



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALICIA MAYRA ARAUJO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM PROBABILÍSTICA DOS INSUMOS DA GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO POTIGUAR**

CARAÚBAS – RN
2023

ALICIA MAYRA ARAUJO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM PROBABILÍSTICA DOS INSUMOS DA GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO POTIGUAR**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Érica Manguiera
Lima

CARAÚBAS – RN
2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

048m Oliveira, Alicia Mayra Araujo.
Modelagem probabilística dos insumos da geração
fotovoltaica no alto sertão potiguar / Alicia
Mayra Araujo Oliveira. - 2023.
41 f. : il.

Orientadora: Érica Manguiera Lima.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2023.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Modelagem
probabilística. 3. Irradiância. 4. Distribuições de
probabilidade. I. Lima, Érica Manguiera, orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ALICIA MAYRA ARAUJO DE OLIVEIRA

**MODELAGEM PROBABILÍSTICA DOS INSUMOS DA GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA NO ALTO SERTÃO POTIGUAR**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 13/ 10/ 2023.

BANCA EXAMINADORA

Érica Mangueira
Lima

Assinado de forma digital por
Érica Mangueira Lima
Dados: 2023.10.19 15:36:24
-03'00'

Profa. Dra. Érica Mangueira Lima



Documento assinado digitalmente
JEANE SILVA DE SOUZA
Data: 20/10/2023 17:52:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Jeane Silva Souza



Documento assinado digitalmente
RAFAEL LUZ ESPINDOLA
Data: 19/10/2023 18:10:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Luz Espindola

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus que me ilumina sempre. Depois aos meus pais, por não ter medido esforços para me fornecer uma educação de qualidade nunca deixando faltar nada para mim. Obrigada a toda família.

Agradeço a professora Érica que me ajudou muito durante todo o período de orientação do trabalho, inclusive me dando apoio psicologicamente, não me deixando desanimar.

Agradeço aos meus companheiros de casa e de tantas batalhas durante todo esse tempo da graduação. Em especial, Bia e Joerdson, vocês foram fundamentais pra mim.

RESUMO

O aumento progressivo da inserção da geração de energia solar no sistema elétrico de potência busca solucionar com eficiência e rapidez os problemas de escassez na geração, no entanto, pode trazer consigo algumas questões que devem ser devidamente analisadas a fim de garantir a operação normal do sistema. Dessa forma, o presente trabalho propõe uma modelagem probabilística dos insumos da geração fotovoltaica. Para isso foi realizado um levantamento de dados de irradiância solar da cidade de Caraúbas/RN, além disso foi realizado teste de várias distribuições de probabilidade, como também teste de aderência Kolmogorov–Smirnov a fim de encontrar o melhor modelo que se adequa aos dados. A principal motivação deste trabalho é apresentar que esse estudo possa ser usado para orientar estudos que exijam dados de fontes de energia solar do Rio Grande do Norte ou de outras localidades. Por exemplo, para realização de simulações generalizadas sobre fluxos de carga, dimensionamento e localização de sistemas.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Modelagem probabilística. Irradiância. Distribuições de probabilidade.

ABSTRACT

The progressive increase in the insertion of solar energy generation into the electrical power system seeks to solve generation deficiency problems with greater efficiency and speed, however, it may raise some issues that must be duly proven to guarantee the normal operation of the system. Therefore, the present work proposes a probabilistic modeling of photovoltaic generation consumption. To this end, a survey of solar irradiance data from the city of Caraúbas/RN was carried out, in addition to this, several probabilistic models were tested, as well as the Kolmogorov–Smirnov adhesion test to find the best model that suited the data. The main motivation of this work is to present that this study can be used to guide studies that extract data from solar energy sources in Rio Grande do Norte or other locations. For example, to carry out generalized simulations on load flows, sizing and location of systems.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Probabilistic modeling. Irradiance. Probability distributions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema on-grid e off-grid.....	15
Figura 2: Mapa solarimétrico do Brasil.....	16
Figura 3 - Projeção da Capacidade Instalada da Micro e Minigeração Distribuída no Brasil.	17
Figura 4: Inclinação dos raios solares na radiação recebida por unidade de área.....	19
Figura 5: Painéis solares de um (a e b) e de dois (c) eixos.....	20
Figura 6: Função de distribuição acumulada de uma variável X.	22
Figura 7: Função de densidade de probabilidade de uma variável X.....	23
Figura 8: Função de densidade de probabilidade da distribuição Normal.	24
Figura 9: Função de densidade de probabilidade da distribuição logística.	25
Figura 10: Função de densidade de probabilidade da distribuição Weibull com diferentes parâmetros.	26
Figura 11: Função de densidade de probabilidade da distribuição valores extremos.	27
Figura 12: Funções distribuição de probabilidade GEV com diferentes parâmetros.	28
Figura 13: Fluxograma modelagem da irradiância solar por uma FDP.	31
Figura 14: Gráfico de caixa da irradiância solar do ano de 2008 à 2023.....	32
Figura 15: Histograma dos dados de radiação solar	34
Figura 16: Histograma da irradiância e diferentes distribuições de probabilidade.....	35
Figura 17: Distribuição GEV para os dados de irradiância.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Associação Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
EPE	Empresa de pesquisa energética
EV	Valores extremos
FDA	Função de distribuição acumulada
FDP	Função de densidade de probabilidade
GD	Geração distribuída
GEV	Valores Extremos Generalizados
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do teste KS.....	35
Tabela 2 – Resultados do teste KS para distribuições específicas.	36
Tabela 3 – Parâmetros da distribuição GEV.....	37

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	ENERGIA SOLAR	14
2.2	RADIAÇÃO SOLAR.....	18
2.3	MODELAGEM POR MEIO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	20
2.3.1	FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA	21
2.3.2	FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP)	22
2.3.3	PRINCIPAIS FUNÇÕES DE PROBABILIDADE	23
2.4	TESTES DE ADERÊNCIA.....	28
3.	METODOLOGIA	31
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	34
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica no Brasil se concentra, primordialmente, em grandes usinas hidrelétricas, e, para o transporte dos grandes blocos de energia gerados, utilizam linhas de transmissão muito extensas. No entanto, nos períodos de estiagem, o insumo para esse meio de geração se torna escasso e muitas vezes não é o suficiente para suprir a demanda, forçando a inclusão de termelétricas. Surgem então outros meios sustentáveis de geração de energia, como a energia solar ou a energia eólica.

A energia solar pode ser utilizada como fonte de energia elétrica de duas formas: termosolar e fotovoltaica. A primeira utiliza o sol como fonte de calor para geração de um vapor capaz de movimentar turbinas. O segundo tipo, mais comum, consiste na conversão da radiação advinda do sol em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, ou seja, a capacidade de materiais específicos liberarem elétrons livres a partir da absorção de fótons, gerando corrente elétrica.

Uma das principais vantagens da utilização da energia solar fotovoltaica, atualmente, é a possibilidade da geração de energia em blocos menores junto a carga, diminuindo a necessidade de transportá-los por grandes linhas de transmissão. Dessa forma, é possível aliviar a demanda energética sobre esse sistema e diminuir as perdas a ele associadas. Esse tipo de geração se chama geração distribuída (GD), ou seja, aquela cuja central geradora está próxima à carga de consumo, normalmente na rede de distribuição (ACKERMANN et al., 2001). Ademais, para o caso da geração fotovoltaica, a produção de energia não demanda, muitas vezes, novas terras para instalação pois é incorporada nas residências dos consumidores, diminuindo o impacto ambiental.

A GD pode ser dividida ainda em minigeração distribuída, cuja potência usualmente está entre 75 kW e 5 MW, para a energia fotovoltaica; e microgeração distribuída, em que a potência instalada deve ser menor ou igual a 75 kW. Admite-se, na GD, a utilização de fontes de energia renováveis, como hidráulica, solar, eólica e biomassa (ANEEL, 2012).

Apesar de todas as vantagens da geração distribuída, existem desvantagens sobre o modo de operação. Por exemplo, quando essa geração é feita usando painéis fotovoltaicos, ela não é deterministicamente previsível, pois o desempenho dos painéis está diretamente relacionado à disponibilidade de radiação solar. E, apesar do sol ser uma fonte inesgotável, especialmente quando comparada as demais fontes de energia, a conversão da radiação solar em energia elétrica pode ser afetada por diversos fatores como sombreamento, acúmulo de

impurezas, fatores climáticos, dentre outros. Além disso, neste contexto, consideram-se sistemas fotovoltaicos espalhados pelas residências de forma que há um segundo fator que afeta a confiabilidade: a possibilidade de falhas no equipamento (BILLINTON, 2006).

Com as usinas fotovoltaicas, surgem três novos aspectos ao se considerar o planejamento da expansão da rede de distribuição: como o perfil intermitente de geração impacta o sistema elétrico, quais as implicações da geração estar conectada diretamente na rede de distribuição, qual a sua potência e em que momento ela será instalada (desde que dentro dos limites de potência previamente definidos pela ANEEL), o que dificulta realizar previsões de longo prazo (SHAYANI, 2018).

Com foco no primeiro aspecto, pode-se destacar que a irradiância é um fator importante para o aproveitamento da energia solar, visto que, por meio dela, é possível estimar quanto de energia será produzida. Seu estudo pode contribuir também para a distribuição de energia na rede elétrica, já que uma das causas de perda de energia são originadas do aquecimento dos fios provenientes da radiação solar (SHAYANI, 2018).

