



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS FORTALEZA*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

FRANCISCO LUCAS DO NASCIMENTO LOPES

ESTUDO DE PREDIÇÃO DA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO EÓLICA E
FOTOVOLTAICA DO ESTADO DO CEARÁ

FORTALEZA

2024

FRANCISCO LUCAS DO NASCIMENTO LOPES

ESTUDO DE PREDIÇÃO DA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO EÓLICA E
FOTOVOLTAICA DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino.

FORTALEZA

2024

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L864e Lopes, Francisco Lucas do Nascimento.
 Estudo de predição da potencialidade de geração eólica e fotovoltaica do Estado do Ceará / Francisco
 Lucas do Nascimento Lopes. - 2025.
 160 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Aperfeiçoamento de Professores para a Educação
 Inclusiva, Campus Fortaleza, 2025.
 Orientação: Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino.

 1. Energia eólica. 2. Energia solar. 3. Mudanças Climáticas. 4. Sistema de Telecomunicações. I. Título.

CDD 371.9

FRANCISCO LUCAS DO NASCIMENTO LOPES

ESTUDO DE PREDIÇÃO DA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO EÓLICA E
FOTOVOLTAICA DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao curso Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Em Engenharia de Telecomunicações Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovado (a) em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus Fortaleza*

Prof. Dr. Sandro César Silveira Jucá

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus Fortaleza*

Prof. Dr. Sérgio Sousa Sombra

Universidade Estadual do Ceará (UECE) – Centro de Ciência e Tecnologia – CCT

Prof. Dr. José Hugo de Aguiar Sousa

Secretaria Estadual de Educação do Ceará (SEDUC)

A minha família, Francisca Áurea, Sanches
Teixeira e Sanchierry Lopes;

Ao meu grande amigo e companheiro Roberto
Pontes;

E aos meus mestres da pós-graduação.

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Senhor YAHWEH (DEUS), por sua graça e sua bondade.

A minha família, nomeadamente Francisca Áurea do Nascimento, Francisco Sanche Teixeira Lopes e Sanchierry do Nascimento Lopes, por sempre me apoiarem e vibrarem por meu sucesso. Amo vocês.

Ao meu amigo e companheiro Roberto Rodrigues Pontes, por sempre me aconselhar sabiamente e incentivar a ser resiliente.

A minha amiga Melissa Bezerra Conceição, companheira de estudo durante a graduação, especialização e agora no mestrado, agradeço o carinho e a paciência.

Aos meus amigos e colegas dos laboratórios LPDS (Laboratório de Processamento Digital de Sinais) e LEM (Laboratório de Ensaaios Mecânicos) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, por serem presentes e atenciosos comigo durante todo o processo da pós-graduação. Obrigado

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino, por sua atenção, por seu profissionalismo, por seus ensinamentos e lições de vida. Muito obrigado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações – PPGET representado pelo professor coordenador Glendo Guimarães e todos os professores do programa, que muito contribuíram com minha formação acadêmica e me possibilitaram experiências de vivências e oportunidades fantásticas. Agradeço-os. Vocês são verdadeiros mestres.

“Prefiram os meus ensinamentos à prata, e o conhecimento ao puro ouro fino escolhido. Porque melhor é a sabedoria do que as pedras preciosas; nada do que se possa desejar se compara a ela”.

(Provérbios 8:10-11)

RESUMO

Diante da preocupação com o suprimento de recursos energéticos para a manutenção dos serviços de telecomunicações, considerando a relação intrínseca entre as fontes de energia renovável e a crise das mudanças climáticas, esta dissertação tem como objetivo estudar as condições climáticas do estado do Ceará. O intuito é avaliar a potencialidade da capacidade geradora de energia eólica e fotovoltaica por meio de séries temporais com dados extraídos de bancos de dados públicos disponibilizados por órgãos governamentais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Além disso, busca-se identificar os principais desafios para os setores solar e eólico no Estado. Foi adotado um modelo matemático preditivo SARIMA (1,0,0)(0,1,1) para a análise preditiva da eficiência energética eólica para os próximos cinco anos (2024-2028) e um modelo ARIMA (0,1,4) para a análise preditiva da eficiência solar fotovoltaica no mesmo período. Concluiu-se que o Estado do Ceará apresentou mudanças em seu quadro climatológico, no que tange à temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. Nesse sentido, pôde-se concluir que as variações das variáveis meteorológicas temperatura do ar, umidade relativa e velocidade dos ventos podem afetar a eficiência energética da rede de energia elétrica alternativa renovável, utilizada como fonte de alimentação dos sistemas de telecomunicações. No entanto, a geração de energia pelos setores eólico e solar apresenta um crescimento progressivo, com tendências estatísticas de aumento no quantitativo de MW diários gerados por essas fontes.

Palavras-chave: Energia eólica. Energia solar. Mudanças Climáticas. Sistema de Telecomunicações.

ABSTRACT

Given the concern about the supply of energy resources for the maintenance of telecommunications services, considering the intrinsic relationship between renewable energy sources and the climate change crisis, this dissertation aims to study the climatic conditions of the state of Ceará. The aim is to evaluate the potential of the wind and photovoltaic energy generating capacity through time series with data extracted from public databases made available by government agencies, such as the National Institute of Meteorology (INMET) and the National Electric System Operator (ONS). In addition, it seeks to identify the main challenges for the solar and wind sectors in the state. A predictive mathematical model SARIMA(1,0,0)(0,1,1) was adopted for the predictive analysis of wind energy efficiency for the next five years (2024-2028) and an ARIMA(0,1,4) model for the predictive analysis of solar photovoltaic efficiency in the same period. It was concluded that the state of Ceará presented changes in its climate, with regard to temperature, relative humidity and air speed. In this sense, it can be concluded that variations in meteorological variables (air temperature, relative humidity and wind speed) can affect the energy efficiency of the renewable alternative electricity grid, used as a power source for telecommunications systems. However, energy generation by the wind and solar sectors shows progressive growth, with statistical trends of an increase in the amount of daily MW generated by these sources.

Keywords: Wind energy. Solar energy. Climate change. Telecommunications system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diversificação climática do Brasil.....	21
Figura 2 – Mapa de irradiação solar no Brasil.....	25
Figura 3 – Mapeamento do potencial cinético dos ventos no Brasil.....	26
Figura 4 - Ilustração dos limites do estado do Ceará.....	28
Figura 5 – Dados Meteorológicos do Ceará.....	29
Figura 6 – Variação do consumo de energia elétrica para serviços de telecomunicação por estado brasileiro entre abril de 2023 e março de 2024.....	36
Figura 7 – Circulação do vento Atmosférico.....	39
Figura 8 – Características da velocidade vertical dos ventos.....	41
Figura 9 - (a) Ilustração da estrutura de um aerogerador; (b) Ilustração do processo de conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica.....	44
Figura 10 – (a) Ilustração dos tipos de Aerogeradores quando a sua configuração de eixo; (b) Ilustração da classificação de aerogeradores com eixo horizontal quanto a sua configuração de incidência do vento.....	45
Figura 11 – Geometria G de um corpo atravessada por um fluido.....	46
Figura 12 – Dopagem do Silício com Boro e Fósforo.....	50
Figura 13 – Representação de uma célula solar de Silício.....	50
Figura 14 – Ilustração da geração solar fotovoltaico on-grid.....	52
Figura 15 – Representação da tendência de uma série temporal.....	57
Figura 16 - Exemplo de correlações lineares, não- lineares e não relacionadas.....	58
Figura 17 – Exemplo da representação gráfica de uma regressão linear.....	59
Figura 18 - Cabos de conexão de internet no mar de Fortaleza -Ce.....	64
Figura 19 - Regiões de Planejamento do estado do Ceará.....	15
Figura 20 - Planilha dos dados meteorológicos.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking Mundial de geração de energia fotovoltaica em 2022	24
Tabela 2 – estados brasileiros que mais produziram energia fotovoltaica	25
Tabela 3 - Ranking dos países que mais produziram energia eólica em 2022	26
Tabela 4 – Indicadores de produção de energia eólica no Brasil	27
Tabela 5 - Ranking em emissões de GEE por UTEs.....	32
Tabela 6 – Prazo de construção e vida útil das tecnologias energéticas.....	34
Tabela 7 – Valores característicos de z_0	42
Tabela 8 – Classificação dos efeitos do vento	43
Tabela 9 – Fontes de energia por geração distribuída e a quantidade de unidades consumidoras em 2023.	53
Tabela 11 - Principais características das estações meteorológicas utilizadas como sistema de aquisição de dados no Ceará.....	68
Tabela 12 - Valores dos parâmetros estatísticos do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0).....	115
Tabela 13 - Previsão dos possíveis valores para a geração eólica média diária por mês do estado do Ceará.....	117
Tabela 14 - Parâmetros métricos estatísticos do modelo ARIMA (0,1,4).....	120
Tabela 15 - Possíveis valores de geração solar diária média mensal no Ceará para os anos de 2024-2028	121

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Histórico e dados de previsão da produção de energia renovável no mundo	19
Gráfico 2 - Geração de eletricidade por tipo de tecnologia de energia renovável 2000 - 2028	20
Gráfico 3 – Diversidade das fontes de energia que compuseram a matriz elétrica brasileira em 2022	22
Gráfico 4 – Comparação de geração por fonte de energia	23
Gráfico 5 – Média da temperatura diurna e noturna em cada mês durante o ano no estado do Ceará.....	30
Gráfico 6 – Fontes renováveis de energia no estado do Ceará.....	31
Gráfico 7 -- (a) Consumo energético do Brasil entre 2014 e início de 2024; (b) variação do consumo energético do Brasil entre 2014 e início de 2024.....	35
Gráfico 8 – Consumo de energia elétrica no Brasil em telecomunicações no período de abril de 2023 a março de 2024.....	36
Gráfico 9 – Variação do consumo de energia elétrica anual do estado do Ceará entre os anos 2023 e 2024	37
Gráfico 10 - Emissões de CO ₂ ao longo do ciclo de vida das tecnologias de geração	38
Gráfico 11 – Volume importado [MWp] de módulos fotovoltaicos para geração centralizada e distribuída	51
Gráfico 12 - Velocidade média dos ventos em Fortaleza - CE (2013-2023)	71
Gráfico 13 - Série temporal da temperatura de Fortaleza - CE (2013-2023)	72
Gráfico 14 - Umidade relativa de Fortaleza - CE (2013-2023).....	73
Gráfico 15 - Precipitação pluviométrica em Fortaleza - CE (2013-2023)	73
Gráfico 16 - Radiação solar global em Fortaleza -CE (2013-2023).....	74
Gráfico 17 - Velocidade dos Ventos em Sobral - CE (2013-2023).....	75
Gráfico 18 - Série temporal da temperatura do ar em Sobral (2013-2023).....	75
Gráfico 19 - Umidade relativa do ar em Sobral (2013-2023)	76
Gráfico 20 - Série temporal da radiação solar global horária em Sobral - CE (2013-2023)....	76
Gráfico 21 - Precipitação pluviométrica em Sobral -CE (2013-2023).....	77
Gráfico 22 - Série temporal da velocidade dos ventos em Guaramiranga - CE (2013-2023)..	77
Gráfico 23 - Série temporal da temperatura de Guaramiranga - CE (2013-2023)	78
Gráfico 24 - Série temporal da umidade relativa em Guaramiranga - CE (2013-2023)	78
Gráfico 25 - Radiação solar global em Guaramiranga - CE (2013-2023).....	79
Gráfico 26 - Precipitações pluviométricas em Guaramiranga - CE (2013-2023)	79

Gráfico 27 - Série temporal da velocidade vos ventos em Barbalha - CE (2013-2023)	80
Gráfico 28 - Série temporal da temperatura de Barbalha - CE (2013-2023).....	80
Gráfico 29 - Série temporal da umidade relativa em Barbalha (2013-2023)	81
Gráfico 30 - Série temporal da radiação solar global em Barbalha (2013-2023).....	81
Gráfico 31 -Precipitação pluviométrica em Barbalha (2013-2023)	82
Gráfico 32 - Série temporal da velocidade dos ventos em Iguatu (2013-2023).....	82
Gráfico 33 - Série temporal da temperatura do ar em Iguatu- CE (2013-2023).....	83
Gráfico 34 - Série temporal da umidade relativa do ar em Iguatu (2013-2023)	83
Gráfico 35 - Radiação solar global em Iguatu (2013-2023).....	84
Gráfico 36 - Precipitação pluviométrica em Iguatu (2013-2023).....	84
Gráfico 37 - Velocidade do vento em Tauá (2013-2023).....	85
Gráfico 38 - Temperatura de Tauá (2013-2023)	85
Gráfico 39 - Umidade relativa de Tauá (2013-2023)	86
Gráfico 40 - Radiação solar global em Tauá (2013-2023)	86
Gráfico 41 - Precipitações pluviométricas em Tauá (2013-2023).....	87
Gráfico 42 - Velocidade dos ventos em Quixeramobim (2013-2023)	87
Gráfico 43 - Temperatura de Quixeramobim (2013-2023)	88
Gráfico 44 - Umidade relativa do ar em Quixeramobim (2013-2023).....	88
Gráfico 45 - Série temporal da radiação solar em Quixeramobim (2013-2023).....	89
Gráfico 46 - Precipitação pluviométrica em Quixeramobim (2013-2023).....	89
Gráfico 47 - Série temporal da velocidade dos ventos em Morada Nova (2013-2023).....	90
Gráfico 48 - Série temporal da Temperatura em Morada nova (2013-2023).....	90
Gráfico 49 - Série temporal da umidade relativa de Morada Nova (2013-2023).....	91
Gráfico 50 - Série temporal da radiação solar global de Morada Nova (2013-2023)	91
Gráfico 51- Precipitação pluviométrica em Morada Nova (2013-2023).....	92
Gráfico 52 - Velocidade dos ventos em Jaguaruana (2013-2023).....	92
Gráfico 53 - Temperatura de Jaguaruana (2013-2023)	93
Gráfico 54 - Umidade relativa do ar de Jaguaruana (2013-2023)	93
Gráfico 55 - Radiação solar global em Jaguaruana (2013-2023)	94
Gráfico 56 - Precipitações pluviométricas em Jaguaruana (2013-2023).....	94
Gráfico 57 - Velocidade média dos ventos em Crateús (2013-2023).....	95
Gráfico 58 - Temperatura do ar média de Crateús (2013-2023)	95
Gráfico 59 - Umidade relativa média do ar de Crateús (2013-2023)	96
Gráfico 60 - Radiação solar global em Crateús (2013-2023).....	96

