



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
ENGENHARIA DE ENERGIAS**

BRUNO FRANÇA VIEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DE ATRATIVIDADE DE UM SISTEMA EÓLICO-SOLAR
ON-GRID NO MUNICÍPIO DE BARREIRA-CE**

**REDENÇÃO
2021**

BRUNO FRANÇA VIEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DE ATRATIVIDADE DE UM SISTEMA EÓLICO-SOLAR
ON-GRID NO MUNICÍPIO DE BARREIRA-CE**

Monografia apresentada como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Energia, pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus dos Palmares.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro.

REDENÇÃO

2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Vieira, Bruno França.

V713e

Estudo comparativo de atratividade de um sistema eólico - solar On-Grid no município de Barreira-Ce / Bruno França Vieira. - Redenção, 2021.

75f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia eólica - Ceará.
3. Energia solar - Ceará. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 333.79098131

BRUNO FRANÇA VIEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DE ATRATIVIDADE DE UM SISTEMA EÓLICO-SOLAR
ON-GRID NO MUNICÍPIO DE BARREIRA-CE**

Monografia apresentada como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Energia, pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, UNILAB – Campus dos Palmares.

Aprovado em: 20/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

DEDICATÓRIAS

A Deus.

Aos meus pais, Walter e Alessandra.

Ao meu irmão, Kauã Douglas.

À minha noiva, Viviane Bizerra.

O amor, carinho e incentivo de todos foram essenciais para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me guiar, ainda que eu não compreenda. A Ele por iluminar o meu caminho e colocar em minha vida seres bondosos que tornam a estadia na terra melhor.

Aos meus pais, Walter e Alessandra Vieira, por fazerem de mim o homem que hoje sou, por me ensinarem os caminhos da bondade, as recompensas da generosidade e o prazer que habita na honestidade. A eles pelo apoio incondicional.

Ao meu irmão, Kauã Douglas, pelo apoio e admiração mútua, pelo amor incondicional.

À minha noiva, Viviane Bizerra, por acreditar em mim muito mais do que eu mesmo acredito. Pelo seu apoio e garra incomensuráveis que tanto me inspiram. Pelo amor dado a mim de forma tão sincera e constante.

Ao Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro, pela orientação, apoio e partilha de conhecimentos que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos Professores Cícero Freitas, Gustavo Lima e Maria Lucineide, que me ensinaram o conceito de ensino sincero e aprendizado sólido.

Aos meus amigos André Lucas, Francisca Viviane, Marcos Venícios e Wanderson Alves que tive o prazer de conhecer e me aproximar durante o curso. Agradeço pela partilha de tempo, experiência, conhecimento e principalmente pelas palavras de incentivo que me permitiram chegar até aqui.

Aos amigos de vida e aventura, Cícero Neto, Gabriel Mendes, Gilmar Dantas, Lucas Sarmiento, Luiz Henrique, Matheus Bandeira e Maycon Andrade, pois sei que eles se alegram a cada conquista minha.

Aos professores Humberto Ícaro Pinto Fontinele e Vandilberto Pereira Pinto, por terem aceitado o convite de participar da Banca Examinadora desta monografia.

Aos professores que tive o privilégio de conhecer durante esta jornada, que pavimentaram minha vida acadêmica e que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

A minha comunidade de origem, Carnaúba. Pela pronta contribuição e incentivo para a elaboração do projeto apresentado.

A mim, pois minha única qualidade foi ter acreditado em todos os aqui citados. Pois se estes a quem tenho apreço acreditam em mim, por certo, devo eu também acreditar.

RESUMO

O presente trabalho destina-se ao estudo de atratividade financeira de implantação de um sistema híbrido eólico-solar de geração de energia, pertencente a categoria de geração distribuída conectados à rede (on grid). O trabalho propõe a utilização de fontes renováveis de energia em uma pequena comunidade do maciço de Baturité, denominada Carnaúba na cidade de Barreira, Ceará, com módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas, objetivando a utilização do potencial energético do local para suprir a demanda elétrica da comunidade. Tal sistema é dimensionado para gerar a energia consumida pela população da comunidade, onde 65% da energia fornecida à carga deve ser proveniente de fontes renováveis, desta forma, utilizando a rede pública de energia elétrica apenas como complemento nos momentos em que nenhuma das outras fontes gere energia suficiente. A partir de dados de consumo de energia das famílias no período de um ano e dados climatológicos disponibilizados por órgãos especializados, foram dimensionados os subsistemas e definidos suas potências para simulação. Além disso foram estabelecidos custos de equipamentos, demanda da carga e parâmetros financeiros, para que o *software* HOMER Pro simule diversos cenários de geração de energia, retornando uma lista de cenários simulados e seus respectivos indicadores econômicos, onde cabe ao projetista definir qual cenário se mostra o mais econômico possível, além de fornecer dados de geração individual, e emissão de gases poluentes para cada cenário, durante o período de vida do projeto. O arranjo que se mostrou mais eficiente do ponto de vista econômico foi o híbrido, dispondo de módulos fotovoltaicos com capacidade de geração total de 170 kW, duas turbinas eólicas de 10 kW e 24 metros de altura mínima, que são conectados a rede através de um grupo de inversores com capacidade de 137 kW e eficiência de 95%, gerando energia suficiente para suprir as necessidades atuais de consumo. Uma vez que a quantidade de energia produzida é maior do que a consumida atualmente pela comunidade em suas residências, torna-se possível suprir um provável aumento de demanda futura, além da inclusão da comunidade como uma unidade de geração compartilhada, podendo participar do sistema de compensação e receber créditos de geração previstos na Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL.

Palavras Chave: Sistema Híbrido, Solar – Eólico, Sistema de compensação, Complementaridade, Análise de viabilidade.

ABSTRACT

The present work is intended to study the financial attractiveness of implementing a hybrid wind-solar power generation system, belonging to the category of distributed generation connected to the grid (on grid). The work proposes the use of renewable energy sources in a small community in the Baturité massif, called Carnaúba in the city of Barreira, Ceará, with photovoltaic modules and wind turbines, aiming to use the local energy potential to supply the community's electrical demand. Such a system is dimensioned to generate the energy consumed by the population of the community, where 65% of the energy supplied to the load must come from renewable sources, thus, using the public electricity network only as a complement at times when none of the other sources generate enough energy. Based on household energy consumption data over a period of one year and climatological data provided by specialized agencies, the subsystems were dimensioned and their powers defined for simulation. Besides that, equipment costs, load demand and financial parameters were established, so that HOMER Pro software simulates various energy generation scenarios, returning a list of simulated scenarios and their respective economic indicators, where it is up to the designer to define which scenario is shown as economical as possible. Besides that, the software provide data of individual generation, and emission of polluting gases for each scenario during the life of the Project. The arrangement that proved to be the most efficient from an economic point of view was the hybrid, featuring photovoltaic modules with a total generation capacity of 170 kW, two 10 kW wind turbines and a minimum height of 24 meters, which are connected to the grid through a group of inverters with a capacity of 137 kW and 95% efficiency, generating enough energy to meet current consumption needs. Since the amount of energy produced is greater than that currently consumed by the community in their homes, it becomes possible to supply a likely increase in future demand, in addition to the inclusion of the community as a shared generation unit, which can participate in the compensation and receive generation credits provided for in ANEEL Normative Resolution 482/2012.

Keywords: Hybrid System, Solar – Wind, Compensation system, Complementarity, Feasibility analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade instalada de geração de energia no mundo de 2000 a 2040.	16
Figura 2 - Investimento no setor mundial de geração de energia em bilhões de dólares.	17
Figura 3 - Empregos gerados no mundo em 2020 via empreendimentos em energias renováveis.	17
Figura 4 - Fluxo de energia elétrica do Brasil.	19
Figura 5 - Emissões de CO ₂ do setor de energia no Cenário de Desenvolvimento Sustentável, 2000-2040.	23
Figura 6 - Emissão de CO ₂ no Brasil no novo cenário de políticas (NPS) x cenário mundial eficiente (EWS).	23
Figura 7 - Matriz Energética Mundial 2018.	24
Figura 8 - Matriz Elétrica Brasileira em 2020.	25
Figura 9 - Nova capacidade de geração eólica em 2020 e participação dos cinco principais mercados.	26
Figura 10 - Empregos gerados em 2020 pela geração eólica.	26
Figura 11 - Potencial Eólico Brasileiro.	27
Figura 12 - Geração e consumo de energia eólica no Brasil de 2010 – 2019.	28
Figura 13 - Potencial eólico do Nordeste.	28
Figura 14 - Geração mensal por estado (MWmed).	29
Figura 15 - Geração mensal por estado (MWmed) e média comparativa anual (MWmed).	30
Figura 16 – Turbinas eólicas com eixo horizontal e vertical.	31
Figura 17 - Principais partes de um aerogerador.	31
Figura 18 - Empregos gerados em 2020 por empreendimentos de geração solar FV.	34
Figura 19 - Insolação Diária, Média Anual (Horas).	35
Figura 20 - Participação de cada fonte na geração distribuída em 2019.	35
Figura 21 - Potência solar fotovoltaica instalada e em operação outorgadas no mercado regulado e livre por estado (MW).	37
Figura 22 - Potência solar fotovoltaica em construção outorgadas no mercado regulado e livre por estado (MW).	37

Figura 23 - Potência solar fotovoltaica com construção não iniciada outorgadas no mercado regulado e livre por estado (MW).	38
Figura 24 - Junção pn e região do acúmulo de carga.	40
Figura 25 - Esquema de um sistema fotovoltaico básico.	41
Figura 26 - Localização do Município de Barreira – CE.	49
Figura 27 - Localização da Comunidade de Carnaúba.	50
Figura 28 - Consumo médio mensal de uma unidade consumidora residente em Carnaúba.....	52
Figura 29 - Consumo médio mensal da comunidade de Carnaúba.....	52
Figura 30 - Irradiação solar e velocidade do vento mensal médio em Carnaúba – CE.	53
Figura 31 - Temperatura média mensal na comunidade de Carnaúba – CE.	53
Figura 32 - Esquema do sistema Híbrido <i>On Grid</i> conectado à rede em estudo.....	54
Figura 33 - Irradiação Solar Média Mensal em kWh/m ² .dia.....	56
Figura 34 – Custo Presente Líquido (NPC) por sistema simulado.	64
Figura 35 - Fração de Energia Renovável Fornecido à Carga em Cada Sistema....	65
Figura 36 - Produção Elétrica Anual Mês a Mês (MWh).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Entrevista Realizada com a Assistente Social.	50
Tabela 2 - Características do aerogerador Bergey Excel 10.....	55
Tabela 3 – Especificações técnicas do módulo solar.....	59
Tabela 4 - Especificações utilizadas pelo programa para o Inversor.....	60
Tabela 5 - Bandeiras Tarifárias da ENEEL.	60
Tabela 6 - Bandeiras Tarifárias entre junho de 2020 e maio de 2021.	61
Tabela 7 - Custo de operação dos sistemas.....	63
Tabela 8 - Custo Inicial, Fração Renovável e Energia Produzida.....	65
Tabela 9 - Parâmetros de avaliação econômica.	66
Tabela 10 - Produção anual total por fonte.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABSolar	Associação Brasileira de Energia Solar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COE	Cost of Energy
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
ENEL	ENTE NAZIONALE PER L'ENERGIA ELÉTRICA
ESRI	Environmental Systems Research Institute
GWEC	Conselho Global de Energia Eólica
HOMER	Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resource
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
IRENA	Agência Internacional de energias Renováveis
LER	Leilão de Energia de Reserva
MPPT	Ponto Rastreador de Máxima Potência
NASA	<i>National Aeronautic and Space Administration</i>
NPC	<i>Net Present Cost</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OPEP	Organização de Países Exportadores de Petróleo

ONS	Operador Nacional do Sistema Eléctrico
ProGD	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Eléctrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Eléctrica
PCS	<i>Power Conditioning System</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Eléctrico Nacional
SIN	Sistema Interligado Nacional
SHEs	Sistemas Híbridos de Energia
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
i	Investimento inicial	\$
FCt	Fluxo de caixa no t-ésimo período	\$
K	Custo de Capital ou Custo de Oportunidade	\$
Cp	Coefficiente de performance	%
n	Eficiência do conjunto gerador-transmissão	%
AR	Área do rotor da turbina	m ²
β	Ângulo ideal de inclinação do módulo fotovoltaico	°
φ	Ângulo de incidência da radiação solar (latitude do local)	°
Pfv	Potência instalada	kWp
Cmédio	Consumo médio que se deseja suprir	kWh
TD	Taxa de desempenho	-
HSP	Horas de sol pleno	h
Ppico	Potência de pico do sistema	kW
ninv	Eficiência do equipamento	%
Eútil	Energia útil entregue pelo sistema anualmente	kWh/ano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS	23
2.2 ENERGIA EÓLICA	25
2.2.1 Energia Eólica no Brasil	27
2.2.2 Energia Eólica no Ceará	28
2.2.3 Aerogerador	30
2.3 ENERGIA SOLAR	33
2.3.1 Energia Solar no Brasil	34
2.3.2 Energia Solar no Ceará	36
2.3.3 Funcionamento de um Módulo Fotovoltaico	38
2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	41
2.4.1 Inversores	43
2.5 LEGISLAÇÃO	44
2.5.1 Resolução Normativa 482/2012	44
2.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA	45
2.7 SOFTWARES DE DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO	47
2.7.1 HOMER	48
3 METODOLOGIA	49
3.1 SELEÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	49

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS	51
3.2.2 Consumo Mensal	51
3.2.3 Dados Climáticos	52
3.3 DESIGN DO SISTEMA.....	54
3.2.1 Escolha do Subsistema Eólico	54
3.3.2 Escolha do Subsistema Fotovoltaico e Inversor	56
3.3.3 Parâmetros de Rede	60
3.3 INDICADORES ECONÔMICOS.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 SISTEMA HÍBRIDO.....	66
5 CONCLUSÕES	68
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.2 TRABALHOS FUTUROS	70
6 REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

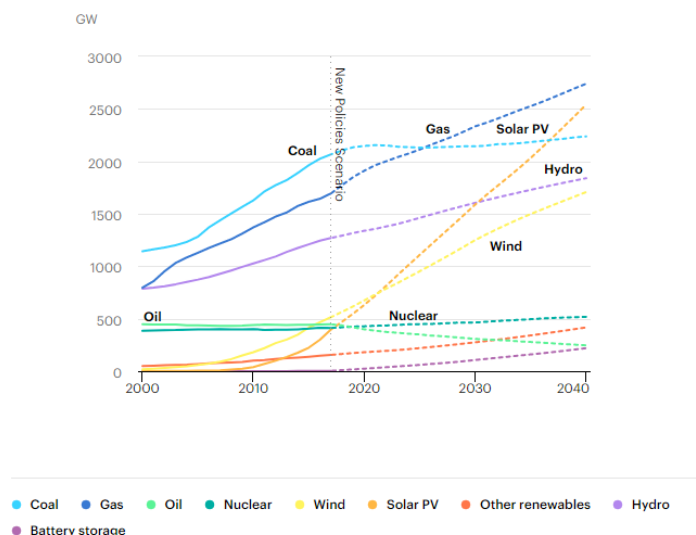
A crescente demanda por eletricidade é resultado do progresso tecnológico e dos processos evolutivos da sociedade humana. A busca por métodos de geração de energia elétrica tem movimentado investimentos em diversos países a fim de aumentar a porcentagem de participação de fontes renováveis nas suas matrizes elétricas e, com isso, reduzir a dependência de combustíveis fósseis como fonte de energia.

A substituição na matriz energética global de fontes convencionais de energia por fontes limpas e com grande potencial energético, contribui para uma renovação neste setor, reduzindo a emissão de gases tóxicos na atmosfera. A utilização de fontes limpas de energia traz consigo uma redução gradativa do ritmo de elevação de temperatura do planeta, que por sua vez é consequência do efeito estufa, grande responsável pelas mudanças climáticas que ocorrem em todo o globo.

De acordo com Villalva, o mundo consumia cerca de 7.000 TWh de eletricidade em 2015. Com base em previsões da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*) este consumo se elevará para a ordem de 20.000 TWh em 2030. A fim de atender esta demanda, o mundo se move para um cenário sustentável capaz de suprir tal necessidade.

Segundo a IEA em uma análise de perspectiva energética realizada em 2020, conforme apresenta a Figura 1, há um crescimento na capacidade instalada de geração de fontes renováveis e para projeções futuras até o ano de 2040.

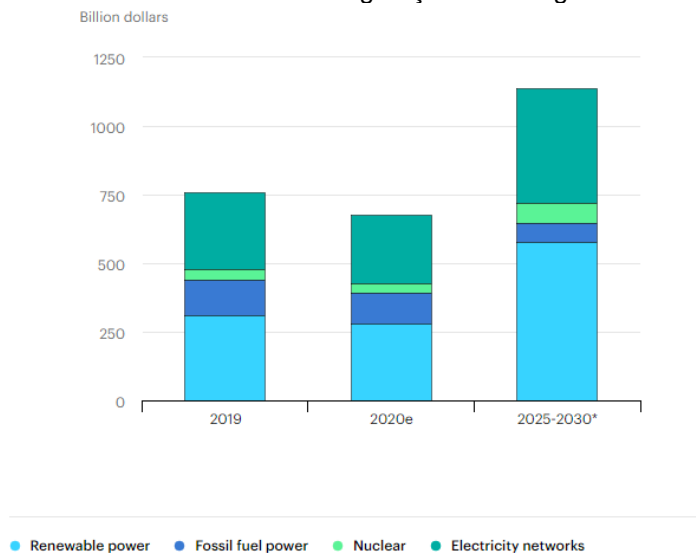
Figura 1 - Capacidade instalada de geração de energia no mundo de 2000 a 2040.



Fonte: IEA Perspectiva Mundial de Energia, 2020.

Nestas projeções, as fontes com crescimento mais acentuado são a Solar e Eólica, fato que corrobora com o crescimento de investimentos globais nestes setores, como demonstra a Figura 2, que apresenta o investimento no setor energético nos anos 2019, 2020 e projeções para 2030.

Figura 2 - Investimento no setor mundial de geração de energia em bilhões de dólares.