Destaca-se que um dos pontos essenciais para o estudo de insumos energéticos é a modelagem, e, para fontes intermitentes como a irradiância solar, que é uma variável aleatória, isso é possível por meio de modelos probabilísticos. Técnicas como média móvel integrada, modelos autorregressivos e distribuições de probabilidade podem ser utilizadas. Esse tipo de modelagem permite a representação precisa de variáveis aleatórias, incluindo incertezas na modelagem de fontes renováveis de energia (SOUZA, 2020).

O presente trabalho propõe realizar uma análise de dados de irradiância solar por meio de métodos probabilísticos, a fim de auxiliar na simulação de fontes nos sistemas que incluem a geração distribuída fotovoltaica. Mais precisamente, considera-se as características solares atípicas da região na qual a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) está situada, o alto sertão potiguar. Esta região apresenta clima quente e seco em boa parte do ano, com grande disponibilidade do insumo solar. Espera-se então que, esse estudo possa ser complementar também na análise de viabilidade da implementação de usinas fotovoltaicas nesta área, visto que esse é um mercado em ascensão.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo principal a modelagem do insumo fotovoltaico por meio de distribuições de probabilidade e como objetivos específicos:

- Estudar e compreender conceitos essenciais sobre a energia solar fotovoltaica;

- Aprender como modelar fontes intermitentes que contém incertezas;
- Compreender conceitos importantes sobre variáveis aleatórias indexadas no tempo;
- Fornecer parâmetros para possibilitar a simulação com maior precisão de sistemas que incluam a geração distribuída fotovoltaica.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho foi dividido em 5 capítulos, incluindo este introdutório. Em seguida, no capítulo 2 apresentam-se conceitos importantes sobre a energia solar fotovoltaica, irradiância solar e a modelagem por meio de distribuição de probabilidade. O capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada neste trabalho. No capítulo 4 os resultados obtidos serão descritos e analisados. Por fim, no capítulo 5 destacam-se as principais conclusões obtidas ao final do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar, assim como a primeira célula fotovoltaica, surgiram em 1954 logo após a descoberta do efeito fotovoltaico. Foram apresentadas por Russell Shoemaker Ohl durante uma reunião da *National Academy of Sciences*, dando início à utilização dos painéis solares em 1958. Além de desenvolver a primeira placa de silício, Russell Ohl foi o primeiro a patentear o sistema fotovoltaico moderno, muito próximo do sistema conhecido atualmente. (SOLAR, 2023).

Na história da tecnologia fotovoltaica, inicialmente as células fotovoltaicas eram utilizadas em aplicações espaciais, posteriormente, na década de 1970, como consequência das crises do petróleo, a energia fotovoltaica começou a se viabilizar economicamente no atendimento de áreas terrestres isoladas, utilizada em conjunto com baterias. Na década de 90, alguns países lançaram programas de estímulo à geração fotovoltaica conectada à rede, em conjunto com o pagamento de tarifas-prêmio pela energia gerada por esses sistemas. Essas medidas fizeram com que houvesse uma forte redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, ocasionando a viabilização ao longo da década atual a paridade tarifária na geração distribuída (TOLMASQUIM, 2016).

O princípio de funcionamento da geração fotovoltaica se baseia em módulos que são associados em série e paralelo para formar os arranjos de geração com a tensão e a corrente desejadas. Essa corrente é contínua (CC), portanto, geralmente é necessário o uso de um inversor para transformá-la em corrente alternada (CA). Os módulos fotovoltaicos são compostos por 36 a 72 células solares produzidas normalmente por silício e utilizados para a captação da luz do sol, com a função de converter a luz solar em energia elétrica fotovoltaica. Utilizam, então, o efeito fotovoltaico, ou seja, a absorção da energia da luz solar (fótons) para que a corrente elétrica percorra o caminho necessário entre duas camadas em uma direção oposta, sendo responsáveis pela geração da energia solar (SOLAR, 2023).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados normalmente em aplicações convencionais conectadas à rede, que são chamados de sistema *on-grid* e em sistemas isolados (*off-grid*). Neste último caso além dos equipamentos citados anteriormente, é necessário utilizar baterias e controladores de carga para possibilitar o funcionamento do sistema quando não estiver havendo a geração de energia solar.

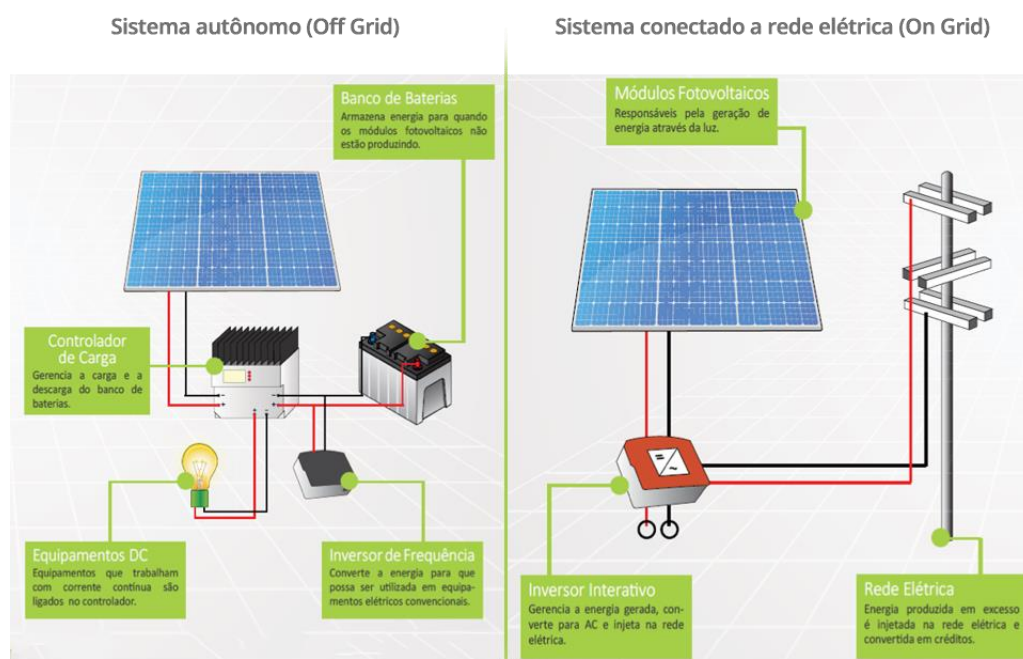
No sistema *on-grid* a localidade onde o sistema está instalado permanece conectado à

rede pública de distribuição de energia elétrica. A produção da energia solar em energia elétrica é usada pela própria unidade consumidora e o que sobra é entregue à concessionária, que concede créditos ao consumidor. Essa operação é muito prática e útil sobretudo para sistemas geradores instalados em áreas urbanas ou com fácil acesso à distribuição. Esse modelo de sistema é vantajoso pois é capaz de baratear os custos periódicos com energia elétrica, uma vez que os créditos gerados podem ser convertidos em descontos e utilizados em até 60 meses (INTELBRAS, 2023).

No sistema *off-grid* a unidade consumidora onde a energia fotovoltaica é gerada opera de forma autônoma e sem integração à rede pública. Esse sistema é ideal para áreas rurais ou distantes de regiões com rede elétrica estabelecida. A quantidade de baterias desse sistema está relacionada à quantidade de cargas e ao tempo de autonomia desejado para o sistema (INTELBRAS, 2023). O funcionamento dos sistemas *on-grid* e *off-grid* está representado na figura 1.

Em contrapartida, essa modalidade possui desvantagem de que não há o desconto na conta de energia, justamente por não haver abastecimento por parte da concessionária pública. A vantagem é a autonomia energética, em poder gerar e armazenar para alimentar qualquer tipo de produto/solução, independentemente do quão distante ou isolada seja a carga a ser alimentada (INTELBRAS, 2023).

Figura 1: Sistema on-grid e off-grid.

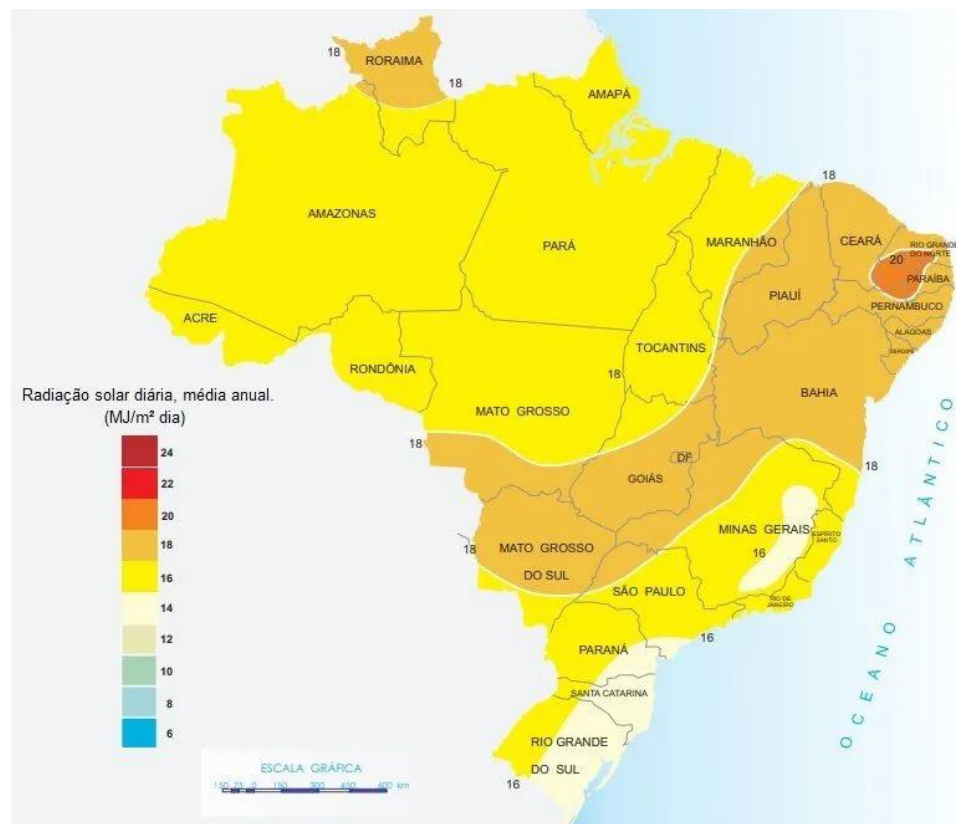


Fonte: Solar Fonte (2023).

