmica, respectivamente. Por ser considerada uma fonte de energia limpa, a energia solar é uma das alternativas mais promissoras para obtenção energética. Para geração de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, a energia do sol é convertida através de placas solares, que geram eletricidade a partir da movimentação dos elétrons no material semicondutor dos módulos fotovoltaicos [22];

- **Geração Eólica** - a energia eólica é o processo pelo qual o vento é transformado em energia cinética e, em seguida, em energia elétrica com o uso de equipamentos de conversão eletro-mecânica. Assim como a solar, a eólica é outra fonte de energia renovável em rápido crescimento, com a instalação de turbinas sendo cada vez mais comuns em todo o mundo, exploradas tanto em terra, denominada geração (*onshore*) quanto no mar ou geração (*offshore*) [23];
- **Geração Hidrelétrica** - a fonte renovável que apresenta a maior potência instalada é a hidrelétrica com, pelo menos, 1.392 GW instalados no mundo até 2022 [6]. Essa fonte é uma das formas mais antigas e comuns de energia renovável, gerada pela conversão da corrente da água em eletricidade. Segundo [3], a hidroeletricidade é produzida por meio da construção de barragens, onde a água em maior altitude é liberada e cai sobre as pás de uma turbina hidrelétrica que produz energia;
- **Geração por Biomassa** - é a fonte de energia renovável que utiliza materiais orgânicos, tais como restos de colheita, esterco animal, plantações energéticas, efluentes agroindustriais e resíduos de serrarias, para geração de energia. Os principais meios de aproveitamento da energia da biomassa são o uso direto ou o uso de subprodutos provenientes da conversão química da matéria. Outra forma de aproveitar a energia da biomassa é por meio da tecnologia de gaseificação, que transforma parte da matéria em gás, também conhecido como gás

de síntese. Esse processo é indicado quando se pretende aproveitar a energia da biomassa em motores de combustão interna, turbinas ou outros equipamentos que permitem a utilização de combustível gasoso para o funcionamento [3]. Segundo dados da IRENA, a capacidade de produção energética da biomassa em 2022 foi de, pelo menos, 148 GW, o que demonstra a relevância desse tipo de fonte energética, sendo uma alternativa renovável para países em que não possuem um bom potencial climático para energia solar e eólica [6].

A crescente demanda por fontes de geração de energia renovável, impulsionada por preocupações ambientais, resultou em significativos avanços nas tecnologias de usinas eólicas e fotovoltaicas. A seguir, são detalhadas as principais características de tais fontes, tratadas como objeto de estudo desse trabalho de dissertação de mestrado.

### **2.1.1 Fonte solar**

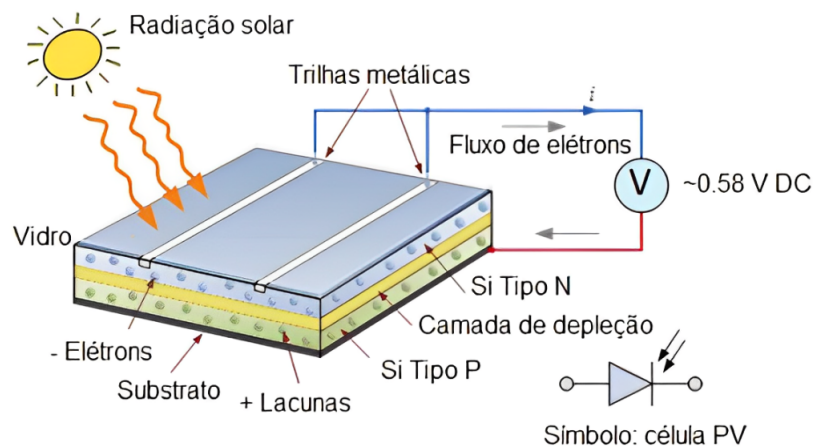
A energia solar fotovoltaica emerge como uma das fontes renováveis mais destacadas devido as suas características ambientalmente naturais, sua praticamente ilimitada disponibilidade, operação silenciosa, independência de combustíveis e capacidade de gerar eletricidade. No Brasil, as condições são altamente propícias para a adoção dessa forma de energia, atraindo o interesse tanto de empresas quanto da população em geral através da geração distribuída. A partir de 2011, houve um significativo aumento na demanda por energia solar fotovoltaica, impulsionado pela redução nos custos de produção dos equipamentos, melhorias na normatização técnica das instalações, políticas públicas de incentivo fiscal e disponibilidade de linhas de financiamento especiais para aquisição dos equipamentos, aproveitando também as vantagens do clima do país [24].

Em termos de aspectos técnicos da geração fotovoltaica, a energia é gerada através do efeito fotovoltaico que envolve a conversão da luz solar em energia elétrica. Os painéis solares constituem-se como um agrupamento de

diversos módulos, cada um composto por várias células fotovoltaicas, as quais representam as unidades fundamentais para a conversão da energia luminosa em eletricidade. As tecnologias amplamente adotadas em painéis solares são aquelas baseadas em silício monocristalino e policristalino. Esta preferência decorre da disponibilidade no mercado, do custo acessível e da eficiência de conversão dessas tecnologias, além de apresentarem um tempo de vida útil estimado em 25 anos. Além destes, outros materiais também estão sendo empregados, como por exemplo, materiais à base de carbono e telureto de cádmio (CdTe), além de serem testadas outras aplicações em painéis, telhas e filmes finos [24, 25].

A célula solar de silício cristalino (c-Si), que domina o mercado fotovoltaico atual, possui uma estrutura típica conforme o modelo ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3: Estrutura típica de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de Sunergia, 2021 [26]

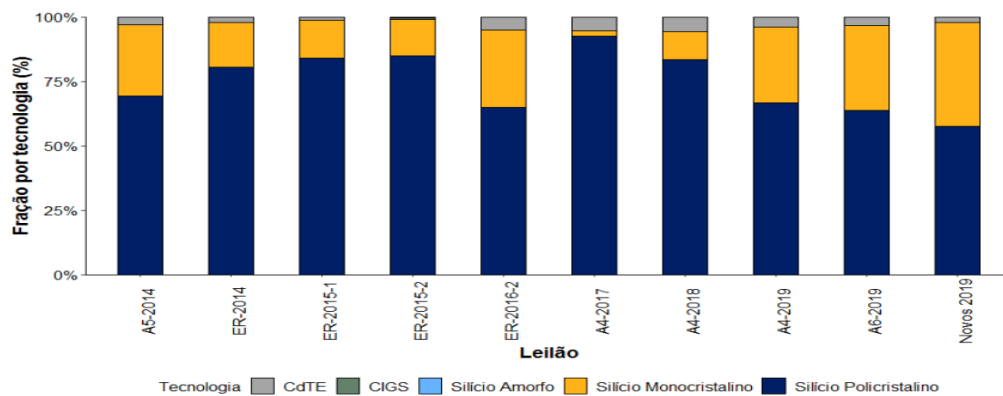
O silício atua como um material que absorve a energia proveniente da luz solar, excitando o elétron, levando-o a um estado mais elevado de energia. Nesta situação, o elétron salta da banda de valência para a banda de condução, gerando uma diferença de potencial entre as células e uma corrente elétrica na estrutura cristalina do semiconductor, conforme indicado no

trecho "fluxo de elétrons" [27, 26].

A corrente produzida pelos painéis é inicialmente contínua (CC), sendo então convertida em corrente alternada (CA). Esta conversão é realizada por um inversor de frequência que é exigido para instalações de geração fotovoltaica. Essa energia pode, então, ser injetada na rede da concessionária local, isto é, geração *on-grid*, ou armazenada em baterias em sistemas *off-grid*, usualmente aplicados em sistemas isolados que estão desconectados da rede da concessionária local [24].

Na Figura 2.4 é apresentado um levantamento da proporção de participação de diferentes tecnologias de placas fotovoltaicas em leilões de geração solar entre os anos de 2015 a 2019. Observa-se que os módulos de silício policristalinos apresentam a maior fatia percentual de utilização em leilões, contudo, vem perdendo espaço para a tecnologia de monocristalino, que nos projetos no ano de 2019 já representava 40% de participação.

Figura 2.4: Participação das tecnologias de placa fotovoltaica em leilões de energia solar 2015-2019

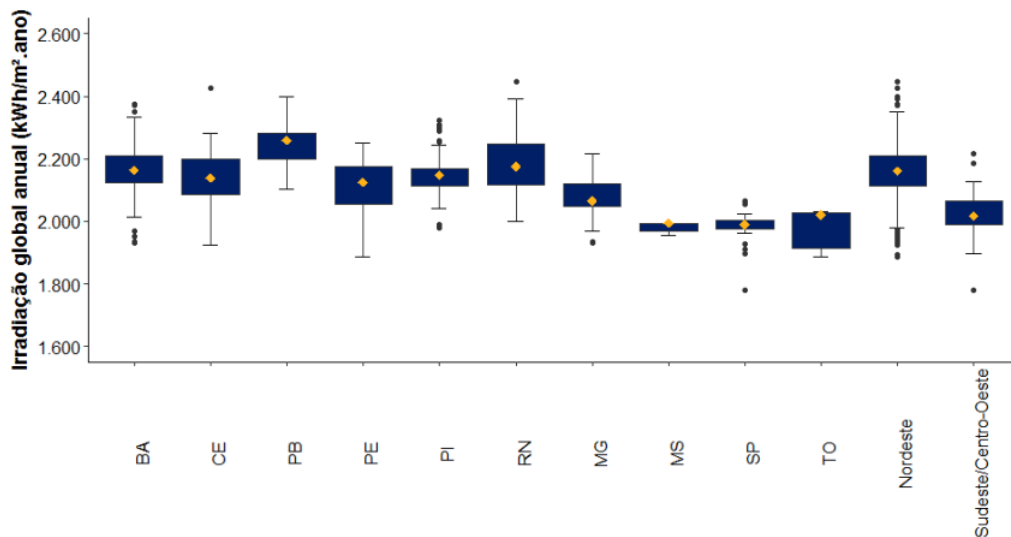


Fonte: EPE, 2020 [28]

Além da composição dos materiais a serem utilizados, é importante também avaliar o índice de irradiação solar dos locais onde se pretende instalar uma usina fotovoltaico, de forma a compreender o potencial de geração do empreendimento. Nesse contexto, para participação em leilões de energia, a

ANEEL solicita que os empreendedores de usinas apresentem os resultados de medições de irradiação feitas *in-loco* por um período de, pelo menos, 12 meses. Para o histórico dos leilões até 2019, a EPE relata em sua nota técnica NT EPE-DEE-003-2020-r0 os valores mínimos, máximos, a mediana por Unidade Federativa, e os agregados dos subsistemas Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste do país, conforme ilustrado no gráfico da Figura 2.5.

Figura 2.5: Gráfico de irradiação global horizontal por estado e região do Brasil, no histórico dos leilões.



Fonte: EPE, 2020 [28]

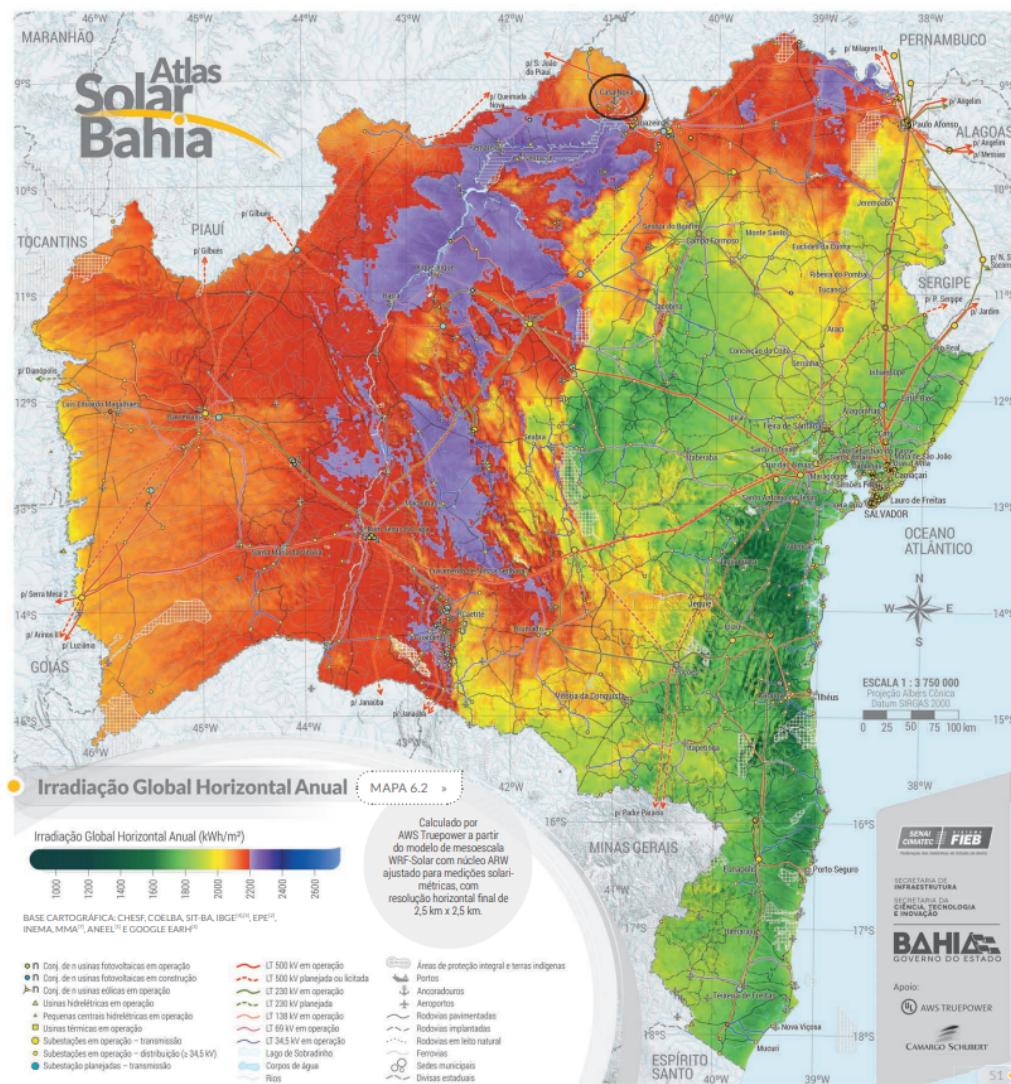
Essa contabilização retrata que o subsistema Nordeste apresenta os valores mais elevados, demonstrando o potencial de geração solar dos estados dessa região, seguida pelo Sudeste/Centro-Oeste, com destaque para o estado de Minas Gerais, que apresenta valores mais altos que os demais quando comparado à SP, MS e à mediana do conjunto da região.

Trazendo à luz os índices de irradiação solar da Bahia, em 2018 foi desenvolvido o Atlas Solar do estado, cujos resultados demonstram o potencial de geração de energia fotovoltaica por região. O Mapa 6.2 do Atlas, ilustrado na Figura 2.6, demonstra que o município de Casa Nova está localizado em uma



região, cuja média de irradiação global horizontal anual é de 2.200 kWh/m<sup>2</sup>.

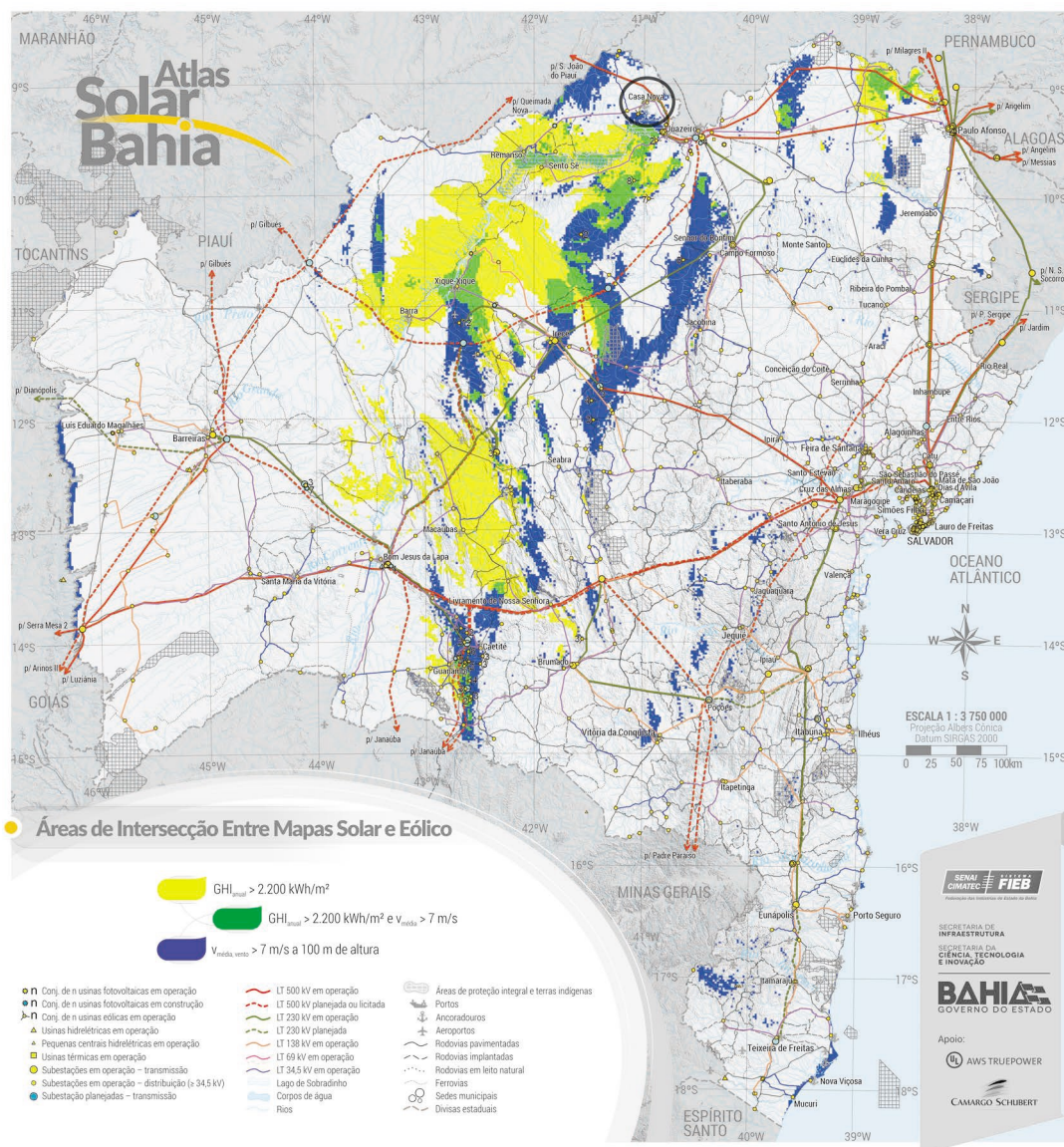
Figura 2.6: Atlas Solar da Bahia, com a representação da Irradiação Global Horizontal (IGH) anual do estado.



Fonte: Atlas Solar, 2018 [29]

Além do potencial de geração solar, esta região também se caracteriza como um local de complementariedade com a fonte eólica, conforme Mapa 7.1 do Atlas, sugerindo que usinas híbridas FV e Eólica podem ter bons resultados de geração de energia na região, conforme observado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Áreas de Intersecção Entre Mapas Solar e Eólica da Bahia.



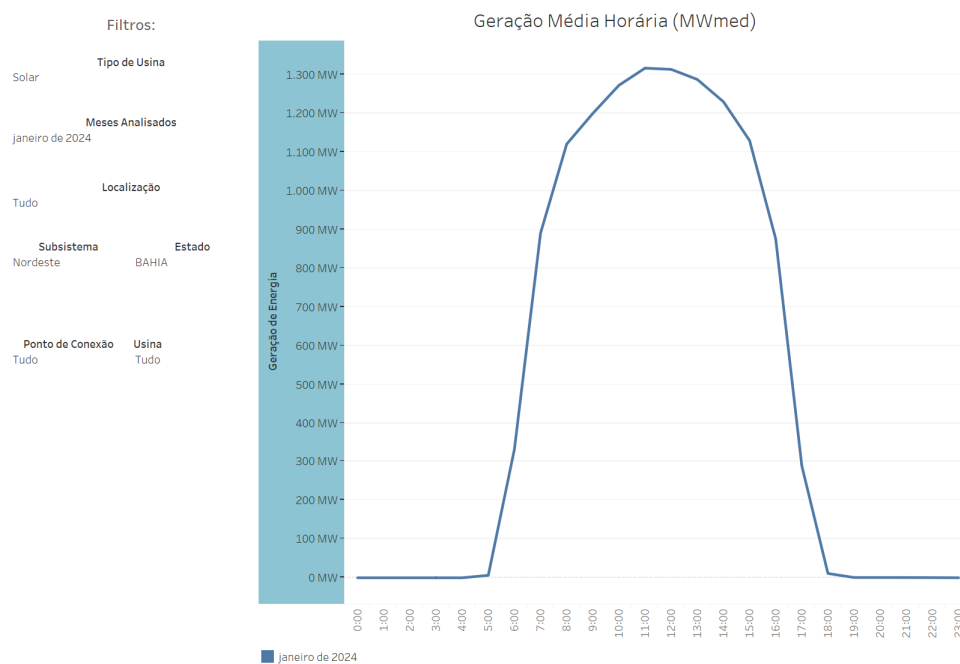
Fonte: Atlas Solar, 2018 [29]

A complementariedade das fontes é também ilustrada através do comportamento da curva diária de geração, cuja fonte solar varia conforme o movimento do sol ao longo do dia, apresentando maiores índices nos horários em que a luz incide de forma direta. Contudo, isto não exclui a possibilidade

da fonte solar gerar energia também em dias nublados ou com luz difusa [30].

Na Figura 2.8 demonstra-se o comportamento da geração horária de todas as usinas solares do estado da Bahia, no mês de janeiro de 2024. Através dela, é possível perceber que a geração solar ocorre entre 5h e 18h, atingindo ao seu pico no horário próximo ao meio-dia.

Figura 2.8: Curva de Geração Solar Média Horária (MWmed) - Bahia.



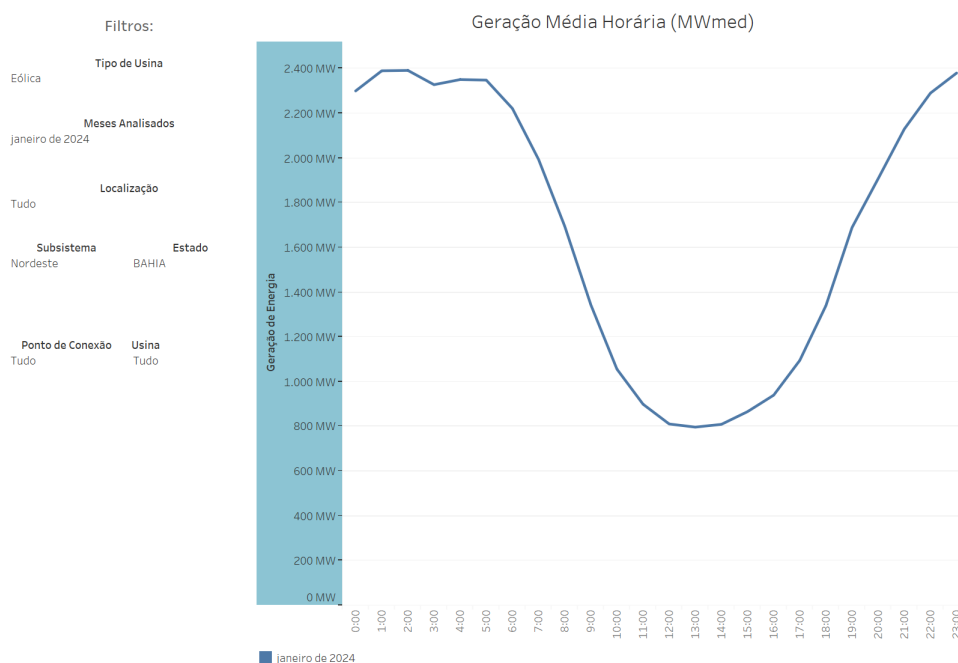
Fonte: ONS, 2024 [31]

## 2.1.2 Fonte eólica

As fontes de energia intermitentes têm sua produção de energia influenciada pela disponibilidade dos recursos, o que pode resultar em variações significativas, oscilando de 0 a 100% durante o mesmo período de 24 horas. Por exemplo, as usinas eólicas operam em função da velocidade do vento ao longo do dia, atingindo os menores valores de geração por volta do meio-dia. Na Figura 2.9 ilustra-se o comportamento de uma geração eólica com relação à velocidade do vento local, resultando na chamada “curva de pato” [30].