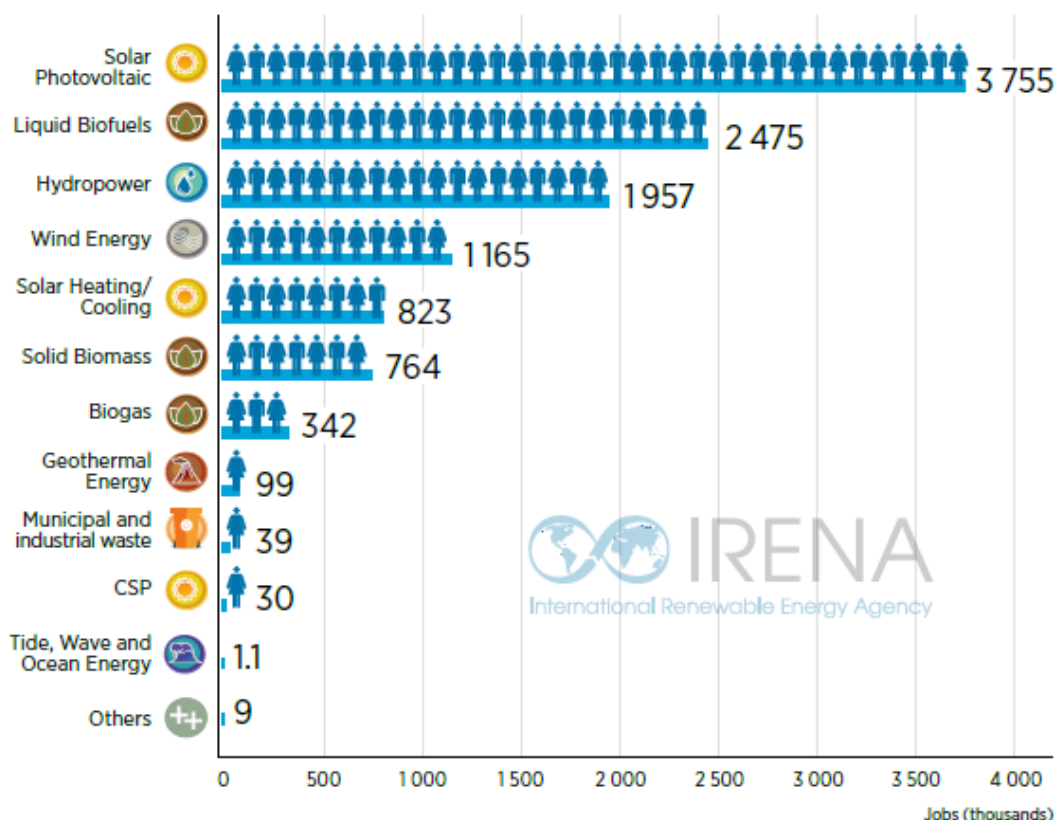


Fonte: IEA Perspectiva Mundial de Energia, 2020.

Segundo a ABEEólica (2020), o mundo enfrenta uma revolução no que tange ao setor energético. A humanidade caminha para um cenário de afastamento de fontes poluentes de energia, priorizando as fontes renováveis que causam mínimos impactos ao ambiente. A partir de órgãos especializados em análises energéticas, como a IEA que trabalha com vários países a fim de estabelecer políticas energéticas para um futuro seguro e sustentável, os dados apresentados nas Figuras 1 e 2, que demonstram os investimentos e crescimento da participação de fontes renováveis, corroboram para a justificativa dessa mudança de perspectiva energética.

De acordo com dados disponibilizados pelo IRENA (*International Renewable Energy Agency*), o setor de energias renováveis empregou sozinho em 2020, aproximadamente 11.45 milhões de pessoas direta ou indiretamente em todo o mundo, conforme apresenta a Figura 3. De acordo com a mesma edição do IRENA, a média ponderada do custo de geração por fontes limpas caiu, tornando o setor de geração por fontes renováveis a escolha padrão do mercado para investimento em geração.

Figura 3 - Empregos gerados no mundo em 2020 via empreendimentos em energias renováveis.



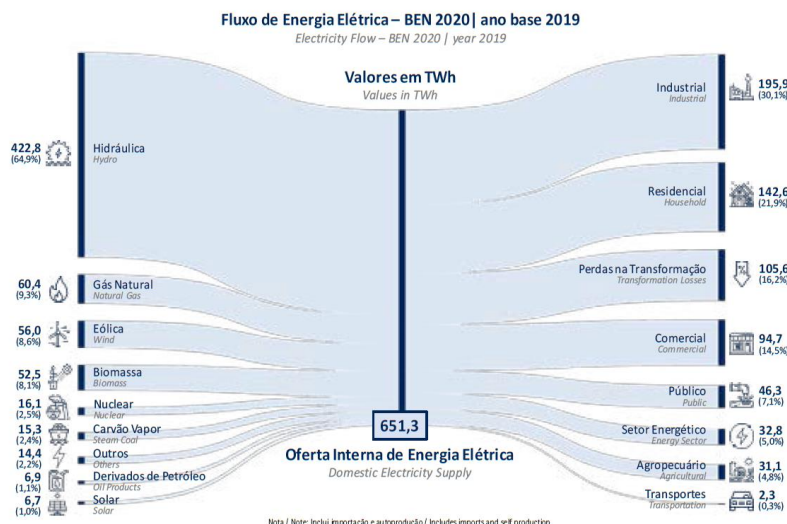
Fonte: IRENA, 2020.

O cenário brasileiro apresenta uma matriz energética bem característica. Devido à grande disponibilidade de rios e grandes bacias hidrográficas em território nacional, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), realizado em 2020, o Brasil tem uma matriz elétrica, em sua maioria, composta por fontes limpas de energia, com uma contribuição maior de energia proveniente de hidrelétricas. O Brasil conta com 83% de sua matriz energética composta por fontes renováveis, enquanto que sua matriz elétrica conta com 64,9% proveniente de fonte hidráulica. Embora esta fonte seja uma fonte limpa, as etapas para a implantação de uma usina hidrelétrica, como o represamento de rios, realocação de povos adjacentes a região, inundação de vastas áreas de vegetação causam danos ao ambiente, de tal forma que não se torna vantajoso a expansão dessa fonte quando comparada com outras fontes renováveis, como a eólica e a solar. Em razão dessa limitação, tem havido um crescimento do investimento de fontes alternativas no território Brasileiro.

A dependência nacional da energia proveniente de fonte hidráulica, conforme ilustra a Figura 4, denota uma dependência de geração relacionada aos índices de precipitação, para que as usinas hidrelétricas possam atender à demanda necessária. Caso os níveis de chuva não sejam satisfatórios, os setores industriais e residenciais

seriam os mais afetados, por representarem os maiores consumidores de energia elétrica.

Figura 4 - Fluxo de energia elétrica do Brasil.



Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2020).

Esta dependência é sentida diretamente no bolso do consumidor, pois em períodos que os índices de precipitação não são suficientes para atender os níveis ideais de geração das usinas hidrelétricas, a geração por meio de termelétricas é utilizada para suprir esse déficit, que por sua vez é altamente poluente e de alto custo de geração. A partir disso, surge o sistema de bandeiras tarifárias criado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2015, que regula as tarifas que serão cobradas ao consumidor por parte das concessionárias com base no custo de geração, além de ter a função de desestimular o consumo de energia em cenários de déficit de geração. Isto tornou-se claro em 2020, quando o mundo enfrentou as consequências da pandemia da COVID-19, onde a população brasileira precisou se isolar em suas residências, elevando de forma inevitável o consumo de energia elétrica. Isto, ligado ao período de seca nas principais bacias hidrográficas do Sistema Interligado Nacional (SIN), no início de 2021, de acordo com a ANEEL, elevou o custo da energia elétrica, que se refletiu no aumento tarifário aplicado neste período.

Visando reduzir esta dependência da energia hidráulica, além de diversificar a matriz elétrica do país, o Brasil tem levado o investimento em outras fontes de energia, como a solar e eólica, que tem demonstrado um crescimento na matriz elétrica do país, de acordo com o BEN de 2020, principalmente devido ao seu potencial de geração. Ligado a isto, políticas públicas de incentivo, como o sistema de

compensação de geração presentes na Normativa nº 482/2012, que trata das definições de geração distribuída, reforçam a necessidade de ampliação deste setor, bem como pavimentam o surgimento deste cenário.

A partir da necessidade de aproveitar o potencial energético do Brasil proveniente de fontes solar e eólicas, a junção de duas tecnologias de obtenção de energia em um sistema híbrido de geração torna-se uma alternativa viável. A aplicação desse sistema toma como base a prerrogativa de complementaridade na geração, pois contratempos como a ausência de luz solar em determinados períodos seria auxiliada pela geração de energia a partir do potencial eólico dos ventos. Em sistemas *on grid*, ou seja, conectados à rede elétrica, a energia gerada pelo sistema é injetada diretamente na rede, gerando créditos para as faturas seguintes.

Já em um cenário local, o Ceará apresenta um alto potencial eólico e solar. De acordo com a ABEEólica, o Nordeste representa 85,6% da geração eólica do país, gerando 5,95 TWh em 2020 por meio da fonte eólica. O Ceará conta com uma Irradiação Global Horizontal Média que varia entre 1826 a 2557 kWh/m²/ano, segundo a ABSolar, com 98% do seu território com sistemas de geração de energia a partir da tecnologia fotovoltaica. Esse grande potencial, ligados aos programas de incentivo atrelados a geração distribuída constroem um cenário propício para o crescimento das fontes renováveis neste estado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade econômica para a instalação de uma central de geração híbrida (Eólica-Solar) conectada à rede na comunidade Carnaúba, situada no Município de Barreira, Ceará.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Levantar dados do consumo energético (kWh) da comunidade;
- II. Dimensionar a central de geração híbrida com base em dados de irradiação solar, Velocidade do vento, temperatura e a participação da rede, considerando suas tarifas.

- III. Simular diferentes configurações para o sistema, por meio do *software* HOMER PRO, com base no dimensionamento realizado para cada subsistema, considerando suas potências, a demanda da carga, custos relacionados ao sistema e tarifas da rede.
- IV. Realizar levantamento de custos de implantação e de operação dos sistemas propostos;
- V. Fazer o estudo de viabilidade econômica utilizando os métodos: VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno), *Payback's* Simples e Descontado, NPC (*Net Present Cost*) e Custo Inicial.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nesta perspectiva, o presente trabalho, busca investigar a relação custo-benefício e atratividade econômica da implementação de um sistema geração híbrido (Eólico-Solar), na região do maciço de Baturité. A comunidade de Carnaúba, comunidade a ser analisada, que se localiza no município de Barreira – CE, trata-se de uma comunidade composta em sua maioria por agricultores e agropecuaristas, que devido à distância da comunidade em relação ao centro urbano do município e a ausência de manutenção da rede elétrica local, tem enfrentado sucessivas quedas de energia, o que prejudica a qualidade de vida dos moradores. A região de estudo possui características de irradiação solar e velocidade de ventos plausíveis para a implantação de um sistema de geração deste tipo, pautados pelo sistema de compensação e obtenção de créditos assegurados pela Resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL. Dito isto, o sistema híbrido de geração surge como uma alternativa para suprir a demanda da comunidade e a redução de dependência da rede elétrica de forma sustentável e segura.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 do presente trabalho aborda o contexto do trabalho, objetivos gerais e específicos bem como a justificativa.

O capítulo 2 aborda conceitos teóricos de sistemas geração fotovoltaicos, eólicos, de geração híbrida e os conceitos de legislação ligados ao cenário de geração distribuída.

O capítulo 3 trata da metodologia de elaboração do estudo realizado no presente trabalho, bem como o estabelecimento de parâmetros de simulação dos cenários de geração.

O capítulo 4 demonstra os resultados obtidos a partir da simulação dos cenários de geração bem como seus indicadores econômicos de atratividade e percentuais de geração de cada subsistema.

O capítulo 5 apresenta as conclusões acerca do estudo realizado através dos dados obtidos e dos cenários de geração simulados.

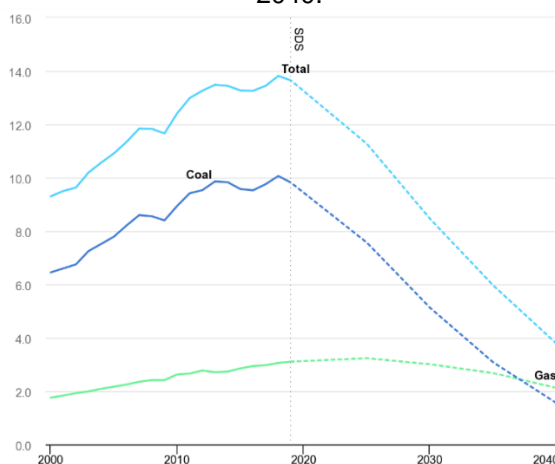
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentando o contexto da energia eólica e solar no mundo, no Brasil e no Ceará. Além disso, o capítulo aborda conceitos ligados à geração híbrida, bem como definições de análise de viabilidade econômica.

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A inclusão de fontes limpas na matriz energética mundial, para Cerqueira (2019), é fator determinante para que se alcance um cenário de desenvolvimento sustentável, onde ocorre uma redução gradual da emissão de gases como CO₂. Fato este expresso na Figura 5, de acordo com a IEA.

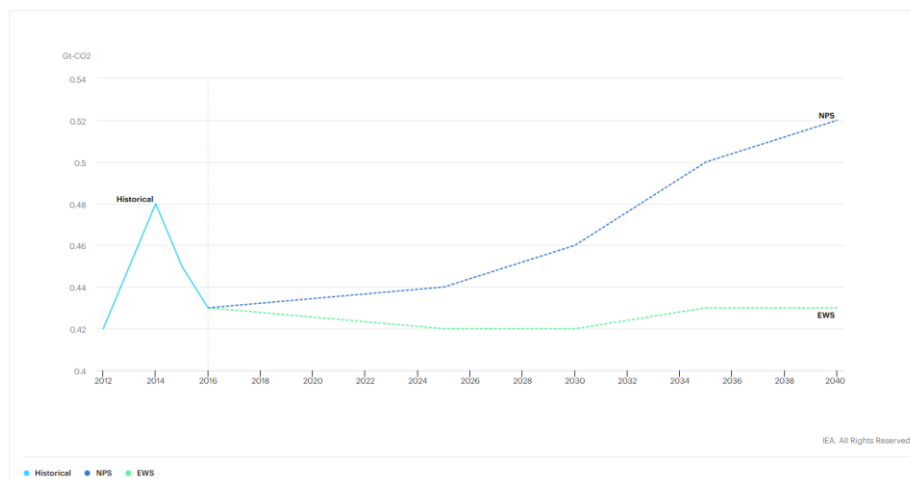
Figura 5 - Emissões de CO₂ do setor de energia no Cenário de Desenvolvimento Sustentável, 2000-2040.



Fonte: IEA World Energy Outlook, 2019.

Ao se falar da emissão de gases como CO₂, o cenário nacional se assemelha aos padrões mundiais. Isto implica dizer que o Brasil, como economia em desenvolvimento, também carece de incentivos e investimentos em um setor mais limpo de geração de energia, visando alcançar o cenário mundial eficiente, reduzindo a emissão de CO₂, como expresso na Figura 6.

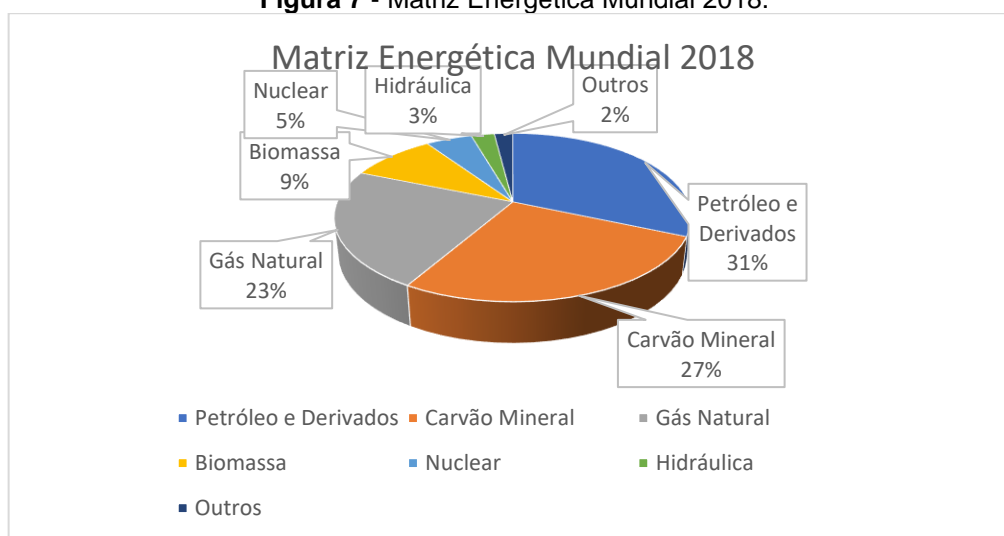
Figura 6 - Emissão de CO₂ no Brasil no novo cenário de políticas (NPS) x cenário mundial eficiente (EWS).



Fonte: IEA World Energy Outlook, 2019.

De acordo com dados disponibilizados pela IEA, expostos na Figura 7, a matriz energética mundial denota uma dependência do mundo em fontes de energia não renováveis.

Figura 7 - Matriz Energética Mundial 2018.



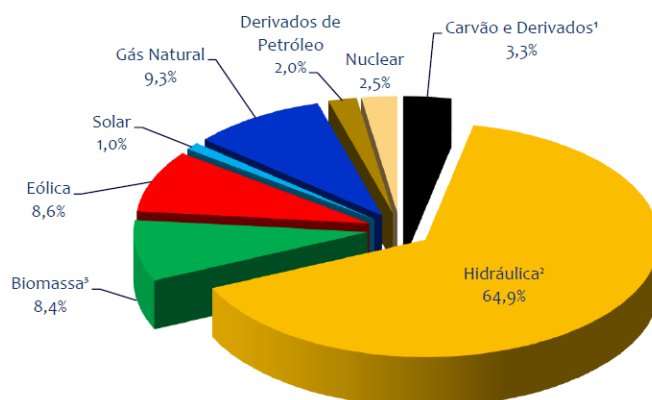
Fonte: IEA World Energy Outlook, 2018.

Em contrapartida, as energias renováveis, despontam de forma crescente na matriz energética mundial.