A localização do Brasil, situado quase que totalmente na região entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, favorece elevados índices de incidência da radiação solar em quase todo o território nacional, inclusive durante o inverno. Essa característica dá ao país condições vantajosas para o aproveitamento energético do recurso solar, pois aqui tem-se uma incidência mais vertical dos raios solares (TOLMASQUIM, 2016). O potencial solar brasileiro pode ser verificado no mapa solarimétrico da Figura 2, no qual apresenta-se a radiação solar diária no país.

Dessa forma, o Brasil, mais especificamente na região Nordeste, tem um potencial solar significativo, sendo um dos maiores do mundo. É possível, portanto, o aproveitamento solar durante o ano todo, propiciando a geração de energia elétrica mesmo em períodos de seca, nos quais a geração por meio de hidrelétricas se torna mais onerosa (MME/EPE, 2020). Nesse contexto, a tecnologia fotovoltaica é a mais promissora dentro as formas de obtenção de energia elétrica por meio do sol.

Figura 2: Mapa solarimétrico do Brasil



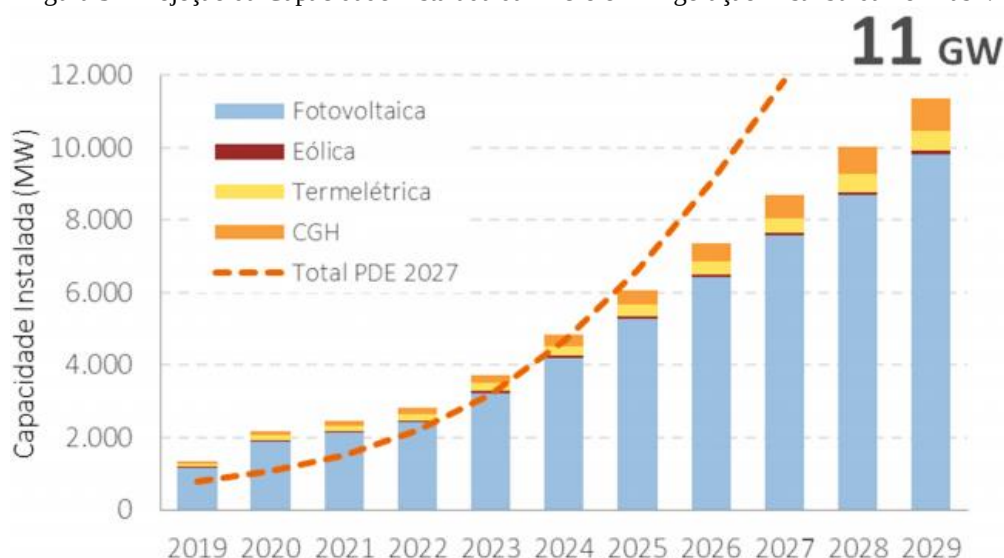
Fonte: (Solarfy, 2023).

No Brasil, os sistemas *on-grid* começaram a ser instalados no final dos anos 90, principalmente em universidades e centros de pesquisa. No entanto, somente em 2012 essa modalidade de geração foi regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Como em qualquer processo de implementação de inovações, logo após a regulamentação houve pouca adoção dos sistemas de geração própria de energia, mas o número de consumidores vem crescendo de modo sustentado à medida que a população toma conhecimento dessa possibilidade e que se aumenta a viabilidade econômica do investimento (TOLMASQUIM, 2016).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2023), no ano de 2023 houve uma expansão da capacidade instalada da matriz elétrica em 7 Gigawatts (GW) entre janeiro e agosto. Desse total, 6,2 GW têm origem nas fontes solar e eólica, caracterizando ano o maior aumento da geração solar. As fontes renováveis compreendem 83,79% de toda a matriz elétrica do Brasil, tornando uma referência internacional em energia limpa.

A Empresa de Pesquisa Energética - EPE realizou a projeção de expansão da adoção de sistemas de micro e minigeração distribuídas, disponível em seu Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (MME/EPE, 2023). Como apresentado na Figura 3, a estimativa indica que no ano de 2029 haverá cerca de 1,3 milhão de adotantes do sistema de micro ou minigeração distribuídas, exigindo quase R\$ 50 bilhões em investimentos e alcançando a marca de 11,4 GW. Além disso, a capacidade instalada deve atender 2,3% da carga total nacional, com uma geração de 2.300 MW médios.

Figura 3 - Projeção da Capacidade Instalada da Micro e Minigeração Distribuída no Brasil.



Fonte: MME/EPE (2020).

Entretanto, a instalação em massa de geração fotovoltaica, assim como eólica, incorpora novos desafios no sistema elétrico. As características intermitentes da fonte, com a presença de variações súbitas, implicam em dificuldades para manter o equilíbrio entre a oferta e a demanda, ou seja, geração e carga. Com isso, é necessário adaptar o sistema elétrico para conciliar esse tipo de geração. Essa modernização precisa vir acompanhada de aperfeiçoamentos na regulação, de modo que seja construído um ambiente favorável para a realização de investimentos na modernização das redes e em serviços suplementares (TOLMASQUIM, 2016).

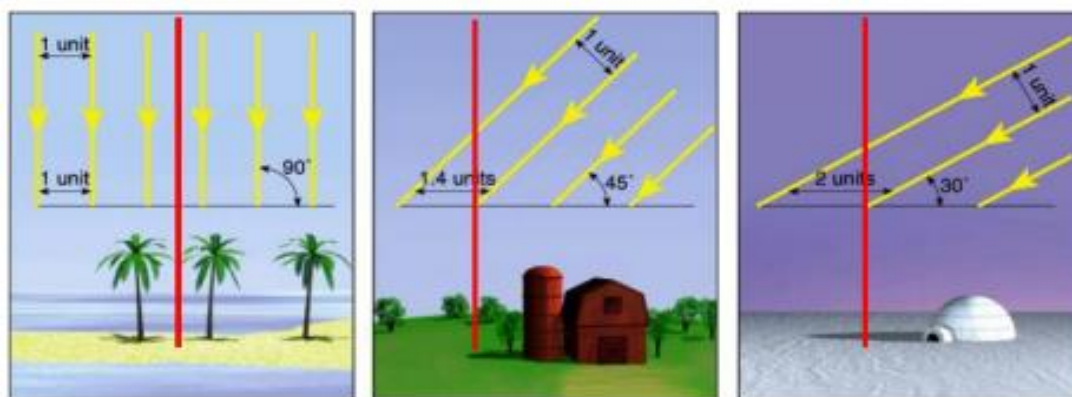
2.2 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol, que se propaga em todas as direções através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas. Essa energia é direta ou indiretamente responsável por diversas circunstâncias cotidianas essenciais, como a fotossíntese das plantas, a produção de energia solar posteriormente convertida em energia elétrica e a formação do vento, fundamental para a geração de energia eólica.

A radiação solar atinge a superfície terrestre e é decomposta em planos. Quando entra na atmosfera, a radiação é influenciada por fatores como vapor de ar, poeira e outras moléculas, chegando ao solo em diferentes direções. Essa componente é chamada difusa. Quando os raios solares atingem o solo diretamente, sem influência do meio, chama-se radiação direta. Existe ainda uma componente de radiação refletida na Terra, chamada de albedo. No plano horizontal a soma das componentes direta e difusa, e no plano inclinado, o acréscimo de uma parcela refletida na superfície e os elementos do entorno, formam o que chamamos de radiação global (TOLMASQUIM, 2016).

A radiação solar incidente por unidade de superfície em um dado plano, por unidade de área dessa superfície, é chamada de irradiância solar e medida em watt por metros quadrado (W/m^2). A irradiância solar integrada durante um dia, medida em watt hora por metro quadrado (Wh/m^2) é chamada de irradiação solar (ABNT, 2013).

Figura 4: Inclinação dos raios solares na radiação recebida por unidade de área.



Fonte: (Floor, 2004).