Figura 2.9: Curva de Geração Eólica Média Horária (MWmed) - Bahia.



Fonte: ONS, 2024 [31]

A partir da comparação entre as curvas de geração apresentadas para as usinas eólica e solar do estado da Bahia, demonstra-se na prática a complementariedade entre essas fontes. Observa-se que a geração eólica possui maior produção de energia nos períodos noturno e madrugada, quando a velocidade do vento é maior; enquanto que a geração solar é favorecida no período diurno, quando a irradiação solar alcança o valor máximo.

Apesar do montante de energia gerado por usinas eólicas ser maior, a variabilidade e dificuldade na previsibilidade do vento tornam a geração através das turbinas um recurso de confiabilidade limitada para o sistema no fornecimento de carga. Uma alternativa para mitigar essa variabilidade é a dispersão geográfica de parques eólicos. Ao distribuir parques eólicos em diferentes regiões, é possível aproveitar diferentes fenômenos climáticos e regimes de vento, o que pode levar a um perfil de geração mais uniforme, permitindo estabelecer um nível garantido de produção de energia [30].

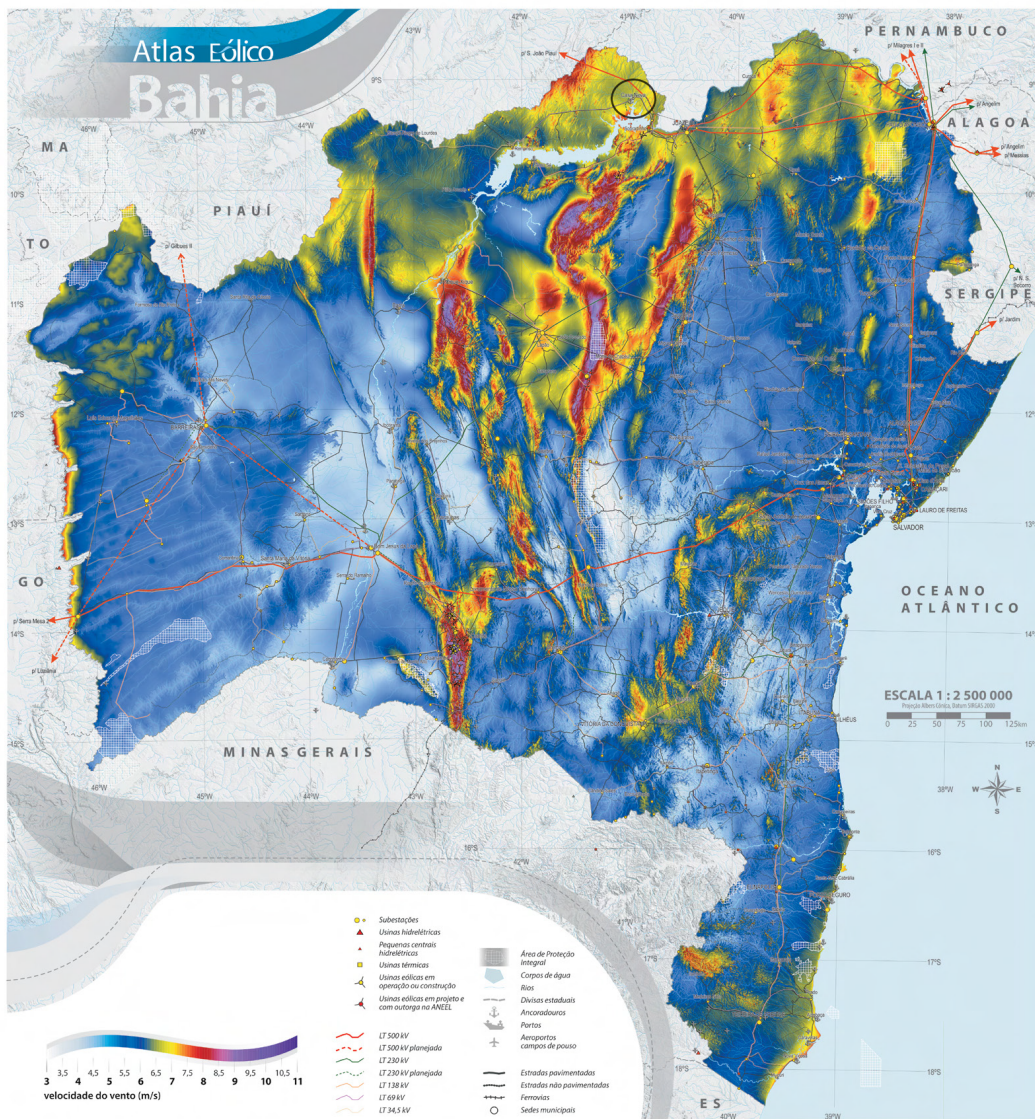
Outra possível alternativa para trazer maior segurança na gestão e utilização de recursos eólicos está no uso de análise de dados para obtenção de modelos de previsão de geração eólica, direção predominante do vento e do fluxo aéreo em parques. Nestes casos, os trabalhos de predição dos ventos podem ser avaliados em diferentes horizontes de tempo: extremo curto prazo (30 minutos); curto prazo (de 30 minutos à 6 horas); médio prazo (de 6 horas à 1 dia); e longo prazo (de 1 dia a 1 semana) [32].

O estudo das técnicas de previsibilidade tem como intuito trazer benefícios ao setor eólico na gestão dos recursos solares, como por exemplo [32]:

- melhorias na escolha dos locais onde serão instalados os parques eólicos, a partir do melhor aproveitamento dos recursos de vento;
- orientar os planejamentos de manutenção dos parques;
- melhorar a eficiência operacional dos sites eólicos;
- mitigar impactos de condições climáticas adversas nos sistemas eólicos, através da detecção de variações climáticas específicas e padrões de comportamento ao longo do ano;
- otimizar custos operacionais, o que contribui para reduzir perdas econômicas nos sistemas.

Essa abordagem de entender melhor os recursos eólicos para auxílio na tomada de decisão motivou o Governo do Estado da Bahia a apresentar, em 2013, o Atlas Eólico Estadual. Nele foram disponibilizados os resultados para as medições anemométricas feitas em todo o território baiano. Nesse caso, foram gerados mapas com o resultado do potencial de geração eólico para diferentes alturas: 80, 100 e 120m. Na Figura 2.10 ilustra-se o Mapa 6.6 do Atlas, com os resultados do potencial eólico anual para 100 m de altura. Nele destaca-se a região de Casa Nova, que apresenta velocidade média do vento na faixa de 7m/s.

Figura 2.10: Potencial Eólico Anual da Bahia, a 100m de altura

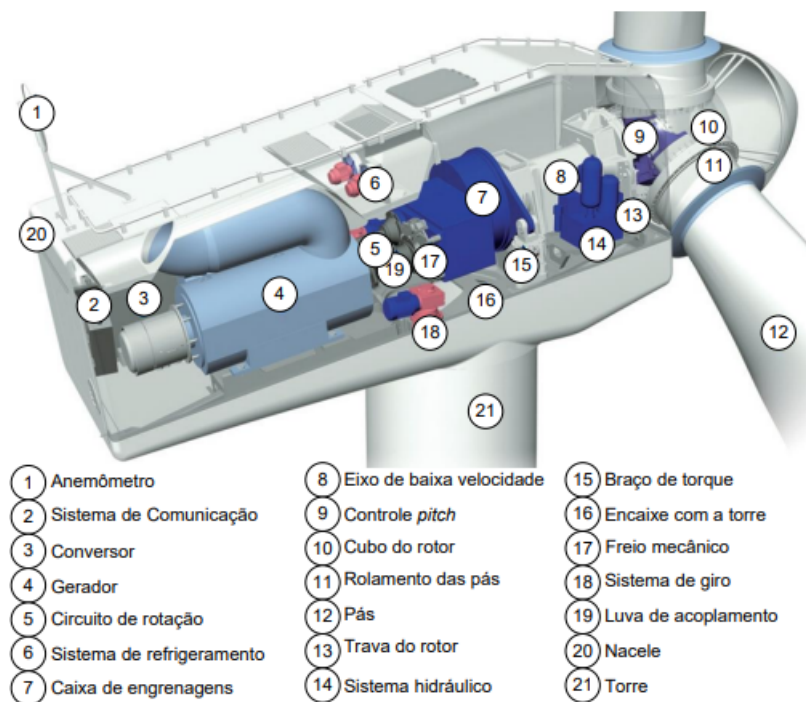


Fonte: Atlas Eólico, 2013 [33]

O potencial eólico identificado por meio do Atlas e as técnicas de previsibilidade aplicadas no setor são fundamentais para informar a localização estratégica e a eficiência operacional das turbinas eólicas. Com base nas informações sobre a velocidade média do vento e o potencial de geração eólica

em diferentes alturas, é possível otimizar o projeto e a configuração dos sistemas de conversão de energia das turbinas eólicas. Na Figura 2.11 ilustra-se e enumera-se os principais componentes de um aerogerador.

Figura 2.11: Principais componentes de um aerogerador.

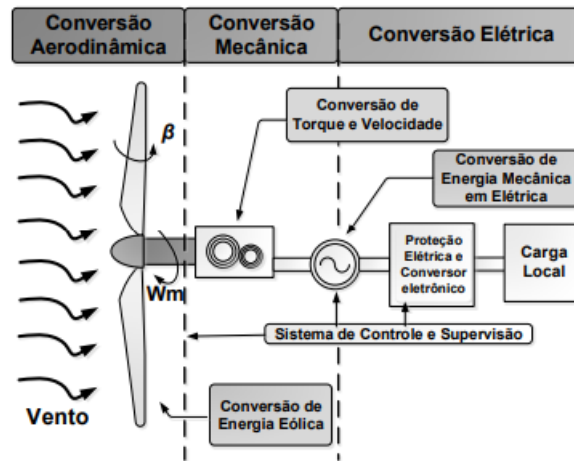


Fonte: Diana Martinello, 2015 [34]

Esse sistema detalha os componentes de um aerogerador, composto por torre, nacelle, pás e rotor. A maior parte dos equipamentos que compõem o sistema ficam dentro da nacelle, onde podem ser encontrados caixa de velocidade, utilizada para sincronizar as diferentes rotações entre o gerador e a turbina. Na sequência, conecta-se um gerador elétrico, responsável por converter a energia mecânica do movimento da turbina em energia elétrica, sendo os geradores de corrente alternada os mais comuns. Essa energia é, então, despachada na rede, microrrede ou em cargas isoladas, através de uma interface de ligação do sistema eólico com o sistema elétrico, composto por

um conversor [35, 34]. A Figura 2.12 apresenta um esquemático genérico de como funciona a conversão de energia dentro de uma turbina eólica.

Figura 2.12: Sistema de conversão de um aerogerador.

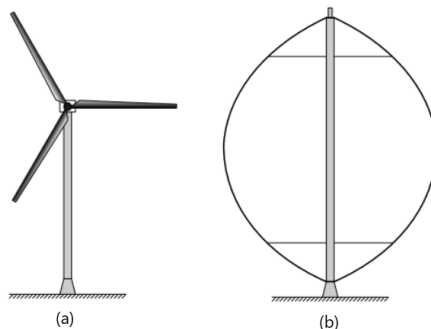


Fonte: Diana Martinello, 2015 [34]

Já na Figura 2.13 são apresentadas as diferenças entre turbina de eixo horizontal e vertical. As turbinas eólicas de eixo horizontal possuem eficiência superior às de eixo vertical, operando com bom desempenho em velocidades de vento mais baixas e sem a necessidade de um motor adicional para iniciar a rotação. No entanto, exigem um sistema de orientação para alinhar as pás do rotor com a direção predominante do vento. Por outro lado, as turbinas de eixo vertical possuem pás dispostas em torno de um eixo central orientado verticalmente, perpendicular à direção do vento. Em comparação com as turbinas de eixo horizontal, estas geram menos ruído e dispensam mecanismos para controlar a direção do vento. Devido à fadiga causada pela força variável do vento em diferentes partes da estrutura, podem apresentar desempenho inferior em condições de vento forte e precisar de meios externos para iniciar a operação em velocidades de vento mais baixas.



Figura 2.13: Modelos de Turbinas Eólicas: (a) Eixo Horizontal, (b) Eixo Vertical.



Fonte: Adaptado de Ananda Thomaz, 2021 [35]

Na Tabela 2.2 são apresentados exemplos de modelos de turbinas eólicas e os respectivos parâmetros que influenciam diretamente na capacidade de geração dos parques.

Tabela 2.2: Modelos de aerogeradores de 4.2MW

Fabricante	Potência Nominal (kW)	Diâmetro do Rotor (m)	Altura do Torre (m)
Vestas	4000/4200	150	105/123/145/155/166 <sup>1</sup>
WEG	4200	147	125 <sup>2</sup>
GoldWind	4200	155	100 <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fonte: [36]; <sup>2</sup> Fonte: [37]; <sup>3</sup> Fonte: [38]

### 2.1.3 Armazenamento por Baterias

Os projetos de armazenamento de energia no Brasil receberam um impulso significativo em 2016, quando a ANEEL, por meio de um programa de P&D estratégico, estabeleceu as bases iniciais para o desenvolvimento tecnológico e a infraestrutura de produção nacional necessários para a integração de BESS (do inglês, *Battery Energy Storage System*) ao setor elétrico. Os projetos atualmente em operação continuam a contribuir para a formulação

da regulamentação e para a expansão do conhecimento sobre essa solução. Atualmente, há 20 projetos em fase inicial de avaliação, totalizando uma capacidade instalada de 83.2 MWh [39].

Ao permitir o armazenamento de uma grande quantidade de energia próxima aos centros de consumo, surgem novas possibilidades para lidar com situações de volatilidade de preços, falhas em linhas de transmissão/distribuição e controle de reativos. Além disso, está em curso uma significativa redução nos preços das baterias. Desde 2010 até o presente momento, os preços reduziram em 84%, com uma expectativa de queda adicional de 65% até 2030 [40].

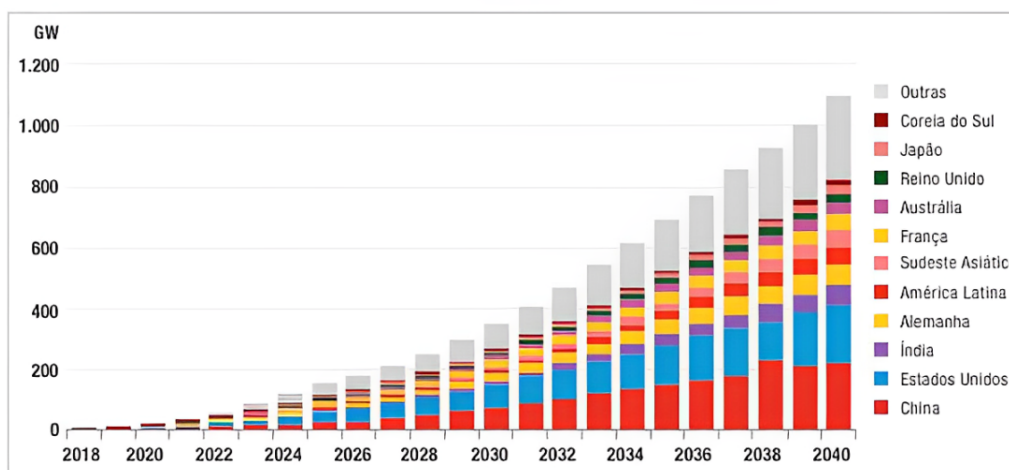
O BESS é integrado ao SEP através de um sistema de conversão de potência, que realiza a conversão entre corrente contínua e corrente alternada, permitindo a interação eficiente entre o sistema de armazenamento de energia e o sistema elétrico de potência. A implementação da estocagem de energia oferece uma variedade de configurações e utilidades, que podem operar de forma independente ou complementar [39]. Essas aplicações estão distribuídas em quatro categorias distintas, conforme relatado a seguir [40]:

- Suporte à estabilidade e operação da rede: os dois principais desafios em termos de estabilidade da rede são a estabilidade dos níveis de tensão e a estabilidade da frequência. A incorporação do BESSs pode servir como uma ferramenta na gestão do SEP. A colocação do armazenamento próximo à carga permite respostas mais ágeis para atender às exigências de ajuste e controle dos níveis de frequência e tensão;
- Melhoria na qualidade da distribuição de energia: os sistemas de armazenamento podem desempenhar variadas funções na distribuição de energia, incluindo: servir como *backup* durante faltas temporárias, controlar a tensão da rede e injetar reativos no sistema;
- Arbitragem (controle da oferta e demanda de energia): A arbitragem de preço de energia ocorre quando baterias são utilizadas como armazenamento de energia para gerar lucro, a partir da diferença entre o preço de compra da energia durante o carregamento da bateria e o

preço de venda da energia durante o descarregamento da bateria. Essa prática pode ser descentralizada, envolvendo consumidores finais, ou concentrada, por meio de grandes bancos de baterias conectados a subestações.

Nesse contexto, as tecnologias de armazenamento tem sido objeto de estudos de inovação, com foco em reduzir os seus custos e melhorar a sua eficiência para, assim, impulsionar a sua utilização. Na Figura 2.14 é apontado o crescimento da utilização de sistemas de armazenamento no mundo.

Figura 2.14: Instalação de Armazenamento de Energia Acumulada no Mundo



Fonte: Matheus Nascimento, 2023 [41]

Nessa curva exponencial de crescimento, observa-se que China e Estados Unidos estão na vanguarda da utilização de armazenamento. Em ambos países, as desafiadoras metas de redução de emissões de GEEs são também um impulsionador dos investimentos em inovação tecnológica em estocagem de energia. Até o ano de 2050, objetiva-se que as energias renováveis e os bateriais sejam responsáveis por produzir 43% da energia total dos Estados Unidos e contribuam para a redução de mais de 54% de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera [41].

A previsão da BloombergNEF (BNEF), fornecedor de pesquisa estratégica que cobre os mercados globais de *commodities* e tecnologias disruptivas que impulsionam a transição para uma economia de baixo carbono, indica que a maioria dos sistemas de armazenamento de energia construídos até 2030, correspondendo a 61% dos Megawatts, será destinada ao que é conhecido como “deslocamento de energia” (ou seja, avançando ou atrasando o momento do despacho de eletricidade). Projetos de energias renováveis combinadas com armazenamento, especialmente solar mais armazenamento, estão se tornando cada vez mais comuns em escala global [42].

As baterias instaladas nos locais dos clientes - tanto em residências quanto em estabelecimentos comerciais e industriais - também devem crescer em um ritmo constante. Atualmente, Alemanha e Austrália lideram nesse setor, com mercados significativos também presentes no Japão e na Califórnia. A BNEF prevê que o armazenamento de energia em residências e empresas representará aproximadamente um quarto das instalações globais de armazenamento até 2030 [42].

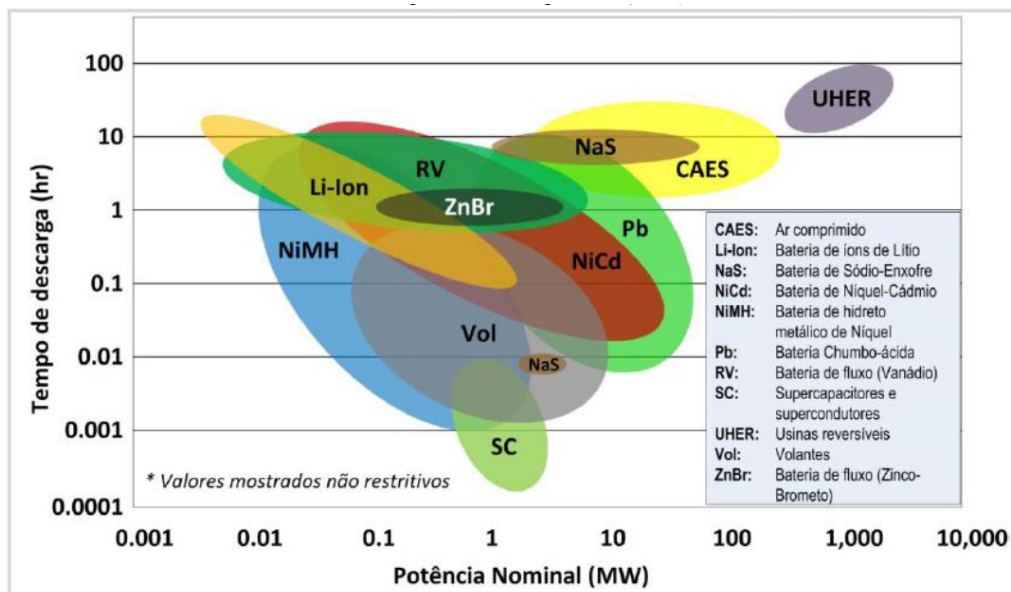
Embora as baterias de íons de lítio dominem as instalações atualmente, várias tecnologias não-bateria estão em desenvolvimento, incluindo armazenamento de ar comprimido e energia térmica. No entanto, a BNEF prevê que as baterias continuarão a dominar o mercado pelo menos até a década de 2030, devido à sua competitividade de preço, cadeia de suprimentos consolidada e histórico comprovado. Se novas tecnologias conseguirem superar com sucesso as baterias de íons de lítio, a adoção total de armazenamento de energia pode ser ainda maior [42].

Enquanto a redução de custo desses sistemas não se materializa, os países se deparam com a necessidade de pagar preços elevados pela sua aquisição, adaptando-se às limitações em termos de capacidade de armazenamento e taxas de fornecimento de energia. Em um outro contexto, o armazenamento pode ser economicamente viável se o custo da produção de energia for consideravelmente alto. Portanto, ao avaliar o tipo de tecnologia, é essencial considerar aspectos técnicos como o custo por kWh (quilowatt-hora), a capacidade

de armazenamento, o tempo de carga e descarga e a eficiência global [41].

Como uma forma de comparar o comportamento de diferentes tecnologias de armazenamento, na Figura 2.15 é apresentado um levantamento dos parâmetros de tempo de descarga e capacidade de armazenamento para os variados mecanismos de estocagem.

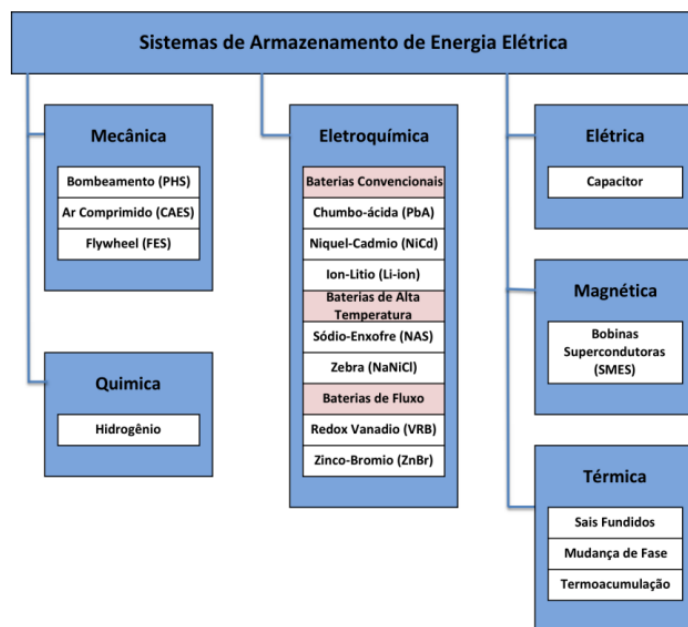
Figura 2.15: Tempo de Descarga vs Potência Nominal de Sistemas de Armazenamento.