Gráfico 61 - Precipitação pluviométrica em Crateús (2013-2023).....	97
Gráfico 62 - Série temporal da velocidade média dos ventos em Campos Sales (2013-2023)	97
Gráfico 63 - Temperatura do ar em Campos Sales (2013-2023).....	98
Gráfico 64 - Umidade relativa do ar em Campos Sales (2013-2023)	98
Gráfico 65 - Radiação solar global de Campos Sales (2013-2023).....	99
Gráfico 66 - Precipitação pluviométrica em Campos Sales (2013-2023)	99
Gráfico 67 - Velocidade média dos ventos em Jaguaribe (2013-2023)	100
Gráfico 68 - Temperatura do ar em Jaguaribe (2013-2023).....	100
Gráfico 69 - Umidade relativa do ar em Jaguaribe (2013-2023).....	101
Gráfico 70 - Radiação solar global em Jaguaribe (2013-2023).....	101
Gráfico 71 - Precipitações pluviométricas em Jaguaribe (2013-2023)	102
Gráfico 72 - Velocidade média dos ventos de Itapipoca (2013-2023).....	102
Gráfico 73 - Temperatura do ar em Itapipoca (2013-2023)	103
Gráfico 74 - Umidade Relativa do ar em Itapipoca (2013-2023).....	103
Gráfico 75 - Radiação solar global em Itapipoca (2013-2023)	104
Gráfico 76 - Precipitação pluviométrica em Itapipoca (2013-2023).....	104
Gráfico 77 - Velocidade dos ventos em Acaraú (2013-2023).....	105
Gráfico 78 - Temperatura do ar em Acaraú (2013-2023).....	105
Gráfico 79 - Umidade relativa do ar em Acaraú (2013-2023)	106
Gráfico 80 - Radiação solar global em Acaraú (2013-2023)	106
Gráfico 81 - Precipitações pluviométricas em Acaraú (2013-2023)	107
Gráfico 82 - Série temporal do consumo de energia elétrica do estado do Ceará no período de 2013 a 2023	108
Gráfico 83 - Decomposição da série temporal do consumo de energia elétrica do Ceará entre os anos de 2013 e 2023	108
Gráfico 84 - Variação do consumo de energia elétrica para o setor comercial de serviços de telecomunicações no estado do Ceará entre os meses de julho de 2023 e junho de 2024	110
Gráfico 85 - Geração de energia elétrica no Ceará de 2013 a 2023	111
Gráfico 86 - Série temporal da geração eólica média diária por mês do estado do Ceará (2013 - 2023).....	111
Gráfico 87 – Série temporal da geração média diária por ano da geração eólica do estado do Ceará (2013-2023).....	112
Gráfico 88 - Decomposição da série temporal de geração eólica anual do estado do Ceará (2013-2023).....	112

Gráfico 89 - Geração de energia solar média diária média por mês (2019-2023).....	113
Gráfico 90 - Série temporal da Geração de energia solar no estado do Ceará (2019-2023) ..	114
Gráfico 91 - Série temporal do modelo preditivo SARIMA (1,0,0)(1,1,0) para a geração eólica do Ceará entre (2024-2028).....	115
Gráfico 92 - Gráfico diagnóstico estático dos resíduos do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0).	116
Gráfico 93 - Gráfico PACF do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0).....	117
Gráfico 94 - Série temporal do modelo predito ARIMA (0,1,4) para a geração de energia solar no estado do Ceará para os anos de 2024-2028.....	119
Gráfico 95 - Diagnóstico estatístico para o modelo ARIMA (0,1,4)	120
Gráfico 96 - Análise da autocorrelação do modelo ARIMA (0,1,4)	121

LISTA DE SIGLAS

AEEE	Anuário Estatístico de Energia Elétrica
ANATEL	Agência Nacional Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCS	Captura e Armazenamento do Carbono (do inglês <i>carbon capture and storage</i>).
CIPP	Complexo Industrial Portuário do Pecém
CO ₂ e	Dióxidos de Carbono equivalente
COBEI	Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações
CTGÁS-ER	Centro de Tecnologia do Gás e Energia Renovável
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases do Efeito Estufa
GW	Gigawatt
IEA	Agência Internacional de Energia
IEC	Comitê internacional de Eletrotécnica
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégias Econômicas do Ceará
KWh	Quilowatt-hora (10 ³ Watt-hora)
LGT	Lei Geral de Telecomunicações
MP	Material Particulado
MWh	Megawatt-hora (10 ⁶ Watt-hora)
MWp	Megawatt-pico (10 ⁶ Watt-pico)

NO _x	Óxidos de Nitrogênio
SO _x	Óxidos de Enxofre
TWh	Terawatt-hora (10^{12} Watt-hora)
UTE	Usina Termoelétrica de Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização da importância das energias renováveis.....	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 Estrutura da dissertação	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Energia Renovável.....	17
2.2 Desenvolvimento tecnológico do setor energético sustentável	19
2.3 Geração de energia renovável no Brasil e suas tecnologias	21
2.4 O Estado do Ceará e sua potencialidade energética	27
2.5 Vida útil das tecnologias de geração energética	34
2.6 O consumo de energia no Brasil e no estado do Ceará	34
2.7 O desenvolvimento do setor energético elétrico e as mudanças climáticas	37
2.8 Geração de Energia Eólica	38
2.8.1 O vento	38
2.8.2 Turbinas eólicas	43
2.8.3 A potência extraída dos ventos	46
2.8.4 Normalização Técnica para o aproveitamento eólico.....	47
2.9 Energia Solar Fotovoltaica	49
2.9.1 Efeito Fotovoltaico	49
2.9.2 Placa solares	51
2.9.3 Geração Distribuída.....	52
2.9.4 Normatização da geração de energia elétrica solar.	54
2.10 Modelos matemáticos de previsão	55
2.10.1 Séries temporais.....	56
2.10.2 Autocorrelação.....	60
2.10.3 Ruído branco	61
2.10.4 Modelo matemático ARIMA.....	62

2.10.5 Modelo matemático SARIMA.....	63
2.11 Sistema de Telecomunicação no Ceará	63
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1 Pesquisa Bibliográfica	13
3.2 Coleta de Dados.....	14
3.3 Tratamento dos dados.....	68
3.4 Software de plotagem das séries temporais.....	69
3.5 Códigos para séries temporais	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 Condições meteorológicas.....	71
4.1.1 Fortaleza	71
4.1.2 Sobral.....	74
4.1.3 Guaramiranga	77
4.1.4 Barbalha.....	80
4.1.5 Iguatu	82
4.1.6 Tauá	84
4.1.7 Quixeramobim.....	87
4.1.8 Morada Nova	89
4.1.9 Jaguaruana	92
4.1.10 Crateús	94
4.1.11 Campos Sales.....	97
4.1.12 Jaguaribe.....	99
4.1.13 Itapipoca	102
4.1.14 Acaraú.....	104
4.2 Consumo de energia elétrica do estado do Ceará.....	107
4.2 Geração de energia elétrica no estado do Ceará.....	110
4.2.1 Geração de energia eólica no estado do Ceará	111
4.2.2 Geração de energia solar no estado do Ceará.....	113
4.3 Predição de geração eólica energética no estado do Ceará	114
4.4 Predição de geração solar energética no estado do Ceará.....	119
5 CONCLUSÃO.....	124
5.1 Trabalhos futuros.....	125
REFERÊNCIAS	126

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da importância das energias renováveis

Diante do crescimento populacional mundial, a humanidade depara-se com um desafio historicamente polêmico tangente ao enfrentamento da incerteza da disponibilidade futura de energia para suprir as demandas cotidianas, dada sua atual dependência da energia para ações e processos essenciais. O fator agravante ao desafio se dá ao amplo uso de fontes não renováveis (fontes de matrizes fósseis e minerais) que possuem reservas limitadas, além da exploração em alta escala dos recursos naturais fornecidos pelo planeta causando desequilíbrio ambiental e provocando consequências adversas como a degradação de habitats, perda da biodiversidade e mudanças climáticas (Mauad; Ferreira; Trindade, 2017).

Com o foco em reduzir os impactos ambientais e sociais negativos, as fontes de energia renováveis têm ganhado prioridade emergente no planejamento energético global. Embora que fontes de energia renováveis não sejam contínuas, isto é, dependem das condições climáticas ou ainda da localização geográfica, podendo exigir grandes proporções de terra para as suas instalações, sua eficiência energética é notória e inegável, representando uma alternativa sustentável e economicamente viável aos combustíveis fósseis (Bondarik; Pilatti; Horst, 2018).

No Brasil, assim como no resto do mundo, políticas públicas que visam a promoção do fornecimento e do uso consciente e sustentável da energia foram validadas para garantir o crescimento econômico substancialmente elementar ao desenvolvimento da produção industrial e o bem-estar da população através dos recursos energéticos. Para isso, reconheceu-se a necessidade da exploração de fontes de energia com baixas emissões de gases do efeito estufa. Contudo, mesmo possuindo histórico evidente nesse segmento político do setor energético sustentável, destacadamente desde 1970 com os programas nacionais “Proálcool” e “Proinfa” além da matriz energética diversificada utilizando dos recursos naturais (Da Paixão; De Miranda, 2018), a oferta energética total brasileira, incluindo as fontes renováveis, ainda gera motivos de cautela. Exemplo disso, pode-se citar a crise energética que o Brasil sofreu em 2001 e 2021, dos quais impactaram negativamente a economia nacional influenciando vetores sociais como a saúde, a educação, a segurança pública, meios de comunicação e ao desenvolvimento humano.

Considerando a participação majoritária de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira de aproximadamente 83,44%, dos quais, 53,88% são equivalentes à geração hidráulica, 24,7% à termelétrica, 13,12% à eólica, 8,6% à geração de outras fontes renováveis,

incluindo a geração de energia por biomassa, geração elétrica distribuída (majoritariamente proveniente de painéis solares) e pequenas centrais de hidrelétricas (Brasil, 2023; Brasil, 2022), pode-se associar a crise de energia elétrica nos anos de 2001 e 2021 a excessiva dependência das hidrelétricas em períodos de escassez de chuvas no país (Borges, 2021; Teixeira; Da Silva, 2021).

Segundo Flores (2023) e Vieira (2021), a relação entre o consumo energético das demandas do ciclo produtivo frente ao setor econômico nacional e ao desenvolvimento tecnocientífico é estreitamente tênue pelo fato de não ser estática, isto é, no processo dinâmico das necessidades dos agentes do ciclo produtivo há exigências de intensa utilização de energia elétrica, bem como nos processos de desenvolvimento tecnológico, o que acarretam consequentemente maior demanda energética, porém, a tendência mundial é a redução do consumo energético. Para isso, investimentos em tecnologias do setor energético em soluções fotovoltaicas, eólicas e biomateriais contribuem diretamente e irreversivelmente para uma realidade sustentável economicamente viável.

Com os recursos eólicos e solares emergindo em destaque nas pesquisas para o setor de gestão e planejamento energético nacional devido seus inúmeros benefícios que colaboram com os interesses econômicos e ambientais do país (Sampaio; Batista, 2021), esse trabalho aborda uma análise da capacidade do Estado do Ceará em geração de energia solar fotovoltaica e eólica e como essas fontes de energia podem ser integradas à rede de telecomunicações existente.

1.2 Justificativa

A legislação brasileira, através da Lei Geral de Telecomunicações (LGT), LEI Nº 9472, de 16 de julho de 1997, e das resoluções da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), Resolução Nº 750, de 15 de março de 2022, prevê a garantia do direito do usuário dos serviços de telecomunicações a oferta contínua e ininterrupta, com padrões de qualidade e regularidade adequada à sua natureza ao acesso à rede de telecomunicações. Entretanto, para que os serviços de telecomunicações sejam ofertados de forma ininterrupta é necessário que haja uma rede de abastecimento elétrico confiável.

Interrupções no fornecimento do abastecimento elétrico podem causar discontinuidades na oferta de serviços na rede de telecomunicações acarretando irregularidades adversas em várias operações de comunicações industriais, como atrasos na transmissão ou perdas de dados, além de desarranjar serviços públicos essenciais e isso pode resultar em danos financeiros para empresas e indústrias, além de transtornos aos usuários desses serviços.

Portanto, mediante a forte dependência da rede de telecomunicações ao abastecimento seguro e contínuo de energia elétrica, é crucial a oferta de meios que possam agregar de maneira alternativa ou complementar ao abastecimento ininterrupto de energia elétrica. E isso inclui o estudo do aproveitamento dos recursos naturais para fonte de energia renováveis, como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, que podem fornecer energia sustentável e reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis.

Ao implementar um sistema integrado de armazenamento e gerenciamento de energia, que diversifica as fontes de energia, pode-se aumentar significativamente a resiliência da rede de telecomunicações a flutuações e interrupções no fornecimento de energia. Esta estratégia de diversificação não apenas fortalece a estabilidade da rede, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental.

Portanto, estudos sobre o desenvolvimento em tais áreas emergem como de vital importância, desempenhando um papel crucial na estimativa da análise de viabilidade da garantia da confiabilidade e qualidade dos serviços de telecomunicações.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a capacidade de geração de energia elétrica a partir da energia solar fotovoltaica (FV) e eólica como fontes integradas à rede de telecomunicações do Estado do Ceará. A pesquisa busca entender a viabilidade dessas fontes de energia, considerando fatores como a disponibilidade de recursos naturais, a eficiência das tecnologias de geração de energia e a infraestrutura existente para a distribuição de energia. Além disso, a pesquisa pretende identificar os benefícios potenciais e os desafios associados à utilização dessas fontes de energia para o abastecimento da rede de telecomunicações.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta dissertação, destaca-se

- Avaliar a capacidade do Estado do Ceará para a geração de energia eólica e solar. Isso envolverá a coleta e análise de dados sobre a velocidade do vento, a radiação solar e outros fatores relevantes em diferentes regiões do estado.

- Investigar a viabilidade de integrar a energia eólica e solar à rede de telecomunicações existente. Isso incluirá uma análise dos desafios técnicos, regulatórios e econômicos associados à implementação dessas tecnologias de energia renovável.
- Desenvolver recomendações para políticas e práticas que possam promover a utilização de energia eólica e solar na rede de telecomunicações. Isso será baseado nos resultados da pesquisa e poderá incluir sugestões para melhorias na infraestrutura, incentivos para a adoção de energia renovável e estratégias para superar os desafios identificados.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No capítulo 1, são apresentadas falas introdutórias que contextualizam a transcendência das fontes de energia renováveis concernentes ao fluxo de demanda e consumo de energia elétrica. O objetivo é evidenciar a necessidade de uma abordagem em contraste as fontes fósseis, que agravam as mudanças climáticas e geram efeitos danosos em vetores de estruturas socioeconômicas e ambientais, e apontar as fontes de energia eólica e solar como possíveis meios para aumentar a resiliência da rede elétrica de abastecimento para o sistema de telecomunicações.