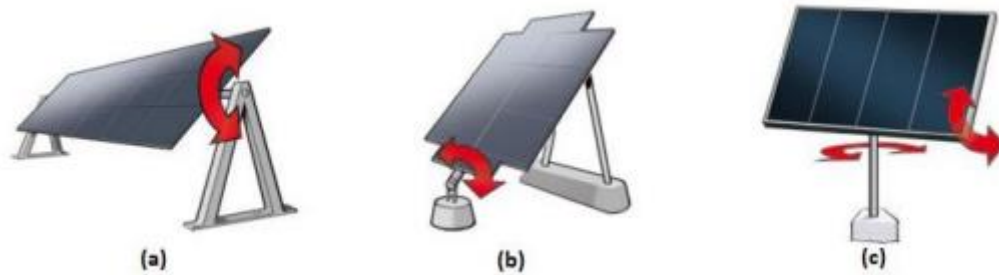
Na geração de energia solar fotovoltaica, a irradiação de maior interesse é a Irradiação Global Horizontal (HHOR), que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela Irradiação Difusa Horizontal (HDIF) pela Irradiação Direta Normal (HDIR). Em dias nublados, a principal parcela é a HDIF, enquanto que em dias claros prevalece a HDIR (TOLMASQUIM, 2016).

Dessa forma, nota-se que a radiação solar incidente na superfície terrestre sofre também o efeito da atmosfera. A definição do espectro da radiação é dada através da temperatura da superfície. Esse processo depende de dois fatores: a condição temporal da atmosfera, e a espessa camada de atmosfera que a luz solar precisa atravessar. Com isso, a posição do sol no céu está diretamente relacionada com atenuação da atmosfera, quanto mais baixo estiver o Sol no céu, maior a atenuação da atmosfera sobre a radiação (STINE, 2001).

Os fatores mencionados anteriormente confirmam certa variação à irradiação incidente na superfície terrestre. Dentre as formas de irradiação, a irradiação direta é a que mais varia ao longo do dia, principalmente em locais com altos índices de nebulosidade variando mais que a radiação global. Sabendo dessa variação, é necessário buscar uma fonte de dados confiável para a correta estimativa da energia a ser produzida por plantas solares, e sua consequente viabilidade (TOLMASQUIM, 2016).

Para se obter uma maior eficiência dos raios solares, alguns painéis fotovoltaicos possuem estruturas de seguimento de um ou dois eixos que fazem com que sigam o movimento do sol, maximizando a incidência da radiação solar nos equipamentos de geração e aumentando a eficiência da produção de energia elétrica.

Figura 5: Painéis solares de um (a e b) e de dois (c) eixos.



Fonte: (TOLMASQUIM, 2016).

O ideal posicionamento dos painéis solares para melhor aproveitamento é quando o ângulo é igual a latitude do local, orientado ao norte, no hemisfério sul, de forma que a superfície receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual, fazendo com que a variação da irradiação ao longo do ano seja atenuada.

2.3 MODELAGEM POR MEIO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

Considera-se como insumo da geração de energia solar a irradiância, que mostra forte dependência de condições meteorológicas, tais como radiação solar, temperatura ambiente e assim por diante. Assim, para avaliar esse tipo de geração distribuída renovável, é necessário analisar as características da irradiância na localidade da instalação. Sendo possível, então, proporcionar bons modelos que representam essas características.

No entanto não existe um modelo único e definitivo para modelar estes recursos renováveis, diferentes métodos podem ser utilizados. Por exemplo, radiação solar pode ser modelada utilizando diferentes técnicas: de forma cronológica, utilizando métodos de séries temporais, ou probabilisticamente usando uma função de probabilidade adequada para um determinado período de tempo (ATWA, 2010).

As funções de probabilidade estão diretamente ligadas à natureza dos dados a que elas se relacionam. Algumas têm boa capacidade de estimação para pequeno número de dados, outras requerem grande série de observações. Devido ao número de parâmetros de sua equação, algumas podem assumir diferentes formas, enquadrando-se em um número maior de situações, ou seja, são mais flexíveis. Desde que respeitado o aspecto da representatividade dos dados, as estimativas dos seus parâmetros para uma determinada região, podem ser estabelecidas como de uso geral, sem prejuízo da precisão na estimação da probabilidade (CATALUNHA, 2002).

A análise de processos de variáveis aleatórias indexadas pelo tempo por meio de

distribuições de probabilidade são capazes de relacionar valores da variável com a probabilidade de ocorrência, podendo ser discretas ou contínuas.

A distribuição de probabilidade discreta só assume valores específicos, enquanto que a contínua assume valores em uma escala contínua. As funções que estão relacionadas as variáveis discretas são a Bernoulli, binomial, binomial negativa, hipergeométrica, geométrica e Poisson. Já as distribuições uniformes, normal, log-normal, gama, valores extremos ou Gumbel, Weibull, exponencial, beta, qui-quadrado, t de Student, F de Snedecor, entre outras, estão relacionadas a dados amostrais de variáveis aleatórias contínuas (CARGNELUTTI FILHO, 2004).

2.3.1 FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA

A função distribuição acumulada (FDA) calcula a probabilidade acumulada para um determinado valor de x . A FDA é usada para determinar a probabilidade de que uma observação aleatória que é extraída da população, seja menor ou igual a um determinado valor (CUNHA, 2016).

Uma função de distribuição acumulada de uma variável X , no caso contínuo, é uma função que a cada número real x associa o valor. Essa FDA é dada por:

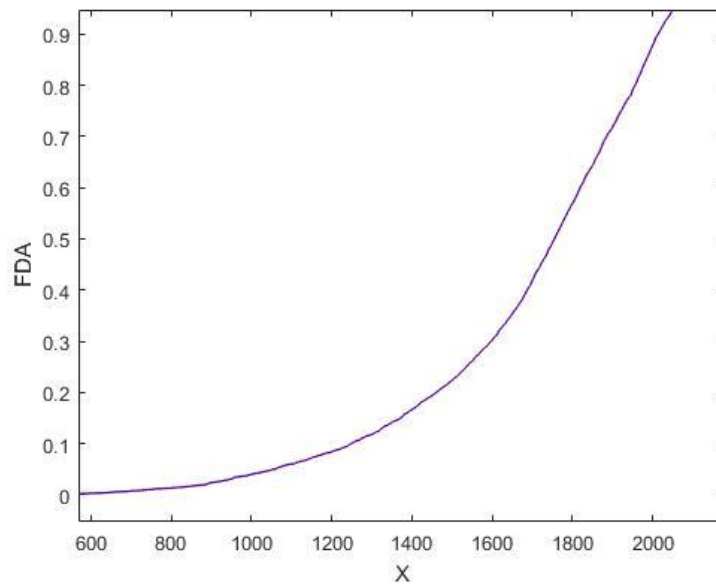
$$F_x(x) = P(X \leq x). \quad (1)$$

A FDA de uma variável aleatória X possui três propriedades básicas (CUNHA, 2016):

- $0 \leq F(x) \leq 1$, $F_x(-\infty) = 0$, $F_x(\infty) = 1$
- F é não decrescente
- F é uma função contínua a direita e tem limite à esquerda.

Na Figura 6 é possível observar um exemplo de uma FDA pra uma variável X .

Figura 6: Função de distribuição acumulada de uma variável X.



Fonte: Autoria própria (2023).

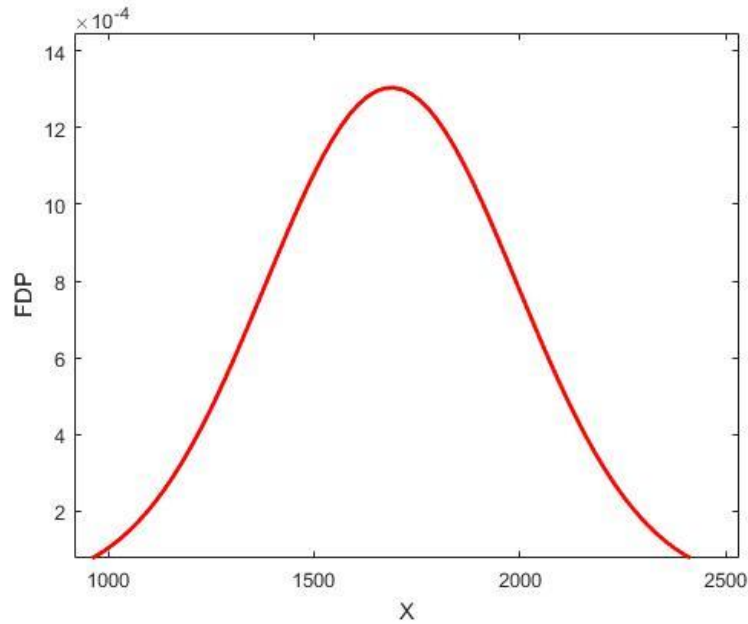
2.3.2 FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (FDP)

A FDP pode ser definida como a derivada da FDA e indica a probabilidade de uma variável aleatória estar em um intervalo infinitesimal centrado por x . A FDP de uma variável aleatória X no ponto x é dada por (LEON-GARCIA 2008):

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (2)$$

As funções de densidade de probabilidade podem ser agrupadas quanto aos picos de frequência (unimodal ou multimodal), a simetria (simétrica ou assimétrica), ao tipo de curvatura (rígidas ou flexíveis) e número de variáveis aleatórias (univariadas ou multivariadas) (GUIMARÃES, 2002).

Figura 7: Função de densidade de probabilidade de uma variável X



Fonte: Autoria própria (2023).

2.3.3 PRINCIPAIS FUNÇÕES DE PROBABILIDADE

Algumas funções de probabilidade se destacam quando se trata da representação de dados similares ao da irradiância solar, que tem valores positivos e contínuos.