A total e abrupta transição de um sistema de geração de energia tradicional para um sistema renovável e sustentável, é complexo e oneroso. Porém, caso a mudança ocorra de forma gradativa, os resultados alcançados podem ser benéficos nas esferas econômica, social, tecnológicas e ambiental, como cita Silveira (2019).

De acordo com o BEN de 2020, o Brasil conta com 83% de sua eletricidade sendo proveniente de fontes limpas e energia, conforme ilustra a Figura 8. Segundo a IEA, quase 90% da nova geração de eletricidade no mundo em 2020 teve como base fontes renováveis de energia, com um crescimento de 4% em relação à 2019, comprovando uma tendência global na utilização dessas fontes.

Figura 8 - Matriz Elétrica Brasileira em 2020.



Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2020).

Como define Cerqueira (2019), a instalação de aerogeradores e usinas solares também geram impactos ambientais, porém sua utilização em conjunto funciona de forma promissora.

Somando os potenciais hidrelétrico, eólico e fotovoltaico do Brasil ainda inexplorados, pode-se calcular um potencial de geração de cerca de 600 GW de energia elétrica somente com fontes renováveis e limpas. Isso representa seis vezes a capacidade de geração disponível atualmente. (VILLALVA, 2015).

2.2 ENERGIA EÓLICA

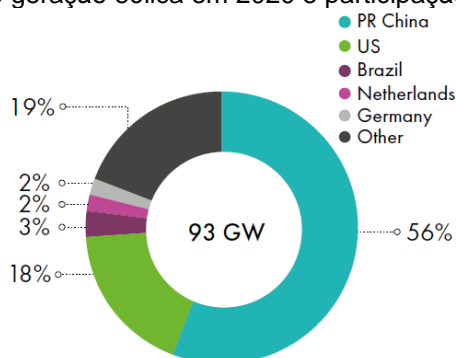
A energia eólica tem sua fonte na força dos ventos, sendo definida como uma energia de fonte renovável de caráter intermitente. O primeiro moinho de vento para fins de geração de eletricidade foi construído em 1887, pelo engenheiro electricista e professor James Blyth (1839-1906), em Glasgow na Escócia. Ao longo dos anos, diversos experimentos com aerogeradores foram realizados, incluindo o conceito de enormes usinas eólicas e diversos modelos de turbina.

Segundo Marten Dyrholm, presidente do Conselho Global de Energia Eólica (*Global Wind Energy Council*, 2021), a medida que a energia renovável cresce, a

energia eólica se tornará a espinha dorsal dos sistemas de energia em muitas partes do mundo.

De acordo com o GWEC, publicado em 2021, em 2020 as novas instalações de energia eólica chegaram a um valor de 90 GW neste ano, com um valor de 743 GW instalados no mundo inteiro, um crescimento de 14% em relação ao ano passado. Isto se deve ao contínuo crescimento nos maiores 5 mercados de energia Eólica, com a China em 1º lugar, sendo responsável por 56% desse crescimento, seguido dos Estados Unidos com 18%, Brasil com 3%, Países Baixos com 2%, Alemanha com 2% e os 19% restantes sendo divididos entre outros mercados, como demonstra a Figura 9.

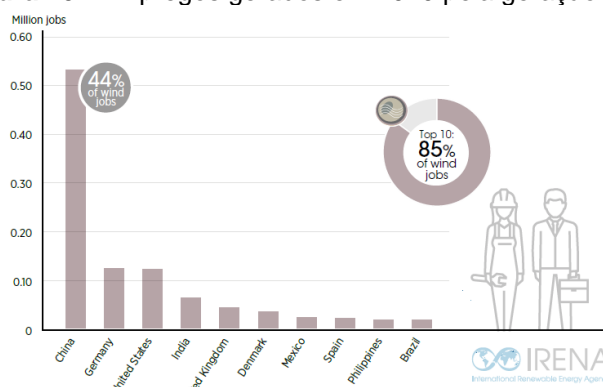
Figura 9 - Nova capacidade de geração eólica em 2020 e participação dos cinco principais mercados.



Fonte: Global Wind Energy Council, 2021.

Embora haja certa concentração de capacidade instalada em alguns países, a geração de empregos desse setor das energias renováveis é bem descentralizada, conforme demonstra a Figura 10.

Figura 10 - Empregos gerados em 2020 pela geração eólica.



Fonte: IRENA, 2021.

2.2.1 Energia Eólica no Brasil

A primeira instalação de um aerogerador ocorreu no arquipélago de Fernando de Noronha em 1992, fruto de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE). Porém, nos anos seguintes, este setor das energias renováveis pouco cresceu, devido à falta de políticas de incentivo e pelo alto custo da tecnologia, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2020).

Durante a crise energética de 2001, segundo a ABEEólica, ocorreu uma tentativa de incentivo a contratação de empreendimento de geração de energia eólica, com o objetivo de realizar uma complementaridade sazonal do regime dos ventos e os fluxos hidrológicos. Porém, não obtiveram sucesso. Em seguida, houve a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e, só em 2009 ocorreu o primeiro leilão de comercialização de energia voltado em exclusivo para a fonte eólica, denominado Leilão de Energia de Reserva (LER). O Leilão foi um sucesso, marcando o efetivo crescimento da energia eólica no país.

Segundo a ABEEólica, a energia eólica se tornou uma fonte de energia consolidada, chegando a se tornar a segunda principal fonte da matriz elétrica do país, com percentual de participação de 9%. Grande parte desse desenvolvimento se deve ao fato que o Brasil contém ventos bons ventos, conforme mostra a Figura 11 e com as três principais características para produzir energia eólica: ventos estáveis, com intensidade certa e sem mudanças bruscas de velocidade ou direção.

Figura 11 - Potencial Eólico Brasileiro.



Fonte: Atlas Eólico Brasileiro, 2001.

A boa qualidade dos ventos nacionais, atrelados aos incentivos neste setor, permitiram que o Brasil atingisse a marca de 17,75 GW de potência eólica instalada e 686 usinas espalhadas pelo país, de acordo com o Boletim Anual de Geração da ABEEólica. De acordo com um *ranking* mundial elaborado pela GWEC, o Brasil manteve a sétima posição de capacidade eólica acumulada, com uma potência de 17.750 MW. Em 2020 foram investido US\$ 4 bilhões, o que fomenta a geração de empregos e realiza uma manutenção no meio ambiente, deixando de emitir mais de 21,2 milhões de toneladas de CO2 apenas em 2020, segundo o Boletim anual de Geração.

De acordo com o BEN 2020, toda a energia produzida no país é consumida em solo nacional, com uma tendência de crescimento de geração, conforme apresenta a Figura 12.

Figura 12 - Geração e consumo de energia eólica no Brasil de 2010 – 2019.

FLUXO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	GWh
											FLOW
GERAÇÃO TOTAL ¹	2.177	2.705	5.050	6.578	12.210	21.626	33.489	42.373	48.475	55.986	TOTAL GENERATION ¹
CONSUMO TOTAL	2.177	2.705	5.050	6.578	12.210	21.626	33.489	42.373	48.475	55.986	TOTAL CONSUMPTION

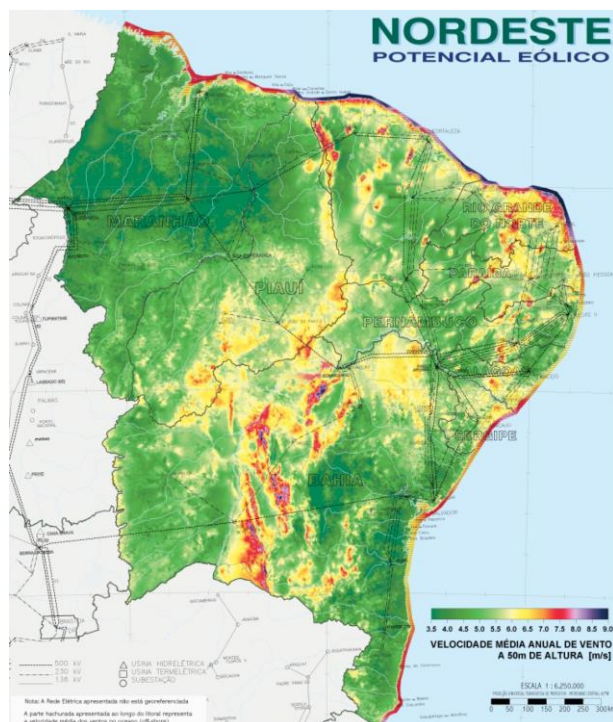
¹ Para estimar dados não informados, foi considerado o fator de capacidade médio do parque eólico nacional de 32,0% / ¹ In order to estimate the data not reported, it was considered 32.0% as the average capacity factor of the national windfarms.

Fonte: Balanço Energético Nacional, (BEN, 2020).

2.2.2 Energia Eólica no Ceará

O Nordeste figura como a principal região contribuidora para o cenário da energia eólica no País, representando 85,6% da geração eólica do país, com o Ceará figurando como terceiro estado de maior geração neste ano, gerando 5,95 TWh, segundo a ABEEólica, em 2020. Isso se deve, principalmente, ao potencial eólico da região, como mostra a Figura 13. O Ceará, por sua vez, figura como um dos estados pioneiros na geração de energia por meio da energia eólica, sendo o primeiro estado do Brasil a implantar usinas eólicas comerciais em 1998, por meio da 1ª Concorrência Nacional de Energias Renováveis, realizada pela COELCE.

Figura 13 - Potencial eólico do Nordeste.



Fonte: Atlas Eólico Brasileiro, 2001.

Em 2020, o Ceará surgiu como o 5º estado com maior geração média neste ano, como expresso na Figura 14.

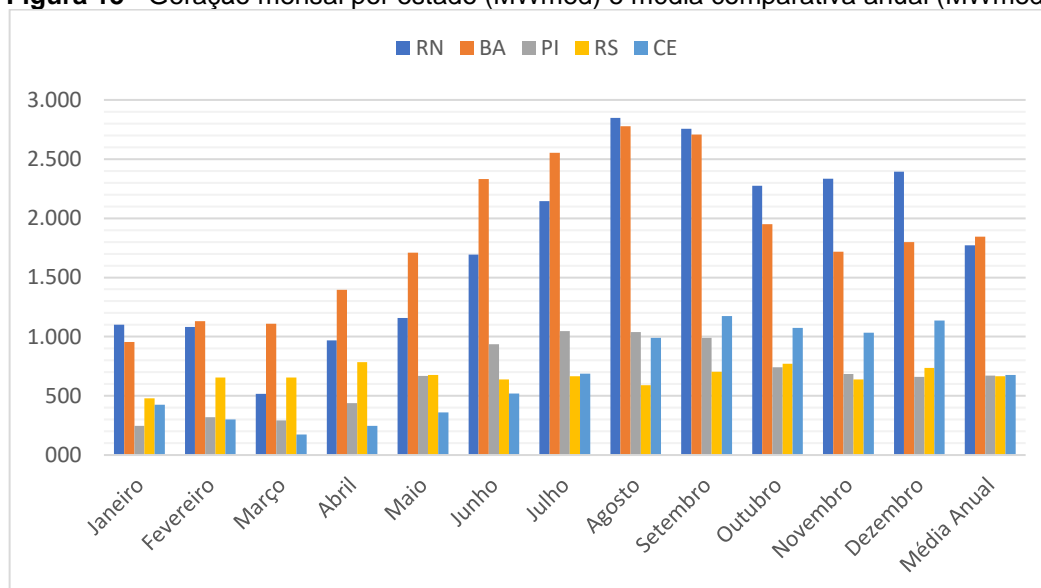
Figura 14 - Geração mensal por estado (MWmed).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
REGIÃO												
RN	1.099,8	1.083,1	516,5	969,3	1.159,0	1.693,5	2.145,7	2.847,2	2.756,1	2.273,8	2.333,5	2.394,2
BA	956,1	1.130,5	1.107,9	1.394,6	1.708,4	2.331,6	2.554,1	2.777,6	2.708,3	1.950,0	1.718,1	1.799,0
PI	247,8	318,7	292,2	439,6	669,4	935,6	1.046,1	1.039,2	991,4	741,6	684,1	660,8
RS	479,1	655,9	601,6	784,1	676,8	637,5	666,8	589,0	703,9	770,7	638,6	735,1
CE	424,2	299,9	173,9	245,2	359,2	518,3	688,3	990,8	1.172,9	1.074,9	1.033,7	1.135,9
PE	276,6	264,5	160,6	206,7	244,3	364,2	336,8	404,0	404,5	396,5	384,1	415,9
MA	120,3	93,5	48,8	62,5	80,1	114,7	152,7	191,5	303,6	299,9	281,7	306,4
PB	38,4	33,7	20,4	34,6	47,0	70,1	77,6	89,3	87,8	71,1	69,6	75,5
SC	41,2	48,7	41,0	53,9	74,0	91,8	65,9	66,4	76,2	67,9	46,3	51,8
SE	7,7	4,1	3,8	2,3	3,3	6,0	8,6	7,5	6,7	8,0	8,9	9,9
RJ	5,9	5,6	2,3	2,2	3,2	4,1	5,1	8,8	11,1	8,2	6,2	11,2
PR	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,6	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3

Fonte: CCEE/ABEEólica

Fonte: Boletim Anual de Geração (ABEEólica, 2020).

Ao se comparar a Figura 14 com a Figura 15, é possível perceber que embora os estados Piauí, Rio Grande do Sul e Ceará alternem em produção ao longo dos meses, suas médias anuais são bem próximas, com uma leve liderança do estado do Ceará. As maiores produções médias de energia eólica do Ceará se situam entre os meses de setembro e dezembro, o que configura a sua “Safr dos Ventos”.

Figura 15 - Geração mensal por estado (MWmed) e média comparativa anual (MWmed).

Fonte: Boletim Anual de Geração (ABEEólica, 2020).

2.2.3 Aerogerador

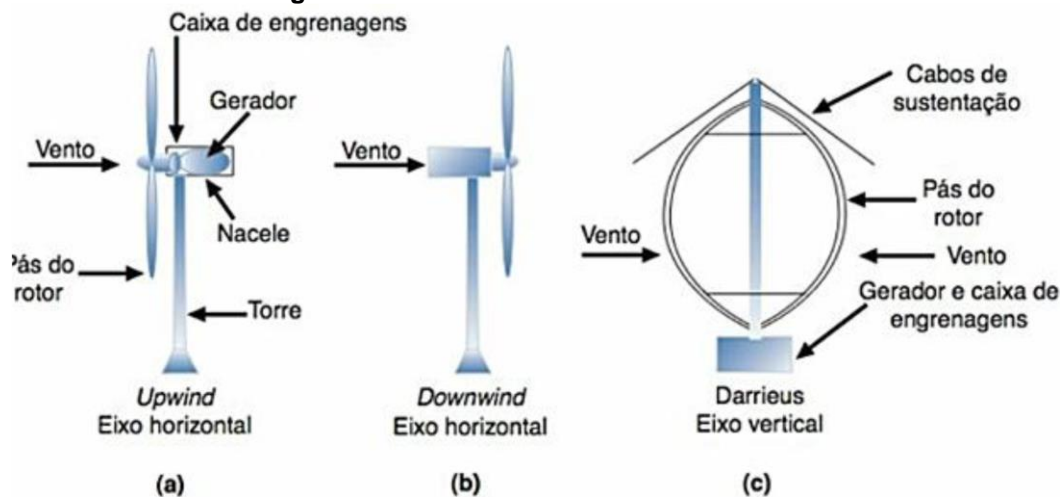
Aerogeradores, ou turbinas eólicas, são equipamentos que absorvem de forma parcial a energia cinética do vento, transformam-na em energia mecânica por meio de suas pás e em seguida a convertem em energia elétrica a partir de um gerador elétrico acoplado em sua estrutura. Parte do desenvolvimento dos aerogeradores deve-se a situação econômica mundial durante a década de 1970, quando ocorreu a crise no setor petrolífero devido às sucessivas altas no preço do combustível por meio da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), em 1973.

O governo americano, por sua vez, iniciou a pesquisa em aerogeradores de grande porte, por meio de uma cooperação entre a Agência Americana de Energia (DOE) e da NASA, como cita Cerqueira (2019).

De acordo com Pinto (2013), as turbinas eólicas podem ser classificadas em termos do eixo ao redor do qual as pás eólicas das turbinas giram: Sendo elas, as de eixo vertical e horizontal. As de eixo vertical, exemplificada na Figura 18, são as utilizadas em projetos mais antigos, dentre as suas vantagens está o fato de não precisarem de nenhum tipo de controle de ajuste para mantê-las na direção do vento, pois conseguem aproveitar o vento em qualquer direção, além da nacele poder ser instalada no solo, facilitando a manutenção. Porém este modelo não possui capacidade de partida própria, além de suas pás ficarem próximas ao solo, onde ocorre as velocidades mais baixas. As turbinas de eixo horizontal, conforme

exemplificada na Figuras 16(a) e 16(b), possuem vantagens como o acesso a ventos de velocidades maiores devido à altura da torre, melhor controle devido ao ângulo de passo e uma alta eficiência em relação as de eixo vertical. Porém, possui uma instalação complexa devido à altura da torre e a exigência de um sistema de controle.

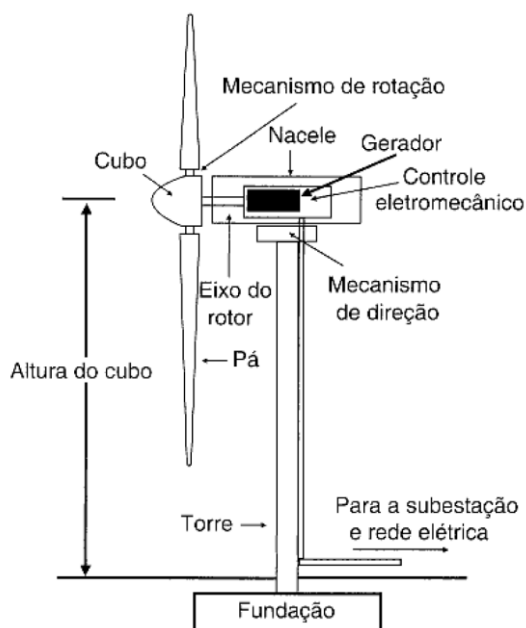
Figura 16 – Turbinas eólicas com eixo horizontal e vertical.



Fonte: Pinto, (2013)

Segundo Pinto (2013), os componentes básicos de um aerogerador consistem em uma torre, nacelle, caixa de engrenagem, cubo, gerador e pás, conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Principais partes de um aerogerador.