No capítulo dois são apresentadas as bases teóricas sobre a imprescindibilidade das tecnologias energéticas na frente ao consumo de energia descarbonizado e eficiente, evidenciando também o resumo dos apontamentos das literaturas científicas no que diz respeito a potencialidade energética do Ceará e seus desafios no setor eólico e solar fotovoltaico.

No capítulo três tem-se a descrição da metodologia abordada para a construção desse estudo e no capítulo quatro tem-se os resultados obtidos, com análises de gráficos e discussões sobre a previsão de geração eólica e solar no Estado do Ceará para os próximos cinco anos.

Já no capítulo cinco é apresentado as conclusões dessa pesquisa, contendo propostas para o enfrentamento dos desafios da geração eólica e solar e o apontamento de possíveis soluções para o fortalecimento da rede de abastecimento elétrico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia Renovável

A energia, segundo os conceitos da Física, é uma entidade abstrata que está relacionada ao estado dinâmico de um sistema, ou seja, uma grandeza física que está associada intrinsecamente a capacidade de geração de movimento ou promover a transformação de algo. Sua expressão é concebida pela forma em que está se manifestando, por exemplo, energia cinética (associada ao movimento), energia potencial (associada a posição de um corpo dentro de um campo de força), energia térmica (associada ao grau de agitação molecular da matéria), energia elétrica (associada ao movimento ordenado de partículas portadoras de carga elétrica em um circuito), entre outras (Hewitt, 2015; Conceito, 2020).

As fontes de energia são conceituadas como recursos naturais na forma de insumo bruto que possuem a capacidade de produzir energia de maneira direta (primária) ou indireta (secundária). As fontes de energia primárias disponíveis na natureza são categorizadas como renovável (exemplo: geotérmica, hidrelétrica, solar fotovoltaica, eólica, biomassa, marés e oceanos) e não renovável (exemplo: petróleo, gás natural, carvão mineral e fontes de energia nuclear) (Camilo, 2018).

De acordo com Marques (2010), a energia atua como agente de impacto social, econômico e ambiental. Segundo Vieira (2022), ao longo da história, diferentes tipos de energia foram utilizados para satisfazer as necessidades da humanidade. Inicialmente, o domínio do fogo conferia poder a quem o continha, com o passar dos anos, com o avanço das tecnologias energéticas e o aumento da população, o petróleo passou a ser explorado em escala global para diversas finalidades, mas a principal era a geração de energia e isso propiciou um sistema econômico complexo e estruturado embasado no petróleo e o fez parte significativa da matriz energética global.

Segundo Azevedo (2021) e Alqattan et al (2018), há estimativas que até o ano de 2030 o petróleo ainda seja responsável por 35% da matriz energética mundial. Porém, o consumo de fontes fósseis representa ameaças severas e drásticas para o meio ambiente, influenciando mudanças climáticas e produzindo gases do efeito estufa (GEE).

Mousinho, Torres, Melo e Janardhanan (2017), afirmam categoricamente que mediante do aumento do consumo energético mundial com a elevada demanda do suprimento das necessidades de uma população de mais de sete bilhões de pessoas, com o consumo energético

dos países em desenvolvimento e os impactos danosos da mudança climática global é impossível não ver a grande crise energética emergente.

De acordo com Montañez (2020), no começo da década de 90, mais de 60% das emissões de GEE foram atribuídos exclusivamente a produção de energia elétrica, o que acarretou discussões internacionais com a finalidade da sustentabilidade energética e a preservação do meio ambiente. Acordos como o protocolo de Kyoto, estratégia Europa 2020 e o acordo de Paris foram elaborados visando a mitigação dos impactos ambientais nocivos através do incentivo da produção de energia limpa, cuja potencialidade de produção, considerando todas as formas diferentes de fontes de energia renovável juntas, podem cobrir até 3078 vezes o consumo de energia mundial.

Segundo a Agência de Energia Internacional (IEA) (2023), a energia extraída de fontes renováveis é substancial para a transição de um sistema energético nocivo e degradante ao meio ambiente para um sistema energético mais sustentável e descarbonizado contribuindo com a luta contra as mudanças climáticas. Iniciativas políticas e reduções de custos beneficiaram o aumento na produção de energia por meio de fontes renováveis, particularmente as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica.

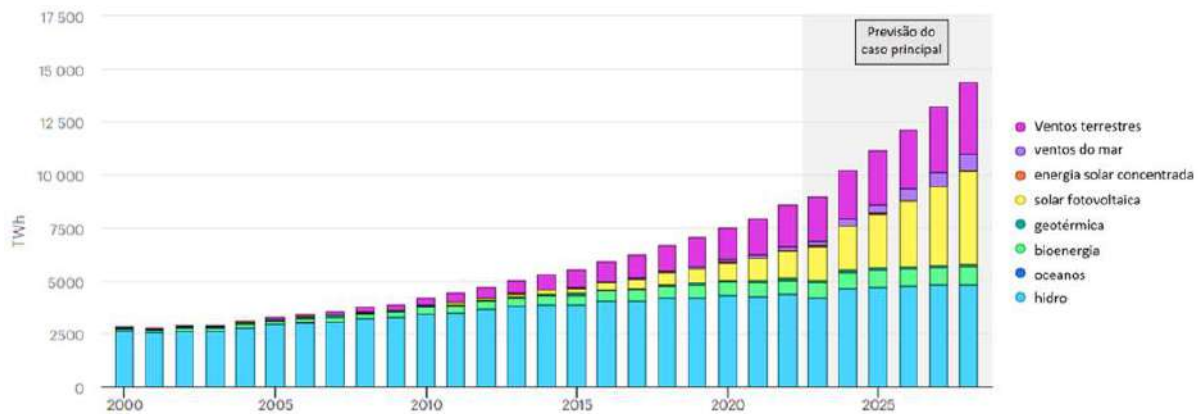
De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023), a matriz energética global em 2021 ainda era majoritariamente de fontes não renováveis (petróleo, carvão mineral e gás natural). Fontes renováveis como eólica, solar fotovoltaica e geotérmicas correspondiam a aproximadamente 2,7% da matriz energética global.

Porém, de acordo com o rastreador do progresso de produção de energia renovável mundial da IEA (2023), a geração de energia renovável tem crescido nos últimos 20 anos e com previsão de avanço progressivo para os próximos anos. No Gráfico 1 estão expostas a linha histórica e projetiva da produção de energia renovável no mundo.

Com o avanço real da utilização de fontes renováveis, o ano de 2023 sinalizou o marco significativo de transição para um sistema energético sustentável que aponta a expansão das energias renováveis para os próximos cinco anos. Com 50% a mais da capacidade elétrica renovável em relação ao ano de 2022, o ano de 2023 marcou expressiva produção de aproximadamente 507 GW. Esse crescimento no setor energético mundial pode ser explicado pelo fato da expansão anual do mercado chinês de produção de energia solar fotovoltaica (+116%) e energia eólica (66%), com isso, as expectativas é que haja adições progressivas no mercado eólico e solar com novos recordes de 96% de geração mundial de matriz renovável (IEA, 2023).

Ainda de acordo com IEA (2023), a expectativa é que até o ano de 2028 a produção de energia solar e fotovoltaica dupliquem em relação ao montante produzido no ano de 2022 podendo atingir até 710 GW. É válido salientar que, no que tange a produção energética por fontes hídricas e bioenergéticas, a tendência é que haja uma redução nos próximos cinco anos

Gráfico 1 - Histórico e dados de previsão da produção de energia renovável no mundo



Fonte: Adaptado de IEA (2023).

2.2 Desenvolvimento tecnológico do setor energético sustentável

De acordo com Abrão (2022), no tocante ao desenvolvimento das tecnologias do setor de energia renovável, pode-se afirmar que, em vários contextos geopolíticos, o cenário é favorável tanto para a promoção de colaborações internacionais como também para fomentar conflitos. A colaboração entre os países é substancialmente imprescindível para uma resposta eficaz a urgência da transição energética e aos impactos das mudanças climáticas (Keohane; Victor, 2013).

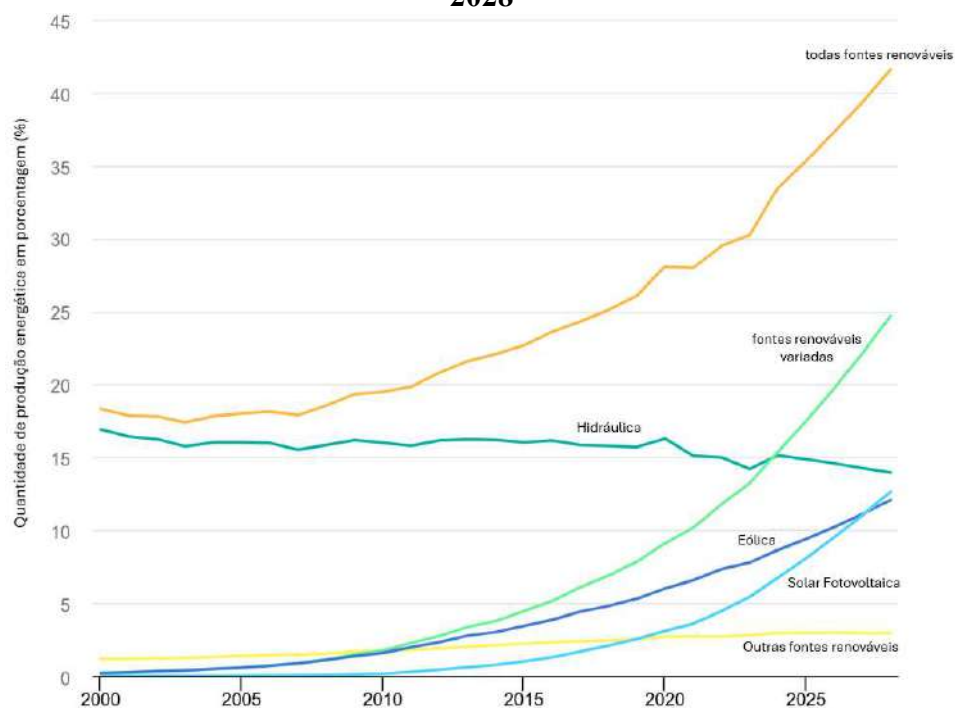
De acordo com Stengen (2018), à medida que as perspectivas da geopolítica mundial da energia renovável são moldadas, evidencia-se que o poder global se inclina em direção aos países que priorizam e investem em tecnologias de produção de energia a partir de fontes renováveis e apresentam autossuficiência, diversificação energética e capacidade de exportação.

De acordo com Criekemans (2018), o processo da evolução tecnológica que influencia a mudança energética está inteiramente ligado a produção de conhecimento e geração de patentes de inovações para o setor sustentável, pois o controle das tecnologias renováveis propicia ao país o domínio do mercado comercial de energia e o seu destaque no cenário

mundial geopolítico gerando grande capital investido com os contratos de empresas do setor de energia renovável.

Com o avanço dos estudos em energia renovável novas tecnologias de produção têm ganhado mais notoriedade impulsionadas pela urgência da corrida mundial pela autossuficiência energética com a pauta da diversificação das fontes de energia com intuito de promover um sistema elétrico resiliente. No Gráfico 2 tem-se a geração de eletricidade por tecnologia de fonte renovável.

Gráfico 2 - Geração de eletricidade por tipo de tecnologia de energia renovável 2000 - 2028



Fonte: Adaptado de IEA (2023).

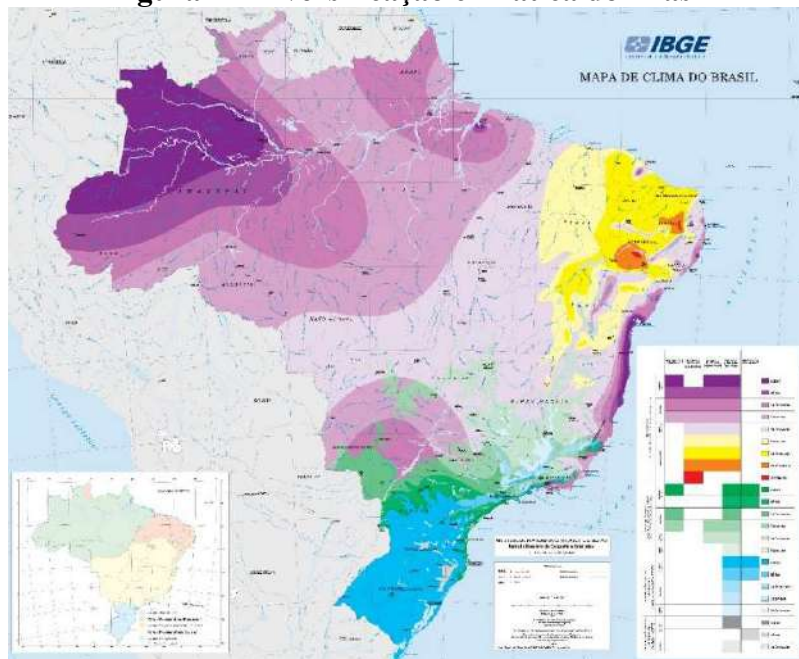
De acordo com as previsões da IEA (2023), em 2024, a tendência é que a produção de energia por meio das fontes eólicas e solar fotovoltaica juntas supere a geração de eletricidade pela fonte hidráulica. Em 2025, com o auge acelerado da exploração dos recursos naturais renováveis, a geração de energia por meio do carvão seja ultrapassada pelas energias renováveis e a energia produzida pelos ventos e solar fotovoltaica ultrapassem, cada uma, a produção de energia nuclear respectivamente em 2025 e em 2026.

Segundo Abrão (2022) e a IEA (2021), potências mundiais como a Europa (28%), Japão (25%) e os Estados Unidos da América (20%) representavam juntas mais de três quartos de todas as patentes globais em inovação de tecnologia de baixo carbono entre os anos 2000 e 2019.