Fonte: Matheus Nascimento, 2023 [41]

Como complemento, na Figura 2.16 é classificado o tipo de armazenamento conforme a natureza do processo utilizado para estocagem, podendo ser elétrico, mecânico, químico, eletroquímico, térmico e magnético. Observa-se que a categoria de Eletroquímico é a que possui a maior diversificação de tecnologias aplicadas, existindo também uma subclassificação em baterias convencionais, baterias de alta temperatura e baterias de fluxo.

Figura 2.16: Tipos de Sistemas de Armazenamento de Energia.



Fonte: Academia Nacional de Engenharia, 2016 [43]

A diferença de comportamento entre as tecnologias reforça a necessidade de se avaliar os parâmetros técnicos inerentes ao local e perfil de instalação, pois cada região e projeto pode necessitar de um perfil de carga e descarga diferente. Essa abordagem possibilita inferir também que os custos de cada tecnologia e o dimensionamento realizado irá variar como escolhas feitas no projeto, o que ressalta a importância de um estudo de viabilidade técnico-econômica em empreendimentos de armazenamento, com ou sem geração de energia associada.

Na Figura 2.17 são compiladas as informações referentes ao custo das tecnologias de armazenamento quando utilizadas em aplicações para apoio à integração com fontes renováveis. Já na Figura 2.18 destaca-se os custos das tecnologias usadas também para regulação rápida do SEP.

Figura 2.17: Custo das tecnologias de armazenamento para apoiar a integração com fontes renováveis.

TECNOLOGIA		CARACTERÍSTICAS DO ARMAZENAMENTO				CUSTO	
Opção	Maturidade	Energia MWh	Potência MW	Duração H	Efic. (%) (nº ciclos)	Invest. US\$/kW	Energia US\$/kWh
PHS	Madura	1680 - 5300	280 - 530	6 - 10	80-82 (>13000)	2500 - 4300	420 - 430
PHS	Madura	5400-14000	900 - 1400	6 - 10	80-82 (>13000)	1500 - 2700	250 - 270
CT-CAES	Demonstração	1440 - 3600	180	8	(>13000)	960	120
CT-CAES	Demonstração	1440 - 3600	180	20	(>13000)	1150	60
CAES (Subsolo)	Comercial	1080	135	8	(>13000)	1000	125
CAES (Subsolo)	Comercial	2700	135	20	(>13000)	1250	60
NAS	Comercial	300	50	6	75 (4 500)	3100 - 3300	520 - 550
Pb-Ac (Avançada)	Comercial	200	50	4	85-90 (2200)	1700 - 1900	425 - 475
Pb-Ac (Avançada)	Comercial	250	20 - 50	5	85-90 (4500)	4600 - 4900	929 - 980
Pb-Ac (Avançada)	Demonstração	400	100	4	85-90 (4500)	2700	675
VRB	Demonstração	250	50	5	65 - 75 (>100000)	3100 - 1700	620 - 740
ZnBr Fluxo	Demonstração	250	50	5	60 (>100000)	1700 - 1900	290 - 350
FeCr Fluxo	P&D	250	50	5	75 (>100000)	1800 - 1900	360 - 380
Zn/Ar Redox	P&D	250	50	5	75 (>100000)	1440 - 1700	290 - 340

Fonte: Academia Nacional de Engenharia, 2016 [43]

Figura 2.18: Custo das tecnologias de armazenamento para regulação rápida e para apoiar a integração com fontes renováveis.

TECNOLOGIA		CARACTERÍSTICAS DO ARMAZENAMENTO				CUSTO	
Opção	Maturidade	Energia MWh	Potência MW	Duração H	Efic. (%) (nº ciclos)	Invest. US\$/kW	Energia US\$/kWh
Volante	Demonstração	5	20	0,25	85-87 (>100000)	1950 - 2200	7800 - 8800
Íon-Lítio	Demonstração	0,25 - 25	1 - 100	0,25 - 1	87-92 (>100000)	1085 - 1550	4340 - 6200
Pb-Ac (Avançada)	Demonstração	0,25 - 50	1 - 100	0,25 - 1	75 - 90 (>100000)	950 - 1590	2770 - 3800

Fonte: Academia Nacional de Engenharia, 2016 [43]

Nessa abordagem, vale a pena destacar a tecnologia de bateria de íon-lítio. Para esse tipo de tecnologia, a Bloomberg NEF calcula que os preços das baterias de lítio diminuirão 89% entre 2010 e 2020, com um preço médio estimado de US\$ 137/kWh em 2020. Essa estimativa reflete os preços pre-

dominantemente observados em veículos elétricos e não inclui os custos de instalação e equipamentos adicionais necessários para sistemas estacionários. De acordo com dados fornecidos por empresas, o preço final de uma solução completa de armazenamento, incluindo instalação, estava na faixa de R\$ 4.000/kWh no Brasil em 2021, tanto para soluções residenciais quanto comerciais, conforme relatado pela EPE em seu estudo para o Planejamento Decenal da Expansão 2031, em que a instituição também prevê que esse preço final caia para cerca de R\$ 1.700/kWh até 2031 [44].

Nesse contexto, as técnicas empregadas para avaliar a viabilidade econômica de projetos, como por exemplo, a utilização de BESS em diferentes arranjos no SEP, geralmente envolvem análises de fluxo de caixa, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). O cálculo do VPL é determinado pela soma dos fluxos de caixa futuros trazidos a valor presente através da aplicação de uma taxa de desconto conhecida como custo médio ponderado de capital. Já a TIR é definida como a taxa de retorno alcançada pelo investimento no regime de juros compostos [40].

A utilização do BESS em território brasileiro ocorre majoritariamente em alguns projetos de P&D e para locais isolados, em que há dificuldade logística que impede a chegada no sistema elétrico. Existem também alguns casos de uso em aplicações para a prestação de serviço ancilar. Contudo, a alta capacidade de produção de células de baterias de íons de lítio e o contínuo aprimoramento nas tecnologias de baterias reforçam a expectativa de uma significativa redução de custos nos próximos anos.

Embora a viabilidade econômica atual possa não ser atrativa, quando essa viabilidade se concretizar, seja devido à redução de custos nos BESS ou ao aumento do custo da energia fornecida pela concessionária, as possibilidades serão disruptivas. Dentre essas possibilidades, destaca-se a utilização de sistemas de armazenamento de energia em usinas de geração híbridas com fontes renováveis, como por exemplo, solar e eólica.



## 2.2 Usinas de Geração Híbridas

A energia renovável tem um potencial significativo para reduzir o custo da eletricidade em áreas rurais e isoladas em todo o mundo. Em regiões distantes das principais redes de energia, as microrredes são frequentemente a principal fonte de eletricidade para a indústria e residências. Nestas regiões, a geração de eletricidade geralmente depende de combustível diesel, muitas vezes importado de longas distâncias. Contudo, estes custos para geração podem ser reduzidos ao hibridizar essas redes isoladas com energia solar fotovoltaica ou outras fontes de energia renovável [45].

Demonstra-se, portanto, que a hibridização não se resume à utilização apenas de fontes renováveis combinadas. Os arranjos de sistemas híbridos podem também ser realizados através de diferentes configurações. Como exemplo, cita-se o estudo de caso da região do Canadá, onde o gerador a diesel foi integrado à fonte solar com bateria [46], para atendimento de uma região remota no país. Outro arranjo possível surge a partir da biomassa combinada à geração eólica, no qual ganha em confiabilidade do sistema ao reduzir a intermitência, inserindo uma fonte de geração constante representada pela biomassa [47].

Nesse contexto, garantir a integração eficiente entre energia solar e/ou eólica em uma rede de energia, que utiliza como base o fornecimento via geradores a diesel, requer o uso de tecnologias habilitadoras que permitam gerenciar a variabilidade dessas fontes renováveis e manter a estabilidade da rede. Um estudo feito pela IRENA concluiu que, no médio prazo e longo prazo, soluções de energia baseadas em energias renováveis seriam as mais sustentáveis e econômicas, por exemplo, para comunidades nas Ilhas do Pacífico. Neste contexto, a geração solar poderia cobrir cerca de 30% a 40% da demanda total de energia, o que poderia resultar em economias de diesel [45, 48].

Através de estudos como esse da IRENA, há viabilidade e perspectivas de redução de custos e de emissões através da hibridização de plantas em locais isolados no contexto internacional. Já para o Brasil, a EPE e a ANEEL

têm se posicionado sobre o tema, divulgando notas técnicas e resoluções normativas que buscam trazer orientações e disseminar os aspectos técnicos para a adoção de usinas híbridas no país.

### **2.2.1 Tipos de Arranjos de Usinas Híbridas**

Como exemplo, a EPE lançou em 2018 a Nota Técnica EPE-DEE-NT-011/2018-r0, intitulada “Usinas Híbridas: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento” com o objetivo de mapear os diversos arranjos e tipologias de configurações na integração entre diferentes fontes energéticas. Nesta nota discutem-se os benefícios da hibridização e suas limitações, a seguir resumidos e relatados, de acordo com os estudos apresentados pela empresa.

As usinas híbridas possibilitam um melhor aproveitamento do sistema de transmissão existente, através da otimização do uso de área disponível, em que seja possível a instalação de ambas fontes em um mesmo terreno, reduzindo custos de arrendamento ou compra de terras. Além disso, a construção da usina também pode ser otimizada, ao se considerar custos logísticos de aquisições, equipamentos, mão-de-obra, entre outros [15].

Não somente na construção, mas a operação da usina híbrida também é otimizada, em virtude do compartilhamento de responsabilidades entre as geradoras, em itens como manutenção, segurança e inspeção, melhorando a sua competitividade. Além da operação, ganha-se também em competitividade com a possibilidade de utilização de equipamentos compartilhados, como inversores e transformadores. Por fim, outro benefício da hibridização é a redução do valor de contratação do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST), isto é, para sistemas híbridas a contratação para uso da rede é menor que a soma das potências individuais das fontes de geração [15].

Além dos benefícios, a Nota Técnica EPE-DEE-NT-011/2018-r0 discute também as limitações físicas e operativas para a implantação de uma usina híbrida. Preliminarmente, o fato de não existir ainda normas regulatórias específicas apresenta-se como uma dificuldade na implementação desses pro-

jetos. Sobre aspectos técnicos, podem ser citados: a necessidade de cortar uma das fontes de geração quando a produção de energia ultrapassa o montante contratado (MUST) a ser escoado para a rede. Nesses casos, o sistema de armazenamento atua como uma possível solução para absorver a energia excedente; a interferência entre as fontes como, por exemplo, no caso de turbinas eólicas que podem interferir no sombreamento de módulos FVs [15].

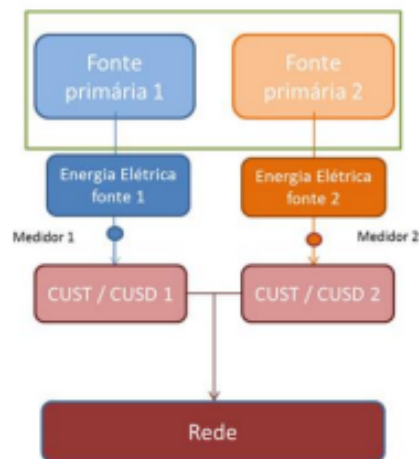
Nesse contexto, a EPE retrata que a denominação “usina híbrida” é utilizada para referenciar diferentes arranjos de integração de fontes de geração. Conceitualmente, pode-se enumerar as configurações de usinas entre adjacentes, associadas, híbridas e portfólios comerciais [15].

### **Usinas Adjacentes**

São aquelas construídas em locais muito próximas, podendo compartilhar o mesmo terreno. Neste arranjo, cada usina deve contratar uma capacidade de uso da rede conforme sua potência instalada nominal. Embora esse arranjo possa resultar em economias no custo do terreno e sinergias operacionais, do ponto de vista do sistema, são consideradas duas usinas distintas, pois não compartilham equipamentos de geração.

Na Figura 2.19 ilustra-se o esquemático de conexão para esse tipo de configuração de usina, onde destaca-se que as fontes possuem medição e pontos de conexão à rede diferentes e separados.

Figura 2.19: Representação de Usinas Adjacentes.



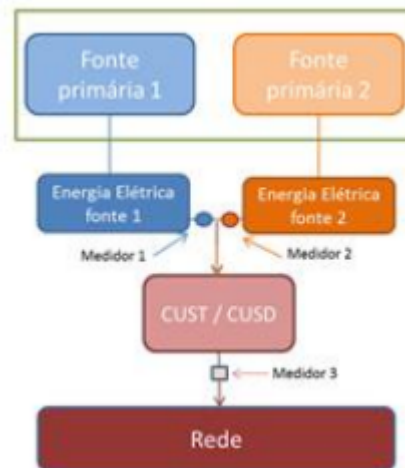
Fonte: EPE, 2018 [15]

Nas usinas adjacentes, os empreendedores podem subdimensionar a capacidade instalada para aproveitar a complementaridade nas gerações das usinas. Nesse caso, qualquer *curtailment* devido ter uma produção superior à capacidade de escoamento, seria suportado pelo próprio gerador. Além disso, esse tipo de arranjo pode ser utilizado por parques eólicos, que se associam em complexos, podendo também incluir novos empreendimentos fotovoltaicos.

### Usinas Associadas

Usinas associadas são caracterizadas por duas ou mais usinas de fontes energéticas distintas, com padrões de produção complementares, localizadas próximas umas das outras e compartilhando tanto a infraestrutura física quanto os contratos de conexão e acesso à rede básica ou de distribuição, conforme apresentado na Figura 2.20. Nesses casos, as usinas associadas contratam uma capacidade de uso da rede menor do que a soma das potências nominais das fontes.

Figura 2.20: Representação de Usinas Associadas.



Fonte: EPE, 2018 [15]

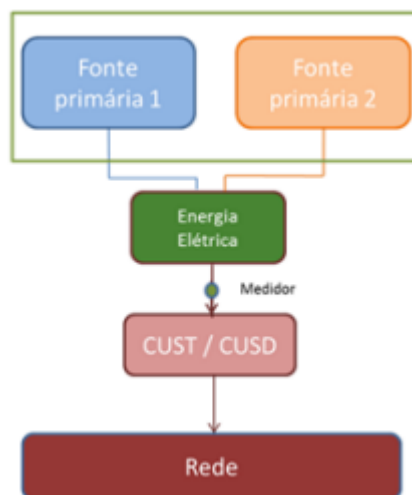
Apesar de existirem vantagens para essa configuração em relação às usinas adjacentes, tal como a redução do custo de infraestrutura de conexão, vale ressaltar que essa combinação aumenta a complexidade do sistema. Isto deve-se ao fato da necessidade de lidar com o *curtailment*, onde a energia produzida pode não ser totalmente escoada mediante às limitações da rede, resultando em desperdício, além de requerer ajustes regulatórios e contratuais.

Embora para o operador do sistema elétrico essas usinas sejam consideradas como uma única fonte de injeção de potência, elas não são classificadas como usinas híbridas propriamente ditas, pois os equipamentos de geração são independentes, podendo até mesmo ter medidores individuais.

### Usinas Híbridas

Como usinas propriamente híbridas se classificam aquelas em que diferentes fontes se combinam durante o processo de geração de energia elétrica. O esquemático apresentado na Figura 2.21 demonstra que nessas situações há apenas um medidor, instalado em um único ponto de conexão que integra a energia gerada com a rede.

Figura 2.21: Representação de Usinas Híbridas.



Fonte: EPE, 2018 [15]

Exemplos desse tipo de usina incluem: uma planta solar heliotérmica, que utiliza queima de biomassa, onde o vapor produzido por ambas as fontes é aproveitado na mesma turbina; uma usina fotovoltaica que compartilhe os conversores dos aerogeradores, eliminando a necessidade de inversores fotovoltaicos separados. Em ambas as situações, não é possível distinguir qual fonte primária contribuiu para a produção específica de energia elétrica.

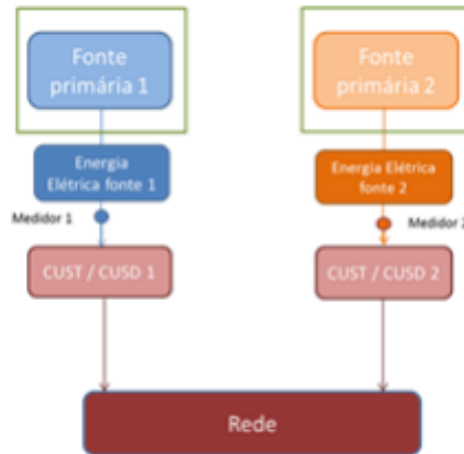
### **Portfólios Comerciais**

A composição de portfólios comerciais entre diferentes fontes se diferencia das categorias anteriores por não envolver estritamente compartilhamento de equipamentos ou qualquer proximidade física, como ilustrado na Figura 2.22. Esta configuração é puramente comercial e contratual, visando principalmente reduzir riscos em operações de variação de preços no curto prazo.

Independente de proximidade física, a composição de portfólios comerciais faz sentido quando se trata de usinas que possuem recursos de geração complementares. Além disso, esta configuração não interfere na contratação do uso da rede de transmissão (CUST) ou distribuição (CUSD), que será

independente para cada usina geradora.

Figura 2.22: Representação de Portifólios Comerciais.



Fonte: EPE, 2018 [15]

### 2.2.2 Avaliação de Normativos Nacionais

Para além dos aspectos técnicos de conexão, a EPE relata também ações necessárias para viabilidade dos projetos de geração híbrida, incluindo sugestões de alterações normativas. Dentre as sugestões, pode-se citar [15]:

- Definição de Regras em relação a perdas por redução ou *curtailment*: O *curtailment* por falta de capacidade de escoamento de energia poderá ser algo comum nas usinas híbridas. Com isso, é preciso definir qual será o tratamento dado, pelas agências reguladoras, à energia excedente perdida, como por exemplo qual fonte será cortada no caso de contratos separados.
- Contratação do montante de uso do sistema (MUST ou MUSD): Para viabilizar a instalação de usinas associadas, seria necessário avaliar a possibilidade do MUST contratado ser diferente da soma das potências nominais individuais que compõem a usina, e ser equivalente ao valor de potência máxima injetável declarada pelo empreendedor. Dessa

forma, em caso de ultrapassagem de MUST valeriam as regras de tarifação maior para os horários de excedente, de modo a buscar evitar as ultrapassagens de montante de energia despachado.

- Parecer de acesso do ONS: Faz-se necessário definir os requisitos que devem ser seguidos para obtenção do parecer de acesso das usinas com mais de uma fonte de geração.
- Regras para leilões e contratos em empreendimentos híbridos: No cenário atual, existem diferentes mecanismos de contabilização de energia para leilões ou contratos de mercado livre (energia firme, energia assegurada etc). A produção solar, por exemplo, pode variar entre 90% e 115% da obrigação contratual, enquanto a eólica pode variar entre 90% e 130%. Quando se acrescenta um sistema de armazenamento ao conjunto, a regulamentação necessária se torna ainda mais complexa. Sendo assim, deve ser avaliada a possibilidade de contratação na modalidade tradicional de nova fonte, que seria associada ou hibridizada em empreendimento existentes ou tratar como empreendimentos separados, que formariam um conjunto associado.
- Combinações com condições contratuais distintas: Quando adicionada uma nova fonte em usina existente, sugere-se que seja avaliada a possibilidade dessa nova fonte ter regras de contratação distintas da anterior.

A criação de regras específicas para usinas híbridas são um grande desafio, uma vez que podem existir uma grande quantidade de combinações e proporções de contribuição de cada fonte para a geração total da planta. Após a divulgação da nota técnica da EPE em 2018, a ANEEL publicou em 2021 a Resolução Normativa (RN) 954/2021, em que divulga uma série de normativos específicos para usinas híbridas e associadas. Ainda em 2022, essa mesma resolução passou por atualizações, revogando determinações que haviam sido publicadas na versão anterior. Dentre os tópicos constantes nesta RN estão [49]:



- Estabelecimento do que são as usinas híbridas e diferenciação das usinas associadas:
  - Central Geradora Híbrida (UGH): instalação de produção de energia elétrica a partir da combinação de diferentes tecnologias de geração, com medições distintas por tecnologia de geração ou não, objeto de outorga única; e
  - Centrais geradoras associadas: duas ou mais instalações, com a finalidade de produção de energia elétrica com diferentes tecnologias de geração, com outorgas e medições distintas, que compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e uso do sistema de transmissão.
- Regras para contratação de MUST: a RN permite que o MUST contratado seja um valor dentro da “Faixa de Potência da Central Geradora Híbrida”. Este valor é uma potência compreendida entre a soma das potências elétricas ativas nominais da tecnologia de geração de maior participação e a soma das potências elétricas ativas nominais de todas as tecnologias de geração;
- Associação de Centrais Geradoras: a mudança na forma de associação das Centrais Geradoras deverá ser precedida de Parecer de Acesso e não poderá implicar em redução do MUST contratado pela associação original.

A partir do ganho de maturidade e entendimento dos normativos aqui discutidos, os projetos de sistemas híbridos podem obter ainda mais espaço no contexto nacional. Nesse contexto, é fundamental que se discuta não somente os aspectos regulatórios, mas também que sejam estudados os parâmetros de viabilidade econômica da geração híbrida.

## 2.3 Avaliação de Viabilidade Técnico-Econômica de Usinas Híbridas

### 2.3.1 Conceitos Gerais

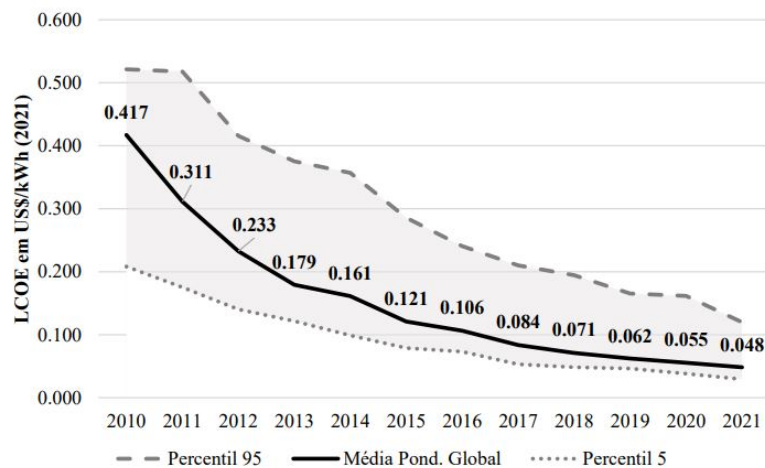
A realização de estudos de viabilidade técnico-econômica proporciona uma visão de custos anuais do sistema e retorno financeiro obtido do projeto. No âmbito de P&D, esse tipo de estudo agrega consideravelmente na relevância do projeto, bem como no impacto da execução do mesmo. Para os sistemas híbridos renováveis, o dimensionamento e a otimização devem levar em consideração a redução do custo total do sistema, que pode ser avaliado a partir de diferentes metodologias [50]. Para a instalação eólica, por exemplo, os elementos que influenciam os custos na produção da energia são [51]:

- Despesas de aquisição: englobam os custos relacionados à aquisição de turbinas, construção das fundações, desenvolvimento de infraestrutura de acesso e conexão à rede elétrica. Esta categoria pode representar até 80% dos custos totais de um projeto ao longo de sua vida útil;
- Despesas operacionais: incluem os custos de manutenção e operação, aluguel de terrenos, despesas com seguro e taxas administrativas. Esses custos tendem a ser relativamente baixos, correspondendo a cerca de 20% do investimento total;
- Produção de energia: o montante de geração está diretamente relacionado aos padrões de vento locais, especificações das turbinas e características do terreno. O indicador chave para determinar a capacidade de geração de eletricidade de um parque eólico é o seu fator de capacidade, que representa a porcentagem do tempo durante o ano em que o parque eólico efetivamente gera energia;
- Custo de oportunidade e vida útil do projeto: ambos refletem o risco associado ao projeto, as condições do mercado interno de cada país e a rentabilidade de alternativas de investimento.