Fonte: Pinto, (2013).

A torre é a estrutura de sustentação. Existem dois tipos de torres, as tubulares cônicas e as treliçadas. O primeiro tipo pode ser construído em aço ou concreto, com um rolamento no topo, permitindo o movimento da nacela, visando um melhor alinhamento com o vento. O Segundo é mais utilizado para turbinas pequenas, segundo Pinto (2013), pois para torres altas, a estrutura se torna instável, em relação às torres Tubulares.

A nacela é a estrutura montada em cima da torre, onde está contido o gerador e a caixa de acoplamento. Dentro da nacela existe um sistema de direção que, por meio de um motor, é responsável por posicionar a turbina na direção do vento. Sob a nacela estão os equipamentos de medição de velocidade (anemômetro) e da direção (biruta) do vento, que enviam os dados adquiridos para o sistema de controle na base da torre.

A caixa de engrenagens está situada no dentro da nacela, com a função de realizar a sintonia correta entre a baixa velocidade da turbina e a alta velocidade do gerador. Alguns fabricantes incluem a caixa de transmissão, que consiste em um dispositivo multiplicador. Em geradores síncronos, este componente possui a função de ampliação.

O cubo é a estrutura onde são fixadas as pás, construída de aço ou liga metálica de alta resistência. A pá é estrutura movimentada pelo vento, construídas em fibra de vidro e reforçadas em epóxi e/ou madeira. Sua função é captar o vento e transformar sua potência ao centro do rotor, de acordo com SILVEIRA (2019).

O Gerador é a máquina responsável pela produção de energia elétrica. Existem dois modelos utilizados nos aerogeradores: máquinas síncronas e assíncronas. No acoplamento da turbina com o gerador existe uma caixa multiplicadora, a fim de alinhar a velocidade da turbina com o gerador. Existe toda uma lógica de eletrônica de potência no processo de conversão da frequência, já que é necessário controlar parâmetros de saída de onda, como frequência, amplitude e fator de potência. A fim de garantir que a energia entregue a rede esteja na mesma frequência dela, utiliza-se um retificador CA-CC e um inversor CC-CA, para eliminar a aleatoriedade da frequência de geração devido a variação da velocidade do vento ao longo do período de operação, de acordo com Pinto (2013).

2.3 ENERGIA SOLAR

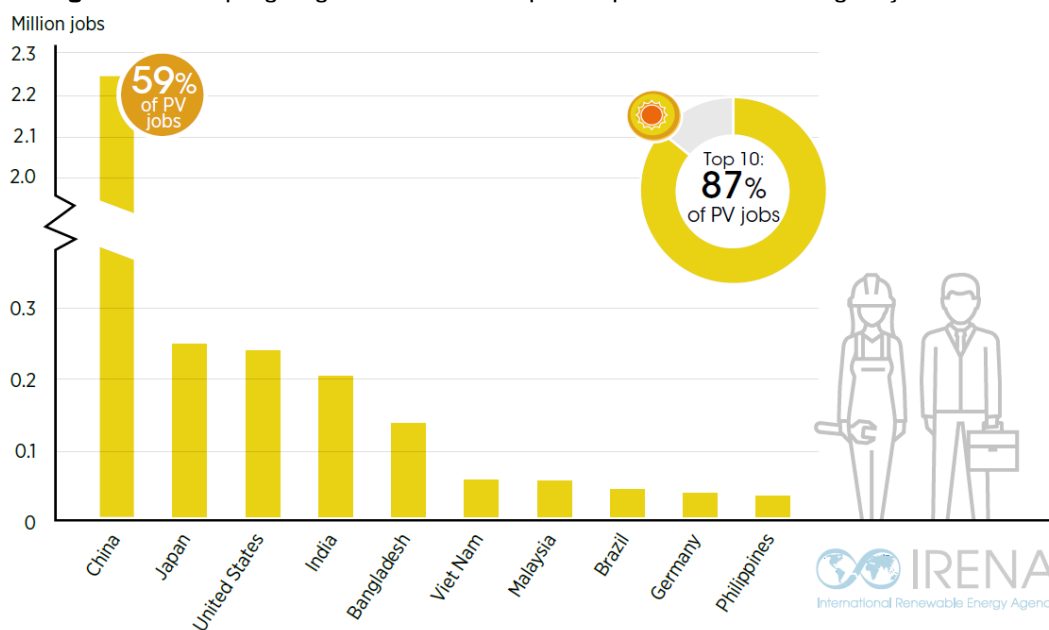
O sol fornece energia de maneira direta e indireta em todas as fontes de energia presentes no planeta. De acordo com Cerqueira (2019), a radiação solar pode ser utilizada de várias maneiras como fonte de energia, desde o emprego da energia térmica para aquecimento de fluidos até a conversão direta em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos, que é o foco do presente trabalho.

O conhecimento do efeito fotovoltaico data do século 19, em 1839, quando Becquerel demonstrou a possibilidade a radiação luminosa em energia elétrica utilizando a incidência da luz em um eletrodo mergulhado em uma solução de Eletrólito. Os estudos deste efeito progredem e em 1958 ocorre o uso das fotocélulas em programas espaciais. Em 1973 ocorre um grande impulso devido à crise mundial de energia, utilizando a geração fotovoltaica de forma terrestre e em seguida, no final da década de 70, o uso terrestre supera o espacial.

A atmosfera terrestre é exposta anualmente a $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, o que corresponde a 10 mil vezes o consumo mundial de energia em um ano. Isto comprova, de acordo com o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), que além de ser responsável pela vida na terra, a radiação solar se configura como uma fonte energética inesgotável, como um enorme potencial de utilização por meios de captação e conversão em outra forma de energia.

De acordo com Fadigas (2012), a energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Neste efeito, um material semicondutor onde uma de suas bandas de valência são totalmente preenchidas por elétrons e outra banda de condução está vazia e à baixas temperaturas, é atingido pela luz solar e um campo elétrico entre a junção das duas camadas inicia um fluxo de energia devido a liberação de elétrons, gerando a corrente contínua.

Segundo o IRENA 2020, até o final de 2020, mais 707 GW de sistemas solares fotovoltaicos foram instalados mundialmente. A Ásia tem contribuído com cerca de 60% dessas instalações no ano de 2020. Ainda de acordo com o IRENA, os principais mercados deste setor energético são China, Japão, Estados Unidos e Índia, também liderando o número de empregos gerados em 2020 devido a energia solar, como expressa a Figura 18, onde 83% dos empregos gerados estão na região asiática.

Figura 18 - Empregos gerados em 2020 por empreendimentos de geração solar FV.

Fonte: IRENA, 2020.

2.3.1 Energia Solar no Brasil

As primeiras utilizações da energia fotovoltaica no Brasil se restringiam a pequenos sistemas autônomos isolados, em regiões de difícil acesso na ausência de atendimento da rede. Segundo Cerqueira (2019), o obstáculo inicial enfrentado pela energia solar fotovoltaica no Brasil foi seu custo elevado em relação a energia hidrelétrica, que configura como fonte majoritária na matriz elétrica do país.

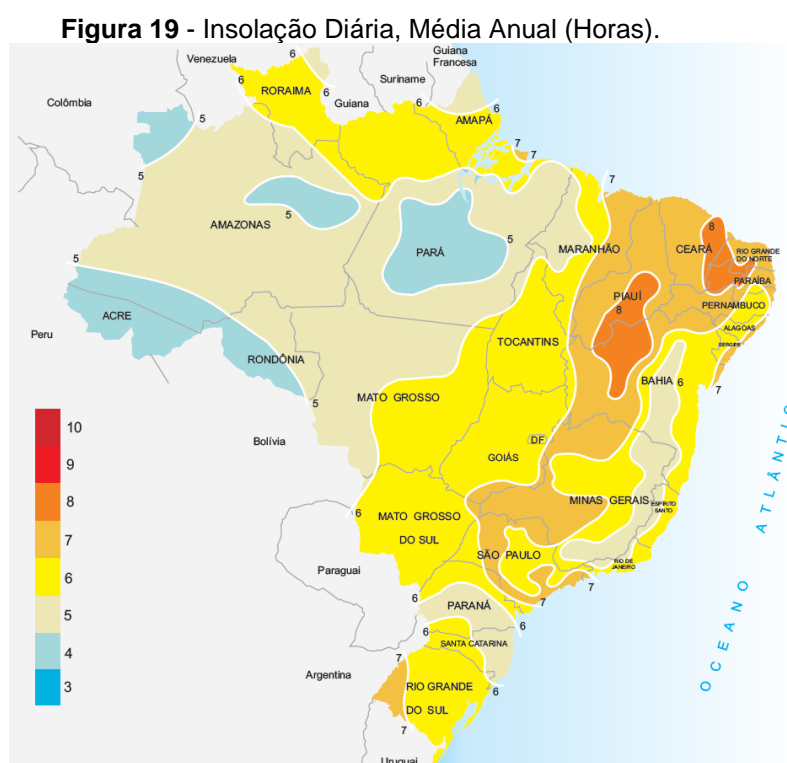
Segundo Cerqueira (2019), outra dificuldade contra o avanço do uso da tecnologia fotovoltaica para geração de energia elétrica no país foi a ausência de normas técnicas e regulamentações para o setor. Isto dificultava o surgimento de novas empresas e indústrias no mercado direcionadas para sistemas menores e geração distribuída.

A fim de solucionar esse problema, em 2012 a ANEEL publicou a Resolução Normativa da ANEEL nº482/2012, que por sua vez estimula o mercado e aumentou de forma significativa o número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

O setor da geração de energia elétrica solar no Brasil cresceu devido o incentivo por meio de normativas estabelecidas pela ANEEL, mas principalmente devido ao terreno propício para esse cenário. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Eólica (2017), o Brasil possui uma Irradiação Global Horizontal Média de 5133 Wh/m², que consiste na irradiância total do sol em uma superfície horizontal da terra. Em destaque

está a região nordeste com um valor de uma irradiação global horizontal média 5483 Wh/m².

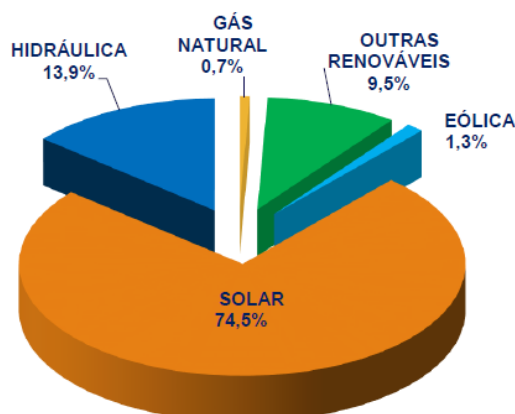
Conforme afirma Fadigas (2012), a produção de eletricidade por meio de um sistema fotovoltaico depende diretamente intensidade da radiação solar no local da instalação. De acordo com a Figura 19, é possível perceber o potencial de e aproveitamento da energia solar no Brasil, em especial na região nordeste, com maiores valores de insolação.



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil, 2020.

De acordo com BEN 2020, a energia solar representava 1% da matriz elétrica do país, porém dobrou a sua participação em relação ao ano anterior, principalmente devido ao incremento da geração solar fotovoltaica. O setor solar fotovoltaico gerou 6.655 GWh em 2019, atingiu uma capacidade instalada de 2.483 MW e figurou entre os 10 principais países na geração de empregos por meio da energia solar, de acordo com o IRENA de 2020. Além disso, a energia solar corresponde a 74,5% da geração distribuída em 2019, conforme expressa a Figura 20.

Figura 20 - Participação de cada fonte na geração distribuída em 2019.



Fonte: BEN, 2020.

2.3.2 Energia Solar no Ceará

O marco inicial da produção de energia solar em escala comercial no Brasil ocorreu no Ceará, em 2011, com a inauguração da Usina Solar de Tauá, com capacidade instalada de 1MW. De acordo com a Figura 19, o Ceará se encontra em uma região de privilégio em relação a insolação diária média anual. Isto justifica o estado como uma região com grande potencial de energia solar.

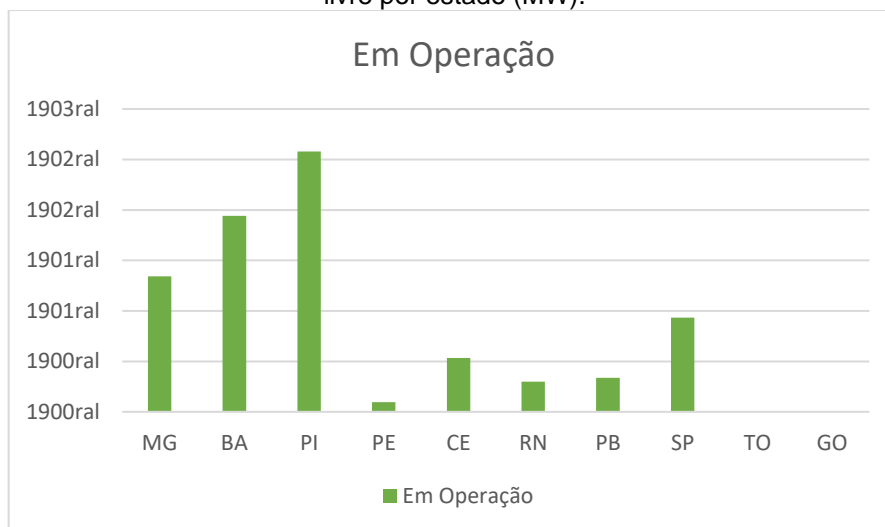
De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar (ABSolar), (2021), o Ceará figura como o 9º estado brasileiro no ranking estadual de geração distribuída, com 208,6 MW, representando 3,5%. Além disso, é o 5º estado no ranking de geração centralizada.

O cenário para geração de energia a partir da fonte solar no Ceará é propício, visto que todo o seu território está sob a incidência de uma Irradiação Global Horizontal Média que varia entre 1826 à 2557 kWh/m²/ano, de acordo com o Atlas Eólico Solar do Ceará, publicado em 2019. Segundo dados da ABSolar, o Ceará possui 13,6 Mil conexões de sistemas fotovoltaicos em 181 dos 184 municípios, o que representa 98% do seu território, que abastecem 17,4 mil consumidores.

Ao analisar as Figuras 21, 22 e 23, é possível observar que o Ceará seja o 5º estado em potência instalada de geração por meio de sistemas fotovoltaicos em operação, além de possuir uma projeção de crescimento neste cenário, pois figura como o 3º estado com maior quantidade de usinas em construção, na ordem de potência de 413 MW e como 5º em usinas com construção iniciada. Desta forma, segundo a ABSolar, o Ceará figura como 5º estado no ranking nacional de potência

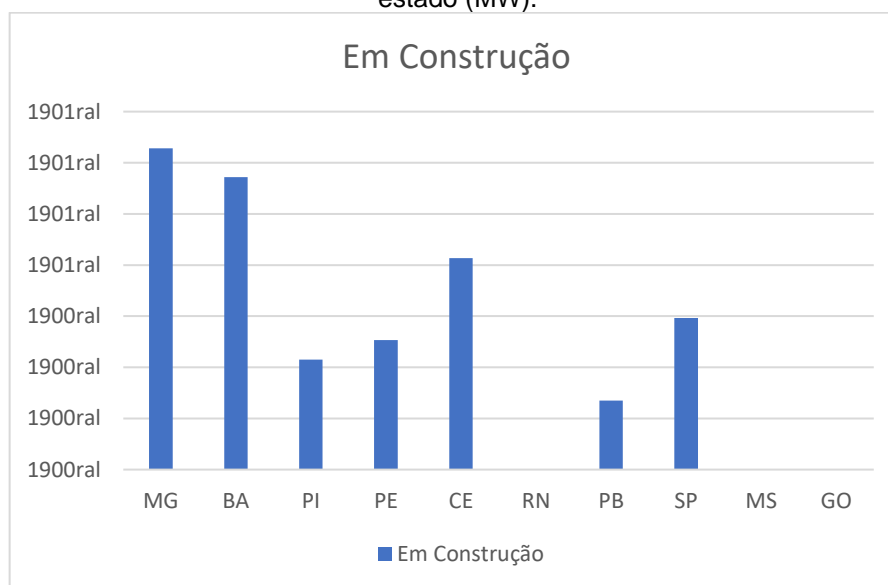
instalada outorgada, com uma potência de 2638,7 MW, ou seja 10,68% do montante total.

Figura 21 - Potência solar fotovoltaica instalada e em operação outorgadas no mercado regulado e livre por estado (MW).



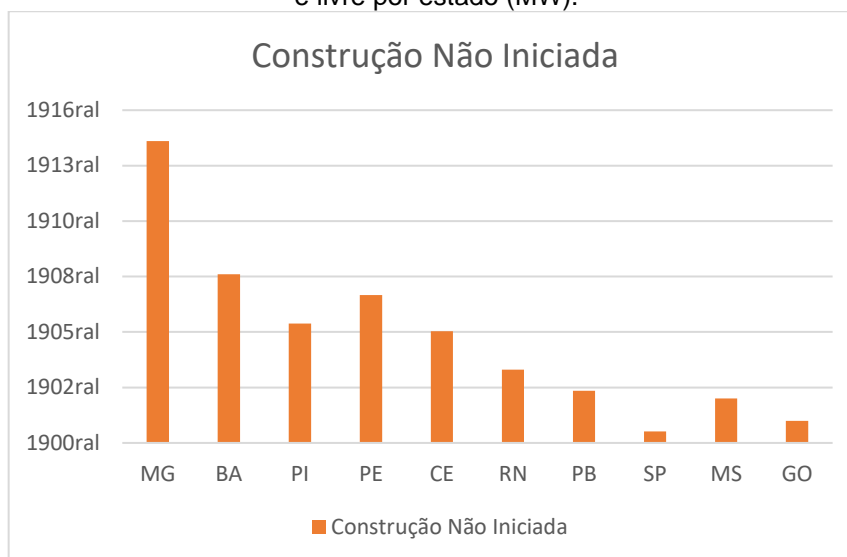
Fonte: ABSolar, 2021.

Figura 22 - Potência solar fotovoltaica em construção outorgadas no mercado regulado e livre por estado (MW).



Fonte: ABSolar, 2021.

Figura 23 - Potência solar fotovoltaica com construção não iniciada outorgadas no mercado regulado e livre por estado (MW).