2.3 Geração de energia renovável no Brasil e suas tecnologias

O Brasil é o quinto maior país do mundo em extensão territorial, com expressivos 8.514.876 km² dispõe de uma abundância territorial que o proporciona uma diversidade geográfica e uma variedade climatológica de seis tipos de climas que se manifestam de acordo com as zonas térmicas do planeta Terra, os climas são: equatorial, semiárido, tropical, tropical de altitude, tropical atlântico e subtropical (ver Figura 1). Localizado a oeste do Meridiano de Greenwich, tem a presença da linha do Equador ao seu extremo norte separando sua extensão territorial em 7% pertencentes ao hemisfério Setentrional e 93% pertencentes ao hemisfério Meridional. E ao Sul, é interceptado pelo trópico de Capricórnio onde o segrega em 92% do seu território na zona intertropical e 8% na zona temperada do Sul (Francisco, 2024; Marques, 2024).

Figura 1 - Diversificação climática do Brasil

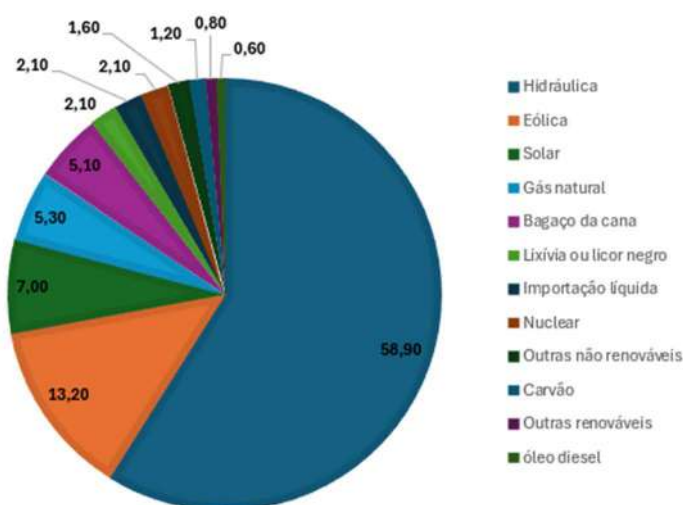


Fonte: IBGE (2024).

Conforme apontado por Araújo et al. (2022) e Silva e Araújo (2022), O Brasil possui condições geográficas e climatológicas favoráveis para a geração de energia renovável, principalmente através das fontes de energia eólica e solar fotovoltaica. De acordo com a empresa de pesquisa energética – EPE (2022), o Brasil se destaca por sua riqueza de diversidade na exploração dos seus recursos naturais em contraste com a matriz energética mundial, isto é, em 2021 o consumo de energia oriundas de fontes renováveis pelo Brasil foi de 44,8% da sua totalidade enquanto apenas 14,7% da matriz energética global eram de fontes renováveis.

No tocante a sua matriz elétrica, o Brasil também tem destaque pelo seu progresso sustentável de diversificação na geração renovável. Mesmo com uma forte dependência dos recursos hídricos em sua matriz elétrica, o Brasil tem explorado e conquistado significativamente o mercado da produção de energia eólica e solar com tendências favoráveis para o crescimento de produção. Outrossim, o país também tem investido em tecnologias de biomassa e biogás, como mostra o Gráfico 3.

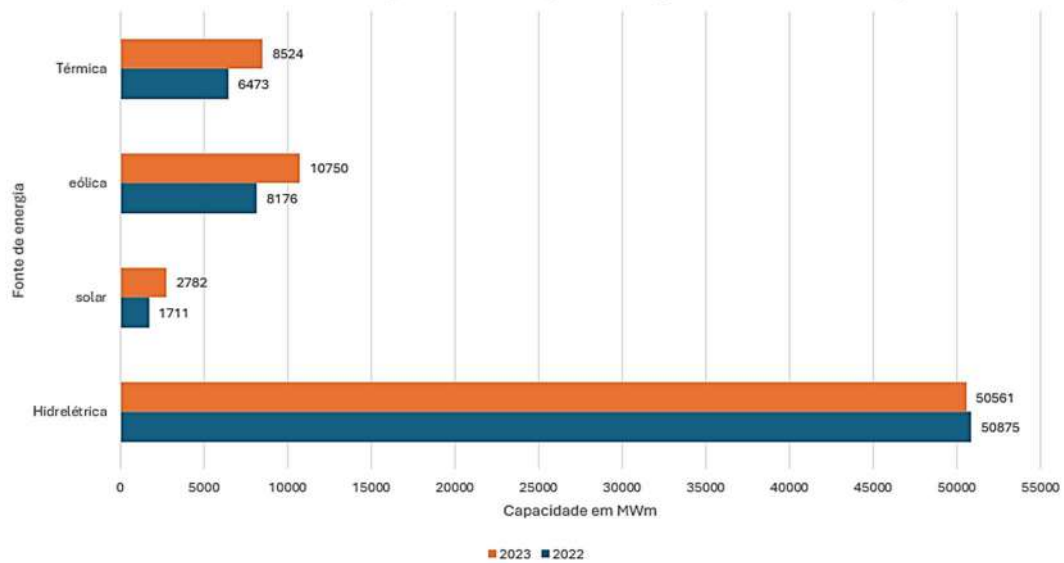
Gráfico 3 – Diversidade das fontes de energia (em porcentagem) que compuseram a matriz elétrica brasileira em 2022



Fonte: EPE (2023).

De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (2024), em 2023, o Brasil alcançou um novo recorde com um quantitativo expressivo de 93,1% da energia elétrica gerada no país por meio de fontes renováveis com uma produção com capacidade de geração 70,2 mil MWm com a forte presença das fontes hidráulicas, eólicas, solares e de biomassa.

O Gráfico 4 apresenta a evolução de produção de energia por meio das fontes eólica, solar, hídrica e térmica na matriz elétrica brasileira do ano de 2023. Nota-se que em relação as fontes de energia eólica e solar houve um aumento de 31% e 63% respectivamente comparado ao quantitativo da produção do ano de 2022. Em relação a geração pelas hidrelétricas, é notório sua colaboração majoritária na matriz elétrica brasileira, porém, entre os anos de 2022 e 2023 a variação da geração de energia é de aproximadamente -1% do qual pode ser justificado pela sazonalidade pluviométrica e reorganização dos recursos hídricos. (CCEE, 2024).

Gráfico 4 – Comparação de geração por fonte de energia

Fonte: Adaptado de CCEE (2024).

Moura (2022) aponta em sua pesquisa que o cenário hídrico brasileiro ainda suscita motivo de cautela e é passivo de implantações de medidas preventivas, pois devido a baixa taxa de precipitações pluviométricas em várias regiões do país, juntamente com a elevação da temperatura potencializada pelo efeito estufa e dos efeitos das mudanças climáticas, o volume da capacidade de armazenamento de água das hidrelétricas está reduzido provocando o fechamento de comportas na barragem e consequentemente diminuindo a produção de energia elétrica.

Soares e Costa (2022), complementam afirmando que a produção de energia por meio de fontes hídricas é uma constituinte importante da matriz elétrica brasileira que beneficia, em partes, ao meio ambiente em relação a uma menor quantidade de emissões de gases do efeito estufa como também ao consumidor pelo seu custo de produção de energia. Entretanto, a excessiva dependência de hidrelétricas compromete o sistema elétrico brasileiro submetendo as condições climáticas, que devido as mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global, afetam o regime de chuvas nas principais bacias do Sudeste brasileiro onde se contra cerca de 70% dos reservatórios do Brasil. Ao compararem as crises energéticas no Brasil nos anos de 2001 e 2021 observaram que ambas se deram por problemas na contabilização entre a oferta e a demanda de energia, cuja primeira culminou em um racionamento e a segunda resultou em tomadas de medidas com alto impacto no valor tarifário imposto aos consumidores contribuintes.

De acordo com Borges (2021), as crises elétricas refletem a ausência de precauções estratégicas com o uso dos recursos energéticos em longo prazo e que no Brasil esse fenômeno tem característica de repercussões culminantes no setor econômico, social, ambiental, tecnológico e na política do país. Dentre os agentes motivadores para as crises elétricas no Brasil pode-se listar a falta de planejamento tático na distribuição do provimento energético, ausência de diversificação das fontes alimentadoras (alternativas e/ou complementares) do sistema elétrico e complicações climáticas.

Para diversificar a matriz elétrica do Brasil, tecnologias de energia renovável como biomassa, energia solar fotovoltaica e energia eólica foram notavelmente consideradas. A variedade dessas tecnologias energéticas confere resiliência e confiabilidade ao sistema elétrico, garantindo uma oferta energética mais ampla. Isso é especialmente útil em condições ambientais e climáticas que podem prejudicar a geração de energia a partir de uma fonte, mas beneficiar outra. Exemplo disso, pode-se observar que nos períodos mais secos do ano, cujo seriam desfavoráveis para a produção de energia por meio das hidrelétricas, são os períodos melhores para captação da energia oriunda dos ventos e da irradiação solar (Silva, 2023).

Em escala mundial, o Brasil ocupa a oitava posição na categoria de gerador de energia fotovoltaica (ver Tabela 1). A posição geográfica entre a linha do Equador e o trópico de Capricórnio, baixos índices pluviométricos, baixas latitudes e expressiva quantidade de espaço para instalações de sistemas de painéis solares são grandes impulsionadores que favorecem a produção de energia fotovoltaica no Brasil.

Tabela 1 - *Ranking* Mundial de geração de energia fotovoltaica em 2022

Classificação	País	Capacidade Instalada
1º	China	392 GW
2º	Estados Unidos	111 GW
3º	Japão	78,8 GW
4º	Alemanha	66,5 GW
5º	Índia	62,8 GW
6º	Austrália	26,7 GW
7º	Itália	25 GW
8º	Brasil	24 GW
9º	Holanda	22,5 GW
10º	Coreia do Sul	20,9 GW

Fonte: adaptado de Borges (2023).

Na Figura 2 tem-se o mapa global de irradiação horizontal média no Brasil onde é possível observar que todas as unidades federativas do país são passíveis de instalações fotovoltaica para o aproveitamento energético. Dentre as regiões do Brasil destacam-se as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste.

Figura 2 – Mapa de irradiação solar no Brasil



Fonte: Pereira et al. (2017).

Os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul lideram no aproveitamento nacional de energia fotovoltaica. Na Tabela 2 tem-se listados os estados brasileiros que mais produziram energia fotovoltaica, onde o Estado do Ceará ocupa a décima posição.

Tabela 2 – estados brasileiros que mais produziram energia fotovoltaica

Classificação	Estado	Capacidade Instalada
1º	Minas Gerais	2.128 MW
2º	São Paulo	1.184 MW
3º	Rio Grande do Sul	1.539 MW
4º	Mato Grosso	843 MW
5º	Santa Catarina	739 MW
6º	Paraná	738 MW
7º	Goiás	653 MW
8º	Rio de Janeiro	596 MW
9º	Bahia	587 MW
10º	Ceará	468 MW

Fonte: adaptado de ABSOLAR (2022).

Em relação ao aproveitamento das energias dos ventos o Brasil ocupa a sexta posição no *ranking* mundial dos países que produzem energia eólica onshore (em terra) com geração de 21,5 GW de capacidade instalada, tornando a fonte eólica a segunda maior fonte de geração de energia renovável do Brasil, atrás apenas da hidráulica (BRASIL, 2022). Na Tabela 3 estão listados os países que compõem o pódio de maiores geradores de energia eólica.

Tabela 3 - *Ranking* dos países que mais produziram energia eólica em 2022

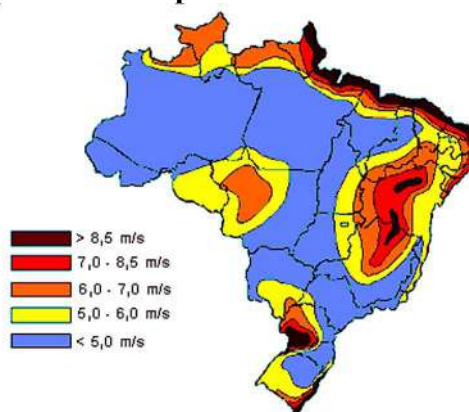
Classificação	País	Capacidade instalada
1º	China	310,6 GW
2º	Estados Unidos	134,3 GW
3º	Alemanha	56,1 GW
4º	Índia	32,8 GW
5º	Espanha	23,2 GW
6º	Brasil	21,5 GW

Fonte: adaptado de Brasil (2022) e GWEC (2022).

Atualmente, o Brasil disponibiliza de 904 parques eólicos em operação em sua extensão territorial de modo que suas localizações são estrategicamente na zona costeira do país devido a contemplação da região com os fortes ventos constantes oriundos do mar.

Na Figura 3 apresenta-se o mapeamento do potencial cinético do vento no território brasileiro gerado a partir de modelagens e simulações computacionais de dados atmosféricos, observa-se que as regiões mais contempladas com rajadas de ventos mais velozes é a região litorânea do Nordeste (Bahia, Ceará, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte) e do Sul (Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio grande do Sul).

Figura 3 – Mapeamento do potencial cinético dos ventos no Brasil



Fonte: Adaptado de EPE (2023).

A região do Nordeste do Brasil é responsável pela produção de 90% da energia eólica produzida pelo país em 2023, destacadamente os estados Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará agregam expressiva concentração de parques eólicos com produtividade dinâmica em áreas de instalações litorâneas e no interior. (Silva, 2023; Freire; Fontgalland, 2022). Na Tabela 4 encontra-se a capacidade instalada e geração de energia eólica por estado brasileiro.