Para a usina fotovoltaica, essa segregação de custos se repete, seguindo a mesma lógica de considerar custos de aquisição, manutenção e operação, produção de energia e vida útil. Especificamente, nos custos de aquisição para a geração solar devem ser incluídos também o custo com inversor DC/AC para conexão à rede e os custos de rastreadores solares, caso sejam utilizados. Já na produção de energia elétrica, o montante gerado está diretamente relacionado à irradiação solar do local da instalação [52].

Para ambas as fontes, ao levar em consideração estas categorias de custos associados a cada fonte, bem como aspectos como a confiabilidade dos equipamentos, expressa na quantidade esperada de falhas, nos indicadores operacionais e na perda de geração associada, torna-se possível calcular o LCOE (do inglês, *Levelized Cost of Electricity*) abrangente da geração ao longo dos anos. Para as usinas fotovoltaicas, entre 2010 e 2021, observou-se uma queda significativa nos valores, passando de US\$ 0,417/kWh para US\$ 0,048/kWh, representando uma redução da ordem de 88%. Na Figura 2.23 apresenta-se o histórico do valor do LCOE para geração fotovoltaica, conforme dados disponibilizados pelo IRENA [52].

Figura 2.23: Evolução Histórica do LCOE da geração fotovoltaica.



Fonte: Macedo, 2022 [52]

Em seu Relatório de Custos da Geração Renovável referente ao ano de 2022, o IRENA apresenta diversas considerações para os valores e evolução do LCOE no setor elétrico mundial. Para os novos projetos de energia eólica *onshore*, o LCOE médio global caiu 5% entre 2021 e 2022, de USD 0,035/kWh para USD 0,033/kWh. Já para a energia eólica *offshore*, o custo da eletricidade dos novos projetos aumentou 2%, em comparação com 2021, passando de USD 0,079/kWh para USD 0,081/kWh em 2022. Para os projetos de energia solar fotovoltaica de grande escala, diminuiu 3% em 2022 para USD 0,049/kWh [53].

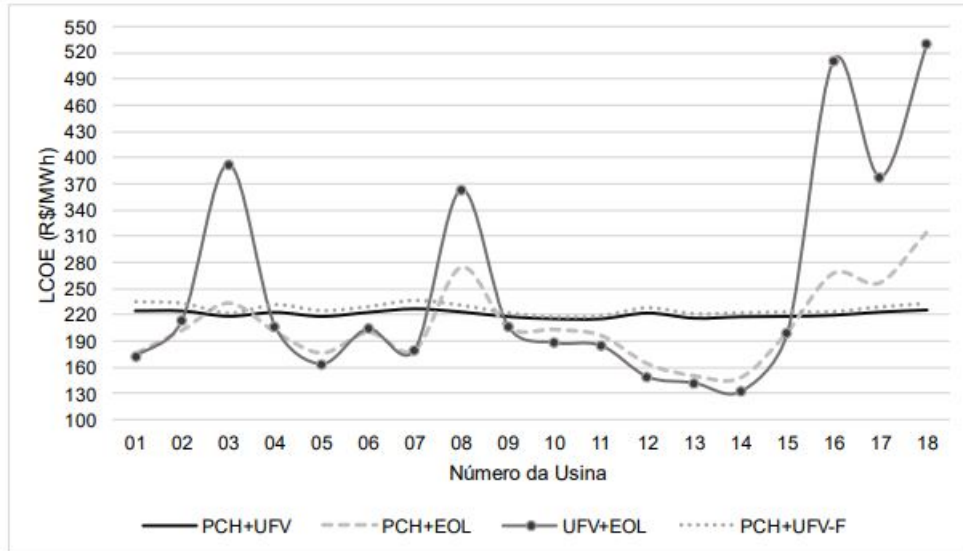
A competitividade da energia renovável nas últimas duas décadas, resultando na redução do LCOE é motivada também pelo aumento dos preços dos combustíveis fósseis. Em 2010, o LCOE médio global da energia eólica *onshore* era 95% maior do que o custo mais baixo de combustíveis fósseis; em 2022, o LCOE médio global de novos projetos de energia eólica *onshore* era 52% mais baixo do que as soluções de combustíveis fósseis mais baratas [53]. No entanto, essa melhoria do LCOE da energia eólica foi superada pela da energia fotovoltaica. Esta fonte de energia renovável era 710% mais cara do que a solução de combustíveis fósseis mais barata em 2010, mas custava 29% menos do que a solução de combustíveis fósseis mais barata em 2022 [53].

Com a redução dos custos de geração e melhoria do LCOE das fontes renováveis, surgiram estudos que passaram a analisar a viabilidade de projetos de hibridização dessas fontes, também a partir da utilização do LCOE como referência. Por exemplo, Leandro Croce [54] desenvolveu em sua dissertação uma simulação, através do software HomerPro, de valores de LCOE para diferentes combinações de usinas híbridas. O resultado obtido com a simulação é sintetizado no gráfico da Figura 2.24.

Observa-se neste gráfico que, em alguns casos, a hibridização mantém o LCOE em um patamar constante, como é o caso da combinação entre Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Usinas Fotovoltaicas (UFV), sejam elas flutuantes ou não. Por sua vez, a combinação entre eólica e solar gera uma variação nos valores de LCOE chegando a alcançar valores maiores que os

LCOEs individuais de cada fonte relatados como média global pelo IRENA em seu relatório de custos de geração.

Figura 2.24: LCOE de arranjos híbridos de fontes renováveis de energia



Fonte: Croce, 2022 [54]

As referências trazidas nesta seção podem demonstrar que a consideração do LCOE para análise de viabilidade de projetos de geração tem se apresentado como uma metodologia já consolidada no setor elétrico, sendo utilizado por diferentes instituições de referência como um parâmetro a ser avaliado na instalação de novas usinas geradoras de energia elétrica. Para além disso, outras metodologias de estudo de viabilidade também são discutidas na literatura, conforme apresentado na seção a seguir.

### 2.3.2 Trabalhos Correlatos

Na Tabela 2.3 sintetiza-se os diferentes tipos de avaliação e as respectivas metodologias de otimização apresentadas em diversas literaturas, que consideram a temática de viabilidade de sistemas híbridos de energia.

Tabela 2.3: Metodologias para avaliação de viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos de energia.

Autor(es)	Descrição metodológica
Kellogg <i>et al.</i>	Descreve a redução do custo total anual de sistemas híbridos como uma combinação entre o custo anual de geração e o custo de manutenção do sistema. <sup>1</sup>
Koutroulis <i>et al.</i>	Sugeriu uma metodologia em que se busca escolher o tipo de equipamento e as unidades para funcionamento do sistema por 20 anos com o menor custo possível, sujeito atender completamente os requisitos da carga sem restrição, baseando-se em algoritmo genético. <sup>2</sup>
Zhang <i>et al.</i>	Baseia-se na estratégia de otimização considerando uma redução no investimento total do sistema durante o seu tempo de vida útil - custo de instalação, Operação e Manutenção (O&M) e substituição -, utilizando algoritmo DIRECT ( <i>Dividing Rectangles</i> ). <sup>3</sup>
Arabi <i>et al.</i>	Determina a configuração ótima do sistema para garantir o suprimento da carga minimizando o custo total da energia, através de algoritmo PSO ( <i>Particle Swarm Optimization</i> ). <sup>4</sup>
Giuseppe	Trabalhou na otimização baseada no desempenho médio a longo prazo e o custo global do sistema na sua vida útil, através da Lógica Fuzzy. <sup>5</sup>
Hakimi	Apresentou uma função para o custo do sistema baseada em indicadores econômicos como Custo Nivelado da Energia (LCOE), Valor Presente Líquido (NPC) and Custo do Ciclo de Vida (LCC). <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Fonte: [55]; <sup>2</sup> Fonte: [56]; <sup>3</sup> Fonte: [57]; <sup>4</sup> Fonte: [58]; <sup>5</sup> Fonte: [59]; <sup>6</sup> Fonte: [60]

Tais abordagens sugerem que a viabilidade técnica-econômica de sistemas híbridos de energia deve considerar como principais fatores: custo do investimento total; custo de operação e manutenção ao longo da vida útil; e suprimento do atendimento da carga. Estes, conseqüentemente, resultam em indicadores econômicos como, por exemplo, o custo da energia.

Uma pesquisa de estado da arte para sistemas de energia híbridos renováveis, realizada através da plataforma *Dimensions AI*, elencou os trabalhos mais citados na temática de viabilidade e análise de custo, conforme resumido na Figura 2.25, onde se apresentam as 10 publicações mais citadas.

A partir dessa busca, pode-se observar que a publicação dos trabalhos mais citados se deu entre os anos de 2016 e 2019. Ao analisar essa amostra, é possível notar que a tendência da produção acadêmica aponta algumas possibilidades para se avaliar a viabilidade técnico-econômica de sistemas híbridos de energia renovável, sendo elas: simulações com o software HOMER, sendo este o mais citado nos trabalhos elencados; e ferramentas de otimização como algoritmos genéticos, MATLAB e aplicação de lógica fuzzy.

Além disso, nota-se que os estudos de viabilidade estão diretamente associados às temáticas de otimização e dimensionamento. Isso ocorre, principalmente, pois o problema de otimização é baseado em funções multiobjetivo que envolvem diferentes custos: custo da energia, custo do ciclo de vida, custo de emissão de gases de efeito estufa e custo anual de perda de carga [61]. A seguir, são discutidas as abordagens apresentadas nos 5 artigos mais citados da temática de viabilidade elencados nesta revisão de literatura.

Bahramara *et al.* [62] apresentam uma revisão ampla a respeito da utilização do software HOMER, elencando os parâmetros de entrada para simulação, a influência da escolha dos equipamentos, as diferentes características de carga e as localizações que são simuladas em mais de 105 publicações referenciadas no trabalho. Como resultado, os autores concluem que sistemas híbridos renováveis são soluções apropriadas para atendimento à carga em áreas remotas e rurais, como também para algumas situações em regiões urbanas. Além disso, demonstram que o software HOMER é uma ferramenta utilizada por muitos pesquisadores ao redor do mundo para o planejamento de sistemas híbridos, e que a modelagem de sistemas híbridos isolados é mais comum em pesquisas do que de sistemas conectados à rede.

Já Amrollahi *et al.* [63] analisaram o modelo de uma microrrede isolada considerando na otimização técnica e econômica do projeto a resposta à de-

manda de energia, variando o dimensionamento dos componentes do sistema. Enquanto muitos estudos tratam a otimização a partir da redução de custos de equipamentos, este trata a otimização a partir da melhor conjugação entre energia gerada e energia requerida pela carga.

Como outra alternativa, Adefarati e Bansal [61] apresentaram uma simulação de otimização de uma microrrede, que investiga os aspectos econômicos de um estudo de caso constituído por geração fotovoltaica, eólica, armazenamento e diesel. Nessa situação, os autores desenvolveram uma ferramenta computacional no MATLAB para processar variáveis como: participação e preço do diesel; variação da carga anual e seus picos de consumo; penetração da geração distribuída com as participações de solar e eólico; parâmetros de irradiação, entre outros. O objetivo desse estudo foi demonstrar a viabilidade e confiabilidade ótima da inserção de fontes renováveis de forma híbrida em microrredes.

Outra abordagem factível é a proposta por Sawle *et al.* [64], que desenvolveram um estudo de caso comparando diferentes técnicas de otimização de um sistema híbrido, composto por combinações entre FV, bateria, diesel, eólica e biomassa. Nesses casos, foram utilizadas as técnicas de algoritmo genético, PSO e TLBO para definir a configuração ótima do sistema, avaliando os parâmetros: (i) técnicos, tais como a participação das fontes renováveis no projeto; (ii) econômicos, como LCOE e consumo de diesel; e (iii) sociais, como geração de empregos e IDH.

Assim como Adefarati, Krishan e Suhag [65] fizeram uma análise de viabilidade técnica e econômica de um HRES (*Hybrid Renewable Energy System*) em uma comunidade rural. Contudo, os autores realizaram simulações em diferentes ferramentas de otimização: HOMER e MATLAB. No HOMER são analisados os resultados de LCOE e VPL (NPC) para determinar as opções mais viáveis economicamente. Por sua vez, o MATLAB é utilizado como uma ferramenta complementar, trazendo uma abordagem de avaliação mais técnica do sistema híbrido. Neste caso, o modelo do sistema otimizado é replicado e sua eficácia é demonstrada em termos de manter o equilíbrio de



potência ativa entre os diferentes componentes do HRES, bem como manter a tensão da ligação CC e a tensão da saída CA constantes, independentemente das variações na irradiância solar, na velocidade do vento e na carga conectada.

Na sequência desta dissertação, são apresentados dois artigos desenvolvidos, em que constam uma revisão de estado da arte das tecnologias de sistemas híbridos renováveis e uma simulação de um estudo de caso para a implementação de um sistema *off-grid* no município de Casa Nova, na Bahia. Nesta simulação, foi considerado o software HOMER como ferramenta de otimização do projeto, sendo avaliados os parâmetros de LCOE, atendimento à carga e *payback* do sistema.

Figura 2.25: Lista das 10 principais produções acadêmicas encontradas na plataforma de busca Dimensions AI para viabilidade técnico-econômica de UHEs.

Revisão de Literatura						
Título	Ano	Autores	Palavra-chave	Fonte de Publicação	DOI	Tipo de estudo
Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review	2016	Bahramara, S.; Moghaddam, M. Parsa; Haghifam, M.R.	Hybrid renewable energy system; HOMER; Optimal sizing	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10.1016/j.rser.2016.05.039	Revisão de Literatura; Simulação do HOMER
Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response	2017	Amrollahi, Mohammad Hossein; Bathaee, Seyyed Mohammad Taghi	Size optimization Micro-grid Stand-alone Mixed integer linear programming Renewable resource energy Demand response	Applied Energy	10.1016/j.apenergy.2017.05.116	Estudo de Caso; Modelagem de equipamentos e matemática
Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources	2019	Adefarati, T.; Bansal, R.C.	Economic Emission Environment Microgrid Reliability	Applied Energy	10.1016/j.apenergy.2018.12.050	Revisão de Literatura; Estudo de Caso; Abordagem matemática
Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques	2018	Sawle, Yashwant, Gupta, S.C.; Bohre, Aashish Kumar	HDI JCI Particular matter Renewable factor Cost of energy HRES	Renewable Energy	10.1016/j.renene.2017.11.058	Estudo de Caso; Modelagem de equipamentos e matemática; Algoritmo de otimização para análise de custos
Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community	2019	Krishan, Om; Suhag, Sathans	Wind energy conversion system (WECS) Photovoltaic (PV) system Battery energy storage system (BESS) Techno-economic analysis Hybrid renewable energy system (HRES)	Journal of Energy Storage	10.1016/j.est.2019.04.002	Estudo de Caso; Simulação no Homer e MATLAB
Feasibility analysis and techno-economic design of grid-isolated hybrid renewable energy system for electrification of agriculture and irrigation area: A case study in Dongola, Sudan	2019	Elkadeem, M.R.; Wang, Shaorong; Sharshir, Swellam W.; Alia, Eman G.	Hybrid renewable energy Techno-economic optimization Carbon emissions Net present cost Sensitivity analysis HOMER Pro®	Energy Conversion and Management	10.1016/j.enconman.2019.06.085	Estudo de Caso; Revisão de Literatura de Sistemas Híbridos Renováveis; Simulação no HOMER
Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building	2017	Singh, Anand; Baredar, Prashant; Gupta, Bhupendra	Solar photovoltaic Hydrogen fuel cell Optimization HOMER Fuzzy logic	Energy Conversion and Management	10.1016/j.enconman.2017.05.014	Estudo de Caso; Modelagem por Lógica Fuzzy; Simulação do Homer
Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach	2016	Maleki, Akbar; Pourfayaz, Fathollah; Ahmadi, Mohammad Hossein	Hybrid renewable energy system Fuel cell/electrolyser storage system Desalination unit Optimization	Solar Energy	10.1016/j.solener.2016.09.028	Modelagem matemática; Algoritmo de otimização para análise de custos
Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm	2019	Javed, Muhammad Shahzad; Song, Aotian; Ma, Tao	Solar-wind-battery system Allowable loss of power supply probability Genetic algorithm Techno-economic assessment Cost of energy	Energy	10.1016/j.energy.2019.03.131	Modelagem de equipamentos e matemática; Comparação de resultados entre HOMER e algoritmo Genético
Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies	2018	Khan, Faizan A.; Pal, Nitai; Saeed, Syed.H.	Renewable energy Sizing schemes Optimization Techniques and cost analysis	Renewable and Sustainable Energy Reviews	10.1016/j.rser.2018.04.107	Revisão de Literatura; Modelagem teórica de equipamentos e análise de custos



# Capítulo 3

## Artigo 1

Hybrid Renewable Energy Systems: An analysis from the state-of-the-art review

Artigo aprovado em Journal of Bioengineering, Technologies and Health, a ser publicado no volume da revista em março de 2024.

Ana Tereza Andrade Borba, Leonardo Jaime Machado Simões, Thamiles Rodrigues de Melo and Alex Álisson Bandeira Santos

Management and Industrial Technology, SENAI CIMATEC University Center, Salvador 41650-010, Brazil

J Bioeng. Tech. Health © 2024 by SENAI CIMATEC. All rights reserved.

# Resumo

Esta revisão de estado da arte investiga a produção de literatura sobre sistemas híbridos de energia renovável (HRES) para atender às crescentes demandas globais de energia e preocupações com as mudanças climáticas. Sistemas fotovoltaicos solares (PV) e turbinas eólicas (WT) destacam-se como componentes primordiais do HRES, que, complementados com Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS), aumentam a eficiência do sistema, armazenando e distribuindo energia excedente durante períodos de baixa geração. Uma análise das tendências da literatura revela um notável aumento nas publicações das pesquisas sobre HRES, atingindo um pico em 2022. Os pesquisadores concentram-se principalmente na otimização de sistemas híbridos, enfatizando dimensionamento, modelagem e avaliações de viabilidade. A predominância de países asiáticos na pesquisa sobre HRES sugere aplicações potenciais em ambientes off-grid dentro de regiões densamente povoadas, remotas e isoladas. Uma revisão da literatura dos dez artigos mais citados de 2019 a 2023 destaca que as publicações mais citadas discutem o estado da arte dos HRES. A análise da literatura identificou lacunas de conhecimento, demonstrando a importância da pesquisa que aborda estratégias de controle, ferramentas de simulação e viabilidade de usinas de energia híbridas em grande escala em geografias diversas, especialmente em locais com alto potencial de geração solar e eólica. Esta revisão não apenas destaca o rápido crescimento e a relevância global dos HRES, mas também serve como um incentivo para a exploração contínua, inovação e colaboração em temas relacionados ao futuro da energia.

Palavras-chave: HRES, Sistemas Híbridos de Energia Renovável, Revisão de Literatura.

---

## Hybrid Renewable Energy Systems: An analysis from the state-of-the-art review

Ana Tereza Borba<sup>1\*</sup>, Leonardo Jaime Machado Simões<sup>1</sup>, Thamiles Rodrigues de Melo<sup>1</sup>, Alex Álisson Bandeira Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SENAI CIMATEC University Center; Salvador, Bahia, Brazil

**This state-of-the-art review investigate the literature production about hybrid renewable energy systems (HRES) to attend the grown global energy demands and climate change concerns. Solar photovoltaic (PV) and wind turbine (WT) systems stand out as primordial components of HRES, which complemented with Battery Energy Storage Systems (BESS) enhance system efficiency by storing and dispatching surplus energy during low-generation periods. An analysis of literature trends uncovers a notable surge in HRES research publications, peaking in 2022. Researchers primarily concentrate on optimizing hybrid systems, emphasizing sizing, modeling, and feasibility assessments. The dominance of Asian countries in HRES research suggests potential applications in off-grid settings within densely populated, remoted and isolated regions. A literature review of the ten most cited articles from 2019 to 2023 underscores that the most cited publications are discussing the state-of-the-art of HRES. The analysis of literature identified knowledge gaps demonstrating the importance of research addressing control strategies, simulation tools, and the feasibility of large-scale hybrid power plants across diverse geographies, especially in locations with high solar and wind generation potential. This review not only highlights the fast growth and global relevance of HRES but also serves as an incentive for ongoing exploration, innovation, and collaboration in themes regarding the future of energy.**

**Keywords:** HRES, Hybrid Renewable Energy Systems, Literature review.

### Introduction

The worldwide energy need has expanded in recent decades, and many researchers in the field of energy studies attribute this to the increase of socio-economic developments. To fulfill this demand growth, the generation of energy is playing a pivotal role in the electricity accessibility and availability [1].

On the other side, the concern about sustainability brings into the discussion the reduction in the use of fossil fuels to generate energy. Therefore, the climate change has been encouraging the adoption of renewable energy sources (RES) as a most suitable solution for meeting energy requirements [2].

In 2020, renewable energy accounted for one-third of total power generation worldwide. In this same year, RES were the only energy resources which had increased the demand during the pande-

mic period [3].

The annual renewable capacity additions increased 45% achieving almost 280 GW in 2020. After that, these high-capacity growth became the new pattern in 2021 and 2022, with RES representing 90% of new power capacity expansion globally [4]. Regarding the Brazilian scenario, renewable energies account for approximately 80% of the national energy matrix, reflecting the country's hydropower, solar, and wind potential [5].

In this context, the solar photovoltaic (PV) and wind turbine (WT) systems stand out as the main RES with practical implementation because both technologies are constantly being improved for acquiring higher efficiency and both can be adopted for large scale applications [1]. Thus, the combined utilization of PV and WT systems represents a highly promising possibility among RES for meeting the growing load demand.

Besides, there are complementary energy generation profiles exhibited by PV, WT and other RES that when integrated, overcome limitations inherent between them, making possible the construction of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES). HRES involves the integration of two or more generation units and offer a

---

Received on 26 January 2024; revised January 2024.

Address for correspondence: Ana Tereza Andrade Borba.  
SENAI CIMATEC University Center. Av. Orlando  
Gomes, 1845 - Piatã, Salvador – Bahia, Brazil. E-mail:  
[ana.borba@fieb.org.br](mailto:ana.borba@fieb.org.br).

J Bioeng. Tech. Health

© 2023 by SENAI CIMATEC. All rights reserved.

solution to the intermittent power supply challenge, thereby increasing power system reliability, resilience, and stability [3].

To complement the hybrid arrangement and maximize the amount of energy generated, Battery Energy Storage Systems (BESS) are being applied in Hybrid Power Plants (HPPs). When the power generated by the sources are higher than the demand, the excess energy can be stored in BESS and then dispatched into the grid in a moment of low generation [3].

Despite this configuration is becoming increasingly discussed, the main references for the installation of HPPs are models found outside of Brazil, where European countries, as well as Australia, the United States, China, and India, can be highlighted as the main market players. Table 1 highlights the main projects involving the hybridization of energy sources worldwide [6].

For example, The Kennedy Energy Park, situated in Flinders Shire, Australia, stands as one of the pioneering large-scale hybrid power plants globally. Construction commenced in 2017, and it successfully became operational in 2019. It has an installed 47 capacity of over 60 MW, with 43.5 MW from wind sources, 15 MW from solar sources, 48 and 4 MWh of lithium-ion storage.