Fonte: ABSolar, 2021.

2.3.3 Funcionamento de um Módulo Fotovoltaico

A possibilidade de conversão de radiação luminosa em energia elétrica foi descoberta por Becquerel, no século 19, em um experimento que envolvia a utilização da incidência de luz em um eletrodo imerso em uma solução de eletrólito. A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico, que se torna possível em escala comercial graças aos materiais classificados como semicondutores, que por sua vez permitem a separação de suas bandas de valência em uma ordem de eVs menores do que os isolantes, lhes conferindo características propícias para realização do efeito fotovoltaico. (Fadigas, 2012)

De acordo com Fadigas (2012), a propriedade fundamental das células fotovoltaicas é capacidade de fótons, na faixa do visível, com energia superior ao *gap* do material, excitarem elétrons na banda de condução. Este efeito também é observado em semicondutores puros, ou intrínsecos, porém apenas isto não garante o funcionamento de células fotovoltaicas, sendo necessário uma estrutura apropriada para a coleta dos elétrons excitados.

O semicondutor mais utilizado na confecção de células fotovoltaicas é o silício, por ser um material barato, abundante na natureza e não tóxico. Seus átomos possuem 4 elétrons de ligação, que se ligam com seus vizinhos formando uma rede

cristalina. A fim de garantir o efeito fotovoltaico, os fabricantes das células realizam o processo de dopagem, que garantem a estrutura apropriada. (FADIGAS, 2012)

Ao realizar a adição de átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, haverá um elétron em excesso, que por sua vez está fracamente ligado ao seu átomo de origem. Desta forma, o elétron livre se deslocará para a banda de condução com pouca energia térmica. Assim, o fósforo é um dopante doador de elétrons, ou seja, um *dopante n* ou *impureza n*.

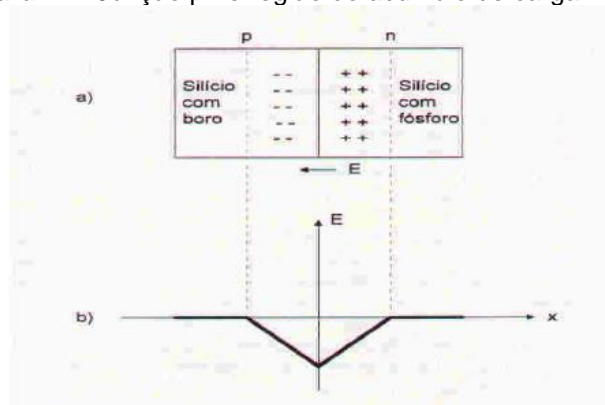
Ao realizar a adição de átomos com apenas três elétrons de ligação, como o boro, haverá a falta de um elétron para realizar as ligações com os átomos de silício da rede, essa falta é chamada de lacuna ou buraco. Desta forma, um elétron de um sítio vizinho pode assumir essa posição, movendo a lacuna. Assim, o boro é um dopante aceitador de elétrons, um *dopante p* ou *impureza p*.

O silício tem sua origem no quartzo, e as três principais células vendidas no mercado são as: Monocristalino (m-si), Policristalino (p-si) e Amorfo (a-si). O monocristalino (m-si), é a tecnologia mais utilizada em painéis fotovoltaicos. As células m-si são extraídas de um único cristal de silício ultrapuro e fundidas com o dopante do tipo p. Esses painéis, em geral, possuem uma eficiência mais elevada em relação as tecnologias comercializadas. Sua eficiência varia entre 14% e 21% com vida útil superior a 30 anos. A fabricação da tecnologia policristalina (p-si) é mais barata do que as das células monocristalinas, mas possuem uma eficiência menor, variando entre 13% e 16,5%. Estas células são obtidas a partir de um cristal de silício puro. O Processo de fabricação das células com silício amorfo (a-si) são baratas, simples e possuem baixo consumo de energia na produção, porém possuem baixa eficiência (8% a 10%) e alto grau de degradação. (PORTAL, 2017).

Partindo de um silício puro e adicionando átomos de Fósforo em uma banda de condução e átomos de boro na outra, será formada a junção *pn*. O que ocorre, neste caso, é que os elétrons livres do lado *n* passam para o lado *p*, onde encontram as lacunas que os capturam. Isto cria um acúmulo de elétrons do lado *p* o deixando negativamente carregador e uma redução de elétrons do lado *n* o deixando positivamente carregado. As cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta o trânsito de mais elétrons, que alcança seu equilíbrio ao

formar uma barreira capaz de barrar elétrons livres remanescentes do lado n , chamada de junção pn , conforme a Figura 24. (FADIGAS, 2012)

Figura 24 - Junção pn e região do acúmulo de carga.



Fonte: Fadigas, 2012.

Como cita Fadigas (2012), nesta situação de formação de uma junção pn , caso a mesma seja exposta a fótons com energia maior do que o *gap* do material, pares elétrons-lacuna serão gerados. Caso isto ocorra em uma região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando uma corrente através da junção, que dá origem a uma diferença de potencial chamada de Efeito Fotovoltaico.

De acordo com Cerqueira (2019), a junção de várias células fotovoltaicas conectadas eletricamente sobre uma estrutura rígida constitui uma placa ou módulo fotovoltaico. Módulos, por sua vez, quando em conjunto formam um conjunto fotovoltaico. Conjuntos fotovoltaicos podem ser conectados em série ou paralelo, a fim de atingir uma produção elétrica desejada.

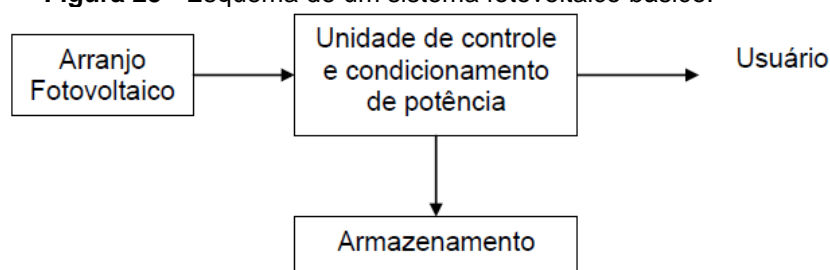
Módulos conectados em série são aplicados com mais frequência em sistemas conectados à rede *on grid*, por operar com tensões mais altas. Já os módulos conectados em paralelo são mais aplicados em sistemas não conectados à rede *off grid*. Ainda é possível realizar um aumento de potência no sistema conectados um conjunto de módulos em série, chamados de *strings*, paralelos entre si.

Segundo Fadigas (2012), os principais fatores que influenciam na operação de um módulo fotovoltaico são a intensidade da radiação solar e a temperatura de operação. A intensidade da radiação solar está relacionada de forma direta com a produção de potência, enquanto variação de temperatura influencia de forma negativa a produção de potência, uma vez que com o aumento da temperatura na célula, a

corrente de curto-circuito I_{cc} aumenta na proporção que a tensão de circuito aberto V_{ca} diminui, reduzindo a potência produzida pelo módulo.

Um sistema fotovoltaico consiste não apenas de um arranjo fotovoltaico, mas também de outros componentes que permitem realizar a entrega da energia elétrica gerada à carga, conforme exemplifica a Figura 25. O arranjo fotovoltaico trata-se da associação de módulos, conexões, diodos de proteção e estruturas de suporte, é onde ocorre a geração de energia propriamente dita. a unidade de controle e acionamento de potência, também conhecido como *Power Conditioning System* (PCS), coleta a energia fornecida pelos módulos em corrente contínua CC e a leva na forma CC ou em corrente alternada CA para a carga. O armazenamento, em geral, consiste em um banco de baterias capaz de armazenar a energia gerada ou o excedente não consumido, a fim de garantir o fornecimento contínuo de energia à carga em momentos de baixa geração, como nos períodos noturnos. Em sistemas *on grid* a potência gerada e condicionada é inserido diretamente na rede, a fim de se utilizar do sistema de compensação de créditos de geração, ignorando a necessidade de baterias. (FADIGAS, 2012).

Figura 25 - Esquema de um sistema fotovoltaico básico.



Fonte: Fadigas, 2012.

2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Sistemas Híbridos de Energia (SHEs) correspondem a combinação de diferentes fontes energéticas como: sol, vento, biomassa, microturbinas hidráulicas, com combustíveis fósseis a fim de gerar energia. O ponto chave para utilização deste método de geração é a redução na utilização de combustíveis fósseis para a geração, como o diesel, pois além dos danos causados ao meio ambiente pela utilização dessas fontes, o preço de produção de energia elétrica é mais custoso. Desta forma, fontes provenientes de combustíveis fósseis atuam como *backups* nesse tipo de sistema de geração. (SILVEIRA, 2013).

Esta configuração de geração reduz a dependência de energia elétrica proveniente da rede pública, o que propicia certa imunidade contra possíveis aumentos de tarifas. A aplicação desse sistema para consumidores distantes dos grandes centros urbanos e de atendimento custoso e demorado por parte das concessionárias pode apresentar grandes vantagens que, além da redução de gastos com a rede elétrica convencional, se apresentam em forma de compensação financeira por meio do sistema de créditos de geração distribuída, com base na Resolução Normativa da ANEEL nº482/2012 e em sua atualização publicada em 2016. Além disso, por se tratar de um conjunto com múltiplas fontes, a complementaridade pode solucionar a problemática das mudanças climáticas que podem causar variações na geração.

Segundo Silveira (2013), um sistema híbrido pode ser categorizado de três maneiras diferentes, a saber: Conectado à rede (*on grid*), fora da rede com sistema de distribuição (*off grid*) e fora da rede sem sistema de distribuição e com alimentação direta da carga (*off grid with direct supply*).

O sistema híbrido *on grid*, foco do presente trabalho, utiliza-se de uma conexão com a rede, onde a energia gerada pelo sistema é inserida na rede elétrica, permitindo aumentar a tensão na rede e, por meio da normativa nº 482/2012 da ANEEL, reduzir os gastos com conta de energia. De acordo com Lopez (2012), sistemas interligados à rede acabam por configurar como uma pequena usina de geração ligada à rede elétrica, devido ao redirecionamento da energia excedente produzida pelo consumidor, podendo atender outros consumidores, e gerar créditos para o consumidor gerador.

“Uma micro-rede ou mini-rede é um sistema que gera energia elétrica e possivelmente calor para servir a uma carga próxima e sua característica principal é a dedicação a essa carga particular.” (SILVEIRA, 20123). No Brasil, a micro-rede, também conhecida como microgeração correspondem a uma geração com potência instalada menor ou igual a 100 kW, já a mini-rede, também conhecida como minigeração correspondem a uma geração superior a 100 kW e inferior a 1MW, definidos pela resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL.

Com base no BEN de 2020, que toma por base o ano de 2019, enfatiza que a micro e mini geração apresentaram um crescimento, principalmente devido ao

incentivo por meio de ações regulatórias, em especial a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte (*net metering*). Segundo a mesma publicação, em 2019 a micro e mini geração distribuída atingiram 2.226 GWh, com uma potência instalada de 2.162 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 1.659GWh de geração e 1.992 MW de potência instalada.

2.4.1 Inversores

De acordo com Fadigas (2012), os inversores consistem em um componente responsável pela conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), também conhecidos como conversor CC-CA. O sistema eletrônico deste componente possui elevado grau de sofisticação, pois necessita que a corrente injetada pelo mesmo na rede tenha o formato senoidal e esteja sincronizada com a tensão senoidal da rede. Além disso, quando ocorre uma queda de energia da concessionária, o inversor é desligado, a fim de garantir a segurança dos equipamentos e pessoas.

Existem dois tipos de inversores. Os Inversores auto-comutados e os comutados pela rede. Os inversores auto-comutados podem operar conectados à rede ou alimentando cargas isoladas, tem um melhor fator de potência e produz uma quantidade menor de harmônicas, embora possua um projeto mais complexo. Já o Inversor comutado pela rede possui um projeto mais simples, porém, depende da existência da rede e requer correção no fator de potência, que caso exceda ao valor permitido, pode gerar multas por parte da concessionária, além de necessitar da correção dos harmônicos. (SILVEIRA, 2013)

Outro ponto interessante refere-se ao *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), que se trata de um recurso que visa garantir a maior eficiência possível por parte dos módulos, certificando-se de que trabalhem em sua máxima potência, independente das condições de operação. Isto se torna necessário devido às variações instantâneas de temperatura e radiação solar. O MPPT atua na geração intencional de pequenas perturbações na tensão de saída, aumentando a potência gerada. (CERQUEIRA, 2019).

2.5 LEGISLAÇÃO

2.5.1 Resolução Normativa 482/2012

O presente trabalho, bem como muitos projetos desenvolvidos no âmbito da geração distribuída, tem como base a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, como já citado anteriormente. Isso se deriva do fato desta normativa, bem como sua atualização publicada em 2016 regulamentarem os mecanismos de geração de energia elétrica e compensação em créditos por parte da concessionária, que são um dos principais motivos para a expansão da geração distribuída no Brasil.

Em 17 de abril de 2012, a ANEEL, por meio da Resolução Normativa 482/2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, com foco no sistema de compensação de geração em créditos, além de outras providências. A Resolução normativa teve como contribuições a Consulta Pública nº 15/2010 e a Audiência Pública nº 42/2011.

No capítulo 1 da normativa, onde se trata das disposições preliminares, no Art, 2º, se definem os conceitos de microgeração, minigeração e sistema de compensação, nos incisos I, II e III, respectivamente.

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;

De acordo com o Capítulo III, que trata do sistema de compensação de energia elétrica, entende-se que o sistema de compensação objetiva trocar a energia sobressalente gerada a partir de créditos em kWh, que podem ser utilizados quando a geração não se mostrar suficiente para suprir a demanda. De acordo com Art. 6º, § 1º do mesmo capítulo, o crédito gerado pode ser utilizado durante um prazo de 60 (Sessenta), meses.

Segundo a resolução normativa de nº 687/2015, que atua juntamente com a normativa 482/2012, houve a inclusão de modalidades de geração que são permitidas a participar do sistema de compensação. De acordo com o inciso VII do Art. 2º da normativa de nº 687/2015, a modalidade geração compartilhada foi incluída, o que se aplica ao projeto a ser realizado no presente trabalho. A saber:

VII – geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

Além dos pontos citados, cabe às distribuidoras de energia a revisão das normas técnicas, tomando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que consiste em diversos documentos elaborados pela ANEEL a fim de normatizar de forma padronizada as atividades técnicas ligadas ao funcionamento dos sistemas de distribuição elétrica. Além disso, as distribuidoras de energia devem se basear por normas técnicas brasileiras e as normas internacionais de forma complementar.

2.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Há certo tempo, os sistemas de suprimento de energia elétrica com geração descentralizada por meio de fontes renováveis, têm sido utilizados por comunidades mais isoladas. Vários tipos desses sistemas têm sido estudados, mostrando-se viáveis economicamente e tecnicamente factíveis. (PALZ, 1981; ROSSI et al., 2005). A fim de averiguar as vantagens econômicas da implantação de métodos de geração de

energia elétrica descentralizados, é de suma importância a utilização de métodos de avaliação que objetivam precisar a viabilidade econômica do projeto.

Neste estudo, serão utilizados métodos de análises de investimentos a fim de avaliar a atratividade econômica do projeto a ser implantado na comunidade. Para tal, os métodos utilizados são: Valor presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* Descontado e *Payback* Simples.

O Método VPL consiste em uma técnica sofisticada para análises de investimentos, onde se calcula em termos de valor presente, o impacto dos eventos futuros ligados a uma alternativa de investimento. De outro modo, este método analisa o valor presente dos fluxos de caixas gerados pelo projeto ao longo de sua vida. Por não exigir a restrição de capital, argumenta-se que esse critério leva à escolha ótima. (SAMANEZ, 2007.)

O VPL calcula-se a partir da equação (2.1):

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^T \left(\frac{FCt}{(1+K)^t} \right) \quad (2.1)$$

Tal que:

- I = Investimento Inicial;
- FCt = Fluxo de caixa no t-ésimo período;
- K = Custo de Capital ou Custo de Oportunidade.

O VPL Indica o lucro em reais que o projeto trará, ou seja, quanto maior o VPL, mais lucrativo será o projeto. O valor presente é obtido ao descontar-se o fluxo de caixa a uma taxa de retorno mínima (K), que se espera obter com o projeto, de forma que todos os valores serão trazidos para o período inicial, a um valor presente líquido, conforme expressa Veras, (2017). A taxa de retorno mínima (K), também é conhecida como taxa mínima de atratividade (TMA), que é definida pelo investidor. Considerando este método, o investimento no projeto só será viável de o VPL for positivo.

Outro método comum neste tipo de análise é o TIR (Taxa Interna de Retorno). Ele não realiza a avaliação da rentabilidade absoluta a determinado custo do capital. Na verdade, por definição, a TIR é a taxa de retorno do investimento, ou seja, define o lucro do projeto. Ela é uma taxa hipotética que anula o VPL, ou seja, é o valor de i que satisfaz a equação (2.2) (SAMANEZ, 2007.):

$$VPL = -I + \sum_{T=1}^T \left(\frac{FCt}{(1+i)^t} \right) = 0 \quad (2.2)$$

Desta forma, o projeto se considera viável quando o valor da TIR for maior que a TMA.

O método do *Payback* Descontado trata-se do prazo de recuperação do investimento, ou seja, quanto tempo se decorrerá até que o valor presente dos fluxos de caixa previsto se iguale ao investimento inicial, levando em consideração o valor do dinheiro com o tempo. Este método é o mais utilizado em análises econômicas com o objetivo de determinar o valor de (T) na equação (2.3) (SAMANEZ, 2007.):

$$I = \sum_{T=1}^T \left(\frac{FCt}{(1+K)^t} \right) \quad (2.3)$$

O método do *Payback* Simples é uma técnica simples para análises de viabilidade econômica de um investimento. Seu método consiste em somar os fluxos de caixa de um período especificado do projeto até a soma se iguale ao valor do investimento inicial, que por sua vez expressa o tempo de retorno do projeto. Por sua simplicidade, este método não é muito utilizado pois não considera a taxa de juros para a correção do dinheiro no tempo, sendo mais confiável utilizar o método do *Payback* Descontado. (SAMANEZ, 2007.)