Tabela 4 – Indicadores de produção de energia eólica no Brasil

Estados	MW	Representatividade	Fator de capacidade	Nº de parques instalados
Bahia	7.006,87	29	47,7	258
Rio Grande do Norte	6.855,03	28,4	45,2	225
Piauí	3.428,25	14,2	46	105
Ceará	2.568,34	10,6	39,9	98
Rio Grande do Sul	1.835,89	7,6	35,65	80
Pernambuco	1.025,77	4,3	43,6	39
Paraíba	672,44	2,8	37,34	31
Maranhão	426	1,8	47,33	15
Santa Catarina	242,7	1	27,29	15
Sergipe	34,5	0,1	22,44	1
Rio de Janeiro	28,05	0,1	22,8	1
Paraná	2,5	0	14,99	1
Brasil	24.126,30	100	43,6	869

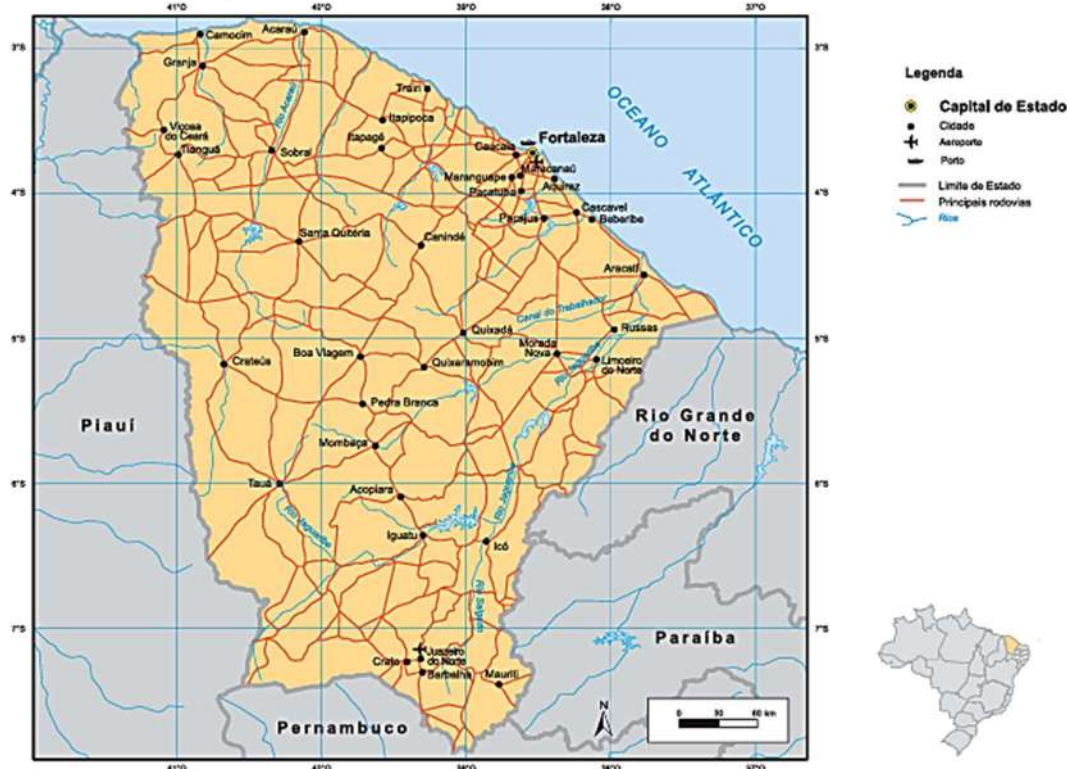
Fonte: adaptado de Silva (2023) e ABEEólica (2023).

2.4 O Estado do Ceará e sua potencialidade energética

O Ceará, um dos estados que compõem a região Nordeste do Brasil, com uma área de aproximadamente de 148.825 km² é delimitado geograficamente pelo Oceano Atlântico ao Norte, pelos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte ao Leste, pelo estado de Pernambuco ao Sul e pelo estado do Piauí ao Oeste (ver Figura 4). Com uma população estimada em 8.791.688 habitantes em 2023, o Ceará se destaca como o terceiro estado mais populoso do Nordeste brasileiro, apresentando uma densidade demográfica de 59,07 habitantes por metro quadrado (Brasil, 2023).

Situado a aproximadamente 3° ao Sul da linha do Equador, na zona intertropical, o Ceará possui um sistema climático complexo, com uma variedade de microclimas locais. A dinâmica atmosférica equatorial, as baixas altitudes, a circulação dos ventos alísios (quentes e úmidos) e dos ventos do Sudeste (quentes e secos) são fatores que influenciam diretamente esses microclimas (Ceará, 2011).

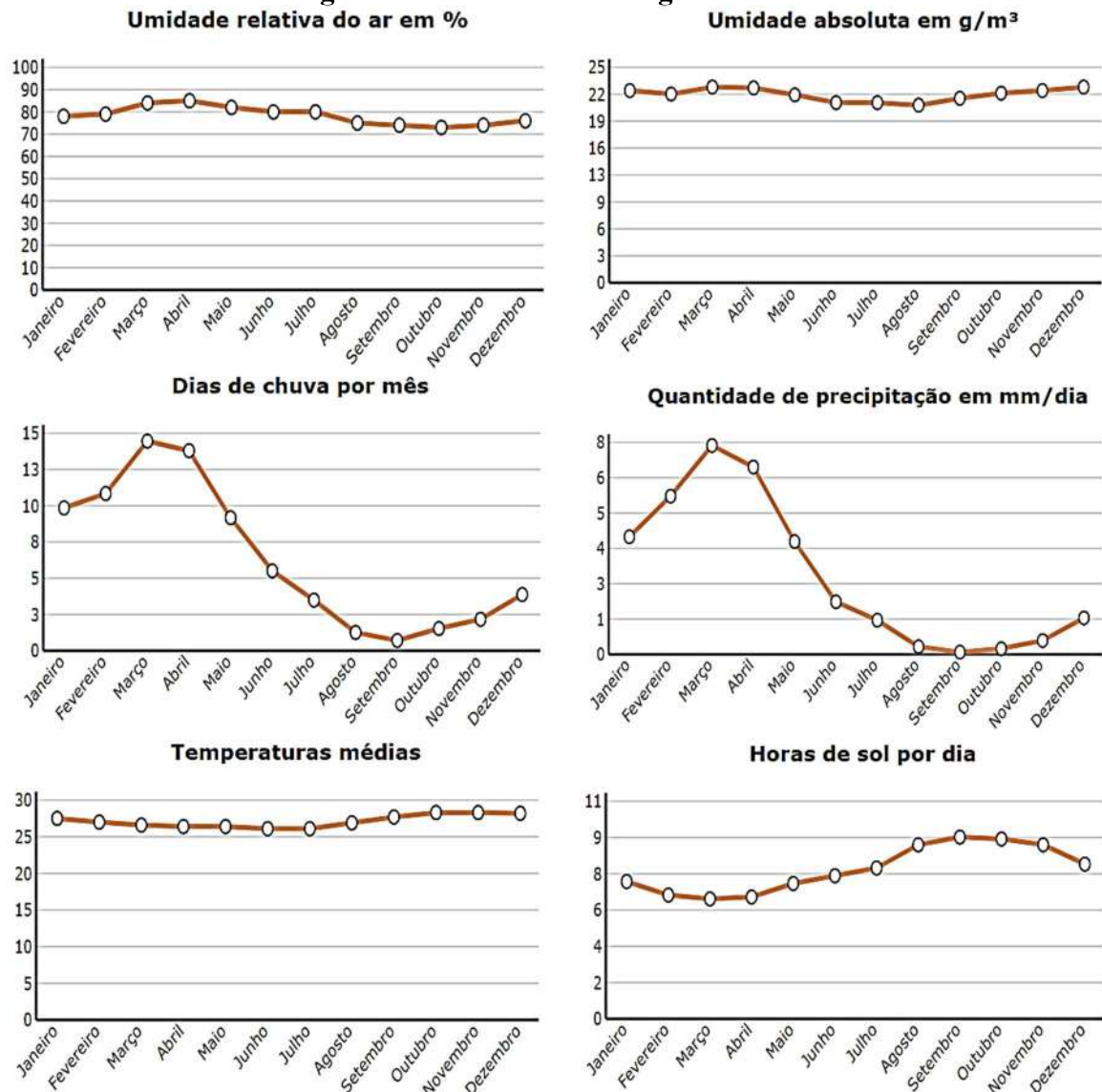
Figura 4 - Ilustração dos limites do estado do Ceará



Fonte: IBGE (2023).

De acordo com Muniz (2017), a classificação climática do estado do Ceará pode ser definida como tropical com inverno seco e Semiárido. Segundo os conceitos físico-climáticos, o Semiárido é caracterizado por medidas térmicas médias elevadas e duas estações definidas como estação seca, onde há poucas precipitações pluviométricas, e estação úmida, quando ocorrem precipitações irregulares variando entre 300 mm e 800 mm de água (Suliano; Magalhães; Soares, 2009; Medeiros-Feitosa; Oliveira, 2020).

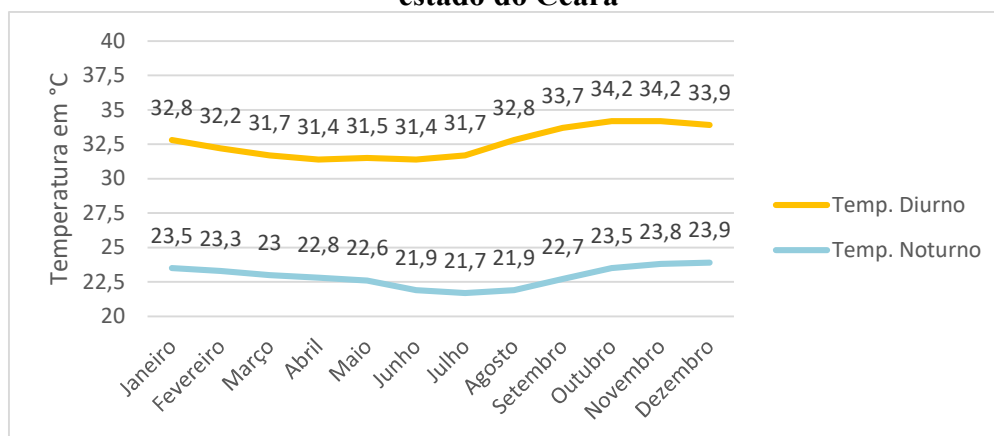
Na Figura 5 apresenta-se os dados médios das variáveis meteorológicas coletados em cinco estações meteorológicas no Ceará da umidade relativa do ar (em porcentagem), da umidade absoluta do ar (em g/m^3), dias de chuva por mês, quantidade de precipitação no mês (em mm/dia), temperatura média durante um dia (24 horas) por mês e horas de exposição solar durante o dia por mês nos últimos 20 anos.

Figura 5 – Dados Meteorológicos do Ceará

Fonte: Dados Mundiais (2023).

O clima no Ceará é caracterizado pelo fenômeno da seca, com temperaturas elevadas, variando em média entre 22 °C e 36 °C. A região apresenta pouca nebulosidade, o que resulta em uma forte taxa de insolação (Ceará, 2011). No Gráfico 5 estão expostas as medidas de temperaturas médias diurnas e noturnas no estado do Ceará correspondentes aos valores médios mensais dos últimos 20 anos.

Gráfico 5 – Média da temperatura diurna e noturna em cada mês durante o ano no estado do Ceará



Fonte: Adaptado de Dados Mundiais (2023).

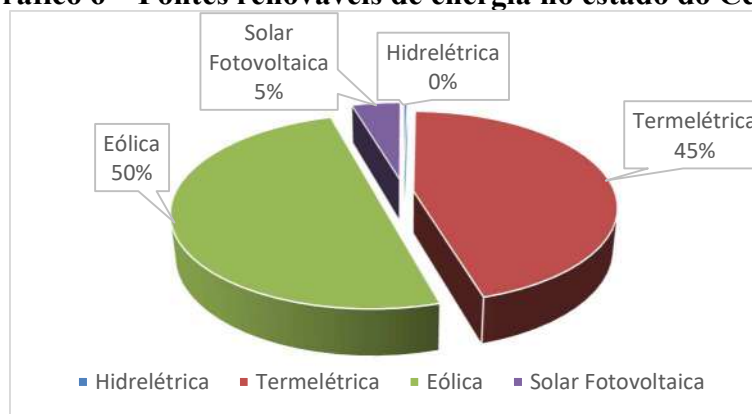
Com características geoambientais e meteorológicas singulares, aliadas à sua localização estratégica na zona intertropical, o estado do Ceará tem se destacado como um local com grande potencial para a exploração de fontes de energia renováveis. Segundo Felipe (2014), o Ceará não possui reservas primárias significativas de recursos hídricos, carvão mineral, petróleo ou gás natural. Contudo, recompensa a falta desses recursos com um notório potencial para produção de energia solar fotovoltaica e eólica (Machado, 2020).

Com aproximadamente 50,16% de capacidade de potência instalada, a geração de energia eólica é predominante no estado, seguida pela produção de energia das usinas termelétricas com potencial instalado equivalente a aproximadamente 45,22% (cujo funcionamento é baseado na queima de óleo diesel (72,2%) e do gás natural (16,6%), além da combustão de outros materiais). A produção de energia por meio da geração solar fotovoltaica tem crescido no Ceará, com um percentual de 4,59% apresenta a tendência de ascensão e popularidade em pequenos geradores domiciliares e pequenas empresas (Paulino; 2021, Leitão; 2019; Ceará; 2018).

A produção de energia por meio de usinas hidrelétricas no Ceará representa 0,03% devido aos recursos hídricos limitados e ao baixo nível de precipitações pluviométricas (Ceará, 2018; Leitão; 2019). Teixeira (2018), complementa salientando que a grande discrepância entre a intensidade pluviométrica (<900mm) interanual é resultado de condições ambientais e geológicas específicas do Ceará, onde se observa também a alta taxa de evaporação (>2000mm) além do fato do estado possuir 80% do seu território composto por rochas cristalinas cobertas por solos rasos que ocasionam a intermitência dos rios.

De acordo com Lira, Melo, Rodrigues e Souza (2019), a rarefação de recursos hídricos no Ceará evidencia a necessidade da diversificação das fontes de abastecimento elétrico para garantir uma oferta segura e contínua do setor energético. Atualmente o estado do Ceará possui empreendimentos de geração de energia de fontes hidráulicas, termelétricas, eólicas e fotovoltaicas (IPECE, 2018). No Gráfico 6 tem-se a representação da diversificação energética das fontes de energia do Estado do Ceará.

Gráfico 6 – Fontes renováveis de energia no estado do Ceará



Fonte: Adaptado de Paulino (2021).

No ano de 2020, registrou-se no estado do Ceará a maior capacidade instalada de Usinas Termoelétricas (UTE) do Brasil. Atualmente, o Ceará abriga cinco grandes UTEs que funcionam a base de combustíveis fósseis: UTE Pecém I (EDP Energias do Brasil S.A.), UTE Pecém II (Eneva S.A.), UTE Fortaleza (Enel Brasil S.A.), UTE Termoceará (Petrobras) e UTE Maracanaú (Bolognesi Energia S.A.), onde as UTEs à carvão representam expressivos 50% da matriz termelétrica do estado (Sales, 2023; ANEEL, 2024).