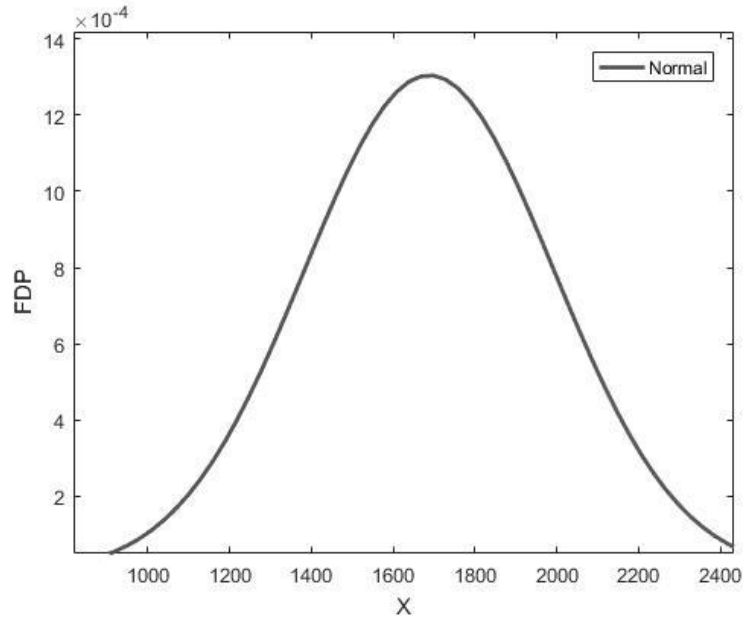
2.3.3.1 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Essa distribuição, representada na Figura 8, é o modelo de probabilidade utilizado para descrever de forma geral a frequência com que valores ocorrem num histograma. É uma das mais importantes distribuições teóricas e práticas, sendo muito utilizada na inferência estatística. A função de densidade de probabilidade da função normal é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (3)$$

em que μ é a média da distribuição e σ o desvio padrão, ambos números reais.

Figura 8: Função de densidade de probabilidade da distribuição Normal.



Fonte: Autoria própria (2023).

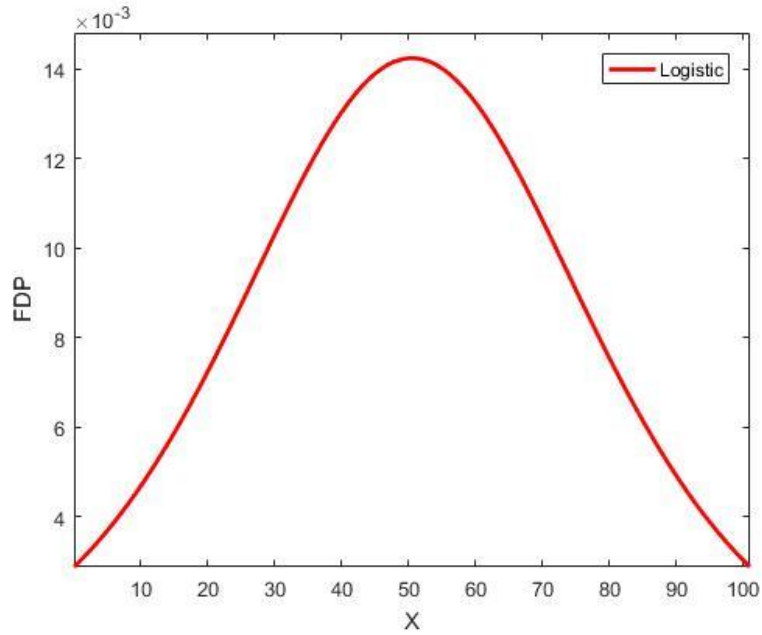
2.3.3.2 FUNÇÃO LOGÍSTICA

A distribuição logística, apresentada na Figura 9, é definida por seus parâmetros de escala e localização e é um tipo de distribuição contínua. Se assemelha a forma da distribuição normal, no entanto a logística se alonga mais, sendo usada para modelos de crescimento e em regressão logística. A equação 5 demonstra a função de densidade de probabilidade da distribuição logística.

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{\exp\left\{\frac{x - \mu}{\sigma}\right\}}{\sigma \left(1 + \exp\left\{\frac{x - \mu}{\sigma}\right\}\right)^2} \quad (4)$$

em que, μ é o parâmetro de média e σ o parâmetro de escala.

Figura 9: Função de densidade de probabilidade da distribuição logística.



Fonte: Autoria própria (2023).

2.3.3.3 FUNÇÃO T- LOCATION SCALE

A distribuição em escala de localização t é utilizada para modelar distribuições de dados com caudas mais propensas a valores discrepantes do que a distribuição normal. Aproxima-se da distribuição normal à medida que o parâmetro de forma, ν , se aproxima do infinito, e valores menores de ν produzem caudas maiores.

A função de densidade de probabilidade da distribuição T- Escala de localização é dada por:

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu r}\Gamma\frac{\nu}{2}} \left[\frac{v + \left(\frac{x+\mu}{\sigma}\right)^2}{v} \right]^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)} \quad (5)$$

na qual Γ é a função gama, μ é o parâmetro de localização, σ é o parâmetro de escala e ν é o parâmetro de forma.

2.3.3.4 FUNÇÃO ESTIMATIVA DE DENSIDADE KERNEL

A estimativa de densidade Kernel não-paramétrica utiliza diretamente os dados, com

isso não é preciso calcular os parâmetros, dessa forma diminuindo os erros dos parâmetros. A função de densidade de probabilidade (FDP) da estimativa de densidade Kernel é dada por (NETO, 2017):

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (6)$$

em que h é a largura de banda e K a função Kernel e $X_1, X_2 \dots X_i$ é conjunto de amostras.

2.3.3.5 FUNÇÃO WEIBULL

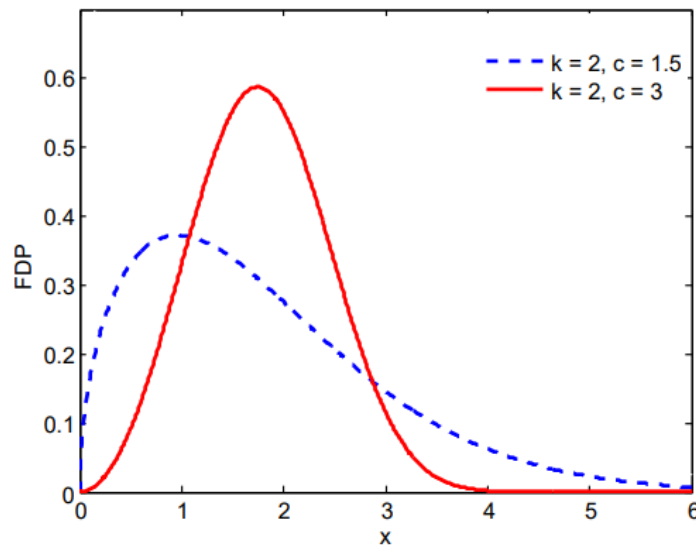
A distribuição Weibull (Figura 10) tem sua função de densidade de probabilidade mais comumente apresentada da seguinte forma (CATALUNHA, 2002):

$$F(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)^{\gamma}\right], x \geq \alpha \quad (7)$$

Em que:

- x é a variável aleatória
- $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ são parâmetros de distribuição.
-

Figura 10: Função de densidade de probabilidade da distribuição Weibull com diferentes parâmetros.



Fonte: Souza (2020).

2.3.3.6 FUNÇÃO VALORES EXTREMOS

Para obtenção da distribuição de probabilidades dos valores extremos de uma variável

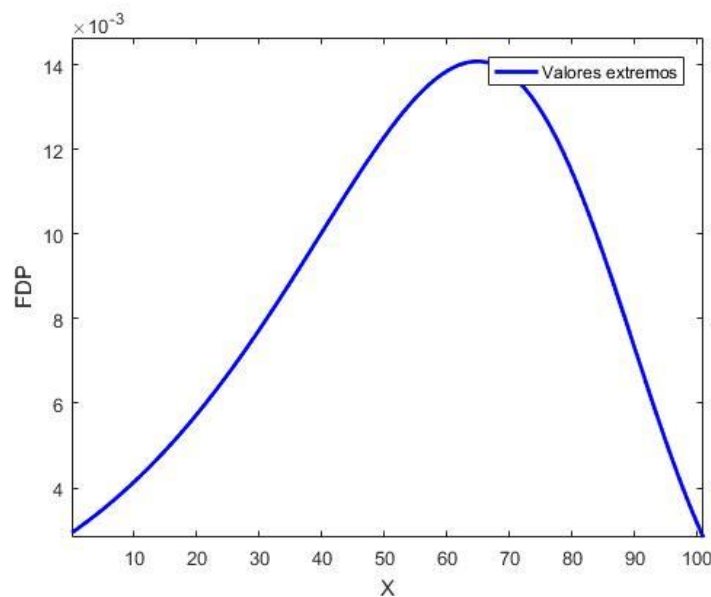
aleatória X , com funções densidade $f_x(x)$ e cumulativa $F_x(x)$ de probabilidades conhecidas, considera-se inicialmente a existência de várias amostras de tamanho n , onde os índices representam os N valores observados na i -ésima amostra (NASCIMENTO, 2009).

A correspondente função densidade de probabilidades do valor extremo para n ocorrência de X é então dada por:

$$f_y(y) = \frac{dF_y(y)}{dy} = N \cdot [1 - F_x(y)]^{N-1} \cdot f_x(y) \quad (8)$$

A distribuição de probabilidades de X , $F_x(x)$ ou $f_x(x)$, é chamada de distribuição parente. A variável N se refere ao número de ocorrências da variável X que são observadas durante um determinado período de tempo de interesse (NASCIMENTO, 2009).