2.7 SOFTWARES DE DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO

No mercado há uma grande variedade de *Softwares* de dimensionamento e simulação de energias renováveis que utilizam diferentes metodologias. Tais programas são de grande importância em análises de viabilidade de projetos, pois automatizam o processo de cálculo, tornando-os mais precisos, auxiliam no processo de análise, modelagem e tomada de decisão considerando determinados tipos de sistema e configurações. A maior parte dos programas possui uma base de dados de radiação solar, temperatura ambiente e velocidades do vento, além de poderem baixar dados meteorológicos a partir de sua interface de diferentes bancos de dados disponíveis.

No presente estudo, a ferramenta utilizada para análises foi o *software* HOMER. Porém, a sua utilização não torna indispensável os conhecimentos do projetista, visto que o processamento dos dados a serem inseridos, bem como análises mais específicas ainda são requeridas.

2.7.1 HOMER

O *Software* HOMER (*Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resource*), desenvolvido originalmente pela National Renewable Energy Laboratory (NREL), é o *Software* padrão global para otimização de projetos de microrredes, desde pequenas ilhas e vilas isoladas até grandes conglomerados conectados à rede. (DESHMUKH et al. 2018; CERQUEIRA, 2019). O programa sempre busca simular um sistema viável com base nas variáveis inseridas, com todas as combinações possíveis do equipamento considerado.

Segundo Milano (2017), o *Software* realiza três tarefas principais, que consistem em simular, otimizar e realizar uma análise de sensibilidade. De acordo com Cerqueira (2019), o HOMER é capaz de simular a operação de um sistema híbrido de energia considerando o balanço energético calculado para o período de um ano, de hora em hora. A partir disso ele compara a demanda de energia que o sistema simulado é capaz de atender a partir de cada elemento do conjunto.

HOMER é uma ferramenta computacional que considera como variáveis de entrada os recursos necessários para a geração de energia, além de variáveis como matéria prima, preço de equipamentos, manutenções futuras, velocidade dos ventos, irradiação solar, preço da biomassa utilizada, preço do combustível, demanda de carga do projeto e tarifa da concessionária. (CARVALHO, 2016). A partir disso, é possível o projetista definir e simular tipos de configurações em percentual de participação de cada fonte que mais se adequa às condições do projeto.

3 METODOLOGIA

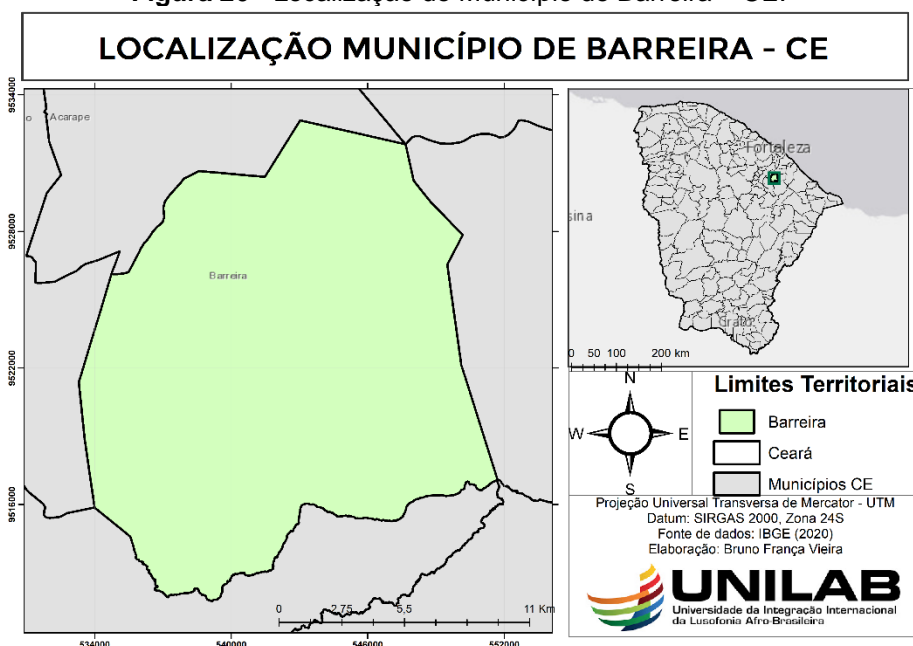
Ao realizar o projeto de viabilidade econômica de um sistema híbrido Solar-Eólico, diversos processos e etapas foram realizadas. Nos tópicos a seguir, serão descritos em detalhes os estágios necessários para que houvesse o cumprimento do projeto.

3.1 SELEÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A escolha da localidade ideal para a elaboração do projeto considerou dados climáticos regionais, como: Irradiação solar, Incidência do vento, temperatura e característica do solo. O projeto visa a mitigação de custos com eletricidade de famílias que, em sua maioria, são baixa renda e trabalham de forma informal.

Após analisar os critérios supracitados, o local escolhido foi a comunidade de Carnaúba, localizado no município de Barreira – CE, situado no maciço de Baturité, como mostra a Figura 26. Com seus primeiros habitantes assentados no ano de 1840, a comunidade Carnaúba esteve vinculada à Barreira, que por sua vez era um distrito de Redenção-CE, recebendo a primeira linha de rede elétrica em 1974, na parte central da comunidade. Com a Emancipação de Barreira em 1987, Carnaúba passou a ser considerada uma comunidade deste novo município, fundada como tal durante o Governo José Sarney (1985-1990).

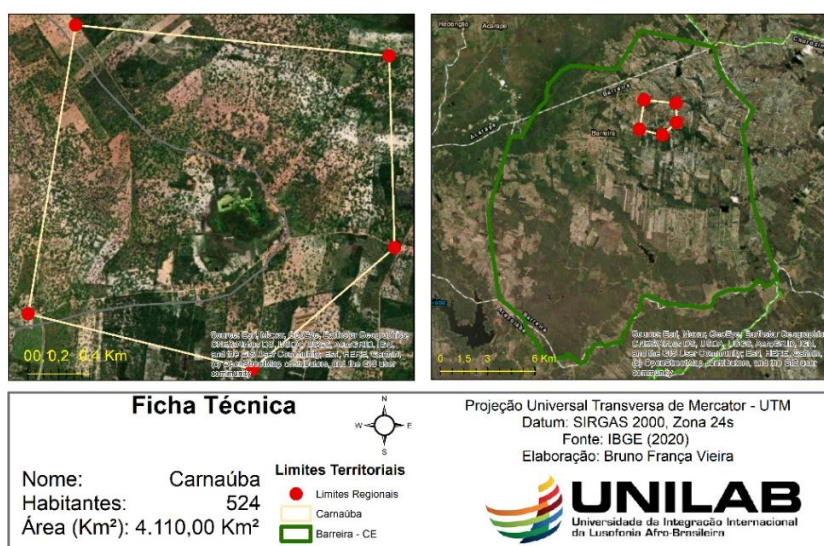
Figura 26 - Localização do Município de Barreira – CE.



Fonte: IBGE, 2020.

A comunidade mostrada na Figura 27 é formada, em sua maioria por famílias que tiram o sustento por meio de trabalhos autônomos e informais, como o setor têxtil terceirizado regional, agricultura e pecuária, além do mercado terceirizado de corte e comércio de castanha.

Figura 27 - Localização da Comunidade de Carnaúba.



Fonte: IBGE (2020).

Por se tratar de uma comunidade distante do centro urbano do município, além da ausência de dados catalogados pelo próprio município, o presente trabalho utilizou dados fornecidos em entrevista, pela Assistente Social responsável pela região: Fátima Abreu, que forneceu dados de limites territoriais, número de famílias e habitantes. Os dados fornecidos estão expressos a seguir:

Tabela 1 - Entrevista Realizada com a Assistente Social.

Perguntas Realizadas	Dados Fornecidos
Quantas famílias residem na comunidade?	<i>“Atualmente, residem na comunidade 178 famílias.”</i>
Qual o número de habitantes da comunidade?	<i>“Com uma média de 3 membros em cada família, a comunidade conta com 524 habitantes.”</i>
Quais comunidades fazem fronteira territorial com a comunidade de Carnaúba?	<i>“A nossa comunidade realiza fronteira com as comunidades de: Caiana,</i>

	<i>Olaria I, Batalha, Pascoalzinho e Córrego.”</i>
Existem áreas comunitárias na comunidade?	<i>“Sim, existem duas. Elas são a igreja e a escola de ensino fundamental Manuel Moreira.”</i>

Fonte: Entrevista com a Assistente Social da Comunidade, 2021.

Com base nas informações coletadas na entrevista e por meio de ferramentas como o Google Earth e o Software ArcGIS desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), foram traçados os pontos fronteiriços e a partir daí, utilizando *rasters* de malhas territoriais fornecidos pelo IBGE de 2020, foram traçados os polígonos que representam as áreas da Cidade de Barreira – CE da comunidade de Carnaúba, conforme as Figuras 26 e 27, com áreas de 260.003 Km² e 4.110 Km², respectivamente.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

3.2.2 Consumo Mensal

A fim de mensurar o consumo anual médio de uma família residente da comunidade de Carnaúba, bem como o consumo médio mensal e anual da comunidade, foi realizada uma pesquisa quantitativa com os moradores e responsáveis por unidades consumidoras do local, onde foram coletados dados de contas de energia em um período de um ano (junho/20 até junho/21) de todas as unidades consumidoras do local.

Para Sampaio (2016), ao realizar o dimensionamento de uma carga com múltiplas unidades consumidoras, é eficiente realizar um dimensionamento a partir do consumo mensal das edificações por meio de faturas de energia, que trazem o histórico de consumo dos últimos 12 meses.

A partir desse levantamento e do número de famílias que residem no local, elaborou-se uma base de dados com informações acerca do consumo de cada unidade consumidora, em seguida, o gráfico da Figura 28 foi elaborado, mostrando o consumo médio de uma família residente do local em cada mês e a Figura 29, representando o consumo médio da comunidade objeto de estudo. De acordo com o gráfico, embora

não haja um pico real de consumo em um mês específico, observa-se que os períodos de maiores consumos estão mais concentrados em meses próximos ao final do ano, período com maior escassez de chuva e maiores temperaturas.

Figura 28 - Consumo médio mensal de uma unidade consumidora residente em Carnaúba.

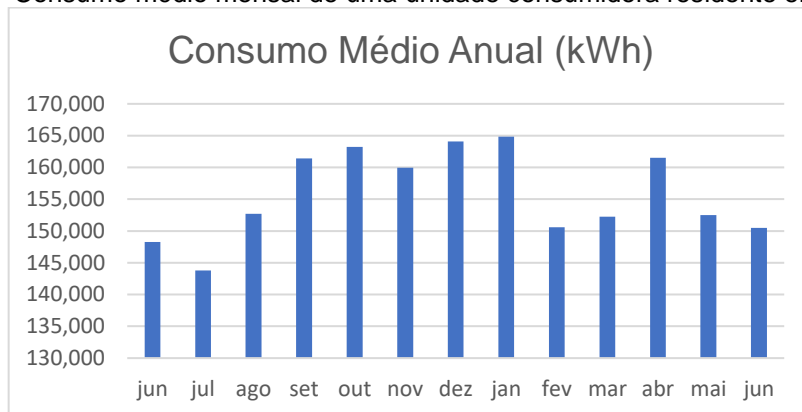
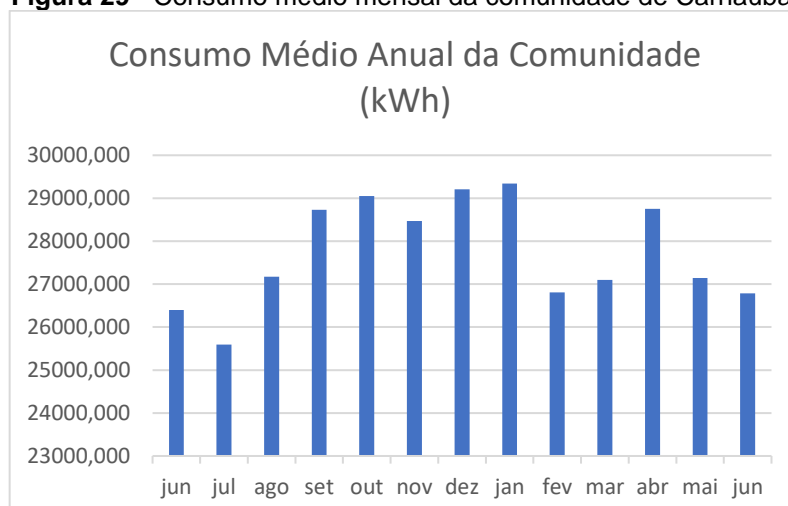
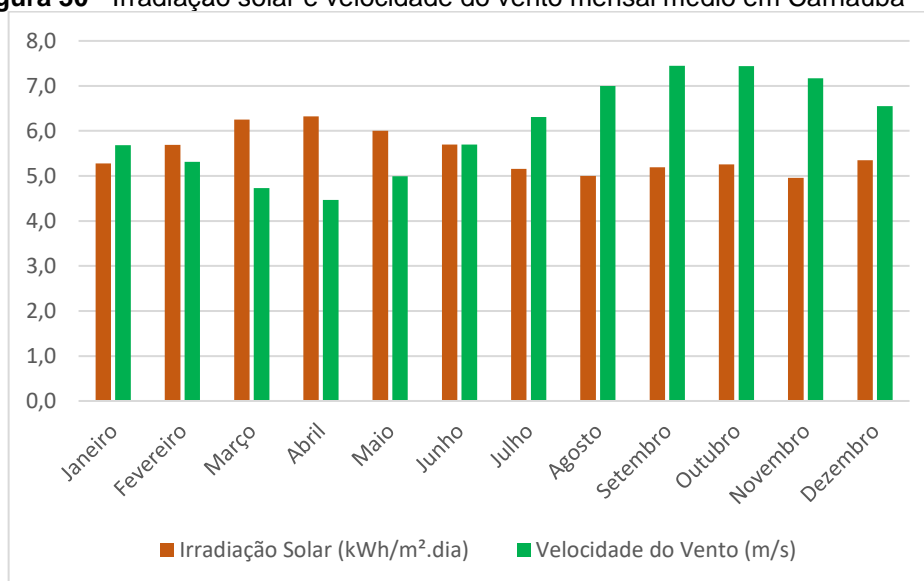


Figura 29 - Consumo médio mensal da comunidade de Carnaúba.



3.2.3 Dados Climáticos

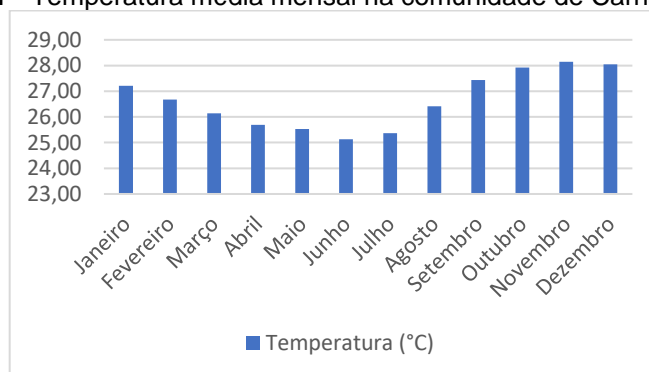
O Programa utilizado no presente trabalho para realizar as simulações e processos de otimização, HOMER Pro, possui a capacidade de acessar e utilizar dados climáticos de grande parte do globo por meio de bibliotecas e bancos de dados que são liberados por diversas entidades responsáveis por aferir esses dados, dentre elas, a NASA. A Figura 30 apresenta dados de velocidade do vento fornecidos pelo programa tomando por base os dados disponibilizados pela NASA, além dos valores de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB. Esses dados, por sua vez, serão utilizados como a base de informação a cerca dessas grandezas, que irão pautar as simulações e otimizações do sistema.

Figura 30 - Irradiação solar e velocidade do vento mensal médio em Carnaúba – CE.

Fonte: NASA Surface meteorology and solar energy database, 2021; CRESESB, 2021.

De acordo com os dados de meteorologia de superfície e energia solar e disponibilizados, acessados em 21/07/2021, a média anual de irradiação solar na comunidade Carnaúba é de 5,51 kWh/m².dia, a velocidade média do vento no mesmo local é de 6,07 m/s. Além disso, a fim de verificar um parâmetro relevante para a eficiência de células fotovoltaicas, foram aferidos dados de temperatura, expressos na Figura 31, com um médio anual de temperatura de 26,64°.

O banco de dados utilizado como base fornece dados de irradiação solar com base em uma série histórica registrada em um período de 22 anos, um valor de velocidade do vento em um período de 30 anos, e um valor médio de temperatura com base em uma série histórica de 30 anos.

Figura 31 - Temperatura média mensal na comunidade de Carnaúba – CE.

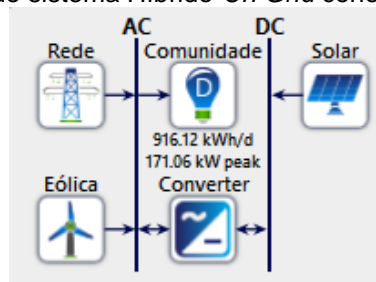
Fonte: NASA Surface meteorology and solar energy database, 2021.

3.3 DESIGN DO SISTEMA

A partir do *Software* HOMER, de início é selecionado o local onde o empreendimento será simulado. Para tal, a comunidade de Carnaúba, situada no município de Barreira foi selecionada. Seguindo a lógica do programa, com base na localização, dados climáticos relevantes são obtidos. Para o presente projeto, optou-se por utilizar dados de irradiação solar disponibilizados pelo CRESESB.

Em seguida, o programa solicita que sejam inseridos os dados referentes à carga elétrica. Ou seja, um consumo médio em kWh/dia, definido a partir do levantamento de carga. Neste caso, optou-se por seguir pela opção de Carga Deferível (*Defferable Load*), que permite que os dados inseridos sejam mensais. Além disso o *software* solicita as fontes de energia que serão utilizadas na simulação, neste caso a solar e eólica, bem como inversor necessário para o sistema e por fim, a conexão com a rede de fornecimento de energia, por se tratar de um sistema híbrido *on grid*. O Esquema final do sistema é demonstrando na Figura 32.

Figura 32 - Esquema do sistema Híbrido *On Grid* conectado à rede em estudo.



Fonte: HOMER Pro, 2021.