Drawing on the innovative advances of projects like the Kennedy Energy Park, which has demonstrated the capabilities of large-scale hybrid power plants, this work aims to present a state-of-the-art review for HRES research issues, emphasizing the following aspect:

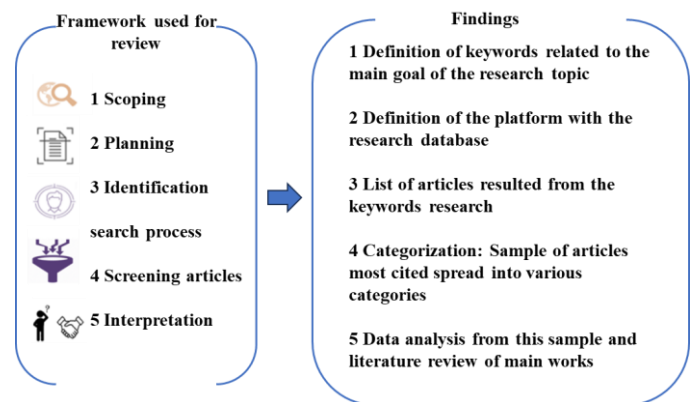
- Literature publications about HRES: perspective over time;
- Main themes regarding hybrid systems presented on literature;
- Geographical perspective about scientific content regarding HRES;
- Literature review of principal works about feasibility assessment of HRES.

## Materials and Methods

The state-of-the-art review was the chosen

study to clarify, group, and synthesize the most relevant current knowledge about HRES. Figure 1 summarize the schematic of the methodology approach of this work. A framework is proposed for state-of-the-art review and the respective findings are shown below.

**Figure 1.** Methodology Approach (Adapted from [1])



In scoping step, the research strategy was based on the keywords choice and the use of Boolean operators “AND” and “OR”, detailed as follow: (“HRES”) AND (“HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEMS”) AND (“HYBRID POWER PLANT” OR “HYBRID POWER SYSTEMS”). The objective of this research was to return the main general work about the theme, in different nonrestrictive perspectives, such as control, modeling, simulation, feasibility and others.

In planning step, the platform was defined by choosing Dimensions AI as the research database. Dimensions is an artificial intelligence platform which provides a search tool for linked research database covering publications, grants, patents, datasets, policy documents or technical reports [7].

In identification step, it is accounted the number of works resulted from the keywords research. The platform returns a list of publications that can be ordered, analyzed and downloaded for composing a literature review about the research topic.

In screening articles step, the chosen platform allows the download of 500 works which were organized by a ranking of number of citations.

**Table 1.** Some of the main examples of hybrid power plants in the world.

Location (City - Country)	Wind Power (MW)	Solar Power (MW)	Storage (MW/MWh)	Wind/Solar PV Proportion (%/%)	Company
Parc Cynog - Wales	3.60	4.99	-	42 / 58	Vattenfal
Haringvliet - Netherlands	21.00	31.00	12 / 12	40 / 60	Vattenfall
Kavital - India	50.00	28.80	-	63 / 37	Hero Futures Energy & Siemens Gamesa
Flinders Shire - Australia	43.00	15.00	2 / 4	74 / 26	Wind Lab & Eurus Energy
Pelica Rapids (MN) - United States	5.00	0.50	-	90 / 10	Juhl Energy
Ollague - Chile	0.30	0.21	0.3 / 0.8	59 / 41	Enel Green Power
Tilos - Greece	0.80	0.16	0.8 / 2.4	83 / 17	H2020 Research Consortium
Graciosa - Portugal	4.50	1.00	6.0 / 3.2	81 / 19	Yunicos
La Muela - Spain	0.85	0.25	0.4 / 0.5	78 / 22	Siemens Gamesa

**Table 2.** List of categories chosen to represent the main themes regarding HRES

Categories (CAT)							
1	2	3	4	5	6	7	8
Optimize	Sustainability	Assesment	Control	Sizing	Review	Simulation	Management
Optimization	Sustainable	Feasibility		Design	State-of- the-art		Operation
Optimisation		Assessing		Size	Overview		
Optimal		Techno- economic		Model			
		HOMER					
		Cost analysis					
		Technoeconomic					

Therefore, this study considers the first 500 articles from the research results.

At last, in interpretation step, the downloaded sample is analyzed by various perspectives: number of publications over time and by source titles; number of citations for each source; and geographical perspective of the most cited publications.

The research intended to ask the question: what

the actual literature are discussing about hybrid renewable systems? To complement the analysis of the publications resulted from this research, this work proposed a categorization which intends to segregate the results into distinct categories, as shown by Table 2. The words related with each category were searched in the content of the title of each paper. After that, it was elaborated a literature review highlighting the ten more cited



works in the last 5 years, from 2019 to 2023.

## Results and Discussion

The application of this research strategy into Dimensions AI returned a total of 1923 publications, which includes articles, thesis, dissertations, technical reports, and others. As the first result of the analysis of HRES literature, Figure 2 illustrates the number of publications in each year since 2015 until 2023. This graph shows an expressive rising in the literature discussion about hybrid systems after 2019, reaching a peak in 2022. The results for 2024 are still non-expressive because these data were taken in January of this same year.

In addition to understanding when the topic began to gain volume of publications, it is important to understand what are the main source titles discussing the theme. Figure 3 demonstrate the relationship between source titles and citations about hybrid renewable energy systems. Publication citations is the number of times that a publication has been cited by other publications in the database. Citing publications can be of any publication type, such as articles, chapters, preprints, or monographs. The results show that the journal *Energies* from MDPI is the one with more publications about HRES from the Dimensions database. However, the most cited journal regarding hybrid technologies and applications is the *Renewable and Sustainable Energy Reviews* from Elsevier.

Moreover, from the total of publications, it was considered to the following analysis only the number of articles produced, which totalize 1383 registers, excluding other types of scientific productions.

The sample of 500 works exported from Dimensions AI was categorized into different themes, presented in Table 2, returning the number of articles for each category, as shown in Table 3.

**Table 3.** Number of articles found about HRES for each category

Results by categories	
CAT 1	241
CAT 2	22
CAT 3	115
CAT 4	45
CAT 5	182
CAT 6	83
CAT 7	7
CAT 8	66

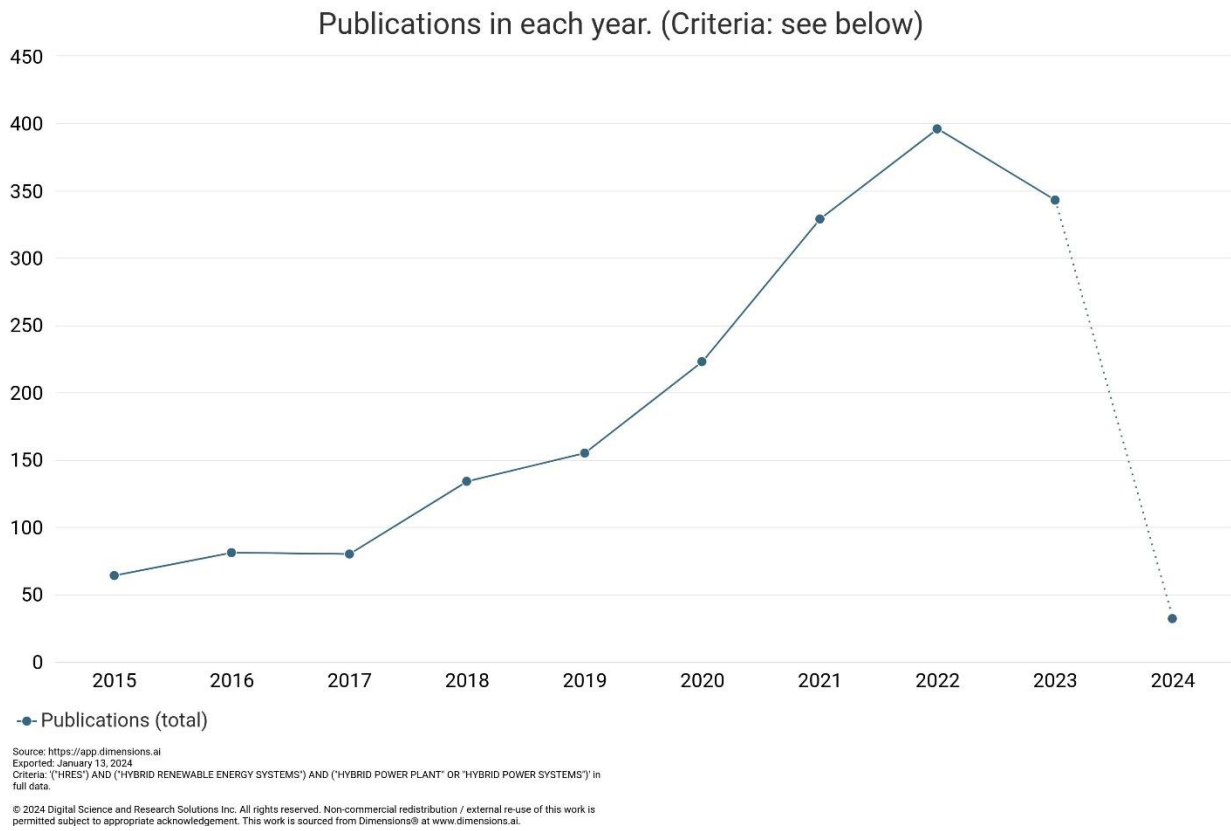
It can be concluded that researchers are prioritizing studies about optimization of hybrid systems, followed by sizing and modelling the design of the plant and its equipment. The feasibility assessment is also an important study to understand the techno-economic aspects of the project. It can be notice that there is a lack of studies about simulation tools, and the results for control strategies suggest that this is a theme than can be more explored. Although these works explore renewable sources of energy, researchers do not associate the title of its works with sustainability. This shows that authors prioritize technical aspects than environmental approaches when discussing hybrid systems.

Despite of HRES be affordable for any country, especially the ones with high solar and wind potential, it's accountable that countries from Asia have more scientific production about the theme. Table 4 lists the ranking of the 10 countries with more articles produced, which the first 5 are from Asia.

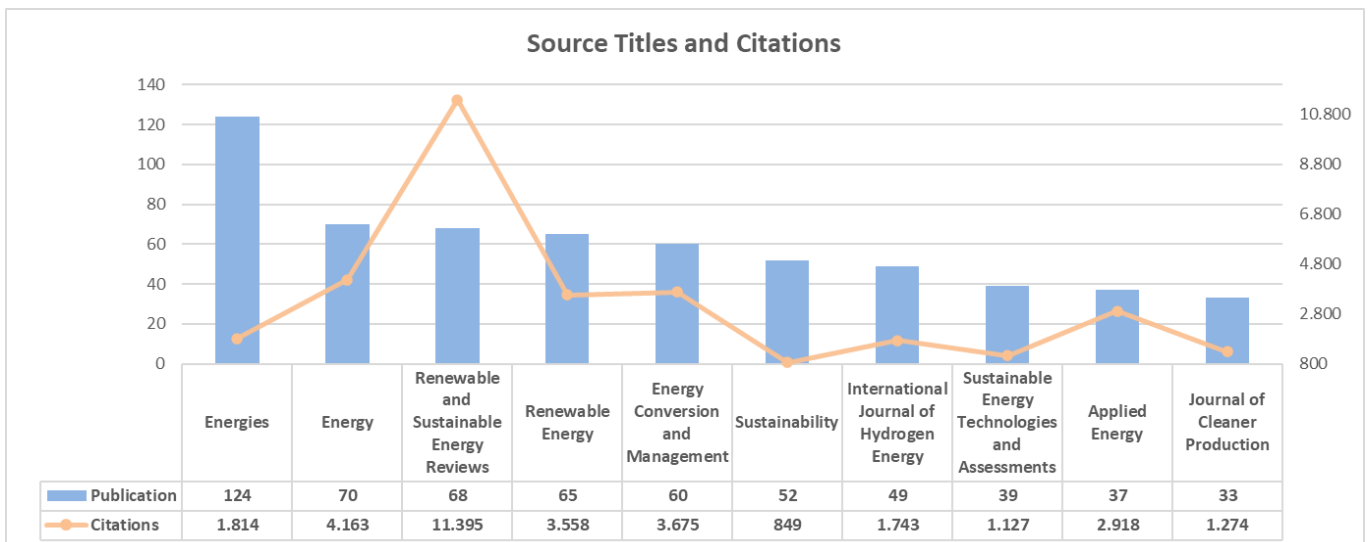
**Table 4.** Number of publications about HRES for each country

Country	Publications
India	79
China	58
Iran	37
Malaysia	31
Saudi Arabia	28
Spain	21
Egypt	18
Australia	17
Morocco	14
United States of America	14

**Figure 2.** Number of publications in each year within the scope of HRES [7]



**Figure 3.** Source titles and citations related to the top 10 journals obtained from the search



The expressive participation from Asian countries can be explained by the fact that 60% of the world population are from Asia and more than half of them lives in rural and remote areas. In this case, HRES projects can be applied in an off-grid

arrangement for supplying the energy need of the population without being necessary many infrastructures investment to connect the HPP to the electrical grid [8].

This understanding of the financial resources

applied to this type of project is fundamental to evaluate the feasibility of the HPP implementation. When solar and wind generation are applied separately, it is usually necessary to increase the size of the installation, when compared to the use of hybrid combination of both to supply the same demand. Thus, the HRES can

improve reliability, performance, and decrease generation fluctuation and investment costs [9].

To better understand the principal topics of study about HRES that contributed to the increase of the number of publications after 2020, Table 5 presents a list of the 10 most cited articles of the last 5 years, from 2019 to 2023.

**Table 5.** List of the 10 most cited articles from 2019 to 2023

Title	Year	Authors	Keywords	Source	DOI	Study Type	Categories
A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems [10]	2019	Lian, Jijian; Zhang, Yusheng; Ma, Chao; Yang, Yang; Chaima, Evance	Hybrid renewable energy system; Renewable energy source; Classification Evaluation indicator; Sizing methodology; Software tool	Energy Conversion and Management	10.1016/j.enconman.2019.112027	Literature review; Mathematical approach	CAT5, CAT6
Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources [11]	2019	Adefarati, T.; Bansal, R.C.	Economic; Emission; Environment; Microgrid; Reliability	Applied Energy	10.1016/j.apenergy.2018.12.050	Literature review; Case Study; Mathematical approach	CAT3
Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications [12]	2020	Zakaria, A.; Ismail, Firas B.; Lipu, M.S. Hossain; Hannan, M.A.	Stochastic optimizations; Uncertainty model; Scenario generations; Renewable energy applications	Renewable Energy	10.1016/j.renene.2019.07.081	Literature Review; Optimization models for renewable energy applications	CAT1, CAT6
Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives [13]	2020	Javed, Muhammad Shahzad; Ma, Tao; Jurasz, Jakub; Amin, Muhammad Yasir	Pumped hydro storage; Solar-hydro energy storage; Wind-hydro energy storage; Hybrid renewable energy systems; Hybrid storage	Renewable Energy	10.1016/j.renene.2019.11.157	Literature review; Future perspectives	CAT6
Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues [14]	2021	Hannan, M.A.; Wali, S.B.; Ker, P.J.; Rahman, M.S. Abd; Mansor, M.; Ramachandramurthy, V.K.; Muttaqi, K.M.; Mahlia, T.M.I.; Dong, Z.Y.	Battery energy-storage system; Sizing; Optimization algorithm; Objective functions; Constraints	Journal of Energy Storage	10.1016/j.est.2021.103023	Literature review; Optimization of BESS	CAT1, CAT6
Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm [15]	2020	Mayer, Martin János; Szilágyi, Artúr; Gróf, Gyula	Renewable energy production; Hybrid energy system; Life-cycle assessment; Multi-objective optimization; Genetic algorithm	Applied Energy	10.1016/j.apenergy.2020.115058	Optimization of HRES; MATLAB simulation; Literature review	CAT1, CAT6
Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource [16]	2019	Ma, Tao; Javed, Muhammad Shahzad	Solar-wind-battery system; Renewable energy saturation; Cost of energy Energy balance; Net present cost; Hybrid Renewable system reliability	Energy Conversion and Management	10.1016/j.enconman.2018.12.059	Case study; Mathematical approach	CAT3, CAT5
Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community [17]	2019	Krishan, Om; Suhag, Sathans	Wind energy conversion system (WECS); Photovoltaic (PV) system; Battery energy storage system (BESS); Techno-economic analysis; Hybrid renewable energy system (HRES)	Journal of Energy Storage	10.1016/j.est.2019.04.002	Case Study; Homer and MATLAB simulation;	CAT3
Feasibility analysis and techno-economic design of grid-isolated hybrid renewable energy system for electrification of agriculture and irrigation area: A case study in Dongola, Sudan [18]	2019	Elkadeem, M.R.; Wang, Shaorong; Sharshir, Swellam W.; Atia, Eman G.	Hybrid renewable energy; Techno-economic optimization; Carbon emissions; Net present cost; Sensitivity analysis; HOMER Pro®	Energy Conversion and Management	10.1016/j.enconman.2019.06.085	Case Study; Literature review of existing HRES; HOMER simulation;	CAT3, CAT5
Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria [19]	2019	Fodhil, F.; Hamidat, A.; Nadjemi, O.	Hybrid renewable energy system; Photovoltaic; Diesel; PSO optimization; Rural electrification	Energy	10.1016/j.energy.2018.12.049	Case study; HOMER simulation; Literature review of optimization methods	CAT1, CAT3, CAT5

With the analysis of Table 5, it is possible to observe a certain balance among categories 1, 3, 5, and 6 with CAT6 containing four of the top five most cited articles. This is explained by the need for access to literature review and state-of-the-art references in the development of large projects involving various themes of HRES. Among these CAT6 articles within the top five, it is worth noting some that review methodologies for sizing and optimization of HRES, which are the main themes of CAT1 and CAT5, respectively.

For CAT3, different evaluations and case studies involving various software tools such as HOMER and MATLAB were conducted among the articles in the table. As for CAT1, different optimization methodologies (e.g., PSO, genetic algorithms) were applied and reviewed.

## Conclusion

In conclusion, this state-of-the-art review has provided a comprehensive exploration of the scientific scenario of HRES studies. Notably, 2020 represented a significant milestone with renewable energy contributing one-third of total power generation worldwide. This rising in implemented generation projects reflected in a substantial increase in HRES research publications, achieving a peak in 2022 until now.

The complementary energy generation profiles of solar and wind technologies make them an ideal pair within hybrid renewable systems. The integration of a BESS further enhances the efficiency and reliability of HRES, allowing for the storage and dispatch of excess energy during periods of low generation.

The analysis of literature trends shows that researchers are predominantly focusing on optimizing hybrid systems, followed by sizing and modelling, with feasibility assessments playing a crucial role in understanding the techno-economic aspects. The top countries contributing to HRES research are predominantly from Asia, emphasizing the potential for off-grid applications in populous regions.

The literature review of the ten most cited

articles from 2019 to 2023 encompass studies of state-of-the-art, the use of tools such as HOMER to optimize strategies and the relevance of sizing methodologies to implement hybrid systems. In this work, it is noticing the large number of literature review and state-of-the-art articles, suggesting the necessity of such materials for research and development involving HRES.

Furthermore, it is fundamental to recognize the global significance of HRES and bridge the knowledge gaps identified in this review. Future research investigation should explore control strategies and simulation tools and address the feasibility of large-scale hybrid power plants in diverse geographical contexts.

In essence, this review not only underscores the rapid growth and global relevance of HRES but also serves as a motivation for continued exploration, innovation, and collaboration in the pursuit of a sustainable and resilient energy future.

## Acknowledgment

The authors would like to express their sincere gratitude to SENAI CIMATEC, CNPq and FAPESB for its support and provision of researcher resources that greatly contributed to the success of this project. Furthermore, the authors also thank Research and Development Program of the Brazilian electricity sector regulated by ANEEL and Eletrobras CHESF, for the financial support to the project “PD-00048-0217: Sistema inteligente com aerogerador integrado às fontes de energia solar e storage como plataforma de desenvolvimento visando melhorias contínuas no processo de geração de energia elétrica”.

## References

- [1] O. M. BABATUNDE, J. L. MUNDA e Y. HAMAM, “A comprehensive state-of-the-art survey on hybrid renewable energy system operations and planning,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75313-75346, 2020.

- [2] A. & S. R. P. Chauhan, "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, pp. 99 - 120, 2014.
- [3] P. H. J. Z. T. & S. Y. V. Roy, "Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review.," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 81-104, 2022.
- [4] I. E. A. (IEA), "Renewable Energy Market Update," 2021.
- [5] L. L. P. L. E. E. S. H. S. R. P. J. C. E. C. L. V. M. .. & C. A. de Souza, "Life cycle assessment of prospective scenarios maximizing renewable resources in the Brazilian electricity matrix.," *Renewable Energy Focus*, vol. 44, pp. 1-18, 2023.
- [6] W. Europe, "Renewable Hybrid Power Plants: Exploring the benefits and market opportunities," 2019.
- [7] "Dimensions AI," [Online]. Available: <https://www.dimensions.ai/>. [Acesso em 13 January 2024].
- [8] S. Bahramara, M. P. Moghaddam and M. Haghifam, "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 609-620, 2016.
- [9] M. H. Amrollahi e S. M. T. Bathaee, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response," *Applied Energy*, vol. 202, pp. 66-77, 2017.
- [10] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang e E. Chaima, "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy," *Energy Conversion and Management*, p. 112027, 2019.
- [11] T. Adefarati e R. Bansal, "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources," *Applied Energy*, vol. 236, pp. 1089-1114, 2019.
- [12] A. Zakaria, F. B. Ismail, M. H. Lipu e M. Hannan, "Uncertainty models for stochastic optimization in renewable energy applications," *Renewable Energy*, pp. 1543-1571, 2020.
- [13] M. S. Javed, T. Ma, J. Jurasz e M. Y. Amin, "Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives," *Renewable Energy*, pp. 176-192, 2020.
- [14] M. Hannan, S. Wali, P. Ker, M. A. Rahman, M. Mansor, V. Ramachandaramurthy, K. Muttaqi, T. Mahlia e Z. Dong, "Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues," *Journal of Energy Storage*, p. 103023, 2021.
- [15] M. J. Mayer, A. Szilágyi e G. Gróf, "Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm [13]," *Applied Energy*, p. 115058, 2020.
- [16] T. Ma e M. S. Javed, "Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource," *Energy Conversion and Management*, pp. 178-190, 2019.
- [17] O. Krishan e S. Suhag, "Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 305-319, 2019.
- [18] M. Elkadeem, S. Wang, S. W. Sharshir e E. G. Atia, "Feasibility analysis and techno-economic design of grid-isolated hybrid renewable energy system for electrification of agriculture and irrigation area: A case study in Dongola, Sudan," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 1453-1478, 2019.
- [19] F. Fodhil, A. Hamidat e O. Nadjemi, "Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria," *Energy*, pp. 613-624, 2019.



# Capítulo 4

## Artigo 2

Techno-Economic Assessment of a Hybrid Renewable Energy System for a County in the State of Bahia

Artigo publicado em *Energies*. 2024, 17, 572.

Ana Tereza Andrade Borba, Leonardo Jaime Machado Simões, Thamiles Rodrigues de Melo and Alex Álisson Bandeira Santos

Management and Industrial Technology, SENAI CIMATEC University Center, Salvador 41650-010, Brazil

DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030572>

Este artigo é de propriedade da *Energies*.

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# Resumo

A instalação de sistemas híbridos com armazenamento é uma maneira de maximizar a quantidade de energia gerada através da exploração da complementaridade de diferentes fontes. Compreender a operação de usinas híbridas de energia (HPP) é crucial para otimizar novos sistemas e reconfigurar plantas existentes para aumentar sua eficiência. Além dos aspectos técnicos, a viabilidade econômica também é uma característica fundamental. Este estudo simulou uma HPP off-grid para considerar o consumo de energia de Casa Nova, Bahia - Brasil. A metodologia consistiu na seleção de fontes de energia, escolha de uma localização de referência, aquisição de dados de geração e operação, modelagem e simulação do sistema em diferentes cenários e uma análise financeira. O software HOMER Pro versão 3.16.2 foi utilizado para otimizar a configuração da planta, e os resultados foram avaliados usando as perspectivas do custo nivelado de energia (LCOE), payback simples e cumprimento da carga de energia. Como resultado, o cenário 3 foi o mais competitivo, enfatizando que o uso de diferentes fontes de energia aumentou a capacidade de geração do sistema. No entanto, a adição de armazenamento de energia em bateria (BESS) resultou em um LCOE alto quando comparado às fontes individuais, o que demonstrou que o custo da integração de baterias ainda não é competitivo nacionalmente. Além disso, os resultados destacaram a importância de investimentos em pesquisa, governança energética e regulação na promoção da adoção de sistemas híbridos.