A construção das UTEs no Ceará é datada a partir de 2002 com a usina Termoceará. No ano seguinte, em 2003, a usina Fortaleza entrou em operação agregando significativamente para a produção de energia no estado. Em 2008 marca a inauguração da usina Pecém I onde em dezembro de 2012 evidenciou-se eficiente com participação notória na matriz energética do estado com uma produção de 360 MW, dobrando sua geração de energia em maio de 2013 para 720 MW. No mesmo ano, em outubro, a usina Pecém II entrou em operação agregando a rede elétrica 365 MW (ANEEL, 2024; Freitas, 2021).

Embora a participação das UTEs na matriz elétrica do estado do Ceará seja agregada positivamente para o montante de reservas energéticas, é válido salientar que há impactos ambientais danosos associados a essa fonte de energia.

As UTEs geram energia através da queima de combustíveis fósseis como o carvão mineral, gás natural e óleo diesel. Nas usinas Cearenses supracitadas não é diferente, nas UTEs Pecém I e II utilizam carvão mineral como combustível, as usinas Fortaleza e TermoCeará são movidas a gás natural e a UTE Maracanaú é movida a óleo combustível. A queima de combustíveis fósseis libera dióxido de carbono (CO₂) e outros gases poluentes atmosféricos equivalentes que contribuem para o avanço do aquecimento global e a poluição do ar, além do fato da extração e do transporte desses combustíveis terem grandes influências nos impactos ambientais (Sales, 2023).

De acordo com 2º Inventário de Emissões Atmosféricas em Usinas Termelétricas do Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA (2022), a usina Pecém I ocupa o 1º lugar no ranking em emissões de GEE por UTEs (ver Tabela 5), onde em 2021, a UTE Pecém I, dentre todas as outras usinas termelétricas do Brasil, emitiu mais dióxido de carbono equivalente (CO₂e), liberando 3,5 milhões de toneladas de GEE.

Tabela 5 - Ranking em emissões de GEE por UTEs

Ranking	Usina	Estado	Emissões (milhões de toneladas de CO ₂ e)	Porcentagem	Combustível
1º	UTE Pecém I (São Gonçalo do Amarante)	CE	3,5	6,3%	Carvão Mineral
2º	UTE Candiota III (Candiota)	RS	3,3	5,9%	Carvão Mineral
3º	UTE TermoRio (Duque de Caxias)	RJ	3,0	5,4%	Gás Natural
4º	UTE Termo Macaé (Macaé)	RJ	2,9	5,2%	Gás Natural
5º	UTE Norte Fluminense (Macaé)	RJ	2,5	4,5%	Gás Natural
6º	UTE Jorge Lacerda III (Capivari do Baixo)	SC	1,8	3,2%	Carvão Mineral
7º	UTE Pampa Sul (Candiota)	RS	1,8	3,2%	Carvão Mineral
8º	UTE Pecém II (São Gonçalo do Amarante)	CE	1,8	3,2%	Carvão Mineral
9º	UTE Mauá III (Manaus)	AM	1,7	3,1%	Gás Natural
10º	UTE Porto de Itaqui (São Luis)	MA	1,6	2,8%	Carvão Mineral

Fonte: Adaptado de Ferreira et al (2022).

A problemática dos impactos ambientais causados pelas UTEs no estado do Ceará e das suas consequências sobre a saúde humana tem sido objeto de pesquisa de muitos estudiosos que coletaram relatos sobre registros de mortes por câncer, doenças de pele e doenças respiratórias

acometidas em pessoas que residem no entorno do Complexo Industrial Portuário do Pecém – CIPP (Sales, 2023).

De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2023), é necessário que as emissões de gases que colaboram para o avanço do efeito estufa sejam minguados em 48% com um prazo até 2030 para que os efeitos da mudança climática sejam retificados ou pelo menos freados.

Segundo Costa et al (2023), o dióxido de carbono (CO_2) é o principal causador do aquecimento global, correspondendo a 75% das emissões de GEE antropogênicas. Para além do CO_2 existem também os gases metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarboneto (CFC) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6), do qual é válido salientar que dentre esses gases mencionados há também a disseminação e dispersão por partes de sistemas naturais, entretanto, a parcela mais significativa das emissões é antrópica.

É necessário salientar que em seu estado natural, a presença de gases do efeito estufa na atmosfera do planeta já era existente em quantidades controladas e possuem a função de absorver e refletir as radiações infravermelho solares mantendo a temperatura em níveis estáveis, entretanto, com a superprodução e emissões em excesso desses gases acarretará uma maior concentração na atmosfera que resultará no aumento da temperatura média do planeta provocando mudanças drásticas no clima global.

Além dos efeitos negativos no ecossistema, o aumento na temperatura média pode acarretar o aumento da demanda do consumo de energia. De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE (2023), o estado do Ceará registrou um aumento de 6,5% no consumo de energia no período de onda de calor em relação ao ano de 2022.

De acordo com Costa et al. (2016), há a necessidade de adoção de um sistema de geração de energia que satisfaça as condições de eficiência e as restrições de integração segura entre as demandas da rede elétrica e os sistemas ambientais, mitigando sistematicamente as emissões de gases poluentes.

Para Costa et al (2021), dada a variedade de tecnologias de geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis, é necessário a realização de uma avaliação de adequação das tecnologias de geração energética sobre seu nível de emissões poluentes, riscos ambientais e sociais e dissemelhanças geográficas e hidrológicas.

Para Oliveira e Pinheiro (2020) e Almeida et al (2020), as tecnologias de geração fotovoltaica e eólica apresentam eficiência em geração energética com mecanismos de desenvolvimento com baixo impacto ambiental, o que pode ser uma excelente alternativa para o enfrentamento da produção energética poluente.

2.5 Vida útil das tecnologias de geração energética

De acordo com Freitas (2021), a definição da “vida útil” de algo, quer seja um produto ou quer seja uma usina de energia, é o período em que seu objetivo é atingido ou excedido. Logo, a vida útil é considerada um parâmetro técnico que implica na viabilidade econômica dos projetos de forma que, quanto maior seu valor, menor o custo da energia gerada, mantidas todas as demais variáveis constantes.

Na Tabela 6 tem-se a estimativa do período de vida útil das tecnologias mais comuns no Brasil e o tempo de construção de suas instalações.

Tabela 6 – Prazo de construção e vida útil das tecnologias energéticas

Fonte	Tempo de construção	Vida útil
Carvão mineral	4 anos	40 anos
Eólica	1 ano	25 anos
Gás natural	2 anos	30 anos
Hidrelétricas	5 anos	80 anos
Nuclear	7 anos	60 anos
Solar fotovoltaica	1 ano	25 anos

Fonte: adaptado de IEA (2015).

2.6 O consumo de energia no Brasil e no estado do Ceará

A análise do consumo de energia elétrica de uma região é crucial para entender os padrões de consumo daquela sociedade evidenciando indicadores do seu desenvolvimento econômico e social. Geralmente, países que apresentam uma alta taxa de consumo elétrico também apresentam um setor industrial desenvolvido e seus habitantes apresentam um índice de qualidade de vida elevado (Silva; Raiher, 2023).

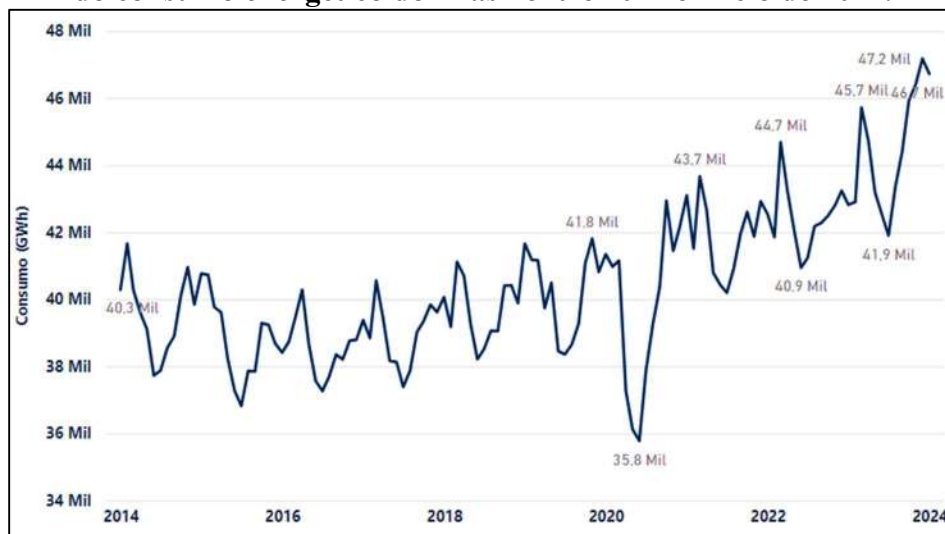
É possível afirmar também que o estudo do consumo energético de uma dada localidade pode nortear o desenvolvimento de políticas públicas para a gestão dos recursos energéticos e validar a eficiência de sua matriz elétrica durante os picos de demanda apontando suas possíveis fragilidades e evitando cortes de energia e garantindo o fornecimento elétrico estável.

Além disso, existe uma relação intrínseca entre o consumo de energia e a liberação de gases do efeito estufa, logo, o estudo crítico do consumo de energia auxilia a desenvolver meios alternativos para reduzir as emissões de poluentes combatendo as mudanças climáticas. O que

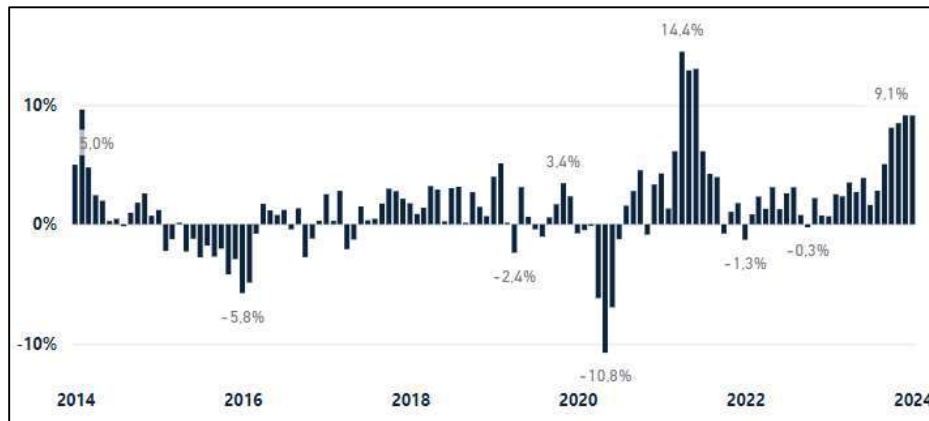
incentiva a adoção de práticas sustentáveis como o desenvolvimento de baixo custo elétrico e geração de eletricidades por meios menos nocivos, como as fontes eólicas e solar.

O Brasil tem apresentado nos últimos anos números significativos no consumo de energia. No Gráfico 7 tem-se a série temporal do consumo total de energia do Brasil desde o ano de 2014 ao atual período.

Gráfico 7 — (a) Consumo energético do Brasil entre 2014 e início de 2024; (b) variação do consumo energético do Brasil entre 2014 e início de 2024.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de EPE (2024).

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica - AEEE (2022), em 2021, o Brasil consumiu aproximadamente 497 TWh de energia elétrica, um total que corresponde cerca de 4,6% superior ao ano de 2020. E de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica - AEEE (2023) o consumo energético brasileiro continuou crescendo e superou o valor

do ano antecessor em 11,6% atingindo 555 TWh com uma redução expressiva de 52,9% na geração de energia elétrica por meio de tecnologias fósseis.

Acompanhando a tendência mundial do desenvolvimento tecnológico sustentável, o consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos quatro anos tem mostrado um crescimento constante, porém com uma mudança notável na matriz energética em direção a fontes de energia renováveis. Essas tendências são provavelmente o resultado de políticas de energia e mudanças no comportamento do consumidor.

De acordo com os dados da CCEE (2024), o Brasil registrou uma variação de 2,7% no consumo de eletricidade para fins de telecomunicações, atingindo um marco de 255,1 MWm no ano atual, superando o ano anterior que apresentou um consumo de 247,3 MWm. No Gráfico 8 tem-se a variação do consumo médio brasileiro de energia para fins de telecomunicações em comparação ao mesmo período do ano antecessor.

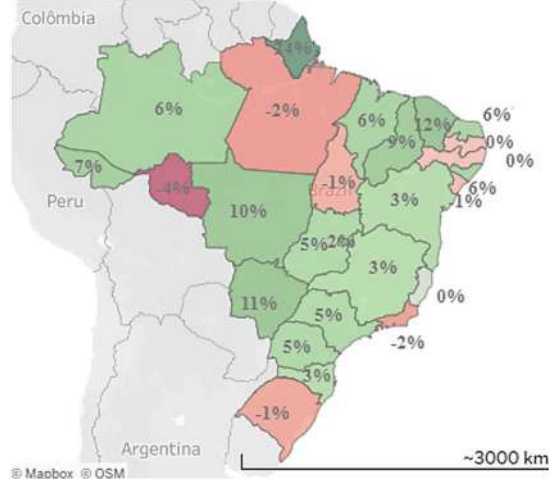
Gráfico 8 – Consumo de energia elétrica no Brasil em telecomunicações no período de abril de 2023 a março de 2024



Fonte: CCEE (2024).

Na Figura 6 tem-se a participação de cada unidade federativa brasileira no monte do consumo de energia elétrica para serviços de telecomunicação.

Figura 6 – Variação do consumo de energia elétrica para serviços de telecomunicação por estado brasileiro entre abril de 2023 e março de 2024



Fonte: CCEE (2024).

No ano de 2021 o estado do Ceará se destacou entre os estados brasileiros por seu aumento no consumo de energia elétrica, atingindo um aumento de consumo de 8,2% em relação ao ano de 2020, superando até a média do aumento de consumo nacional, que foi de 4,1%, no mesmo período. (Varela, 2022).

De acordo com CCEE (2024) o estado do Ceará apresentou uma variação de 11,7% do consumo de eletricidade para serviços de telecomunicações. A segunda maior variação de consumo energético para serviços de telecomunicações entre os estados brasileiros para o período entre abril de 2023 e março de 2024. Onde é válido salientar que a utilização da eletricidade pelo consumidor livre do estado do Ceará entre os anos de 2022 a março de 2024 aumentou em 165% (ver Gráfico 9).