O *Software* fornece em seu banco de dados, diversos modelos de aparelhos reais presentes no mercado com seus respectivos dados, sendo possível realizar diferentes testes para arranjos diferentes. Além disso, o programa fornece a opção de modelos genéricos com dados próximos do real, com diferentes potências para realizar as simulações, permitindo verificar a potência total de cada subsistema e qual seria a ideal para compor um conjunto mais eficiente.

3.2.1 Escolha do Subsistema Eólico

Para o presente trabalho, a escolha dos modelos de aerogeradores foi limitada pelo custo elevado dos equipamentos, bem como a dificuldade de sua instalação e manutenção. Além disso, optou-se por modelos com altura de torre dentro dos parâmetros de medição da velocidade do vento, visando uma precisão maior nos

dados obtidos, bem como o menor impacto de danos visuais e auditivos nas proximidades da instalação.

Após uma pesquisa realizada em *websites* especializados, neste caso, o *site* que apresentou o melhor valor, foi o *Watt – U – Need*, especialista em vendas de equipamentos para sistemas eólicos e solares. Considerando as limitações de altura, e o menor impacto visual e auditivo, o aerogerador escolhido foi o Bergey Excel 10, da empresa Bergey WindPower. Além das limitações definidas, outros modelos que se encaixavam nos parâmetros de altura, geravam uma potência menor ou um valor unitário maior do que o modelo escolhido. Segundo a empresa, em informação disponível no *datasheet* do equipamento, o modelo Excel 10 é ideal para sistema de geração em casas, fazendas e pequenos empreendimentos, devido ao seu grande rotor, preço e baixa velocidade de partida, ele garante um rápido retorno de investimento. As informações básicas contidas no seu *datasheet* estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do aerogerador Bergey Excel 10.

Parâmetros do Equipamento	Valores
Potência Nominal/ Potência de Pico	10kW / 12kW
Velocidade de Vento de Partida	2,5 m/s
Diâmetro do Rotor	7m
Custo Inicial	\$70.281,23
Custo de Troca	\$70.281,23
Custo de Manutenção por Ano	\$702,81
Potência considerada na Simulação	10kW
Vida útil	20 Anos

Fonte: Berguey, 2021.

Para o cálculo de potência gerada a partir do aerogerador, em uma análise simplificada, o programa considera a equação (3.1).

$$PWT = \frac{1}{2} C_p \eta A R v^3 \quad (3.1)$$

Onde:

- CP : coeficiente de performance (%);
- η : eficiência do conjunto gerador-transmissão (%);
- ρ : densidade do ar (kg/m^3);
- AR : área do rotor da turbina (m^2);
- v : velocidade do vento (m/s)

3.3.2 Escolha do Subsistema Fotovoltaico e Inversor

Para o dimensionamento da produção de energia do sistema fotovoltaico é possível ignorar os efeitos de variação da irradiação a cada instante de tempo, sendo necessário apenas considerar uma totalidade de energia elétrica convertida em intervalos de horário. Desta forma, é possível expressar um valor acumulado de energia solar ao longo de um dia, ou seja, Horas de Sol Pleno (HSP). (VERAS, 2017).

HSP é uma grandeza que representa o número de horas equivalentes por dia em que radiação solar permanece constante e igual a 1 kW/m^2 , de forma que a energia resultante seja igual à energia disponibilizada pelo sol, acumulada ao longo do dia (GTES, 2014; VERAS, 2017). Dito isto, com base da irradiação incidente obtida através do *software*, torna-se possível determinar as horas de som pleno diária equivalente à média da irradiação diária, a partir da equação (3.2)

$$HSP = \frac{5,51 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot \text{dia} \right]}{1 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]} \quad (3.2)$$

$$HSP = 5,51 \left[\frac{h}{\text{dia}} \right]$$

De acordo com a Figura 35, com dados disponibilizados pelo CRECESB, tem-se uma irradiação média anual, no posto de coleta de dados mais próximo do local de estudo, situado em Barreira - CE. A média de irradiação é muito próxima aos valores utilizados pelo *software* HOMER. Além disso, a Figura 33 indica um ângulo de inclinação para a instalação dos painéis solares, bem como sua orientação, neste caso, um ângulo de 4° norte.

Figura 33 - Irradiação Solar Média Mensal em $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$.

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,36	5,41	5,31	4,84	5,05	4,90	5,30	5,97	6,29	6,21	6,10	5,58	5,53	1,45
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	4° N	5,23	5,34	5,30	4,90	5,18	5,07	5,47	6,10	6,32	6,14	5,95	5,43	5,54	1,41
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	4° N	5,23	5,34	5,30	4,90	5,18	5,07	5,47	6,10	6,32	6,14	5,95	5,43	5,54	1,41
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	10° N	5,00	5,19	5,26	4,96	5,35	5,28	5,69	6,25	6,32	6,00	5,70	5,16	5,51	1,38

Fonte: CRESESB, 2021.

No Brasil, para a inclinação do módulo, a utilização comum se trata do mesmo ângulo de latitude do local, não sendo indicado um ângulo menor do que 10°, pois tal ângulo prejudicaria a manutenção do módulo (MIRANDA, 2014; DI SOUZA, 2016). De acordo com Di Souza (2016), o ângulo ideal de inclinação é dado pela equação (3.3)

$$\beta = 3,7 + 0,69\phi \quad (3.3)$$

Onde:

- β = ângulo ideal de inclinação do módulo fotovoltaico em graus;
- ϕ = ângulo de incidência da radiação solar (latitude do local).

De acordo com o *Google Earth*, o ângulo de latitude do local onde o empreendimento foi simulado é 4,27°. Desta forma, de acordo com a equação (3.4), o ângulo ideal de inclinação dos módulos fotovoltaicos seria:

$$\begin{aligned} \beta &= 3,7 + 0,69(4,27) \\ \beta &= \mathbf{6,6463^\circ} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Considerando os pontos de definição de ângulos de inclinação supracitados, no presente trabalho, o ângulo de 10° norte foi adotado, visto que, de acordo com a Figura 35, existe uma variação pequena em relação à irradiação apresentada para um ângulo de 4° e bem mais próxima do valor de irradiação utilizado pelo *software* HOMER.

Segundo CRESESB (2014), é possível definir a potência instalada de um sistema fotovoltaico necessária para suprir totalmente ou parcialmente o consumo de energia mensal de uma carga, que por sua vez é calculada com base na equação (3.5).

$$Pfv = \frac{C \text{ médio}}{TD \times HSP \times 30} \quad (3.5)$$

Onde:

- Pfv = potência instalada (kWp);
- $C \text{ médio}$ = consumo médio que se deseja suprir (kWh);
- TD = taxa de desempenho, adimensional;

- HSP = Horas de sol pleno (h)

A Taxa de Desempenho (TD), corresponde a um índice utilizado para avaliar a produção de energia de um sistema FV, considerando as perdas envolvidas, como sombreamento nos módulos, temperatura de operação, perdas por carregamento e eficiência do inversor (ZILLES, 2012; CRESESB, 2014; SANTOS, 2016). De acordo com Santos (2016), um sistema é considerado como de boa qualidade se a TD estiver acima de 80%.

De posse dos dados previamente estabelecidos, considerando uma TD do painel de 90%, considerando que ela deve suprir um consumo médio mensal de 23.785,18 kWh, que corresponde a fração não suprida pelo sistema eólico, com base na equação (3.6), tem-se a seguinte potência instalada:

$$Pfv = \frac{23.785,18}{0,9 \times 5,51 \times 30} \quad (3.6)$$

$$Pfv = 159,88 \text{ kWp}$$

Com base neste resultado, o subsistema fotovoltaico de 159,88 kWp instalada atenderia a necessidade energética para o empreendimento em análise. Com base nas definições da resolução normativa de nº 482/2012, atualizada em 2016 no capítulo 1, Art. 2º, o empreendimento em questão enquadra-se na categoria de minigeração distribuída, que é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Além disso, está permitida a participar do sistema de compensação, de acordo com o inciso VII do Art. 2º da normativa de nº 687/2015, que atua de forma conjunta com a resolução normativa de nº 482/2012, que incluiu no sistema de compensação a modalidade geração compartilhada.

A partir das informações obtidas é possível calcular a quantidade de painéis solares necessários para atender a potência de 159,88 kWp. Para o presente trabalho, os módulos utilizados no gerador solar fotovoltaicos foram pesquisados a partir de *Websites* de empresas especializadas. Dentre os *sites* pesquisados, o que apresentou melhor custo-benefício foi o da empresa *RENUGEN*, especialista em venda de equipamentos para sistemas de geração de energias renováveis. O módulo escolhido foi o da marca SunPower X21-335-BLK monocristalino, com a potencial nominal de

335Wp. Sua escolha foi baseada na eficiência do painel, além da tecnologia utilizada em sua fabricação, seu período de vida útil e preço. Desta forma, o número de módulos necessários para suprir a demanda definida é expresso pela equação (3.7):

$$N_{mod} = \frac{159,88 \text{ kWp}}{0,335 \text{ kW}} \quad (3.7)$$

$$P_{fv} = 478 \text{ Módulos.}$$

Para a definição do inversor, o método HOMER *Optimizer* foi utilizado, a fim de definir um inversor com potência e número de *strings* ideal para o subsistema fotovoltaico. O programa utiliza a equação (3.8) para definir a potência necessária pelo sistema de inversores para suprir a potência fornecida pelo sistema.

$$P_{inv} = \frac{P_{pico}}{\eta_{inv}} \quad (3.8)$$

Onde:

- P_{pico} : potência de pico do sistema;
- η_{inv} : eficiência do equipamento.

A seguir, nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as especificações dos módulos fotovoltaicos e inversor utilizados no projeto.

Tabela 3 – Especificações técnicas do módulo solar.

Fabricante	SunPower
Modelo	X21-335-BLK
Máxima Potência	335 W
Eficiência	21%
Voltagem de Máxima Potência (Vm)	57,3 V
Corrente de Máxima Potência (Im)	5,85 A
Voltagem de Circuito Aberto (Voc)	67,9 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	6,23 A
Dimensões do Painel	(1558 x 1046 x 46) mm
Número de Células e tipo	96, Monocristalino
Custo do Painel (Dólares Americanos)	\$339.32
Custo de Troca (Dólares Americanos)	\$339.32

Custo de Manutenção Anual por Pannel (Dólares Americanos)	\$1,7
---	-------

Fonte: Sunpower, 2021.

Tabela 4 - Especificações utilizadas pelo programa para o Inversor.

Inversor	Genérico
Custo do Inversor (Dólares Americanos)	\$300/kW
Custo de Troca (Dólares Americanos)	\$300/kW
Potência Considerada na Simulação	Utilização da função <i>Optimizer</i>
Eficiência	95%

Fonte: HOMER Pro, 2021.

3.3.3 Parâmetros de Rede

Na etapa de definição de parâmetros de conexão à rede, foi adotada a função *scheduled rates*, ou Taxa Programada. Com esta função é possível definir as taxas cobradas pela concessionária de energia com base em uma tabela regular, definida em horários e meses. Na opção *rate definition* adotou-se a definição de bandeiras tarifárias disponível no site da ENEL, bem como o histórico de meses em que cada bandeira tarifária foi aplicada ao longo do período de estudo do presente trabalho.

De acordo com a ANEEL, o sistema de bandeiras tarifárias, criado em 2015 classifica em 3 modalidades: verde, amarela e vermelha, as tarifas que serão cobradas pela concessionária na fatura de energia devido às condições de geração de energia. De acordo com a Resolução Homologatória nº 2.859, de 22 de abril de 2021, que descreve as Tarifas da Enel Distribuição Ceará (Grupos A e B). Os novos valores das bandeiras terão vigência no período de 22 de abril de 2021 a 21 de abril de 2022. Com base nisso, os valores das bandeiras tarifárias são definidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Bandeiras Tarifárias da ENEEL.

Bandeira	Tarifa em R\$/kWh
Verde	0,4949

Amarela	0,5083
Vermelha Patamar 1	0,5366
Vermelha Patamar 2	0,5898

Fonte: ENEL, 2021.

A fim de obter informações acerca do sistema de compensação em créditos de energia elétrica, a opção *Net Metering* foi selecionada, para que o próprio programa realize o cálculo de desconto entre a energia consumida e gerada, para que haja a determinação da quantidade de energia fornecida concessionária.

De acordo com as informações disponibilizadas no calendário de divulgação de bandeiras tarifárias da ENEL em 2020 e 2021, as seguintes bandeiras foram consideradas para determinar as tarifas cobradas pela concessionária em cada mês estudado. Os dados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Bandeiras Tarifárias entre junho de 2020 e maio de 2021.

Mês	Bandeira Tarifária
Junho/20	Verde
Julho/20	Verde
Agosto/20	Verde
Setembro/20	Verde
Outubro/20	Verde
Novembro/20	Verde
Dezembro/20	Vermelha Patamar 2
Janeiro/21	Amarela
Fevereiro/21	Amarela
Março/21	Amarela
Abril/21	Amarela
Maio/21	Vermelha Patamar 1

Fonte: ENEL, 2021.

3.3 INDICADORES ECONÔMICOS

O *software* utiliza dois principais parâmetros econômicos com objetivo de classificar os sistemas propostos e simulados. O principal parâmetro considerando pelo programa é o NPC (*Net Present Cost*) ou Custo Líquido Total, que engloba os custos ligados ao sistema em todo o período de vida útil menos a receita gerada por ele.

Considerando que o empreendimento analisado se trata de um período longo, o programa considera a depreciação sofrida pelo equipamento utilizados a partir de uma taxa real de desconto i (%), calculada com base em uma função da taxa de desconto nominal i' e taxa de inflação esperada f , demonstrada na equação (3.9).

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (3.9)$$

Outro parâmetro considerando pelo programa é o COE (*Cost of Energy*), ou custo nivelado de energia, utilizados para comparar diferentes modelos energéticos seguindo a equação (3.10)

$$COE = \frac{Can, tot}{E_{\text{útil}}} \quad (3.10)$$

Onde $E_{\text{útil}}$ corresponde a energia útil entregue pelo sistema anualmente em kWh/ano e Can, tot corresponde ao custo total anual do sistema, a partir da equação (3.11).

$$Can, tot = CRF(i, Rproj) \times NPC \quad (3.11)$$

De acordo com a equação (3.10), $Rproj$ corresponde ao tempo de vida total do sistema proposto, no presente trabalho, adotou-se um período de 25 anos. O CRF, ou fator de recuperação de capital, define-se como o valor anual do montante após N anos de projeto, com base na equação (3.12).

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3.12)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

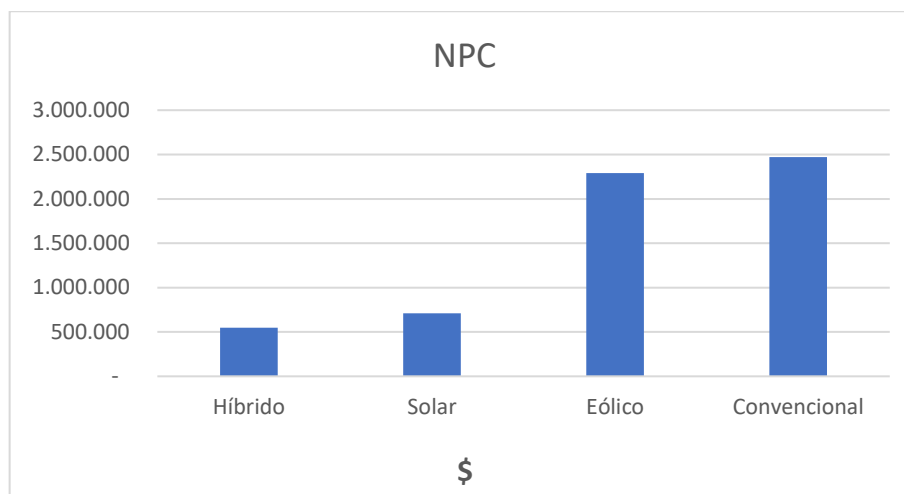
O *software* considera como parâmetro principal para a escolha do sistema simulado mais eficiente o índice NPC. O *Net Presente Cost*, ou Custo Líquido Atual é definido como o valor presente de todos os custos de instalação, operação e durante a vida útil do projeto simulado, menos o valor das melhorias e manutenções. Desta forma, o sistema com menor valor de NPC se demonstrará o mais eficiente dentre os sistemas simulados pelo programa com base nas configurações e parâmetros estabelecidos para o projeto, conforme demonstrado nos elementos do capítulo 3.

Seguido do NPC, o índice considerado durante a simulação realizada pelo programa é o COE. O *Cost of Energy*, ou Custo Nivelado de Energia é definido na equação (3.10) como uma relação entre o custo total do sistema de energia e a energia útil fornecida a carga pelo sistema. Embora seja um parâmetro relevante, não é levado em consideração na classificação final dos sistemas.

A partir dos parâmetros e especificações estabelecidos durante a elaboração do projeto, o sistema proposto que se demonstrou com maior rentabilidade econômica com base na comparação do índice NPC foi o sistema híbrido, conforme apresenta a Tabela 7 e Figura 34, onde os valores são apresentados em dólares americanos. Os sistemas considerados foram o híbrido, apenas solar e *on grid*, apenas eólico e *on grid* e por último o sistema convencional de energia, que é o sistema somente conectado à concessionária local.

Tabela 7 - Custo de operação dos sistemas.

Sistema	Cap. Fotovoltaica (kW)	Nº de Turbinas	Cap. Do Conjunto de Inversores (kW)	NPC (USD)	COE (USD/kWh)	Custo de Operação (USD/ano)
Híbrido	170	2	137	546.376,00	0,0767	13.333,00
Solar	170	-	141	708.854,00	0,104	34.221,00
Eólico	-	2	-	2.290.000,00	0,474	148.865,00
Conv.	-	-	-	2.470.000,00	0,511	170.971,00

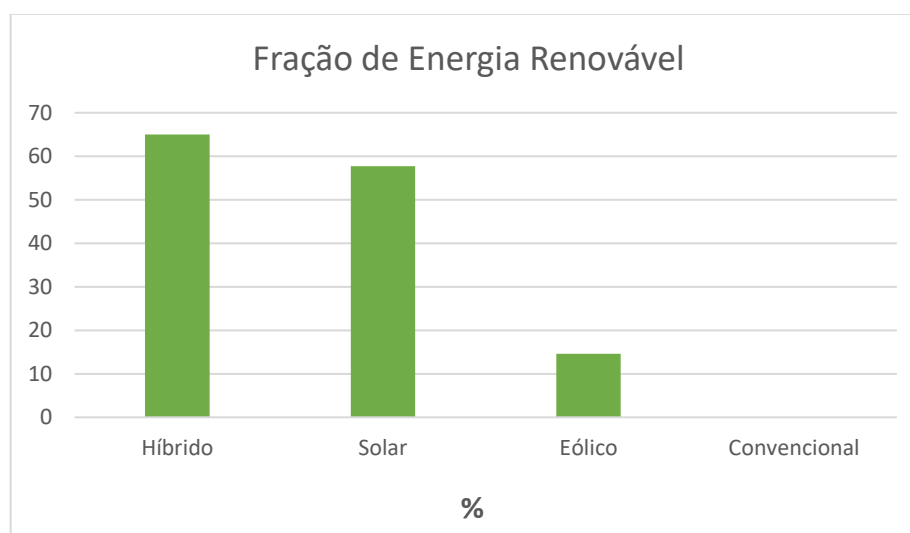
Figura 34 – Custo Presente Líquido (NPC) por sistema simulado.