Palavras-chave: Sistemas híbridos; Energia Renovável; Avaliação de Viabilidade; BESS; HOMER.



## Article

# Techno-Economic Assessment of a Hybrid Renewable Energy System for a County in the State of Bahia

Ana Tereza Andrade Borba <sup>1,\*</sup> , Leonardo Jaime Machado Simões <sup>1</sup> , Thamiles Rodrigues de Melo <sup>1</sup>   
and Alex Álisson Bandeira Santos <sup>1,2,3</sup> 

<sup>1</sup> Management and Industrial Technology, SENAI CIMATEC University Center, Salvador 41650-010, Brazil; leonardo.simoese@fbest.org.br (L.J.M.S.); thamiles.melo@fieb.org.br (T.R.d.M.); alex.santos@fieb.org.br (A.Á.B.S.)

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energia e Ambiente (INCT), Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador 40170-110, Brazil

<sup>3</sup> Instituto de Ciência, Inovação e Tecnologia em Energias Renováveis do Estado da Bahia, Salvador 40210-630, Brazil

\* Correspondence: ana.borba@fieb.org.br

**Abstract:** Installation of hybrid systems with storage is a way to maximize the amount of energy generated through exploring the complementarity of different sources. Understanding hybrid power plant (HPP) operation is crucial for optimizing new systems and reconfiguring existing plants, to their enhance efficiency. Alongside technical aspects, economic feasibility is also a fundamental feature. This study simulated an off-grid HPP to consider the energy consumption of Casa Nova in Bahia, Brazil. The methodology consisted of the selection of energy sources, choosing a reference location, acquisition of generation and operational data, modeling and simulating the system in different scenarios, and a financial analysis. HOMER Pro software Version 3.16.2 was used to optimize the plant configuration, and the outputs were evaluated using the perspectives of levelized cost of energy (LCOE), simple payback, and power load fulfillment. As a result, scenario 3 was the most competitive, emphasizing that the use of different energy sources increased the system generation capacity. However, the addition of battery energy system storage (BESS) resulted in a high LCOE when compared to individual sources, which demonstrated that the cost of battery integration is not yet nationally competitive. Moreover, the results highlighted the importance of research investments, energy governance, and regulation in promoting hybrid system adoption.

**Keywords:** hybrid systems; renewable energy; feasibility assessment; BESS; HOMER



check for updates

**Citation:** Borba, A.T.A.; Simões, L.J.M.; de Melo, T.R.; Santos, A.Á.B. Techno-Economic Assessment of a Hybrid Renewable Energy System for a County in the State of Bahia. *Energies* **2024**, *17*, 572. <https://doi.org/10.3390/en17030572>

Academic Editors: Dilip Khatiwada and Farzin Golzar

Received: 3 December 2023

Revised: 27 December 2023

Accepted: 18 January 2024

Published: 24 January 2024



**Copyright:** © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

In recent years, a paradigm shift has occurred in the way electric power systems are planned and operated. The main reason for this is the expansion of low-carbon technologies for electricity generation, transmission, distribution, and consumption. Among these technologies, renewable energy sources (RES) such as photovoltaic and wind power have emerged as prominent solutions. RES applicability is encouraged using the concepts of decarbonization, digitization, and decentralization within the electrical sector. These three pillars are indispensable for promoting the energy transition required across various economic sectors [1,2].

According to WindEurope, a renewable energy research institution in Europe, hybrid power plants (HPPs) are facilities responsible for generating energy, consisting of more than one energy generation method connected to a grid at a connection point [3]. In Brazil, the Energy Research Company (EPE) introduced two concepts related to types of power plants: adjacent power plants, which are characterized by having two generation sources built close to each other and sharing the same land, with separately contracted connections to

the basic grid; and associated power plants, which have individual meters for each source, although sharing infrastructure connections and access to the basic grid [4].

Unlike the previous types of power plants, HPPs have energy sources that are combined in the generation process, connecting to the grid with just one meter, and the origin of the energy is not differentiated [4]. In this way, hybrid systems have proposed source complementarity for optimizing electricity generation, as the individual exploitation of RES faces the limitations of seasonality and intermittency in production. Furthermore, when sources are considered independently, the sizing of the electrical grid requires taking into account the generation peaks of each source, leading to source oversizing and increased energy costs [5].

In terms of financial feasibility, it is worth noting that economic factors play a crucial role when making decisions regarding the implementation of a hybrid power plant. To conduct studies, indicators are used to quantify the economic characteristics of a project, such as the levelized cost of electricity (LCOE), which is an indicator that quantifies the unit cost of electricity (kWh or MWh) over the course of a project. For hybrid power plants, this metric can be evaluated either by considering the LCOE for each partial source or by taking into account the LCOE for the entire plant [6].

In addition to the economic analysis, studies on distributed generation systems, whether hybrid or not, should be categorized based on their connection to the electrical grid. Grid-connected systems are interconnected with the conventional electrical grid, while off-grid systems operate independently, generating energy in isolated areas. Thus, the usage of specialized software, such as HOMER Grid and HOMER Pro, is essential for assessing which type of distributed generation system is most suitable, depending on the installation location and load [7,8].

Hybridization aims to meet energy demands, whether in remote areas or within existing generation facilities. The integration of storage systems, for example, presents several opportunities for managing energy dispatch, especially when utilizing uncontrollable sources like solar and wind, allowing compensation during periods of higher tariffs. Furthermore, the adoption of renewable sources, such as wind and solar energy, aims to expand low-carbon energy generation, aligning with the three pillars of the abovementioned energy transition (decarbonization, decentralization, and digitalization) [9,10].

Thus, conducting technical-economic feasibility studies for hybrid power plants allows providing a comprehensive view, encompassing aspects of the electrical system, financial indicators, and evaluation of site-specific characteristics of the HPP. This type of study also allows a scientific approach for obtaining the best arrangement for new hybrid plants; the broad evaluation of existing plants that can be reconfigured as hybrid plants to achieve greater energy efficiency; and the discovery of new assets as a RES for the HPP.

This article aims to address a research gap concerning the analysis of scenarios involving the implementation of a hybrid power plant (HPP) composed of photovoltaic, wind, and BESS in Casa Nova, located in the state of Bahia, Brazil. The mentioned scenarios goal was to determine the ideal proportion of energy supply for Casa Nova by means of an analysis of the aforementioned technical, financial, and social aspects. The region in question experiences high levels of sunlight and favorable winds, making it conducive to the construction of such ventures.

Moreover, this article aims to present the advantages and disadvantages of constructing HPPs, considering the simulations conducted and data obtained from the existing literature [11,12]. To perform simulations and obtain results for the HPP feasibility study, HOMER Pro software was used, in line with various similar studies [13,14]. It is important to note that the methodology proposed in this work can be effectively adapted and reproduced for diverse settings, making it a valuable resource for evaluating the feasibility of similar HPP research worldwide.

Regarding the organization of this paper, Section 2 provides the methodological framework of the study, as well as the data used for the simulations. Section 3 presents the results obtained, while Section 4 provides an analysis of the scenarios. Finally, Section 5 offers the conclusions and final considerations of the paper.

## 2. Materials and Methods

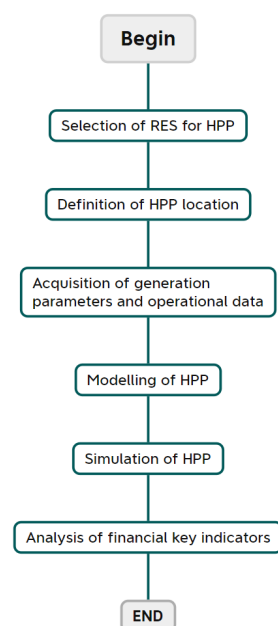
This section describes the hybrid power plant used as a case study, as well as presenting the methodology used to define the load and the simulated scenarios.

### 2.1. Proposed Methodological Approach

This work is organized based on six main steps, which compose the structure of the applied methodology for techno-economic assessment of the implementation of a hybrid off-grid system:

1. **Selection of RES for HPP:** The initial step involves the careful choice of renewable energy sources suited for the specific case study. Hybrid systems can encompass a range of configurations, from renewable sources to combinations involving diesel, PV, and battery storage, for example.
2. **Definition of HPP Location:** Selecting the installation site is an important step, because of the direct influence on solar potential and wind patterns, both of which are location-dependent factors.
3. **Acquisition of Generation Parameters and Operational Data:** Organizing data collection is essential for establishing the electric grid parameters, such as the load curve, wind speed, and solar generation. Data may be sourced from public databases or collected using instrumentation like anemometers and solar measurement devices.
4. **Modelling of the HPP:** To achieve simulation, first, it is necessary to model the systems that comprise the power plant by choosing equipment and defining electric and financial parameters, such as generation capacity, costs, lifetime, and behavior over time.
5. **Simulation of HPP:** Once all input parameters have been established, the simulation phase can precede. This phase involves running the HPP model in a specialized software (HOMER PRO Version 3.16.2) to generate results that offer insights into the system's performance and feasibility.
6. **Analysis of Financial Key Indicators:** The final step involves analysis of the simulation results from a financial perspective. Key indicators, including LCOE and payback period, can be considered to assess the technological and economic feasibility of the system.

Figure 1 summarizes the methodological approach proposed in this work, highlighting each step.



**Figure 1.** Flowchart of the methodological approach for a techno-economic feasibility HPP study.

## 2.2. Case Study

The increase in RES provides a growing opportunity to combine various resources within a single infrastructure to create hybrid power plants. Consequently, research, development, and innovation (RD&I) projects provide a chance to understand the behavior of hybrid systems.

For example, this work was motivated by a RD&I project conducted by SENAI CIMATEC, with funding by Eletrobras CHESF and identified as PD-0048-0217/2020 by the ANEEL (National Electric Energy Agency). This project aims to integrate solar and wind energy, while incorporating energy storage systems, in the city of Casa Nova, Bahia, Brazil. Projects like this one are developed to validate essential concepts associated with the technology behind Brazilian energy production through HPPs.

In this way, the content of this subsection is tailored to delve into the specific case study of Casa Nova, encompassing details ranging from the HPP characteristics to financial analysis, data utilization, computational modeling, and the simulations conducted.

### 2.2.1. Selection of Hybrid Power Plant Assets

The HPP under construction consists of a photovoltaic (PV) system, wind turbines (WT) and a battery energy storage system (BESS), directly connected to a load representing the city of Casa Nova, BA. In addition, it is necessary to use inverters to convert DC sources for the HPP connection, allowing the delivery of energy to the load in the AC bus.

It is worth noting that HPPs can be constructed using other types of energy resources beyond photovoltaic, wind, and BESS. They have the capability to incorporate a variety of additional sources, such as thermal energy and biomass. This allows for the development of hybrid systems that leverage existing infrastructures by integrating other sources for hybridization, or even establishing entirely new energy ecosystems [15]. In the specific case study mentioned, the same energy sources utilized in the previously mentioned RD&I project were employed.

### 2.2.2. Plant Location Definition

To select the location where simulations for the HPP would be implemented, it was determined that the chosen site should have a high solar and wind incidence. Additionally, the preference for a more remote location stemmed from the objective of assessing the feasibility and performance of the hybrid power plant in areas that might have limited access to transmission lines.

Therefore, the city chosen for this case study was Casa Nova, located in the state of Bahia. Casa Nova is a county in a semi-arid region and has approximately 71,000 inhabitants in an area of 10,000 km<sup>2</sup>. The city already has wind farms with its proximity for local energy generation and dispatch to the national grid.

### 2.2.3. Data Collection and Processing

For obtaining the generation parameters and operational data, we focus on the initial system settings and data acquisition, and then delve into the creation of the load curve for Casa Nova city, utilizing the gathered data.

In this research, the database of the Brazilian companies and regulatory bodies (e.g., ANEEL, ONS, and EPE) was used to characterize the HPP assets and load profiles. We looked for records representing the energy consumption of Casa Nova, and the most recent data cut-off was 2016, which limited the acquisition of all other data to that year.

To characterize a load, it is necessary to create a curve that represents the daily consumption profile. First, the database from ONS was consulted to obtain the data consumption per hour for the whole Brazilian electric grid. ONS provide a standardized daily load curve for the each region of the country, and in this case the Northeast region was considered [16]. Therefore, a percentage ratio was defined between the consumption of Bahia in relation to the Northeast and the consumption of Casa Nova in relation to Bahia.

Table 1 presents the procedure for collecting information that composed the inputs for acquiring the load curve of Casa Nova and each step of the data processing.

**Table 1.** Data collection for obtaining the load curve for Casa Nova—BA.

Data Type	Data Description
Energy consumption by class and municipality in Bahia—last real data: year 2016	Total consumption for all cities in Bahia and segregated by class. From all cities, only information related to Casa Nova’s consumption was extracted <sup>1</sup>
COELBA’s Energy Consumption by Class—Captive Market	Bahia’s total energy consumption in 2016. The consumption was segregated by class <sup>2</sup>
Electric Power Statistical Yearbook	Determine the relationship between Bahia’s consumption and the Northeast region <sup>3</sup>
Load Curve—Northeast Region	Download records for each month and hour of 2016. Data treatment for obtaining the load curve of the Northeast for each month. Downscale the northeast curve for obtaining Bahia’s load profile. New downscale from Bahia to Casa Nova <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Source: [17]; <sup>2</sup> Source: [18]; <sup>3</sup> Source: [19]; <sup>4</sup> Source: [16].

The relationship between Bahia and the Northeast region was obtained using data from the Statistical Yearbook of Electrical Energy, provided by EPE. This book contains various data related to energy consumption, both by region and by state, considering free and captive markets. In turn, the relationship between Casa Nova and the state of Bahia was determined through the acquisition of real energy consumption registers provided by the government of the state of Bahia and recorded by the local distributor company.

This database contains the energy consumption for all cities in Bahia, segmented by consumer class (e.g., industrial, commercial, and residential). Thus, the values for Casa Nova were segmented, and the data for all cities were summed to obtain an overview of the total consumption in Bahia, considering only the captive market. Afterward, the database from ANEEL for the same year for the captive market was consulted, which contains the energy consumption for all Brazilian states, segmented by class. Then, the results were checked to compare the data from the state of Bahia provided by the two sources [17,18].

Table 2 illustrates both records: Bahia consumption provided by ANEEL and the state government, highlighting the data for the city of Casa Nova.

**Table 2.** Consumption data by class in Bahia.

Consumption (GWh)	Bahia Records (ANEEL) <sup>1</sup>	Bahia Records (State Government) <sup>2</sup>	Casa Nova (State Government) <sup>2</sup>
Commercial	3402.34	3402.15	4.22
Industrial	2463.36	2463.36	1.24
Others	16.33	16.33	0.03
Public	2665.72	2664.51	5.77
Residential	6872.15	6872.76	20.59
Rural	1928.10	1928.22	87.18
TOTAL	17,347.99	17,347.33	119.03

<sup>1</sup> Source: [18]; <sup>2</sup> Source: [17].

As observed through an analysis of the table, the data related to the state of Bahia for the captive market are very close, with a margin of error of 0.004%, which validated their use for the simulations. Additionally, from the Statistical Yearbook of Electrical Energy, it was found that Bahia’s and the Northeast’s total consumptions of energy in 2016,

considering both captive and free market, were equal to 23,945.41 GWh and 79,501.30 GWh, respectively [19].

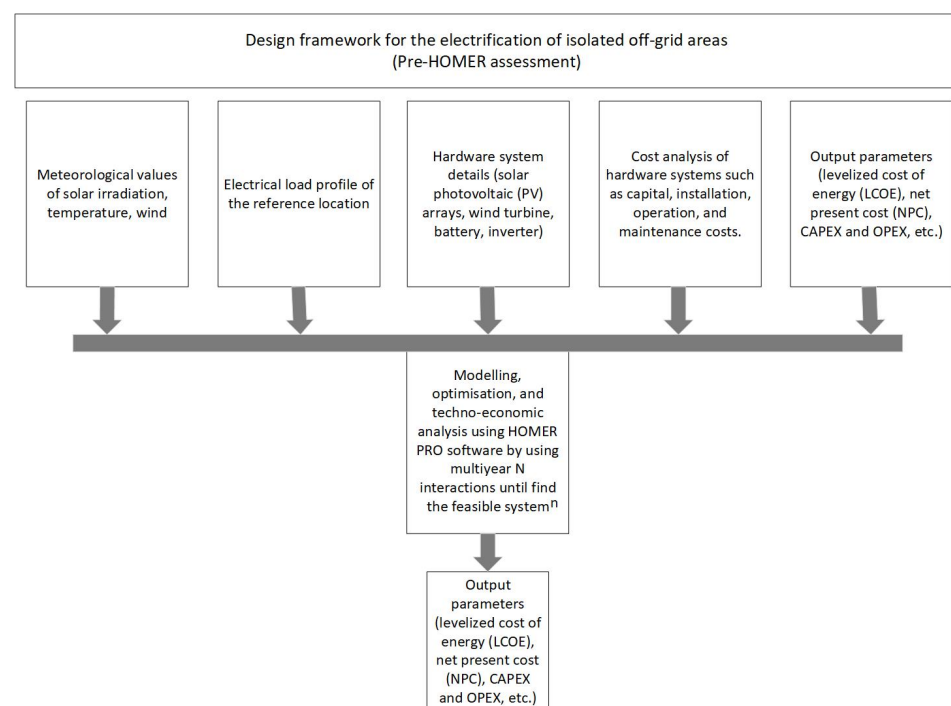
In Equation (1), it can be seen that the municipality of Casa Nova represented 0.4971% of Bahia's load. Using the same rule, Equation (2) shows the result of the relationship between Bahia and the Northeast region. Therefore, two successive downscaling steps for the curve obtained for the Northeast region were performed using the mathematical relationships described. The first step considered the relationship between the Northeast and Bahia, and the second step considered Casa Nova and Bahia.

$$\text{First Relation (\%)} = \frac{\text{Casa Nova's Energy Consumption}}{\text{Bahia's Energy Consumption}} = \frac{119.03}{23,945.41} = 0.4971\% \quad (1)$$

$$\text{Second Relation (\%)} = \frac{\text{Bahia's Energy Consumption}}{\text{Northeast's Energy Consumption}} = \frac{23,945.41}{79,501.30} = 30.12\% \quad (2)$$

#### 2.2.4. Computational Modeling of the Hybrid Power Plant

In order to describe the model of the hybrid power plant used for this simulation, it is necessary to elucidate the method employed in HOMER Pro for performing these calculations. The software operates with an optimization framework called the HOMER Optimizer that, using technical, economic, and climatic input data, identifies the optimal scenario considering financial indicators such as LCOE and NPC. Figure 2 presents a flowchart outlining the main stages of the optimization process [20].



**Figure 2.** HOMER Optimizer Framework—Adapted from [20].

It is interesting to mention that the financial indicators cited (i.e., LCOE and NPC) are referred to as intrinsic parameters, whereas there are other parameters called extrinsic. Among these, we can highlight payback, which relates to the period in which the cumulative cash flows of the difference between the current system and the base system switch from a negative value to a positive one. This relationship is quantified through a measure of time required to obtain a return on the investment made, in relation to a reference value. Moreover, for the construction of an economic feasibility study, it was necessary to consider both intrinsic and extrinsic parameters [21]. The parameters utilized in the simulation and





For the photovoltaic system, the costs are described in Table 5. Unlike the way the wind system was implemented, the data were incorporated considering different peak power values, as presented by the reference from Canal Solar Brasil [24]. The O&M estimate was based on the EPE's 2021 Power Generation Costs Report, which considered the value of R\$50 per kWp. Similarly to the wind system, the replacement data corresponded to 70% of the installation cost of the photovoltaic plant [23,24]. The acquisition cost of the inverter considered was obtained from market research, considering a cost of R\$40,000 for a 125 kW inverter.

**Table 5.** Details of the costs associated with the photovoltaic system.

Installed Capacity (kWp)	Total Cost (R\$)	Cost without Converter (R\$)	O&M (R\$)
150	R\$531,000	R\$491,000	R\$7500
300	R\$1,041,000	R\$961,000	R\$15,000
500	R\$1,780,000	R\$1,620,000	R\$25,000
1000	R\$3,710,000	R\$3,390,000	R\$50,000
3000	R\$10,740,000	R\$9,780,000	R\$150,000
5000	R\$18,250,000	R\$16,650,000	R\$250,000

Source: [24].

Table 6 presents the costs for the BESS. Similar to the other systems, this describes the main costs involved in the implementation of this system. In this case, a commercial quotation was considered with a national supplier for a 1 MW system, and the costs are broken down into equipment and installation services. The O&M value was considered to be equivalent to 1% of the total cost [25].

**Table 6.** Details of the costs associated with the BESS (battery energy storage system).

BESS's Costs	Total Cost (R\$)
Equipment	R\$4,967,903.70
Installation Service	R\$1,451,850.76
O&M	1% of total CAPEX
Replacement	Same cost of equipment

For battery dispatch control, a combined dispatch control logic was used, varying between meeting the load and charging the battery bank. Regarding the inputs for the financial and economic parameters, a discount rate of 8% and an average annual inflation rate of 6.06% were adopted, based on the average of the last 10 years in Brazil [26].

### 2.2.5. Hybrid Power Plant Simulation

In this case study, HOMER Pro software was used, as it is a computational simulation tool that is primarily focused on off-grid hybrid systems. This software is specialized for microgrid optimization and was chosen due to its capability for conducting feasibility studies for hybrid power plants. Despite this work being based on HOMER, the methodology is replicable and could be applied using different optimization software and tools for hybrid generation systems.

The HOMER results presented different possibilities for the design of the project, indicating which one was the optimal arrangement based on the financial results. The results obtained provided insights into the various possible scenarios, with engineering and financial data, aimed at providing greater robustness to the analyses. Furthermore, this software carries out three essential tasks using the raw data supplied by the user: simulation, optimization, and sensitivity analysis, in which various energy combinations can be modeled, including solar panel arrays, wind turbines, utility load, generators, and battery backup systems [7]. These functionalities and the optimization flowchart are detailed further in Section 2.2.4.



For each simulation, three possible scenarios were considered in this case study to assess the feasibility of installing an off-grid system to meet the total or partial consumption of the region. These scenarios are characterized by the variation in the percentage of the load curve defined for the city of Casa Nova, representing the different consumptions of the different energy approaches. Moreover, the scenarios highlighted features related to the costs and optimization. “Scenario 1”, where the HPP met the entire demand, was considered the most expensive. “Scenario 2”, where the plant supplied half of demand, was classified as intermediate. Meanwhile, “Scenario 3”, where the majority of the load was supplied by the grid was considered optimal. Table 7 presents these three scenarios and the corresponding percentages of the load curve.

**Table 7.** Details of the simulated scenarios.

Scenarios	Percentage of Energy Consumption—Casa Nova	Percentage of Available Energy—HPP	Cost-Effectiveness
Scenario 1	100%	0%	Most Expensive
Scenario 2	50%	50%	Intermediary
Scenario 3	25%	75%	Optimum

### 2.2.6. Financial Analysis

In the energy sector, the levelized cost of energy (LCOE) is a significant parameter considered when evaluating the implementation of generation systems. LCOE represents the fraction between the yearly cost of the system (including components, operation, maintenance, and replacements) and the total energy production. This economic indicator is given by Equation (3) [21,27].

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Levelized annual cost (R\$/year)}}{\text{Levelized annual electric load served (kWh/year)}} \quad (3)$$

It is important to highlight that the financial competitiveness of energy systems can vary and become better depending on technological advancements, battery costs, incentive policies, energy tariffs, and other local factors. Therefore, feasibility and financial analyses should be updated as these factors evolve over time.