Gráfico 9 – Variação do consumo de energia elétrica anual do estado do Ceará entre os anos 2023 e 2024



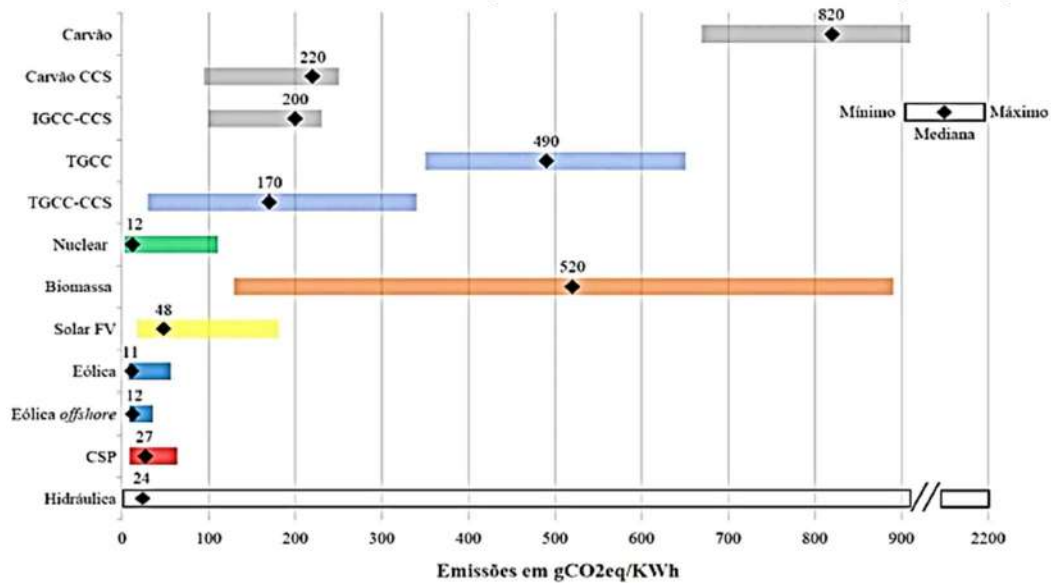
Fonte: CCEE(2024).

2.7 O desenvolvimento do setor energético elétrico e as mudanças climáticas

De acordo com Omer et al (2020), a expressão “mudança climática” exprime a mutação no clima global ao decorrer do tempo, no qual, revela uma relação intrínseca entre a variação da temperatura, da nebulosidade, das precipitações pluviométricas e de outros fenômenos climatológicos em comparação as suas médias históricas. Isto é, são alterações climatológicas definitivas consideradas alarmantes quando o valor de desvio é estimado maior do que a média em todos os anos anteriores.

De acordo com Freitas (2021), o desenvolvimento tecnológico do sistema energético elétrico enfrenta o desafio de conciliar a segurança energética da oferta para a crescente demanda com a redução de emissões de gases do efeito estufa. No Gráfico 10 tem-se o ciclo de vida das tecnologias de geração de energia elétrica e a estimativa de emissão de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) produzido durante a vida útil de cada tecnologia energética.

Gráfico 10 - Emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida das tecnologias de geração



Fonte: Freitas (2021).

Grande parte das usinas de energia possuem controladores de poluentes locais (MP, SO_x e NO_x), entretanto, o gás CO₂ demanda a utilização de uma tecnologia para capturar e armazenar o carbono (CCS). Entre os processos adotados para a captura do carbono estão a absorção química (utilizando solventes como o monoetanolamina) e a absorção física (absorção de sólidos, separação por membranas e separação criogênica).

Freitas (2021) ressalta que é necessário avaliar as demandas adicionais ao instalar da tecnologia CCS nas usinas de geração de energia pois o processo de captura de carbono penaliza o consumo interna de energia da usina fazendo consumir mais combustível e aumentado também o consumo de água por MW de energia gerado.

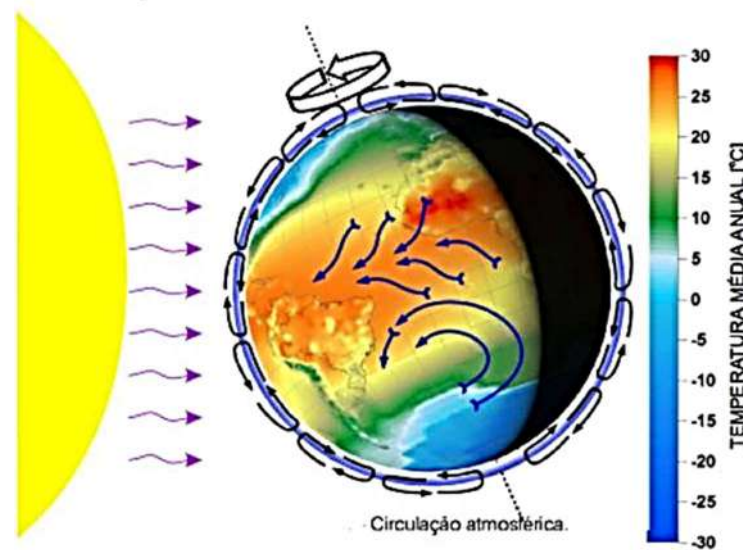
2.8 Geração de Energia Eólica

2.8.1 O vento

De acordo com os conceitos geofísicos, o vento é o deslocamento de uma massa de ar que pode ser ocasionado por distintos fatores dos quais os mais comuns são os movimentos naturais do planeta Terra (rotação e translação) e pela irradiação de calor do Sol, do qual, cerca de 2% dessa energia irradiada é absorvida pela atmosfera terrestre heterogeneamente de modo que as regiões mais próximas a linha do Equador recebem uma intensidade maior de incidências solares do que as regiões polares, produzindo assim um gradiente de temperatura. Com o aquecimento do ar na região equatorial o ar é tendencioso a ficar mais leve e com menor

densidade que o propicia a deslocar-se para as regiões polares aumentando o volume de ar nessas regiões e criando um gradiente de pressão atmosférica. Logo, o sentido de deslocamento da massa de ar é da zona de menor pressão para a zona de maior pressão e é fortemente influenciado pela temperatura, pela umidade e pela densidade da massa de ar, além da morfologia da superfície pelo qual escoará (Montero et al, 2020; Zuffo, 2015; Fontanet, 2012; Amaral, 2011). Na Figura 7 tem-se a representação da dinâmica atmosférica na conversão da energia térmica absorvida do Sol e convertida em energia cinética dos ventos.

Figura 7 – Circulação do vento Atmosférico



Fonte: Barcellos (2014) apud Monteiro et al (2020).

A velocidade do vento é usualmente estudada como um vetor tridimensional $\vec{V}_v = (v_{\hat{x}} + v_{\hat{y}} + v_{\hat{z}})$ onde os componentes representam os ventos que sopram do Norte, do Leste e verticalmente, entretanto, como geralmente o componente vertical da velocidade do vento é muito pequeno próximo a superfície da terra é comum representar o vetor velocidade do vento apenas com os componentes horizontais.

Pode-se afirmar que a velocidade do vento é diretamente proporcional a sua força de arrasto, expressa matematicamente pela equação (1), onde A é a área [m^2], ρ é a densidade do ar [$kg \cdot m^{-3}$], V é a velocidade do escoamento do vento [ms^{-1}] e C_a é o coeficiente de arrasto [adimensional] que pode ser definido pela função dependente da geometria do corpo que está sofrendo a força de arrasto e a velocidade do vento.

$$f_a = \frac{1}{2} A \rho C_a V^2. \quad (1)$$

Porém, é válido salientar que em um amplo espectro de velocidades, a dependência do coeficiente de arrasto pela velocidade do escoamento do vento é desprezível, logo, frequentemente, o coeficiente de arrasto é utilizado como uma função dependente somente da geometria do corpo que está interagindo com o escoamento do vento. $0 < C_a < 1$ (BROCK; RICHARDSON, 2001).

O vento é um objeto de interesse de estudo para áreas da ciência como a anemologia, meteorologia, engenharias, arquitetura e construções civis pois está relacionada a fenômenos climáticos, industriais e as sensações térmicas urbanas e rurais (COSTA; LYRA, 2012).

De acordo com Picolo et al (2014) e Burton et al (2001), o vento é um fenômeno caótico, isto é, é um fenômeno que não pode ser previsível fielmente através das leis de formação em modelagem matemática, pois cada variação, mesmo que seja a menor e mais insignificante possível em algum dos parâmetros que o compõe o vento alteram suas características dinâmicas. O que se pode concluir que o vento é altamente instável, tanto geograficamente como temporalmente.

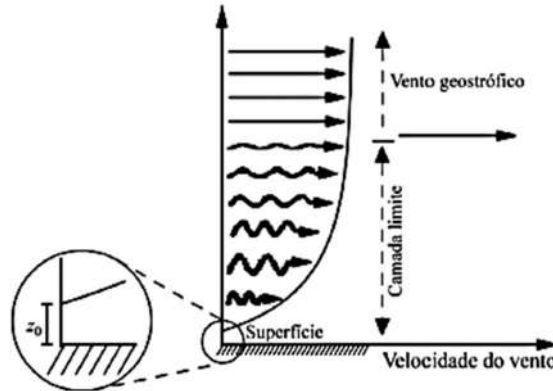
O planeta apresenta heterogeneidade em aspectos climatológicos eólicos. A discrepância do estado eólico em regiões distintas no planeta é consequência da variação da latitude e o tipo de vegetação de cada região pois influenciam no processo de absorção da radiação e sua reflexão afetando a temperatura da superfície do solo (Picolo et al, 2014; Burton et al, 2001).

De acordo com García (2004), a velocidade vertical do vento ($\vec{v}_z$) não é uniforme. Com velocidades mínimas próximo a superfície do solo e maiores a medida que o ponto de altura de referência se distancia do ponto de referência do solo.

Segundo Martins et al (2008), considera-se a velocidade $\vec{v}_z$ nula na altura z_0 próximo à superfície terrestre. Para alturas $z > z_0$ tem-se a camada limite atmosférica (U) que compreende uma região no intervalo $100\text{ m} < U < 3000\text{ m}$ e que está sujeita a interações dinâmicas com forte influências do sistema superfície – atmosfera.

Para alturas maiores que as compreendidas na camada limite, onde teoricamente o vento não sofre influência do sistema superfície – atmosfera, o vento é chamado de geostrófico. Na Figura 8 tem-se a representação das características da velocidade vertical do vento desde a altura z_0 até a zona de ventos geostróficos.

Figura 8 – Características da velocidade vertical dos ventos



Fonte: Martins et al (2008).

Para o aproveitamento da energia eólica por turbinas de aerogeradores, a zona de interesse é a zona superficial, entretanto, a rugosidade e a topografia da superfície do solo influenciam fortemente a velocidade do vento nessa região. Essa relação pode ser concebida matematicamente pela equação logarítmica de Prandtl (2), onde $v(z)$ é a velocidade do vento em função da altura, v^* é a velocidade de fricção, k é a constante de Von-Kármán e z_0 é o comprimento da rugosidade (Castro, 2004).

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

De acordo com Dultra (2001), pode-se definir o comprimento da rugosidade através de uma escala métrica pré-estabelecida para avaliar a rugosidade do solo, a qual se refere às variações verticais da superfície em função de sua textura, composição e estrutura. Esse parâmetro é fundamental para estudos de dinâmica de superfície, como escoamento superficial e erosão.

A rugosidade do solo deve ser considerada como um parâmetro temporal, uma vez que mudanças naturais, como a ação do vento e da chuva, ou antropogênicas, como o uso de máquinas agrícolas, podem alterar significativamente suas características. Além disso, a rugosidade influencia em processos de transferência de calor e energia entre o solo e a atmosfera.

Na Tabela 7 estão listados alguns valores característicos da rugosidade de diferentes tipos de solos, que podem variar de acordo com o tipo de manejo adotado e o clima local. A

análise desses valores é essencial para a modelagem de processos ambientais, sendo amplamente utilizada em estudos de microclima e planejamento de aproveitamento eólico.

Tabela 7 – Valores característicos de z_0

Tipo da superfície	$z_{0_{min}}$ (m)	$z_{0_{máx}}$ (m)
Lama / gelo	0,00001	0,00003
Mar calmo	0,0002	0,0003
Areia	0,0002	0,001
Neve	0,001	0,006
Campo de cereais	0,001	0,01
Relva baixa / estepes	0,01	0,04
Descampados	0,02	0,03
Relva alta	0,04	0,1
Terrenos com árvores	0,1	0,3
Florestas	0,1	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Fonte: Castro (2009).

Núñez e colaboradores (2012), apresentam em seus estudos que são inúmeras as ações induzidas do vento sobre os corpos que estão imersos em seu escoamento. Nem todos os corpos que estão submetidos ao escoamento do vento apresentam respostas dinâmicas, isto é, devido as suas propriedades intrínsecas (frequência natural ou amortecimento) existem corpos que não apresentam respostas de interações relevantes com o vento. Entretanto, é possível observar efeitos estáticos do vento em todos os corpos imersos em seu escoamento, pois considerando a resposta de interação estática, em relação a ventos médios, como a distribuição de pressão, a variação de pressão é uma força que, quando decomposta em caracterizações específicas, dá origem aos coeficientes aerodinâmicos.

Esses coeficientes, como o de arrasto e sustentação, são fundamentais para projetar turbinas eólicas de alta eficiência, maximizando o aproveitamento da energia cinética do vento. Além disso, os efeitos do vento influenciam diretamente o desempenho e a durabilidade das turbinas, já que a variação da pressão pode gerar esforços adicionais nas pás e nos componentes estruturais. O entendimento dessas configurações também é crucial para a otimização do posicionamento e a orientação dos aerogeradores em parques eólicos, garantindo maior

aproveitamento energético. Na Tabela 8 tem-se um resumo de alguns efeitos do vento sobre estruturas.

Tabela 8 – Classificação dos efeitos do vento

Efeitos do vento médio (pressão e força)				
Estático	Instabilidade Estática	Divergência torcional		
		Flambagem lateral		
Dinâmico	Instabilidade Dinâmica	Galope	1 Grau de liberdade	Respostas com amplitudes divergentes
		Flutter torcional		
		Flutter acoplado		Respostas com amplitudes limitadas
		Desprendimento dos vórtices		
		Flutter de baixas velocidades		
	Excitação devido ao vento-buffeting			

Fonte: Adaptado de Núñez *et al.* (2012).