A partir da Tabela 7 é possível observar que o sistema híbrido se apresenta como o mais eficiente, enquanto o convencional figura como o mais oneroso dos sistemas considerados e apresenta o maior valor do Custo de Energia (COE). Além disso, com base nos métodos de otimização do *software* HOMER, o número ideal de turbinas para o sistema foi definido como duas unidades do modelo previamente estabelecido, justificado pelo seu elevado custo, além de um percentual auto de participação do subsistema fotovoltaico, que figurou como o segundo sistema mais vantajoso além o híbrido. Considerando o custo de operação, o sistema híbrido também se apresenta como o mais vantajoso.

O Custo inicial do sistema híbrido, ao ser comparado com os 3 principais sistemas simulados, de fato é o maior, conforme apresenta a Tabela 8. Isto ocorre devido a utilização de dois tipos de tecnologia para geração de energia, neste caso, módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas, além dos valores relacionados a operação e manutenção, bem como a aquisição de inversores. Mesmo assim, o conjunto de dupla fonte é o mais eficiente dentre os simulados pela sua complementaridade no que tange a geração em cenários de geração com ou sem sol ou com ou sem vento. Além disto, em termos ambientais, o sistema híbrido possui a menor emissão de gases como o dióxido de carbono, se comparado aos outros sistemas, fornecendo à carga uma energia com 65% proveniente de fontes renováveis, conforme demonstra a Tabela 8 e Figura 35. O sistema híbrido possui a maior quantidade de produção de energia em kWh/ano, dentre os sistemas simulados, o que garante créditos de geração assegurados pela Resolução Normativa nº 482/2012.

Tabela 8 - Custo Inicial, Fração Renovável e Energia Produzida.

Sistema	Custo Inicial (USD)	Fração de Energia Renovável (%)	Energia Produzida (kWh/ano)
Híbrido	353.714,00	65	505.048,00
Solar	214.356,00	57,7	486.126,00
Eólico	140.562,00	14,6	334.492,00
Convencional	0,00	0,00	334.492,00

Figura 35 - Fração de Energia Renovável Fornecido à Carga em Cada Sistema.

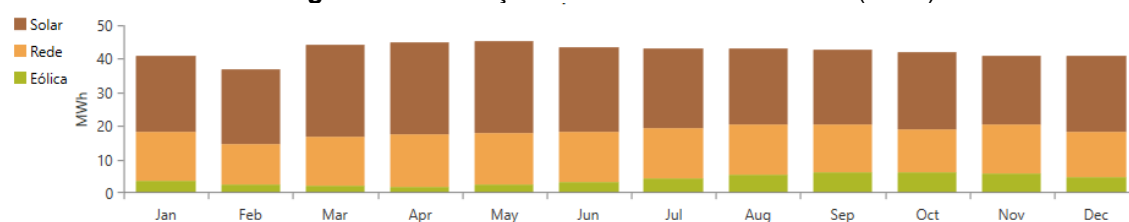
De acordo com os parâmetros de avaliação econômica definidos no capítulo 2 do presente trabalho, o *software* HOMER fornece informações acerca dos valores obtidos para cada simulação, como demonstra a Tabela 9. O Valor Presente Líquido (VPL) do sistema híbrido se apresenta como o maior dentre os sistemas considerados, o que se justifica pela quantidade de energia gerada e inserida na rede ser a maior dentre eles. Embora o retorno do investimento, TIR e *payback* descontado serem superados pelo sistema solar *on grid*, este ainda figura como segunda opção, visto que o sistema híbrido se beneficia da alternância e complementaridade de métodos de geração ao adicionar o subsistema eólico em seu método de geração.

Tabela 9 - Parâmetros de avaliação econômica.

Sistema	VPL (USD)	Retorno do Investimento (%)	TIR (%)	Payback Descontado (Anos)
Híbrido	1.924.161,00	40,6	45,3	2.4
Solar	1.761.682,00	59,8	64,3	1.7
Eólico	178.873,00	11,8	15,9	7,15
Convencional	0,00	0,0	0,0	-

4.1 SISTEMA HÍBRIDO

A Figura 36 mostra a produção de energia realizada por cada fonte de geração do sistema híbrido. Como esperado, a maior participação na geração de energia no período de um ano é proveniente da fonte solar, com (56,41%), seguido pela rede elétrica convencional (33,99%) e em menor contribuição figura o subsistema eólico, responsável por 9,59% da geração.

Figura 36 - Produção Elétrica Anual Mês a Mês (MWh).

Fonte: HOMER, 2021.

Nota-se que, embora a produção de energia proveniente de fonte eólica seja a de menor contribuição em termos de porcentagem de geração, ela se releva com maior relevância no período do ano conhecido com safra dos ventos, característico por possuir velocidades de vento mais elevadas. Tal crescimento em relevância na produção é seguido de uma redução de demanda de energia proveniente da concessionária, o que se demonstra vantajoso em termos econômicos, pois este período do ano coincide com os meses de bandeiras tarifárias com valor acima da tarifa cobrada pela bandeira verde. Além disso, embora a energia solar pareça constante, ela demonstra uma redução de produção em meses com um crescimento da energia produzida por fonte eólica, o que contribui na justificativa do conceito de complementaridade.

A Tabela 10 apresenta valores absolutos de produção anual de energia a partir das fontes utilizadas na elaboração deste sistema, bem como a porcentagem participação que cada fonte tem na produção de energia do sistema híbrido.

Tabela 10 - Produção anual total por fonte.

Fonte	Produção (kWh/Ano)	Porcentagem de Geração (%)
Solar	286.600,00	56,41
Eólico	48.747,00	9,59
Rede	172.701,00	33,99
Total	508.048,00	100,00

Considerando dados de consumo anual da carga, de toda a energia produzida pelo sistema híbrido, 68,77% ou 349.419,00 kWh/ano são consumidos localmente pelos moradores da comunidade de Carnaúba. Os outros 31,23% ou 158.629,00 kWh/Ano são injetados na rede de distribuição, que por sua vez irão gerar créditos que podem ser utilizados no consumo futuro do local.

A conexão com o a rede de distribuição de energia convencional, permite a utilização do sistema de compensação *net metering*, visto que sempre que o sistema produzir energia em excesso, a produção será transmitida diretamente para a rede, gerando créditos para a comunidade. Em momentos em que o sistema não produzir energia suficiente para suprir a demanda da carga em determinado momento, a rede suprirá a parte necessária desta demanda.

A partir dos indicadores econômicos utilizados na análise, o sistema híbrido apresenta uma taxa de retorno de 40,6% e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 45,3% do valor inicialmente investido. Além disso o sistema apresenta um *payback* descontado, ou seja, um período de retorno de 2,4 anos após o início de operação, sendo superado apenas pelo tempo de retorno do sistema Solar *on grid* que é de 1,7 anos.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi apresentado um estudo de viabilidade econômica para a instalação de um sistema híbrido eólico-solar conectado à rede na comunidade de Carnaúba, situada em Barreira – CE. No Presente estudo foi realizado um levantamento bibliográfico acerca dos conceitos centrais do cenário de energias renováveis no mundo e no Brasil, bem como a conversão fotovoltaica, aproveitamento da energia dos ventos e sistemas de geração distribuída conectados à rede (*on grid*).

A fim de realizar um estudo de viabilidade econômica, foram utilizadas metodologias e equacionamentos presentes na literatura visando dimensionar a demanda da carga, bem como as condições de geração de energia da região e o dimensionamento de um sistema híbrido de geração viável. Além disso foram considerados parâmetros largamente utilizados para a avaliação econômica do projeto com base em um período determinado de vida útil.

O dimensionamento foi realizado com base na prerrogativa de inclusão da comunidade no sistema de compensação de energia elétrica, visando a redução de gastos com a energia proveniente da rede. Para além do citado, a análise de viabilidade também se baseou na necessidade de uma redução de dependência do sistema convencional de fornecimento de eletricidade, que devido ao isolamento da comunidade por vezes se demonstrou ineficiente.

Após a elaboração e dimensionamento de sistemas necessários para atender a demanda da carga, neste caso, a comunidade, a simulação foi realizada utilizando o *software* HOMER, que com base em parâmetros econômicos definiu como mais eficiente e atrativo economicamente o sistema Híbrido, que por sua vez gera energia suficiente para suprir a demanda de todas as habitações da comunidade com um custo inicial de USD 353.714,00 em dólares americanos.

O sistema híbrido gera uma quantidade de energia grande o suficiente para atender toda a demanda da comunidade e gerar uma quantidade extra na ordem de 158.629,00 kWh/Ano que pode ser inserido na rede elétrica. Esta energia injetada diretamente na rede elétrica gera créditos com base no sistema de compensação de geração, estabelecido na Resolução Normativa nº 482/2012. Estes créditos podem

ser utilizados pelos consumidores da região em até 36 meses após a geração deste excedente.

Com base na Resolução Normativa de nº 687/2015, a comunidade estaria classificada como uma unidade de geração compartilhada e a partir da Resolução Normativa 482/2012 o sistema projetado figura como um sistema de minigeração, considerando sua potência instalada. Dito isto, de acordo com as duas normativas da ANEEL, a comunidade estaria habilitada a participar do sistema de compensação, que por sua vez traria grandes benefícios para a comunidade em termos econômicos. Estes benefícios poderiam ser destinados à melhoria de equipamentos elétricos, ou melhoria de condições de moradia, trabalho e espaços comunitários, visto que a comunidade é composta, em sua maioria, por famílias baixa renda.

O custo inicial do sistema híbrido de geração se mostrou elevado em comparação com os outros sistemas considerados na simulação. Porém, esse valor é compensado de forma rápida, considerando os valores de VPL, TIR e *Payback* Descontado. Este valor se recupera na forma de economia advinda do sistema de compensação, além do NPC, que se mostrou o mais eficiente dentre os sistemas considerados.

Atrelado à eficiência do sistema híbrido, outro fator relevante a ser considerado é o fator ambiental. O sistema híbrido se mostrou o sistema com maior participação de fontes renováveis na energia fornecida à carga (65%), fato este que contribui para o crescimento da utilização de fontes limpas de energia na matriz elétrica brasileira, além de um valor baixo de impactos ambientais no que tange à emissão de gases que contribuem de forma negativa para o efeito estufa. Para termos de comparação, o sistema convencional se demonstrou o mais oneroso neste aspecto. Para além do citado, uma das bases econômicas da comunidade é a agricultura e pecuária, que por sua vez utilizam processos, em sua maioria, de manejos orgânicos. Dito isso, o fato do consumo elétrico da comunidade impactar de forma mínima o ambiente gera um valor agregado em seus produtos, o que contribui também de forma econômica. A partir do contexto social e econômico da comunidade, a implantação de um sistema de minigeração traria um impacto benéfico para a comunidade e regiões adjacentes, pois a implantação de tal empreendimento movimentaria o mercado regional, gerando empregos e incentivos em projetos de capacitação de nativos para operação e manutenção do sistema.

Considerando os benefícios econômicos, sociais e ambientais, a implementação de tal projeto se justifica viável durante o período de estudo simulado, com base nos parâmetros utilizados. As fontes de energia utilizadas se demonstram confiáveis e com um potencial de geração alto para a região. A viabilidade econômica do projeto se mostra plausível, pois ainda que exista um custo inicial considerável, ferramentas e políticas públicas gesticuladas pelo governo, como o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) fornecem incentivos financeiros que pavimentam um investimento seguro, além das normativas da ANEEL, que garantem um retorno do investimento de forma considerável, tal que o consumidor reduzirá a dependência da rede elétrica.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como perspectiva para trabalhos futuros nesta área, visando a complementação do estudo aqui realizado, tem-se, considerando uma possível execução da instalação dos sistemas aqui dimensionados por parte dos moradores ou entidades governamentais, a análise da geração real do sistema a fim de realizar comparações com as projeções realizadas neste trabalho, além de uma análise de viabilidade econômica e de logística da implantação deste sistema. Além disso, sugere-se um estudo acerca do potencial energético proveniente da biomassa, visto que a comunidade, devido ao caráter de ocupação laboral dos moradores, produz insumos que podem ser utilizados para geração de energia.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 8, vigente a partir de 01/01/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Resolução Normativa nº 482/2012**, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 21.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Resolução Normativa nº 687/2015**, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 21.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, **Geração Distribuída**, 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

AGÊNCIA BRASIL, **Governo Lança Programa para estimular a geração de energia pelos consumidores**, 2015. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-12/governo-lanca-programa-para-estimular-geracao-de-energia-pelos-consumidores>>. Acesso em: 27 jul. 21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEólica, **Eólica: Energia para um futuro inovador**, 2020. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>>. Acesso em: 20 jun. 21.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, **Bandeiras Tarifárias**, 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 25 jul. 21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – ABSolar, **Panorama da Solar Fotovoltaica no Brasil e no mundo**, 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 16 jun. 21.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – IRENA, **Renewable Power Generation Costs in 2020**, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf>. Acesso em: Acesso em 20 jun. 21.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – IRENA, **Renewable Energy and Jobs in 2020**, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_RE_Jobs_2020.pdf>.

Acesso em: Acesso em 20 jun. 21.

CARVALHO, Danilo Diógenes Cachina de. 2016. **Proposta de um Modelo Para Implantação de Sistemas Híbridos de Geração Distribuída Eólico-Fotovoltaicos**. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil: s.n., 2016.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO – CRESESB, **Atlas Solarimétrico do Brasil 2000**, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em: 18, jun. 21.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO – CRESESB, **Potencial Solar de Barreira**, 2018. Disponível: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_55726>. Acesso em: 25, jul. 21.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO – CRESESB, **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas%20do%20potencial%20eolico%20brasileiro.pdf>. Acesso em: Acesso em: 20 jun. 21.

DE CERQUEIRA MATEUS, Ana Geddera. **Análise de sistema híbrido solar-eólico de geração de energia on grid em assentamento rural**. 2019.

DIÁRIO DO NORDESTE, **Queda de energia elétrica é a principal reclamação contra a ENEL**, 2019. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/metro/queda-de-energia-eletrica-e-a-principal-reclamacao-contr-a-enel-1.2092062>>. Acesso em: 26 jul. 21.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, **Balanco Energético Nacional 2020 – BEN 2020**, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf>. Acesso em 23 jun. 21.

ENTE NAZIONALE PER L'ENERGIA ELÉTRICA – ENEL, **Bandeiras Tarifárias de 2021**, 2021. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-ceara/Para_Voce/Bandeira_Tarifaria.html>. Acesso em: 27 jul. 21.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica**. Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2012.

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. 2011. **Energia Eólica**. Barueri: Manole LTDA, 2011.

GALDINO, Júlio César Gomes et al. **Análise crítica entre dois softwares de dimensionamento e simulação fotovoltaicos**. 2016.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL- GWEC, **Global Wind Report 2021**, 2021. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2021/>>. Acesso em 25 jun. 21.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, **Atlas Eólico e Solar do Ceará**, 2019. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/User/LogIn>>. Acesso em: 20 jun. 21.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, **CO2 emissions by region in the New Policies Scenario, 2010-2040**, Paris, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-by-region-in-the-new-policies-scenario-2010-2040>>. Acesso em: 16 jun. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, **CO2 emissions in Brazil, EWS vs. NPS**, Paris, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-in-brazil-ews-vs-nps>>. Acesso em: 16 jun. 2021.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. 2012. **Energia Solar Para Produção de Eletricidade**. São Paulo: Artliber, 2012.

MILANO, Jackson. 2017. **Proposta de Utilização de Sistema Híbrido Eólico/Solar de Geração de Energia em Estabelecimentos Comerciais na Ilha do Mel - PR**. Curitiba, Paraná, Brasil: s.n., 2017.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1981. p. 358.

PINTO, Milton de Oliveira et al. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2013.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de trabalho de energia solar-GTES.** CEPEL-DTE-CRESESB, 2014.

RENEWABLE GENERATION, **Preço do módulo do painel solar X21-335W-BLK 335**, 2021. Disponível em: <<https://www.renugen.co.uk/sunpower-x21-335w-blk-335-watt-solar-panel-module/>> Acesso em: 25 jul. 21.

SAMANEZ, Carlos Patricio. **Gestão de investimentos e geração de valor.** Pearson, 2007.

SAMPAIO, Victor Bruno Ribeiro. **Geração distribuída: normas vigentes, dimensionamento e análise de *payback* de sistemas solares fotovoltaicos.** Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SILVEIRA, Juliana Santos. **Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de fontes renováveis-eólica e fotovoltaica-para a autossuficiência energética em Fernando de Noronha.** Engenharia Ambiental e Sanitária-Pedra Branca, 2019.

SANTOS, Johnantan Oliveira dos. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: um estudo de caso.** 2016.

SILVEIRA, Eduardo Fontes. **Cenários de geração renovável em Fernando de Noronha.** 2013.

VILLALVA, Marcelo Gradella. 2015. **Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações.** São Paulo: Saraiva Educação, 2015.

VERAS, Caio Kerson Oliveira. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede na fazenda Mirassol.** 2017.

WATT – U – NEED, **Preço do aerogerador modelo Bergey Excel 10kW**, 2021. Disponível em: <<https://www.wattuneed.com/en/wind-turbine/1595-10kw-bergey-excel-wind-turbine-230-vac-or-48-vdc-0712971129559.html>>. Acesso em: 26 jul. 21.