Figura 11: Função de densidade de probabilidade da distribuição valores extremos.



Fonte: Autoria própria (2023).

2.3.3.7 FUNÇÃO VALORES EXTREMOS GENERALIZADOS

A distribuição GEV incorpora a distribuição de Gumbel, de Fréchet e de Weibull, todas elas sendo distribuições de máximas. A função GEV possui três parâmetros: forma, escala e posição. Uma distribuição com menor número de parâmetros flexíveis terá menor precisão para modelagem de dados que uma distribuição com maior número de parâmetros. O parâmetro de forma representa onde a maioria dos dados está concentrada. Já o parâmetro de escala descreve

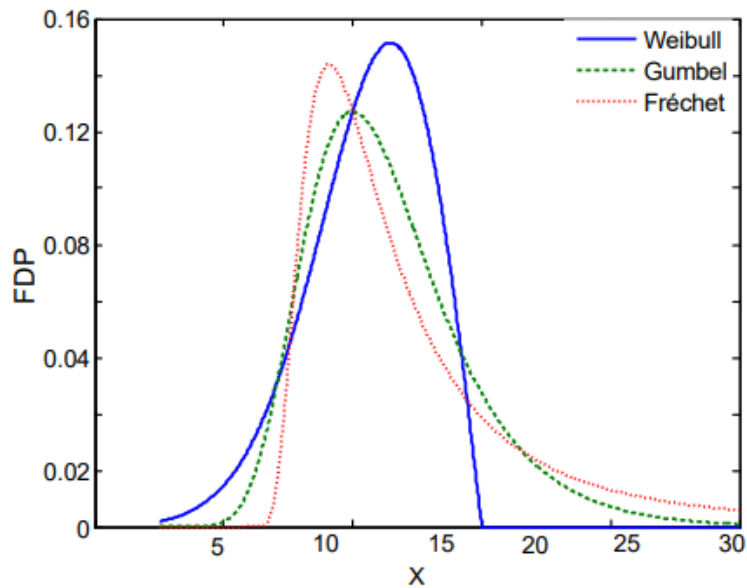
quão espalhado a distribuição é, com isso a medida em que o valor do parâmetro cresce, a função se torna mais espalhada. Por fim, o parâmetro de posição descreve a posição da distribuição em uma dada direção do eixo horizontal (MILLINGTON, 2011). As equações 1 e 2, mostram a função de densidade de probabilidade (FDP) e a função de probabilidade $F(x)$.

$$f(x|\xi, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\left(\frac{1+\xi}{\xi}\right)} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right] \right\} \quad (9)$$

$$F(x|\xi, \mu, \sigma) = P[X \leq x] = \int_0^x f(x|\xi, \mu, \sigma).dx = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right] \right\} \quad (10)$$

Os termos ξ, μ, σ representam, respectivamente, os parâmetros de forma, posição e escala. Se $\xi = 0$ tem-se distribuição Gumbel, se $\xi < 0$ tem-se Weibull e se $\xi > 0$ tem-se Frechet. A distribuição é apresentada na Figura 12.

Figura 12: Funções distribuição de probabilidade GEV com diferentes parâmetros.



Fonte: Souza (2020)

2.4 TESTES DE ADERÊNCIA

Para realizar a comparação das probabilidades práticas de uma variável com as probabilidades teóricas estimadas pela função de distribuição em teste, existem os testes de aderência, como o qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Shapiro-Wilk, Cramervon

Mises que verificam se os valores da amostra podem razoavelmente ser considerados como provenientes de uma população com aquela distribuição teórica (CARGNELUTTI FILHO, 2004). Entre os testes mais utilizados para distribuição de probabilidade estão o qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov.

O teste de aderência de qui-quadrado é mais eficaz quando comparado a outros testes, porém possui algumas restrições entre elas, podemos citar a frequência de uma classe que não pode ser inferior a cinco e os dados são agrupados em classes perdendo informações (CATALUNHA, 2002).

No teste de aderência do qui-quadrado, a hipótese admite que a distribuição seja aquela especificada e usada no estudo (normal, log-normal e gama, p.e.), com os seus parâmetros estimados com base nos dados amostrais. A hipótese é testada fazendo-se a comparação entre as frequências observadas e as frequências teóricas ou esperadas, em cada classe de frequência dos dados, pela estatística teste dada por (CAMPOS, 1983).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left[\frac{(Fo_i - Fe_i)^2}{Fe_i} \right] \quad (11)$$

O teste de Kolmogorov-Smirnov, pode ser realizado com os dados agrupados e com os dados isoladamente, tornando mais eficiente que o teste qui-quadrado em pequenas amostras. Esse teste é baseado no módulo da maior diferença entre a probabilidade observada e a estimada, que é comparada com um valor tabelado de acordo com o número de observações da série sob teste (CATALUNHA, 2002).

A estatística de Kolmogorov-Smirnov para uma dada função distribuição acumulada $F_0(x)$ é dada pela equação 12.

$$D = \max |F_0(x) - S_n(x)|, \quad (12)$$

em que: $F_0(x)$: é a distribuição hipotética, $S_n(x)$: uma distribuição observada em uma amostra de n observações (distribuição empírica).

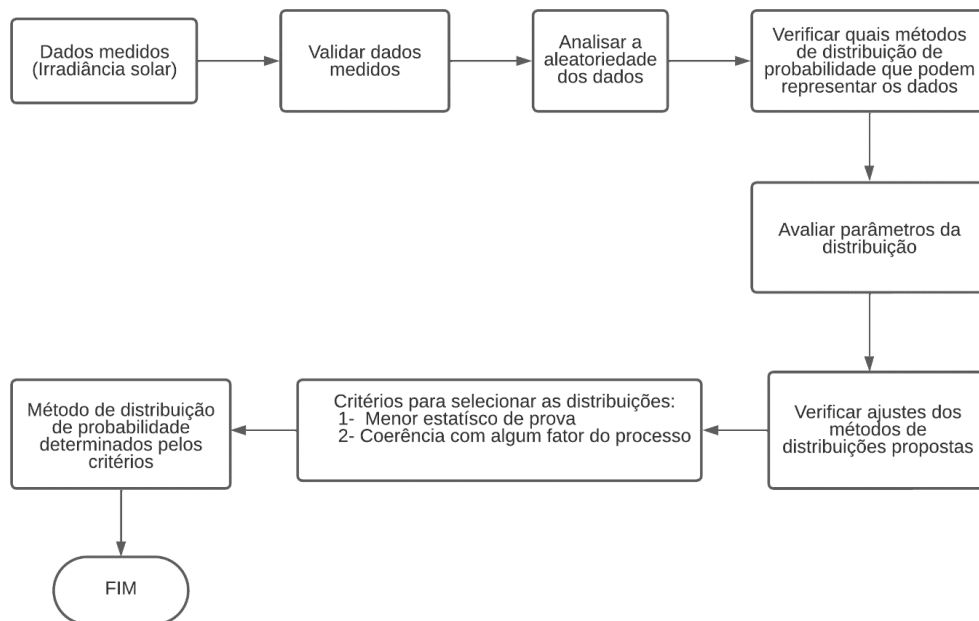
O teste KS é um teste da hipótese nula. Com isso, menores valores da estatística fornecem maiores níveis de significância (valor-p) isso implica em uma maior evidência de não rejeição da hipótese nula, e com isso possui maior aderência dos dados à distribuição em teste. Portanto, quando o valor-p for maior que 5% a hipótese nula é aceitável, e os dados seguem a

distribuição em que se está testando. Se o valor-p for menor que 5%, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, os dados não seguem a distribuição que está supondo (CAMPOS, 1983).

3. METODOLOGIA

A irradiância solar pode ser descrita como uma variável aleatória indexada no tempo. Para identificar funções de distribuições de probabilidade que possam modelar devidamente esse tipo de dado, algumas etapas devem ser seguidas. Essas etapas estão apresentadas na Figura 13.

Figura 13: Fluxograma modelagem da irradiância solar por uma FDP.



Fonte: Adaptado de Souza (2016)

Inicialmente, para caracterização desse processo aleatório por modelos estatísticos, é necessário a obtenção de uma série histórica de dados. Ou seja, a modelagem desse insumo por uma distribuição de probabilidade requer um volume significativo de dados, capaz de representar sua variabilidade ao longo do tempo. Isto posto, a primeira etapa para a análise consiste em obter uma série temporal de dados.

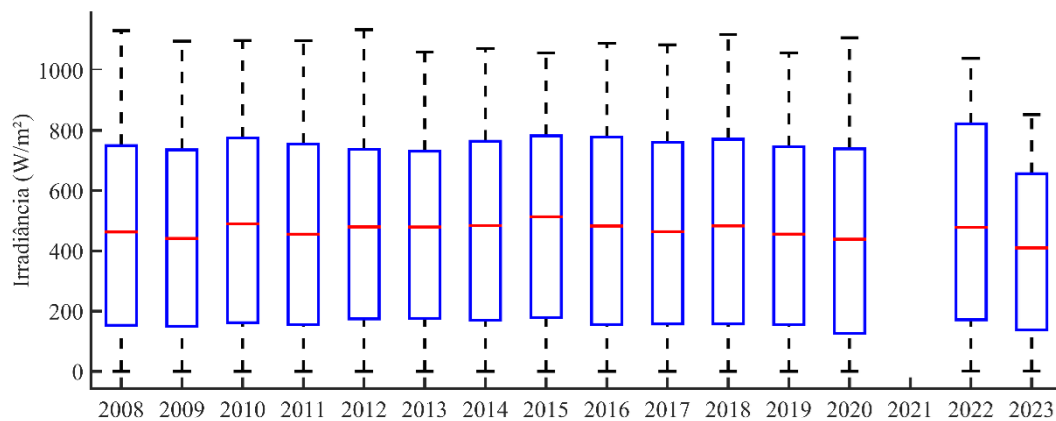
No presente trabalho, foram considerados 15 anos de dados horários de radiação global fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na cidade de Mossoró – RN. Destaca-se que a cidade de Mossoró foi escolhida por possuir estações meteorológicas automáticas há mais tempo que outras cidades do alto sertão potiguar, dessa forma é possível colher dados suficientes para caracterização do insumo. Os dados disponíveis usualmente são de radiação global, dados em kJ/m^2 , devendo ser tratados e transformados para valores de

irradiância solar em W/m^2 .