Simple payback is another financial indicator that can be calculated to analyze the time it takes for an initial investment to be recouped. In this case, the return is obtained through energy savings or revenue generation. A shorter simple payback period often indicates a more attractive investment and suggests which projects are worth pursuing, as this signifies quicker returns on capital and an increased cash flow for further sustainability initiatives. The payback period can be determined by dividing the investment costs for the project by the income generated in a year [28], as in Equation (4).

$$\text{Simple payback period} = \frac{\text{Investment cost}}{\text{Income per year}} \quad (4)$$

This is particularly valuable in the energy sector, because cost-effectiveness and quick returns play a vital role in choosing to adopt renewable and sustainable energy solutions.

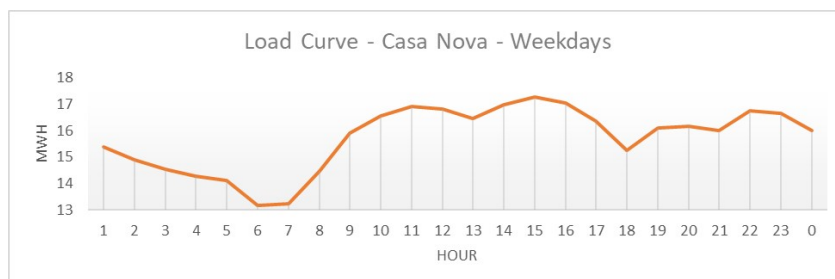
## 3. Results

This section presents the results for the data collection, through to the simulation outputs used to conduct analyses regarding the technical and economic feasibility of installing a hybrid off-grid system for the city of Casa Nova—Bahia.

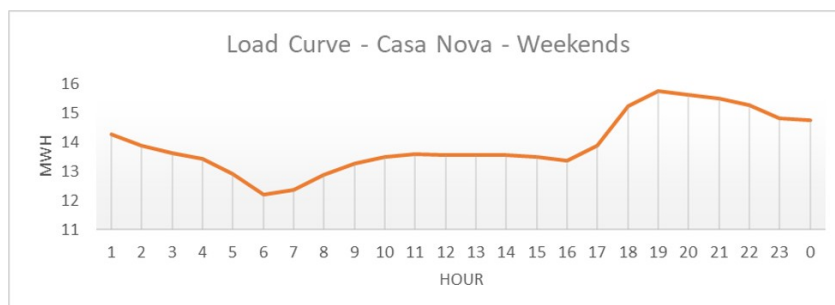
### 3.1. Load Curve

From the data collection and processing presented in Section 2.2.3, it was found that the state of Bahia represented 30.12% of the Northeast’s consumption in the year

2016 [19]. Additionally, the percentage of Casa Nova in relation to the Northeast region was approximately 0.4971%. Figures 4 and 5 show the load curves obtained for Casa Nova city, considering weekdays and weekends, respectively, representing the consumption behavior of the region. In these curves, the average power consumed by the load is plotted for each hour of the day in 2016.



**Figure 4.** Load Curve for Casa Nova on weekdays.



**Figure 5.** Load Curve for Casa Nova on weekends.

### 3.2. Plant Simulation Scenarios

According to the data that were incorporated into HOMER Pro and demonstrated in Sections 2.2.4 and 2.2.5, a simulation was conducted using the software's calculation engine, described in Figure 2, based on the load curve percentages for each scenario, as shown in Table 7. The main results obtained through the optimization performed by HOMER for scenarios 1, 2, and 3 are shown in Tables 8, 9, and 10, respectively.

**Table 8.** Description of the main results for the Scenario 1 simulation.

Generation Source	Total Power (MW)	Storage (MWh)	Amount of Equipment	Equipment Power (MW)
PV	75.18	-	-	-
Wind	63	-	15	4.2
Storage	-	274.06	65	-

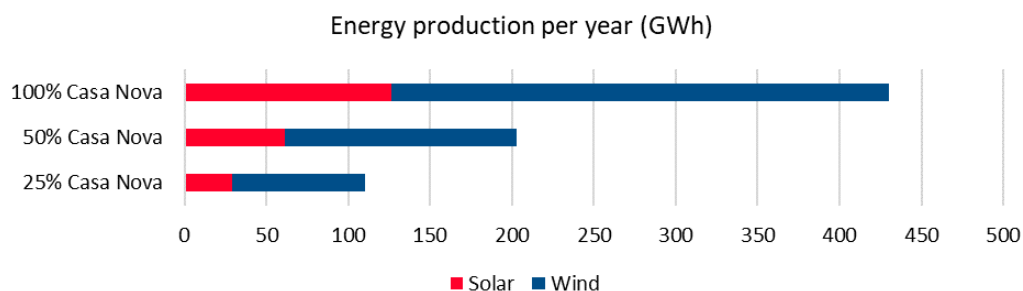
**Table 9.** Description of the main results for the Scenario 2 simulation.

Generation Source	Power (MW)	Storage (MWh)	Amount of Equipment	Equipment Power (MW)
PV	36.36	-	-	-
Wind	29.40	-	7	4.2
Storage	-	147.57	35	-

**Table 10.** Description of the main results for the Scenario 3 simulation.

Generation Source	Power (MW)	Storage (MWh)	Amount of Equipment	Equipment Power (MW)
PV	17.4	-	-	-
Wind	16.8	-	4	4.2
Storage	-	67.4	16	-

Regarding the energy production from each of the sources, Figure 6 shows a graphical comparison of each of the three scenarios, highlighting the share of each RES used.

**Figure 6.** Hybrid plant energy production per year.

### 3.3. Financial Indicators (LCOE, Payback)

Table 11 catalogs some financial indicators such as NPC (net present cost), CAPEX (capital expenditure), and OPEX (operational expenditure) obtained in the HOMER PRO optimization. Table 12 describes the LCOE outcomes of the simulation, based on Section 2.2.6, separating each of them by the scenario to which they refer.

**Table 11.** Financial indicators values obtained for the case study of Casa Nova—BA.

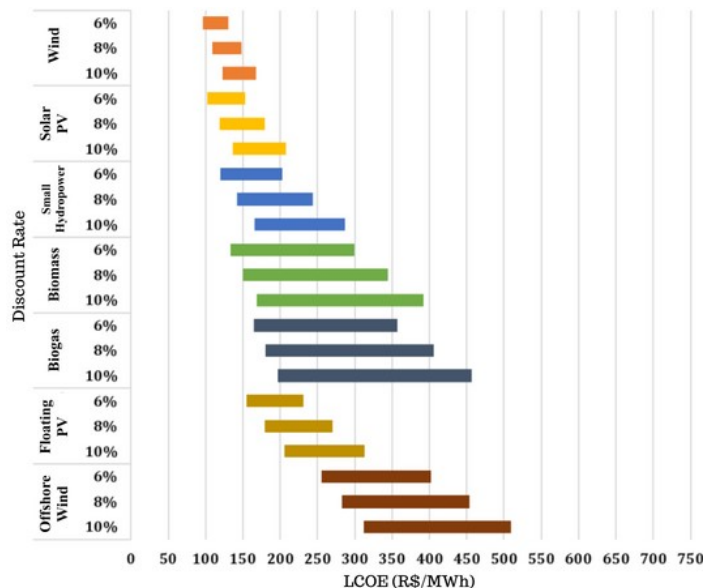
Indicators	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
NPC	R\$1.48Bi	R\$745M	R\$367M
CAPEX	R\$989M	R\$496M	R\$245
OPEX	R\$24.6M	R\$12.5M	R\$6.1M

**Table 12.** LCOE values obtained for the case study of Casa Nova—BA.

Scenario	Generation Source	LCOE for Each Source (R\$/kWh)	Total LCOE for the System (R\$/kWh)
1	PV	R\$0.145	R\$0.569
	Wind	R\$0.0707	
	Storage	-	
2	PV	R\$0.145	R\$0.573
	Wind	R\$0.0707	
	Storage	-	
3	PV	R\$0.144	R\$0.565
	Wind	R\$0.0707	
	Storage	-	

A common result in all three scenarios was that the individual LCOE for solar and wind sources was close to or within the range of the national average depicted in the EPE Power Generation Costs Report for the year 2021 [23]. Figure 7 shows that, for a discount rate of 8%, the parameter used in the simulation, the expected LCOE per MWh (Megawatt-hour) for the solar source ranged between R\$110 and R\$170, and for the wind

source, it ranged between R\$100 and R\$150. The results from the simulation showed that the individual LCOE for solar source was R\$ 150/MWh and for wind was R\$ 70/MWh.



**Figure 7.** Range of LCOE Values for Renewable Sources. Adapted from the EPE Power Generation Costs Report 2021 [23].

It is important to highlight that LCOE is a parameter that can vary according to the location, technology used, and scale of the project. For total LCOE, it is clear that the addition of an energy storage system significantly increased the cost of electricity and consequently raised the total LCOE of the system to a range of R\$565 to R\$573 per MWh.

This observation indicates that, at least in the scenario and conditions analyzed, the integration of energy storage systems is not yet economically competitive compared to standalone solar and wind generation sources. This conclusion is relevant and highlights the importance of carefully considering costs and benefits when making decisions about the inclusion of energy storage systems in renewable energy generation projects. Thus, based on the LCOE as the reference for assessing the feasibility of the renewable generation system, it was concluded that Scenario 3 had the lowest value and the best feasibility.

Relative to the calculations for the payback period, some premises were adopted. First of all, the income generated was defined through two perspectives:

1. the income obtained through selling energy that produced by the hybrid plant on the free market;
2. the cost of energy that would be paid if consumers were under the captive market regulation.

Tables 13 and 14 show the results for payback considering the values of the price of energy in the free market for the years of 2016 and 2022. The Northeast region was taken as a reference, where the medium price for the MWh was equal to R\$173.56 in 2016 and R\$58.5/MWh in 2022 [29].

**Table 13.** Payback period based on free market prices (Year 2016).

Year (2016)	Production of Energy (MWh/Year)	Annual Income	Capital Cost (Investment)	Payback Period (Years)
Scenario 1	430,138.471	R\$74,654,833.03	R\$989M	13.24
Scenario 2	202,879.882	R\$35,211,832.32	R\$496M	14.08
Scenario 3	110,321.371	R\$19,147,377.15	R\$245M	12.79

**Table 14.** Payback period based on free market prices (Year 2022).

Year (2022)	Production of Energy (MWh/Year)	Annual Income	Capital Cost (Investment)	Payback Period (Years)
Scenario 1	430,138.471	R\$25,163,100.55	R\$989M	39.3
Scenario 2	202,879.882	R\$11,868,473.10	R\$496M	41.79
Scenario 3	110,321.371	R\$6,453,800.20	R\$245M	37.96

These findings reveal that in comparison to the data from 2016, the payback period for implementing a hybrid plant varied between 12 and 14 years, a duration significantly shorter than the operational lifetime of the plant, which was estimated at 25 years. Nevertheless, when juxtaposed with prevailing market prices in the deregulated energy sector, the feasibility of the off-grid system diminished. This decline in feasibility can be attributed to the substantial increase in energy supply within Brazil in recent years, which has led to a reduction in the market prices for renewable energy.

When considering prices from the captive market as the reference for evaluating the payback period, the results in Tables 15 and 16 were acquired. As in the previous example, the Northeast region was taken as a reference, where the medium tariff for MWh was equal to R\$367.44 in 2016 and R\$603.59/MWh in 2022 [19].

**Table 15.** Payback period based on captive market tariffs (Year 2016).

Year (2016)	Production of Energy (MWh/Year)	Annual Income	Capital Cost (Investment)	Payback Period (Years)
Scenario 1	430,138.471	R\$158,050,079.78	R\$989M	6.25
Scenario 2	202,879.882	R\$74,546,183.84	R\$496M	6.65
Scenario 3	110,321.371	R\$40,536,484.56	R\$245M	6.04

**Table 16.** Payback period based on captive market tariffs (Year 2022).

Year (2022)	Production of Energy (MWh/Year)	Annual Income	Capital Cost (Investment)	Payback Period (Years)
Scenario 1	430,138.471	R\$259,627,279.71	R\$989M	3.80
Scenario 2	202,879.882	R\$122,456,267.98	R\$496M	4.05
Scenario 3	110,321.371	R\$66,588,876.32	R\$245M	3.67

The results underscore that, when considering a captive market scenario, the establishment of a hybrid plant to cater for the energy needs of Casa Nova remains economically viable, both using data from 2016 and current values. This economic feasibility is a direct consequence of the persistent increase in tariff costs in Brazil. As a consequence, this encourages an increase in renewable energy generation projects to address the growing energy demand across different regions.

### 3.4. Power Load Fulfillment

For the implementation of a hybrid power plant in Brazil, various aspects need to be analyzed, including regulation, the economic feasibility of the project, and the connection to the grid. Regarding Brazilian norms and resolutions related to the topic, the ANEEL Normative Resolution (REN) No. 954 from 2021 can be cited. This resolution added to REN No. 876 from 2020, which addressed the requirements and procedures for granting wind, thermal, and photovoltaic sources, introducing the hybrid generation unit as a new category of generation. Thus, the installed capacity of each partial source in a HPP must exceed 5 MW, in accordance with what was stipulated in the previous wording of REN

No. 876 [30,31]. In addition, the implementation of the distributed generation systems is also subject to national regulations, such as Brazilian Law No. 14.300 and ANEEL REN No. 1000, as well as the rules of the utility companies operating in the location where the power plant will be implemented [32,33].

As depicted in Scenario 1, considering the size of the components selected for the optimized configuration, notably those related to energy storage, it becomes evident that the financial investment would be substantial. Moreover, compared to the existing hybrid plants, this configuration necessitates unconventional and potentially impractical proportions. Consequently, these observations suggest that supplying the entire city of Casa Nova exclusively through the utilization of an off-grid system is not a feasible prospect. The grid connection becomes fundamental for effectively fulfilling the energy demand in this context.

Similarly to the previous scenario, the storage in Scenario 2 represented the most expensive cost of hybrid generation. The dimensions of the PV and wind plants were within proportions seen in other hybrid projects. However, a significant challenge arises when considering the substantial energy storage requirements, as these often clash with the conventional utilization and production parameters inherent to these systems.

From the results in Scenario 3, it can be observed that an off-grid hybrid system designed with only renewable sources has some vulnerabilities, which impact directly on its economic feasibility. Specifically, the optimization outputs from HOMER Pro revealed that the dimensions of the storage system resulted in significant costs and, in certain instances, an impractical scale. This phenomenon can be partially attributed to the fundamental characteristics of renewable sources, namely their susceptibility to environmental resource intermittence.

The absence of a constant and consistent generation pattern for solar and wind resources necessitates a greater reliance on the battery system to meet the load demands, consequently leading to substantial storage requirements and associated costs. These inherent challenges underscore the importance of carefully considering the balance between renewable energy generation and energy storage capacity when designing robust and cost-effective off-grid systems. For the case study of Casa Nova, the dimensions of the city entail that to supply energy from the grid, it is necessary to strengthen the system.

#### 4. Discussion

Although the primary focus of this article centered on hybrid renewable energy systems, it is noteworthy that diverse configurations of hybrid generation, including non-renewable sources, can be effectively designed. Specially, wind and solar energies are considered the most promising renewable energy sources and are widely used in many countries in standalone applications or connected to a utility grid. In the case of isolated sites, where off-grid systems may prove more economically advantageous, an evaluation of factors such as location, climate dynamics, consumer needs, and load profiles becomes imperative to choose the best HRES combination.

Unfortunately, Brazil currently does not have other HPPs of similar type for comparison with this work. To make a comparative analysis, consideration of the context of Canadian off-grid hybrid power plants is pertinent, based on a study with a similar proposal and validated in the literature [21]; in this context, where remote communities are detached from the transmission grid and rely on diesel facilities for energy supply. However, the reliance on transporting vast quantities of diesel over winter roads to ensure reliability poses significant environmental risks, including the potential for leakage and soil or groundwater contamination. Moreover, the transport of diesel introduces hazards to nearby inhabitants, especially in the event of a fire. The interruption of diesel supply also poses a risk of blackout during extreme cold weather.

In addressing these challenges, hybrid generation emerges as a socially and environmentally impactful solution. The technical feasibility of integrating diverse energy sources and a battery energy storage system (BESS) not only could enhance the commu-



nity's resilience and comfort during the harsh winters of Northern Canada but could also serve to diminish dependence on diesel, consequently mitigating greenhouse gas emissions—a critical step toward environmental sustainability.

This example of Canada illustrates the importance of energy supply and its relationship with the economic development of a nation, as well as achieving engagement of the different stakeholders. The United Nations Environment Program estimated that approximately two billion people around the world do not have appropriate grid-based electricity services, mostly in small villages in developing countries. Inadequate electricity infrastructure and accessibility in rural areas make future development difficult, encompassing both social and economic aspects of these regions. The absence of reliable power sources in rural areas has exacerbated poverty levels among populations of these countries. The implementation of sustainable development technology, guided by judicious policies, represents a validated strategy for reducing energy poverty and fostering socio-economic advancement in these underserved areas [34,35].

Hybridization of sources provides an alternative, not only to fill the gap in electricity supplies in remote areas, but also to improve existing generation by transforming plants from one source to hybrid with storage. When considering the use of renewable resources, some advantages and disadvantages for HRES can be listed. For example, using renewable sources represents an advantage of sustainability by not producing pollution or wastes from the sources, but also represents a dependency on natural cycles that can cause intermittency of generation. Nevertheless, there is an advantage about the low level of O&M higher costs for implementing the HPP than when considered non renewable resources. The complexity of the design procedure for hybrid plants can be cited as a disadvantage, as well as, the need of a storage system to manage peak-loads and the energy dispatch. However, fuel saving and, consequently, lower atmosphere contamination stands out as great advantages [36]. There are potential policy implications for building a HPP not only in Casa Nova, but elsewhere in the world, including renewable energy integration, energy planning, and sustainable development. Concerns regarding environmental sustainability have greater weight in the assessment of advantages versus disadvantages, reinforcing the importance of investment in projects and research regarding hybrid power generation, whether governmental or private. Effective energy management mandates substantial investment in energy storage systems.

This study has elucidated that battery energy storage systems (BESSs) presently face competitiveness challenges due to their elevated equipment costs. However, alternative avenues are actively under investigation, with researchers exploring the feasibility of integrating hybrid generation with hydrogen energy storage systems (HydESS). These HydESS are being considered as a relatively cheaper method of storing renewable energy. The working principle of a HydESS is that the energy is stored in a gaseous form and can then be converted back into electric power as required [37].

This illustration serves as one example of how hybrid power generation can accelerate new studies and new business opportunities. These aspects encompass relations with the hydrogen economy, as well as the applicability of advanced control methods to optimize HPP performance, in order to determine the long-term viability of these assets. For industry, power requirements are vital and at a huge scale. Thus, any significant increase in price of grid power will adversely effect this sector. Due to the all-time high availability of hybrid power, the price of electricity will reduce and make it wiser to use this energy. Therefore, large-scale hybrid systems should be the main bet of industry for years to come.

Additional emerging opportunities surrounding energy generation hybridization include applications such as the use of artificial intelligence as part of the energy management system; investment in R&D to enhance the cost-effectiveness of solar PV and wind technologies; the emergence of new companies specialized in managing the O&M of hybrid power plants, thereby generating employment opportunities for local communities; and new studies on the expansion or reinforcement of the electric system to accommodate the escalating energy output from HPPs [37,38].

## 5. Conclusions

This study aimed to address a critical research gap by analyzing scenarios for the implementation of a HPP in Casa Nova, Bahia. Through simulations utilizing HOMER Pro software, this work provided valuable insights into the feasibility and requirements for implementing a hybrid off-grid system to meet the energy needs of Casa Nova, Bahia. By examining various scenarios, including supplying 100%, 50%, and 25% of the city's energy consumption through such a system, we gained a comprehensive understanding of the associated challenges and opportunities.

Our findings underscore that providing the entire energy demand of Casa Nova city through an off-grid system may be financially prohibitive and impractical, especially when compared to existing HPPs. However, as we scale down the proportion of energy supplied to the city, the feasibility and cost-effectiveness of such a system become more favorable.

The decision to adopt an off-grid system for Casa Nova should be made judiciously, considering not only economic aspects but also the environmental and social benefits. The choice may ultimately involve a blend of renewable energy integration and grid connectivity. In light of the rapid changes in renewable energy technologies and the evolving energy landscape, continuous evaluation and adaptation of such projects are essential, to ensure a sustainable and reliable energy supply for Casa Nova.

Moreover, this research was intended to provide a comprehensive evaluation of the advantages and disadvantages of HPPs and can contribute not only to the specific context of Casa Nova but also advance the broader understanding of HPP implementation, providing valuable data and insights for future decision-making and planning of the energy infrastructure for the city or similar locations. A future study that could be conducted would be to simulate an on-grid hybrid plant considering the same load requirements but with the support of grid connection. The adaptable methodology proposed in this work not only facilitates replication in diverse arrangements but is also a valuable resource for assessing the feasibility of similar HPP projects worldwide.

Therefore, the use of hybrid energy plants should consider not only the technical approach, but also energy governance, environmental sustainability, and economic development. It is necessary to establish policies that encourage the integration of renewable sources within hybrid systems, setting clear regulations for grid connection and tariff structures, considering off-grid supply for isolated locations, incentivizing energy storage technologies, and stimulating hybrid system adoption.

**Author Contributions:** Conceptualization, A.T.A.B.; Methodology, A.T.A.B., L.J.M.S. and T.R.d.M.; Software, A.T.A.B.; Validation, A.T.A.B. and T.R.d.M.; Formal analysis, T.R.d.M.; Resources, A.T.A.B. and L.J.M.S.; Writing—original draft, A.T.A.B. and L.J.M.S.; Writing—review & editing, T.R.d.M. and A.Á.B.S.; Supervision, T.R.d.M. and A.Á.B.S.; Project administration, A.Á.B.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** The public data used in this work can be found on the following websites and in the repository available in the github link: Statistical YearBook of Electricity—baseline 2022: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>, accessed on 26 February 2023; Power Generation Costs Report 2021: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao>, accessed on 6 March 2023; COELBA's energy consumption by class: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/cativo>, accessed on 6 February 2023; Hourly Load Curve—Brazil: [https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva\\_carga\\_horaria.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx), accessed on 19 March 2023; Pricing Panel—Chamber of Electric Energy Commercialization—Brazil: <https://www.ccee.org.br/precos/painel-precos>, accessed on 6 June 2023; Repository of all data used in this work: <https://github.com/anaterzaborba/Database-for-TECHNO-ECONOMIC-ASSESSMENT-OF-A-HYBRID-RENEWABLE-ENERGY-SYSTEM-FOR-CASA-NOVA>, accessed on 26 December 2023.



**Acknowledgments:** The authors would like to express their sincere gratitude to SENAI CIMATEC, CNPq, and FAPESB for their support, which greatly contributed to the success of this project. Furthermore, the authors also thank the Research and Development Program of the Brazilian electricity sector regulated by ANEEL and Eletrobras CHESF, for their technical support in the project “PD-00048-0217: Sistema inteligente com aerogerador integrado às fontes de energia solar e storage como plataforma de desenvolvimento visando melhorias contínuas no processo de geração de energia elétrica”.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

### Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

ANEEL	National Agency of Electric Energy
BESS	Battery Energy Storage System
CAPEX	Capital Expenditure
EPE	Energy Research Company
HPP	Hybrid Power Plant
LCOE	Levelized Cost of Electricity
NPC	Net Present Cost
O&M	Operation and Maintenance
ONS	National Operator of the Electric System
OPEX	Operational Expenditure
PV	Photovoltaic
RES	Renewable Energy System
R\$	Brazilian Monetary Unit

### References

- Di Silvestre, M.L.; Salvatore, F.; Sanseverino, E.R.; Zizzo, G. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *93*, 483–498. [\[CrossRef\]](#)
- Rabbi, M.F.; Popp, J.; Máté, D.; Kovács, S. Energy Security and Energy Transition to Achieve Carbon Neutrality. *Energies* **2022**, *15*, 8126. [\[CrossRef\]](#)
- WindEurope. *Renewable Hybrid Power Plants: Exploring the Benefits and Market Opportunities*; Technical Report; WindEurope: Brussels, Belgium, 2019.
- de Pesquisa Energética, E. *Estudos de Planejamento da Expansão da Geração—Usinas Híbridas: Uma Análise Qualitativa de Temas Regulatórios e Comerciais Relevantes ao Planejamento*; Technical Report; Federal Government Ministry of Minas and Energy: Brasília, Brazil, 2018.
- Mouhadjer, S.; Neçaibia, A.; Benmedjahed, M. Hybrid photovoltaic-wind system for the electricity production in isolated sites. In Proceedings of the 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE), Agadir, Morocco, 22–24 July 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 1–6.
- Gholaimi, H.; Nils Røstvik, H. Levelised Cost of Electricity (LCOE) of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) in Europe, rational feed-in tariffs and subsidies. *Energies* **2021**, *14*, 2531. [\[CrossRef\]](#)
- Budes, F.A.B.; Ochoa, G.V.; Obregon, L.G.; Arango-Manrique, A.; Álvarez, J.R.N. Energy, economic, and environmental evaluation of a proposed solar-wind power on-grid system using HOMER Pro<sup>®</sup>: A case study in Colombia. *Energies* **2020**, *13*, 1662. [\[CrossRef\]](#)
- Amupolo, A.; Nambundunga, S.; Chowdhury, D.S.P.; Grün, G. Techno-economic feasibility of off-grid renewable energy electrification schemes: A case study of an informal settlement in Namibia. *Energies* **2022**, *15*, 4235. [\[CrossRef\]](#)
- Micangeli, A.; Del Citto, R.; Nzue Kiva, I.; Santori, S.G. Energy production analysis and optimization of mini-grid in remote areas: The case study of Habaswein, Kenya. *Energies* **2017**, *10*, 2041. [\[CrossRef\]](#)
- Riayatsyah, T.M.I.; Geumpana, T.A.; Rizwanul Fattah, I.M.; Indra Mahlia, T.M. Techno-economic analysis of hybrid diesel generators and renewable energy for a remote island in the indian ocean using HOMER Pro. *Sustainability* **2022**, *14*, 9846. [\[CrossRef\]](#)
- Bayu, E.S.; Khan, B.; Hagos, I.G.; Mahela, O.P. Feasibility analysis and development of stand-alone hybrid power generation system for remote areas: A case study of Ethiopian rural area. *Wind* **2022**, *2*, 68–86. [\[CrossRef\]](#)
- Amossou, I.; Tanyi, E.; Ali, A.; Agajie, T.F. Optimal Modeling and Feasibility Analysis of Grid-Interfaced Solar PV/Wind/Pumped Hydro Energy Storage Based Hybrid System. *Sustainability* **2023**, *15*, 1222. [\[CrossRef\]](#)
- Al-Badi, A.; Al Wahaibi, A.; Ahshan, R.; Malik, A. Techno-economic feasibility of a solar-wind-fuel cell energy system in Duqm, Oman. *Energies* **2022**, *15*, 5379. [\[CrossRef\]](#)
- Basheer, Y.; Waqar, A.; Qaisar, S.M.; Ahmed, T. Analyzing the Prospect of Hybrid Energy in the Cement Industry of Pakistan, Using HOMER Pro. *Sustainability* **2022**, *14*, 12440. [\[CrossRef\]](#)

15. Rice, I.K.; Zhu, H.; Zhang, C.; Tapa, A.R. A Hybrid Photovoltaic/Diesel System for Off-Grid Applications in Lubumbashi, DR Congo: A HOMER Pro Modeling and Optimization Study. *Sustainability* **2023**, *15*, 8162. [\[CrossRef\]](#)
16. National Operator of the Electric System. *Hourly Load Curve*; National Operator of the Electric System: Brasília, Brazil, 2023.
17. Superintendency of Economic and Social Studies of Bahia. *Electricity Consumption by Class in Bahia by Municipality (2016)—Captive Market*; ANEEL: Brasília, Brazil, 2023.
18. Electric Energy National Agency. *Captive Market Report*; ANEEL: Brasília, Brazil, 2023.
19. Empresa de Pesquisa Energética. *Statistical YearBook of Electricity—Baseline 2022*; Technical Report; Federal Government Ministry of Minas and Energy: Brasília, Brazil, 2023.
20. Rashid, F.; Hoque, M.E.; Aziz, M.; Sakib, T.N.; Islam, M.T.; Robin, R.M. Investigation of optimal hybrid energy systems using available energy sources in a rural area of Bangladesh. *Energies* **2021**, *14*, 5794. [\[CrossRef\]](#)
21. Kaluthanthrige, R.; Rajapakse, A.D.; Lamothe, C.; Mosallat, F. Optimal sizing and performance evaluation of a hybrid renewable energy system for an off-grid power system in northern Canada. *Technol. Econ. Smart Grids Sustain. Energy* **2019**, *4*, 4. [\[CrossRef\]](#)
22. Oulis Rousis, A.; Tzelepis, D.; Konstantelos, I.; Booth, C.; Strbac, G. Design of a hybrid AC/DC microgrid using Homer Pro: Case study on an islanded residential application. *Inventions* **2018**, *3*, 55. [\[CrossRef\]](#)
23. Empresa de Pesquisa Energética. *Power Generation Costs Report 2021*; Technical Report; Federal Government Ministry of Minas and Energy: Brasília, Brazil, 2021.
24. *Valor Da Energia Solar: Quanto Custa Para Instalar Energia Solar?* Canal Solar: Campinas, Brazil, 2023.
25. Fedalto, L.F.V.; Salas, S.; de Medeiros, L. Análise Técnica e Simulação Econômica para Aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias nos Sistemas Elétricos de Potência-[Not available in English]. In Proceedings of the 2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA), Montevideo, Uruguay, 28 September–2 October 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 1–6.
26. Gomes, A.C.; Neto, C.C.; Sobrinho, D.M.; de Queiroz, D.M.B.; de Oliveira, E.E.S.; Porto, F.; Uchôa, K.M.; Batista, N.E.; Ribeiro, S.B.J.; de Carvalho, P.C.M. Estudo de viabilidade de planta híbrida eólica-fotovoltaica para compensação de consumo de energia elétrica residencial-[Not available in English]. *Rev. Eng. Technol.* **2021**, *13*, 13–23.
27. Islam, M.R.; Akter, H.; Howlader, H.O.R.; Senjyu, T. Optimal sizing and techno-economic analysis of grid-independent hybrid energy system for sustained rural electrification in developing countries: A case study in Bangladesh. *Energies* **2022**, *15*, 6381. [\[CrossRef\]](#)
28. Mubarok, H.; Farid, M. Hybrid power plant system analysis in seruni beach, Bantaeng district, South Sulawesi. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1413*, 012010. [\[CrossRef\]](#)
29. Chamber of Electric Energy Commercialization. *Pricing Panel*; CCEE: Brasília, Brazil, 2023.
30. Electric Energy National Agency. *Normative Resolution No. 876, of March 10, 2020*; ANEEL: Brasília, Brazil, 2020.
31. Electric Energy National Agency. *Normative Resolution No. 954, of November 30, 2021*; ANEEL: Brasília, Brazil, 2021.
32. Electric Energy National Agency. *Normative Resolution No. 1000, of December 7, 2021*; ANEEL: Brasília, Brazil, 2021.
33. Brasil. *Law No. 14,300, of January 6, 2022*; ANEEL: Brasília, Brazil, 2022.
34. Olatomiwa, L.; Mekhilef, S.; Huda, A.; Ohunakin, O.S. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geo-political zones of Nigeria. *Renew. Energy* **2015**, *83*, 435–446. [\[CrossRef\]](#)
35. Borhanazad, H.; Mekhilef, S.; Saidur, R.; Boroumandjazi, G. Potential application of renewable energy for rural electrification in Malaysia. *Renew. Energy* **2013**, *59*, 210–219. [\[CrossRef\]](#)
36. Faccio, M.; Gamberi, M.; Bortolini, M.; Nedaei, M. State-of-art review of the optimization methods to design the configuration of hybrid renewable energy systems (HRESs). *Front. Energy* **2018**, *12*, 591–622. [\[CrossRef\]](#)
37. Arsad, A.; Hannan, M.; Al-Shetwi, A.Q.; Mansur, M.; Muttaqi, K.; Dong, Z.; Blaabjerg, F. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions. *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47*, 17285–17312. [\[CrossRef\]](#)
38. Nema, P.; Nema, R.; Rangnekar, S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 2096–2103. [\[CrossRef\]](#)

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



# Capítulo 5

## Conclusão

Este trabalho visou contribuir para o estudo de viabilidade técnico-econômica de uma UHE para atendimento ao município de Casa Nova, localizado no interior da Bahia, de forma a avaliar a melhor combinação de integração das fontes de energia renováveis e conectividade à rede. Através de simulações computacionais, realizou-se a otimização de cenários para configuração de planta híbrida mais adequada às características locais, tendo como base a análise de resultados para um sistema híbrido *off-grid*, envolvendo geração fotovoltaica, eólica e armazenamento de energia.

A revisão do estado da arte apresentada na primeira etapa deste estudo relata que a discussão científica a respeito de sistemas híbridos de energia se intensificou a partir do ano de 2020, quando houve um *boom* de publicações nessa temática. Nesta revisão demonstrou-se também que os países asiáticos destacam-se em número de trabalhos publicados sobre HRES, indicando que a utilização de sistemas híbridos é uma solução explorada para fornecimento de energia desses locais. Isso pode ser justificado pelo fato desses países terem mais da metade da sua população vivendo em áreas remotas, onde os sistemas *off-grid* possuem maior potencial de aplicação.

O levantamento de revisão da literatura, complementado com o fornecimento de dados reais de consumo e geração, notas técnicas e resoluções normativas apresentadas neste trabalho de dissertação de mestrado, objetivam

contribuir para futuras tomadas de decisão e planejamento da infraestrutura energética de novos sistemas de geração renováveis, principalmente no Brasil, aonde o cenário de desenvolvimento de usinas híbridas de energia ainda é emergente.

Para a análise dos cenários relativos à implementação da UHE, utilizou-se o software HOMER Pro, que simula cenários de hibridização, buscando a configuração ótima para o arranjo escolhido. Dessa forma, ao examinar diferentes cenários de carga, incluindo o fornecimento de 100%, 50% e 25% do consumo de energia da cidade por meio de uma planta híbrida, foi possível obter resultados que auxiliaram na compreensão dos desafios e oportunidades associados à geração híbrida. Além disso, a pesquisa envolvida nesse trabalho consolidou conhecimentos a respeito da viabilidade e dos requisitos para a implementação de um sistema híbrido *off-grid* para atender às necessidades energéticas de Casa Nova - BA.

Os resultados destacam que fornecer toda a demanda energética da cidade de Casa Nova por meio do sistema *off-grid* pode ser financeiramente proibitivo e impraticável, especialmente quando comparado às demais fontes de geração existentes. Contudo, à medida que foi reduzida a proporção da carga atendida e, conseqüentemente, do tamanho do sistema híbrido responsável por fornecer energia para a cidade, a viabilidade e a eficácia econômica de tal sistema tornaram-se mais favoráveis. Logo, a decisão de adotar um sistema *off-grid* para Casa Nova deve ser feita com cautela, considerando não apenas aspectos econômicos, mas também os benefícios ambientais e sociais.

Além da simulação do sistema de geração renovável, esta pesquisa pode também fornecer uma avaliação abrangente das vantagens e desvantagens das usinas híbridas no contexto nacional. Sendo assim, este trabalho de dissertação de mestrado pode elucidar para o caso específico do município de Casa Nova, mas que pode ser extrapolado para um entendimento mais amplo da implementação de hibridização de fontes de energia em outras cidades ou locais semelhantes no Brasil, ou até mesmo no mundo.

Um estudo futuro que poderia ser realizado seria simular uma planta

híbrida *on-grid*, considerando os mesmos requisitos de carga, mas com o suporte da conexão à rede. Neste caso, deveria-se incluir o estudo de tarifas para avaliar o dimensionamento e a viabilidade da hibridização no atendimento ao município de Casa Nova ou locais semelhantes. Ademais, a metodologia proposta neste trabalho é adaptável e replicável em diferentes arranjos, sendo também um recurso valioso para avaliar a viabilidade de projetos semelhantes em todo o mundo.

Portanto, o uso de usinas de energia híbridas deve considerar não apenas a abordagem técnica, mas também a governança energética, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento econômico. É necessário estabelecer políticas que incentivem a integração de fontes renováveis dentro de sistemas híbridos, estabelecendo regulamentações claras para conexão à rede e estruturas tarifárias, considerando o fornecimento *off-grid* para locais isolados, incentivando tecnologias de armazenamento de energia e estimulando a adoção de sistemas híbridos.

# Bibliografia

- [1] Marlon Max Huamaní Bellido. “Microrredes elétricas: uma proposta de implementação no Brasil”. Tese de dout. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [2] Maria Luisa Di Silvestre et al. “How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 (2018), pp. 483–498.
- [3] Abidur Rahman, Omar Farrok e Md Mejbaul Haque. “Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161 (2022), p. 112279.
- [4] Ministério de Minas e Energia. *Fontes de Energia*. Rel. técn. Empresa de Pesquisa Energética, 2021.
- [5] IEA. *Energy Statistics Data Browser*. Rel. técn. IEA, 2023. URL: [www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser](http://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser).
- [6] Arvydas Lebedys et al. *Renewable Capacity Statistics 2023*. Rel. técn. International Renewable Energy Agency, 2023.
- [7] Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional - Ano Base 2022*. Rel. técn. Empresa de Pesquisa Energética, 2023.
- [8] Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional - Ano Base 2017*. Rel. técn. Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

- [9] EXAME. 2023. URL: <https://exame.com/esferabrasil/o-que-e-o-acordo-de-paris-e-as-metas-do-brasil-para-reducao-de-emissoes/>.
- [10] IRENA. *Energy Transition Outlook*. fevereiro de 2024. URL: [www.irena.org/Energy-Transition/Outlook](http://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook).
- [11] Reshma S. Jadhav e Sangita B. Patil. “Design and implementation of pv-wind battery hybrid system for off grid and on grid”. Em: *2020 Fourth International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)* (2020), pp. 612–618.
- [12] WindEurope. *Renewable Hybrid Power Plants: Exploring the benefits and market opportunities*. Rel. técn. WindEurope, 2019.
- [13] Umashankar Subramaniam et al. “A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications—Controller-in-loop simulation validation”. Em: *Energies* 13 (2020), p. 755.
- [14] Mukund K Deshmukh e Sandip S Deshmukh. “Modeling of hybrid renewable energy systems”. Em: *Renewable and sustainable energy reviews* 12.1 (2008), pp. 235–249.
- [15] Ministério de Minas e Energia. *Usinas Híbridas - Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento*. Rel. técn. Empresa de Pesquisa Energética, 2018.
- [16] Pranoy Roy et al. “Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review”. Em: *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society* 3 (2022), pp. 81–104.
- [17] Abdullah Al-Badi et al. “Techno-economic feasibility of a solar-wind-fuel cell energy system in Duqm, Oman”. Em: *Energies* 15.15 (2022), p. 5379.
- [18] BIOENERG - consultoria ambiental. *O Sistema Elétrico*. URL: <https://bioenerg.com.br/blog-detalhes.php?id=2&titulo=O+Sistema+El%C3%A9trico>.



- [19] Arlei Bichels. *Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução*. 2018.
- [20] CCEE. *Geração de energia renovável bateu recorde em 2022, aponta CCEE*. URL: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/geracao-de-energia-renovavel-bateu-recorde-em-2022-aponta-ccee>.
- [21] ONS. *EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA NO SIN - FEVEREIRO 2024/ DEZEMBRO 2028*. URL: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- [22] Alfredo Peinado Gonzalo, Alberto Pliego Marugan e Fausto Pedro García Marquez. “Survey of maintenance management for photovoltaic power systems”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020), p. 110347.
- [23] Ali C. Kheirabadi e Ryoza Nagamune. “A quantitative review of wind farm control with the objective of wind farm power maximization”. Em: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 192 (2019), pp. 45–73.
- [24] Sandro Gomes Pinheiro, Rogério Atem de Carvalho e Francisco de Assis Léo Machado. “POLÍTICAS PÚBLICAS DO BRASIL PARA EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: UMA REVISÃO DA LITERATURA NO PERÍODO 2011-2021”. Em: *InterSciencePlace* 18.1 (2023).
- [25] Patrícia Fagundes Góes e Armando Hirohumi Tanimoto. “Propriedades e uso de tecnologias de grafeno em painéis solares visando ao aprimoramento de seu desempenho”. Em: *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA* 21.7 (2023), pp. 7358–7366.
- [26] SUNERGIA. *COMO FUNCIONA O DIODO DE BYPASS EM NÍVEL DE CÉLULA EM UM PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO?* URL: <https://sunergia.com.br/blog/como-funciona-o-diodo-de-bypass-em-nivel-de-celula-em-um-painel-solar-fotovoltaico/>.

- [27] Miro Zeman. “Introduction to photovoltaic solar energy”. Em: *Delft University of Technology* 2.6 (2003).
- [28] *PROJETOS FOTOVOLTAICOS NOS LEILÕES DE ENERGIA: Análises dos leilões A-4 e A-6 de 2019*. Rel. técn. No. EPE-DEE-003/2020-r0. Ministério de Minas e Energia, 2020.
- [29] Secretaria de Ciência e Tecnologia SENAI CIMATEC Secretaria de Infraestrutura. *Atlas Solar da Bahia*. Governo da Bahia, 2018.
- [30] Floriano Torres Neto et al. “Análise da Interação das Fontes Renováveis Intermitentes com a Matriz Elétrica Brasileira”. Em: *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. IEEE. 2023, pp. 422–427.
- [31] ONS. *GERAÇÃO MÉDIA DIÁRIA E HORÁRIA*. URL: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-media-diaria-horaria.aspx>.
- [32] Matheus Paula et al. “Predicting long-term wind speed in wind farms of northeast brazil: A comparative analysis through machine learning models”. Em: *IEEE Latin America Transactions* 18.11 (2020), pp. 2011–2018.
- [33] Secretaria de Ciência e Tecnologia SENAI CIMATEC Secretaria de Infraestrutura. *Atlas Eólico da Bahia*. Governo da Bahia, 2013.
- [34] Diana Martinello et al. “Sistema de emulação de aerogeradores para aplicação em geração distribuída de energia elétrica”. Diss. de mestr. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- [35] Ananda Thomaz Simões. “Implementação de uma plataforma experimental para emulação de turbinas hídricas e eólicas”. Tese de dout. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal), 2018.
- [36] *Vestas V150-4.2 MW*. URL: <https://www.goldwindamericas.com/sites/default/files/GW4.2MW.pdf>.

- [37] *AEROGERADORES AGW 147 / 4.2*. URL: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/Aerogeradores---AGW147-4-2/Aerogeradores---AGW147-4-2/p/MKT\\_WEN\\_WIND\\_AGW147](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/Aerogeradores---AGW147-4-2/Aerogeradores---AGW147-4-2/p/MKT_WEN_WIND_AGW147).
- [38] *4.2MW Goldwind Smart Wind Turbine*. URL: <https://www.goldwindamericas.com/sites/default/files/GW4.2MW.pdf>.
- [39] Brasil Energia. *Mercado de armazenamento de energia deve crescer 84% no Brasil até 2030*. URL: <https://editorabrasilenergia.com.br/mercado-de-armazenamento-de-energia-deve-crescer-84-no-brasil-ate-2030/>.
- [40] Luiz Felipe Vilela Fedalto, Silvio Salas e Lucio de Medeiros. “Análise Técnica e Simulação Econômica para Aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias nos Sistemas Elétricos de Potência-[Not available in English]”. Em: *2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA)*. IEEE. 2020, pp. 1–6.
- [41] Matheus de Souza Nascimento et al. “Análise técnica e econômica de sistemas de estocagem de energia”. Em: *Brazilian Journal of Development* 9.2 (2023), pp. 8499–8517.
- [42] BloombergNEF. *Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030*. URL: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>.
- [43] Eduardo T. Serra; Alcir de Faro Orlando; Acher Mossé; Nelson Martins. *ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: SITUAÇÃO ATUAL, PERSPECTIVAS E RECOMENDAÇÕES*. Rel. técn. Comitê de Energia da Academia Nacional de Engenharia, 2016.
- [44] Way2Energy. *Tecnologias e aplicações para armazenar energia*. URL: <https://www.way2.com.br/blog/tecnologias-para-armazenar-energia/>.

- [45] IRENA. *Renewable energy in hybrid mini-grids and isolated grids: economic benefits and business cases*. Rel. técn. International Renewable Energy Agency, 2015.
- [46] Roshani Kaluthanthrige et al. “Optimal sizing and performance evaluation of a hybrid renewable energy system for an off-grid power system in northern Canada”. Em: *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 4 (2019), pp. 1–16.
- [47] A Perez-Navarro et al. “Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation”. Em: *Renewable Energy* 35.7 (2010), pp. 1436–1443.
- [48] IRENA. *Pacific Lighthouses: Hybrid Power Systems*. Rel. técn. International Renewable Energy Agency, 2013.
- [49] ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 954*.
- [50] Faizan A Khan, Nitai Pal e Syed H Saeed. “Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (2018), pp. 937–947.
- [51] Carlos Alberto Anjoletto Macedo, Andrei Aparecido de Albuquerque e Herick Fernando Moralles. “Análise de viabilidade econômico-financeira de um projeto eólico com simulação Monte Carlo e avaliação de risco”. Em: *Gestão & Produção* 24 (2017), pp. 731–744.
- [52] Carlos Alberto Anjoletto Macedo. “Avaliação de diferentes estratégias de manutenção e estimativa do LCOE de uma usina fotovoltaica centralizada aplicando conceitos de confiabilidade”. Tese de dout. [sn], 2022.
- [53] IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2022*. Rel. técn. IRENA, 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>.

- [54] Leandro Firme CROCE et al. “Análise da atratividade da geração híbrida de energia elétrica de acordo com o atual cenário do mercado brasileiro”. Em: (2023).
- [55] William D Kellogg et al. “Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems”. Em: *IEEE Transactions on energy conversion* 13.1 (1998), pp. 70–75.
- [56] Eftichios Koutroulis et al. “Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms”. Em: *Solar energy* 80.9 (2006), pp. 1072–1088.
- [57] Lu Zhang, Georges Barakat e Adnan Yassine. “Deterministic optimization and cost analysis of hybrid PV/wind/battery/diesel power system”. Em: *International Journal Of Renewable Energy Research* 2.4 (2012), pp. 686–696.
- [58] Saber Arabi Nowdeh e Mahdi Hajibeigy. “Economic Designing of PV/FC/Wind Hybrid System Considering Components Availability.” Em: *International Journal of Modern Education & Computer Science* 5.7 (2013).
- [59] Giuseppe La Terra, Gagliano Salvina e GM Tina. “Optimal sizing procedure for hybrid solar wind power systems by fuzzy logic”. Em: *MELCON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. IEEE. 2006, pp. 865–868.
- [60] R Ramakumar, Imad Abouzahr e Kaveh Ashenayi. “A knowledge-based approach to the design of integrated renewable energy systems”. Em: *IEEE transactions on energy conversion* 7.4 (1992), pp. 648–659.
- [61] Temitope Adefarati e Ramesh C Bansal. “Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources”. Em: *Applied energy* 236 (2019), pp. 1089–1114.
- [62] S Bahramara, M Parsa Moghaddam e MR Haghifam. “Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016), pp. 609–620.

- [63] Mohammad Hossein Amrollahi e Seyyed Mohammad Taghi Bathaee. “Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response”. Em: *Applied energy* 202 (2017), pp. 66–77.
- [64] Yashwant Sawle, SC Gupta e Aashish Kumar Bohre. “Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques”. Em: *Renewable energy* 119 (2018), pp. 459–472.
- [65] Om Krishan e Sathans Suhag. “Techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for an energy poor rural community”. Em: *Journal of Energy Storage* 23 (2019), pp. 305–319.