O período de 15 anos obtido foi representado por um ano típico através da média diária, reforçando o conjunto contra possíveis erros de medição ou falta de dados no conjunto, sem perder a característica estocástica do processo (SOUZA, 2020).

Uma vez selecionados e validados, é necessário analisar a aleatoriedade e semelhança entre os dados dos anos estudados. Para isso, um diagrama de caixas (*boxplot*) como cada um dos anos estudados é apresentado na Figura 14, na qual pode-se observar que a irradiância solar na localidade varia em média de 200 a 800 W/m^2 , podendo chegar a mais de 1000 W/m^2 dentro da sua faixa normal de variação. Destaca-se que os dados de 2021 não estavam disponíveis no *site* do INMET.

Figura 14: Gráfico de caixa da irradiância solar do ano de 2008 à 2023.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após a seleção e tratamento dos dados é possível iniciar a avaliação das distribuições de probabilidade de forma visual, sendo adotado nesse estudo o *software* Matlab por meio da ferramenta *Distribution Fitter*, que possibilita a visualização do histograma dos dados e consequentemente a possibilidade de representação dos mesmos por distribuições específicas. Para isso considera-se o tipo de variável aleatória (discreta ou contínua), a faixa de valores das variáveis, os tipos de dados (positivos ou negativos), a forma do histograma e o coeficiente de variação estatística (SOUZA, 2020).

Para verificar o ajuste das distribuições propostas, apenas visualizar os dados amostrais de uma variável em um histograma de frequência não é o indicado para determinar uma função de distribuição de probabilidade que os represente. Portanto, é necessário usar testes de aderência para validar a adequação do modelo probabilístico a um conjunto de dados observado. Para a série de dados objeto deste trabalho, o teste de Kolmogorov-Smirnov é o mais indicado,

considerando dados amostrais de uma única variável (SOUZA, 2020).

Sendo atendidos os critérios de menor estatístico de prova, ou seja, teste de hipótese nula positiva e valor-p acima de 5%, é possível escolher uma ou mais funções de distribuição de probabilidade que representem os dados. Se não houver nenhuma FDP que passem no teste, algumas etapas podem ser executadas (PAREJA, 2009), (ZAPATA, 2005). Dentre elas, alterar os parâmetros de análise, alterando o nível de confiança, ou diminuir o tamanho da amostra para um grande volume de dados.

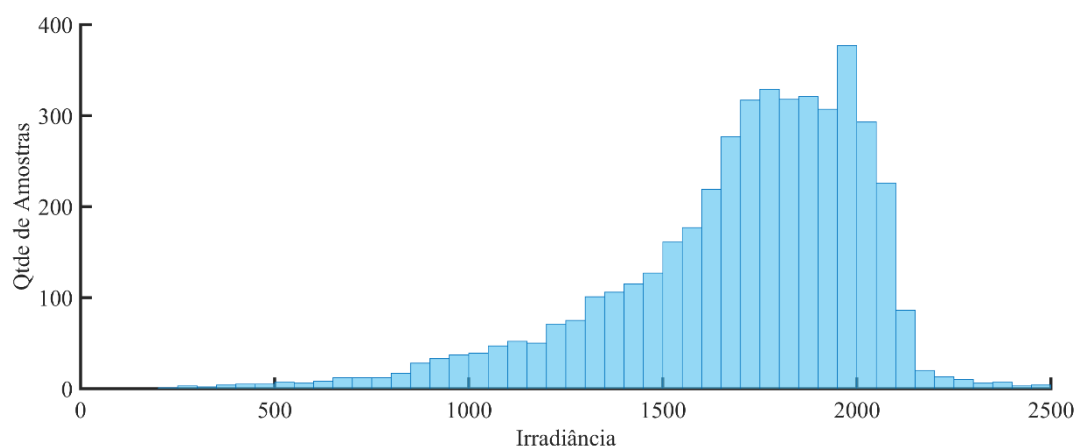
Pode ocorrer de várias funções de distribuição de probabilidade representar o processo, com isso alguns critérios podem ser estabelecidos para escolher a distribuição adequada. Dentre eles, escolher a distribuição de probabilidade que possui o maior valor-p de teste, escolher a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta às condições naturais do problema em estudo (PAREJA, 2009).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

De posse da série histórica de irradiância referentes aos últimos 15 anos, de 2008 até 2023, com exceção apenas do ano de 2021 por motivos supracitados, o tratamento e validação dos dados foi realizado por meio da anualização. Ou seja, a representação de um ano típico de irradiância solar para cada um dos anos pela média diária, removendo desde o início valores discrepantes da análise.

O histograma que representa os dados obtidos na série temporal completa pode ser observado na Figura 15.

Figura 15: Histograma dos dados de radiação solar

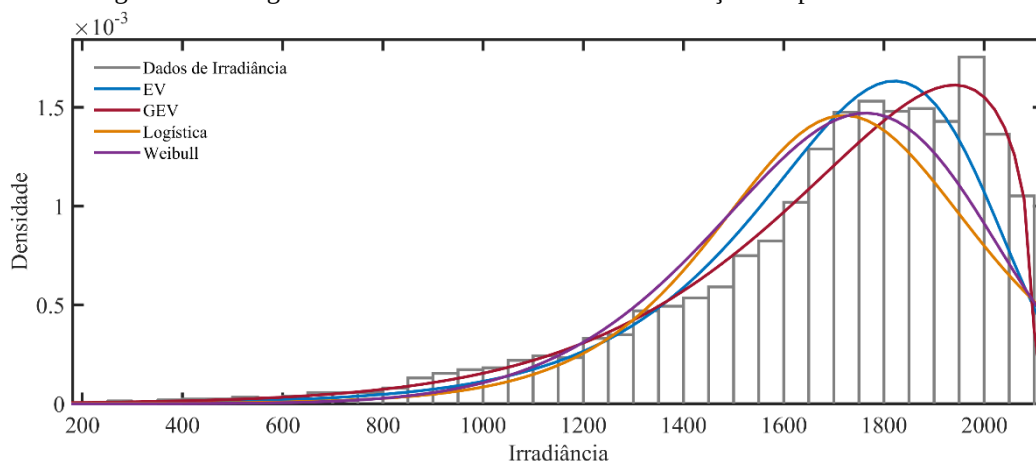


Fonte: Autoria própria (2023).

Vale salientar que a irradiância solar é um processo que geralmente ocorre das 06:00 hs às 16:00 hs, considerando a latitude e longitude do local estudado. Então, para evitar a inclusão de valores muito pequenos e de dados não significativos foram retirados valores abaixo de 200 W/m² e acima de 2100 W/m². Esses valores foram obtidos por meio da análise estática dos diagramas de caixa da Figura 14 em conjunto com o histograma apresentado na Figura 16.

Em seguida, foram testadas diversas distribuições, dentre elas: Normal, Exponencial, Valores Extremos (EV), Gama, Valores Extremos Generalizado (GEV), Gaussiana Inversa, Logística, Lognormal, Nakagami, Poisson, T Location Scale, Rayleigh, Rician e Weibull. Com base no histograma, de início as distribuições que foram satisfeitas foram: Valores Extremos, Valores Extremos Generalizado, Logística, Weibull. Na Figura 16, apresenta-se no gráfico as distribuições que mais se aproximam visualmente da representação desejada.

Figura 16: Histograma da irradiância e diferentes distribuições de probabilidade



Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se que os dados analisados tem uma tendência à representação por distribuições que modelam eventos extremos, como a EV e a GEV. No entanto, para confirmar esta hipótese, os dados foram submetidos ao teste KS a fim de avaliar o valor e o hipótese nula para todas as funções de distribuição disponível. Na Tabela 1, apresenta-se os resultados do teste KS para o teste realizado, na qual é possível observar que apenas a distribuição GEV, como esperado, passou no teste de aderência, obtendo o valor-p acima de 5%.

Tabela 1 – Resultados do teste KS.

Distribuição de probabilidade	Valor-p (%)
Kernel	0.0144
Normal	0.0000
Exponencial	0.0000
Valor Extremo	0.0000
Gamma	0.0000
Gaussiana Inversa	0.0000
Loglogística	0.0000
Logística	0.0000
Lognormal	0.0000
Nakagami	0.0000
Poisson	0.0000
Rayleigh	0.0000
Rician	0.0000

T- Location Scale	0.0000
Weibull	0.0000
Valor Extremo Generalizado	0.1394

Fonte: Autoria própria.

Observando ainda o histograma de dados das Figura 15 e 16, um novo tratamento de dados foi realizado, reduzindo um pouco mais a amostra e adotando dados de irradiância entre 400 W/m² e 2100 W/m², buscando validar os testes realizados para as distribuições EV, GEV, logística e Weibull, que apresentaram maior aderência visual aos dados. O objetivo foi verificar a possibilidade de aumento no valor-p e possivelmente representação por alguma outra FDP além da GEV. Os valores do teste KS estão apresentados na Tabela 2.

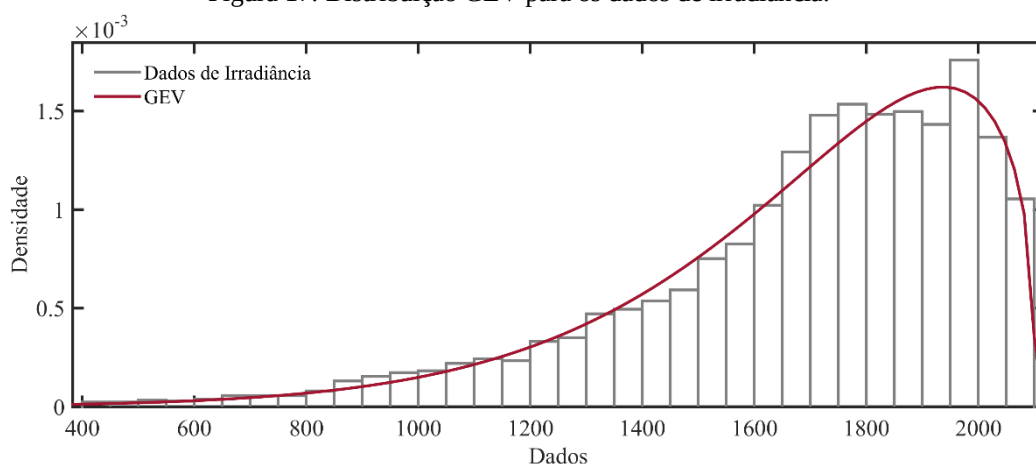
Tabela 2 – Resultados do teste KS para distribuições específicas.

Distribuição de probabilidade	Valor-p (%)
Valores Extremos	0.0000
Valores Extremos Generalizados	0.2275
Logística	0.0000
Weibull	0.0000

Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados confirmam a hipótese de que a irradiância solar no local estudado pode ser representada pela distribuição GEV, capaz de representar fenômenos como inundações, terremotos, emissões radioativas, dentre outros. Apresenta-se, na Figura 17, a aplicação da distribuição GEV na modelagem da irradiância solar na cidade de Mossoró. Os três parâmetros para essa distribuição foram obtidos por meio do aplicativo *DistributionFitting* do Matlab e estão apresentados na Tabela 3. Esses parâmetros possibilitam a simulação do insumo da geração fotovoltaica utilizando a distribuição de probabilidade GEV na região estudada, ou seja, o alto sertão potiguar, que compreende a cidade de Mossoró e cidades vizinhas.

Figura 17: Distribuição GEV para os dados de irradiância.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 3 – Parâmetros da distribuição GEV.

Parâmetro	Valor
K	- 0,744701
σ	337,086
μ	1647,88

Fonte: Autoria própria.

Destaca-se ainda que a aderência da distribuição GEV também já foi observada em outras cidades do Nordeste, como apresentado em algumas referências e destacado em Souza, 2020. Pode-se inferir, então, que a proximidade da linha do Equador e o consequente alto potencial para o recurso solar nessa região, impliquem no comportamento extremo da irradiância observado nos dados analisados. Esse fato, somado a fatores como a melhoria do custo-benefício dessa fonte nos últimos anos, pode justificar e impulsionar a alta adesão da energia solar fotovoltaica utilizada principalmente como geração distribuída.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração distribuída, especialmente na forma de sistemas fotovoltaicos, vem apresentando uma crescente de interesse atualmente. Isto se deve a possibilidade de gerar energia a partir de um recurso natural amplamente disponível, produção de energia limpa e silenciosa, redução de perdas no sistema, e acessível ao consumidor. No entanto, o sistema fotovoltaico possui um insumo intermitente e aleatório, a irradiância solar, sendo difícil afirmar o quanto de energia os geradores irão de fato prover.

Neste contexto, o presente trabalho considera as incertezas presentes na irradiância solar, caracterizando-a como um processo aleatório indexado no tempo e modelando este insumo por meio de distribuições de probabilidade. Para tal, utilizou-se uma série histórica de 15 de dados de irradiância na cidade de Mossoró – RN, obtida no site do INMET, sendo essa a maior série temporal disponível na região. Os dados foram devidamente tratados e analisados a fim de expurgar valores discrepantes e representar anos típicos, reduzindo a amostra e possibilitando a modelagem.

A análise foi feita inicialmente pela inspeção visual da adesão de diversas distribuições de probabilidade ao histograma de dados. Em seguida, as distribuições foram avaliadas pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e a função de distribuição de valores extremos generalizados apresentou resultados superiores comparado a distribuições como a Weibull, a logística e a de valores extremos.

Os resultados apresentados, apesar de serem empíricos, corroboram com estudos que destacam o potencial solar da região Nordeste. Além disso, salienta-se representação singular do insumo para geração fotovoltaica nessa localidade, visto que a distribuição de valores extremos generalizados é capaz de modelar fenômenos meteorológicos como inundações, tsunamis e terremotos.

Espera-se que esta análise possa contribuir para estudos sobre a confiabilidade dos módulos fotovoltaicos, ou simular a geração distribuída em sistemas utilizando modelos realistas da geração, podendo esses serem considerados como sugestões para trabalhos futuros. Ademais, salienta-se que a metodologia utilizada pode ser adotada para outras fontes intermitentes, como energia eólica, em diferentes localidades, sendo possível avaliar o custo benefício da implantação desse tipo de geração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. **Distributed generation: a definition.** *Electric Power Systems Research*, v. 57, n. 3, p. 195–204, 20 abr. 2001.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. [S. l.], p. 4, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899:** Energia solar fotovoltaica – Terminologia. Brasil: [S. l.], 2013.

ATWA, Y., **Distribution system Planning and Reliability Assessment under High DG Penetration**, University of Waterloo, Ontario Canada, 2010.

BILLINTON, R., **Reliability Considerations in the Utilization of Wind Energy, Solar Energy and Energy Storage in Electric Power Systems**, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Suécia, Junho de 2006.

CAMPOS, H., 1983. **Estatística Experimental Não-Paramétrica.** 4.ed. Piracicaba: Departamento de Matemática e Estatística – ESALQ. 349p.

CARGNELUTTI FILHO, Alberto. **Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul.** *SciELO*, Porto Alegre, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, dez. 2004.

CATALUNHA, M.J.; SEDIYAMA, G.C.; LEAL, B.G.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, A. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.153-162, 2002.

CESAD. **Estatística Aplicada a Química Aplicada.** Disponível em: <https://cesad.ufs.br/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

CORDEIRO, Ilis Nunes Almeida. **MODELO GENERALIZADO DE VALORES EXTREMOS APLICADO PARA IRRADIAÇÃO SOLAR E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS.** 2016. 74 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CUNHA, Lucas Santana da. **Modelos não lineares resultantes da soma de regressões lineares ponderadas por funções de distribuição acumulada**. 2016. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Matemática, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

FONTE, Solar. **On grid x Off grid**. Disponível em: <http://solarfonte.com.br/blog/grid-x-grid>. Acesso em: 05 ago. 2023.

GUIMARÃES, D. P; **Uma função hiperbólica de distribuição probabilística de Alta Flexibilidade**. EMBRAPA, 2002, p. 38.

INTELBRAS. **Descubra a diferença entre micro e minigeração de energia solar**. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/micro-e-minigeracao-de-energia-solar>. Acesso em: 03 out. 2023.

LEON-GARCIA, A. **Probability, statistics, and random processes for electrical engineering**. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2008.

MILLINGTON, Nick; DAS, Samiran; SIMONOVIC, Slobodan P. **The Comparison of GEV, Log-Pearson Type 3 and Gumbel Distributions in the Upper Thames River Watershed under Global Climate Models**. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario – Canada, report n 77, set 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2029. [S. l.], p. 393, 2020.

MINITAB. **Distribuições de probabilidades contínuas e discretas**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/21/> Acesso em: 10 set. 2023.

NASCIMENTO, Leonardo Sant' Anna do. **ANÁLISE DE VALORES EXTREMOS DE PARÂMETROS DE RESPOSTA DINÂMICA DE PLATAFORMAS AUTO-ELEVATÓRIAS**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrj, Rio

de Janeiro, 2009.

NETO, M. M. B. Fluxo de carga probabilístico com geração fotovoltaica utilizando estimativa de densidade Kernel. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, 2017.

PAREJA, G. L. A., 2009. **Fluxo de Potência em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Incertezas**, Tese de Doutorado, UESP.

SHAYANI, Rafael Amaral. **ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA NECESSIDADE DE REFORÇO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO PARA CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: Cbens, 2018. p. 1-7.

SOLAR, Portal. **Quem Criou a Energia Solar? História da Energia Solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>. Acesso em: 03 out. 2023.

SOUZA, Jeane Silva de. **AJUSTES DE FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE AOS INSUMOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Cbens, 2020. p. 1-11.

STINE, W. B.; GEYER, M. Power From The Sun. [s.l: s.n].

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Epe, 2016.

ZAPATA, C. J., 2005. **Análisis Probabilístico Y Simulación Colombia**: Universidade Tecnológica de Pereira, Pereira.