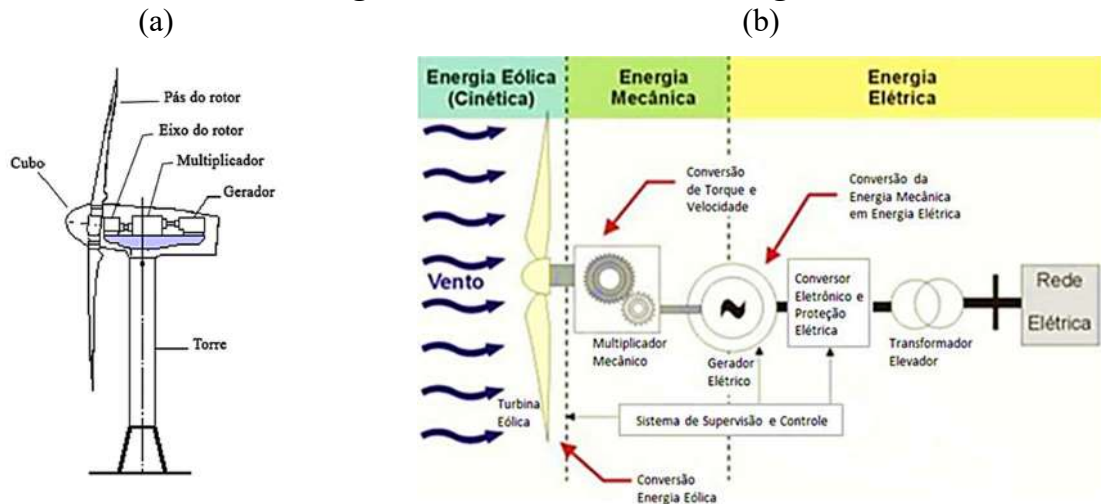
2.8.2 Turbinas eólicas

Turbinas eólicas, ou aerogeradores, são máquinas que convertem a energia cinética dos ventos captada pelas pás das hélices do rotor em energia mecânica rotacional, que será transmitida por um eixo ao gerador responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica (Duarte, 2018; Moraes, 2018; Wenzel, 2007).

As pás do rotor devem ser leves o suficiente para possuírem sensibilidade a força de arrasto do vento, entretanto, também devem apresentar alta resistência e boa aerodinâmica. Geralmente, as turbinas atuantes na geração de energia eólica possuem 3 pás. Isso se dá pela eficiência comprovada de 3 a 5% maior quando comparada a aerogeradores que são constituídos de apenas 2 pás. Para aerogeradores com quantidade de pás maiores do que 3 observou-se que a eficiência é reduzida em 3 a 5%. Isso ocorre devido a estabilidade aerodinâmica que a turbina de três pás possui em consequência ao seu design geométrico (Horn, 2010; Vogt, 2010; Castro, 2009).

Na Figura 9 tem-se um fluxograma ilustrado do processo de conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica por meio dos aparelhos aerogeradores e uma representação da sua estrutura.

Figura 9 - (a) Ilustração da estrutura de um aerogerador; (b) Ilustração do processo de conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica



Fonte: Adaptado de García (2004) e Pavinatto (2005).

Pode-se classificar os aerogeradores em dois grupos: aerogeradores que possuem eixo do rotor na horizontal e os aerogeradores que possuem o eixo do rotor na vertical. Os aerogeradores que apresentam o eixo do rotor na vertical são mais vantajosos devido a sua independência do mecanismo de constatação da direção do vento, o que faz com que o seu processo mecânico seja menos complexo. Entretanto, sua desvantagem é que as pás de hélice do rotor ficam muito próximas ao solo onde há ventos mais fracos e turbulentos que ocasionam o aumento da tensão sobre a turbina do eixo vertical (Cavalcanti, 2023; Pinto, 2013).

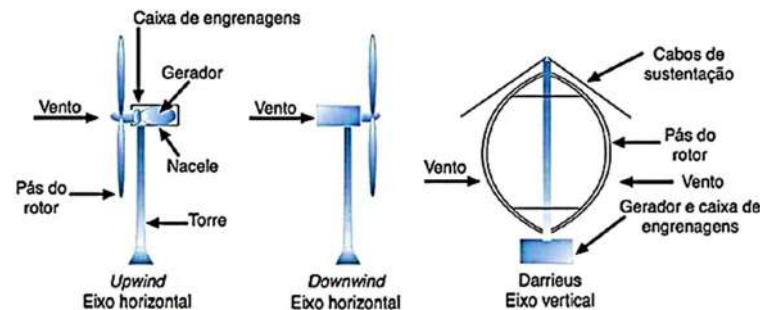
Como a velocidade do vento é maior em alturas elevadas e a potência gerada pelos aerogeradores aumenta com o cubo da velocidade dos ventos, então há um forte estímulo para a aplicação das pás de hélice do rotor em regiões mais altas, que por meio dessa necessidade, as turbinas com eixos horizontais se destacam das com eixo verticais, além de apresentarem a possibilidade de controlar por meio do ângulo das pás a velocidade do rotor e a saída de potência.

É válido salientar que estudos apontam que os aerogeradores que são constituídos com os eixos do rotor na vertical são mais eficientes no aspecto geral devido as suas pás serem posicionadas perpendicularmente em relação ao escoamento do vento. (Cavalcanti, 2023; Pinto, 2013).

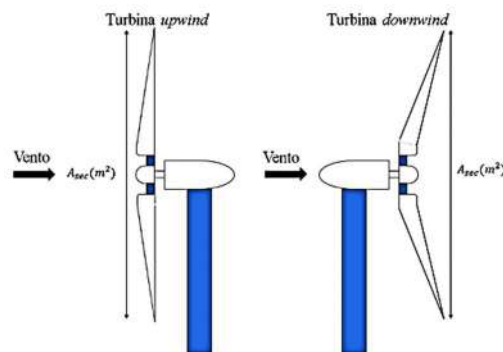
No tocante as turbinas com eixos horizontais, pode-se ainda as classificar pela forma de como o vento incide nas pás da hélice do rotor, de modo que se chama turbina *upwind* o aerogerador cujo sua configuração se destaca pela incidência do vento ocorrendo na parte dianteira da zona de varredura das pás. Já a configuração de turbina *downwind* é destacada pela incidência dos ventos na parte traseira da zona de varredura das pás (Pinto, 2013).

Na Figura 10 tem-se a ilustração dos tipos de turbinas eólicas no toante a direção do seu eixo do rotor e em relação a sua classificação de *upwind* e *downwind*.

Figura 10 – (a) Ilustração dos tipos de Aerogeradores quando a sua configuração de eixo; (b) Ilustração da classificação de aerogeradores com eixo horizontal quanto a sua configuração de incidência do vento



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Cavalvanti (2023) e Pinto (2013).

Embora haja pesquisas que comprovem a eficiência das turbinas de eixo horizontal, ainda existe controvérsias sobre qual configuração, *upwind* ou *downwind*, é a melhor. Dentre as vantagens e desvantagens dessas configurações podemos citar que para o modelo *downwind* é vantajoso que vento incida na parte traseira da turbina pois assim ela poderá orientar-se naturalmente à direção do vento, porém, como as pás da hélice estão atrás da torre ocorre o

efeito “sombra” e quando a pá passa por detrás da torre existe um instante de tempo em que o vento reduz ocasionando a flexão da pá.

Essa flexão faz com que o potencial de saída diminua, além de aumenta o ruído da pá, ocasionando potencialmente o desgaste da pá e a levando a fadiga. Já para as turbinas na configuração *upwind*, comparadas as *downwind*, necessitam de um mecanismo mais elaborado para as deixarem sempre voltadas para a direção do vento, entretanto, operam de forma mais suave e fornecendo assim mais potência. (Cavalcanti, 2023).

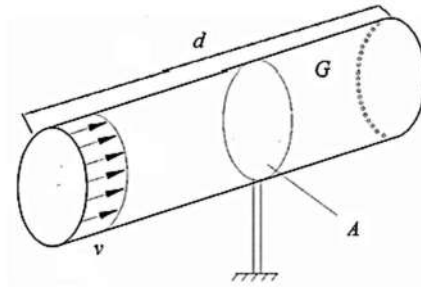
2.8.3 A potência extraída dos ventos

Todas as equações apresentadas nessa seção estão de acordo com Pico et al (2014).

Adotando uma geometria espacial G de um corpo cilíndrico atravessado por fluido com velocidade v constituído por uma área transversal A de um comprimento d como mostra a Figura 11. Tem-se que o volume V desse corpo pode ser definido como o produto entre a área transversal e o comprimento do corpo. Isto é,

$$V = A \cdot d. \quad (3)$$

Figura 11 – Geometria G de um corpo atravessada por um fluido



Fonte: Pico et al (2014).

Escrevendo o comprimento d como uma função que depende da velocidade do fluido e do tempo, a equação (3) pode ser reescrita na forma

$$V = A \cdot v \cdot t, \quad (4)$$

no qual explicita uma equação matemática onde o volume do corpo está em função da área do corpo, da velocidade do fluido que o atravessa e do tempo.

Considerando a definição de vazão como quantidade volumétrica ou mássica de um fluido que escoar por unidade de tempo, podemos escrever a vazão Q como a taxa temporal do volume V , como mostra a equação (5)

$$Q = \frac{dV}{dt} = A \cdot v. \quad (5)$$

O fluxo de massa φ_m que atravessa o corpo com a geometria G em um regime de escoamento permanente e incompressível pode ser descrito matematicamente como

$$\varphi_m = \frac{dm}{dt} = \rho v A, \quad (6)$$

onde ρ é a massa específica.

Considerando a energia cinética desse fluido que atravessa do corpo com geometria G como $E_c = \frac{1}{2} m v^2$, podemos escrever a massa como sendo $m = \rho \cdot V$, onde pela equação (4) tem-se a expressão matemática

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho A t v^3. \quad (7)$$

Por definição, a potência é a taxa temporal da variação da energia, logo ao derivarmos a equação (7) teremos a expressão matemática da potência eólica. Isto é,

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (8)$$

Através da equação (8) pode-se concluir que a potência da energia eólica é dada pelo cubo da velocidade do vento.

2.8.4 Normalização Técnica para o aproveitamento eólico

De acordo com as definições do CTGÁS-ER (2012), define-se como uma normalização uma atividade coletiva com alto grau de ordenação que envolve conhecimentos técnicos que sejam destinados ao uso comum.

De acordo com Gejima Junior (2021) e CTGÁS-ER (2012), a Agência Internacional de Energia (IEA – do inglês International Energy Agency) elaborou várias recomendações que tiveram forte influência nas práticas da indústria eólica de tal maneira que posteriormente passaram ser consideradas como normas. Tais sugestões estavam pautadas práticas voltadas ao desempenho de geração, custo de energia dos aerogeradores, carregamento de fadigas, medição da emissão de ruídos entre outros.

As normas técnicas internacionais de geração de energia eólica contemplam requisitos de segurança, procedimentos de medições e testagens. O comitê técnico das normas de geração por aerogeradores da comissão internacional de Eletrotécnica (IEC – do inglês International Electrotechnical Commission) é constituído por representantes de 25 países mais 13 países observadores. O Brasil, é um desses países observadores da IEC, sendo representado pela COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações) (CTGÁS-ER, 2012).

A norma brasileira destinada aos processos de geração e medição de potencialidade do setor eólico que está em vigor atualmente é a ABNT NBR IEC 61400 e suas atribuições para as normatizações das práticas na indústria eólica brasileira são definidas por edições, exemplo: ABNT NBR IEC 61400 – 1 (2005), é a norma que estabelece os requisitos mínimos para projetos de aerogeradores de grande porte; ABNT NBR IEC 61400 – 2 (2006), é norma que estabelece os requisitos mínimos para projetos de aerogeradores de pequeno porte; ABNT NBR IEC 61400 - 12 - 1 (2005), é a norma que estabelece os padrões para as medições de desempenho de geração (CTGÁS-ER, 2012).

A norma ABNT NBR IEC 61400 - 12 - 1 (2005) juntamente com a norma ABNT NBR IEC 61400 – 1 são umas das mais importantes pois estabelecem critérios e padrões para a geração eficiente em larga escala.

De acordo com a norma ABNT NBR IEC 61400 - 12 - 1 (2005), a velocidade do escoamento do vento para o aproveitamento eólico pode ser descrita em função da massa específica do escoamento e da pressão diferencial. A massa específica do ar é determinada pela temperatura do fluido e da pressão do ar como mostra a equação (9),

$$\rho = \frac{P_b}{R_0 \cdot T}, \quad (9)$$

onde ρ é massa específica [kgm⁻³], P_b é a pressão barométrica [Pa], T é a temperatura absoluta do fluido [K] e R_0 é a constante universal dos gases para o ar seco [287,05 J/kg·K].

Porém, é válido salientar que para temperaturas elevadas é sugerido a utilização da equação da massa específica corrigida em função da umidade relativa do ar, equação (10),

$$\rho = T^{-1} \left(\frac{P_b}{R_0} - \varphi P_w (R_0^{-1} - R_w^{-1}) \right), \quad (10)$$

onde φ é a umidade relativa (faixa de 0 a 1), P_w é a pressão do vapor d'água dependente da temperatura $[0,0000205^{0,0631846 \cdot T}]$ e R_w é a constante universal dos gases para o vapor d'água $[461,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}]$.

A velocidade do vento em função da massa específica e da pressão dinâmica é dada pela equação (11),

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (11)$$

onde $\Delta p = p_0 - p_e$, sendo p_0 a pressão de estagnação e p_e a pressão estática.

2.9 Energia Solar Fotovoltaica

2.9.1 Efeito Fotovoltaico

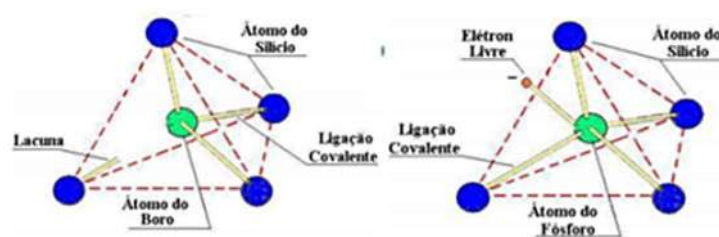
Segundo Machado e Miranda (2015), a tecnologia do aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica vem sendo desenvolvida desde o século XIX. em 1839, o físico francês Edmond Becquerel fez uma descoberta crucial ao notar que a inclusão de placas de latão em eletrólito líquido, expostas à luz solar, gerava eletricidade. Esse fenômeno foi denominado efeito fotovoltaico, pois os fótons da luz solar, ao incidirem sobre materiais semicondutores, são absorvidos pelos átomos do material provocando o movimento dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, criando pares elétron-lacuna. A separação desses pares dentro do campo elétrico interno dos dispositivos semicondutores resulta em uma tensão elétrica.

Com o progresso dos estudos sobre o efeito fotovoltaico, em 1954, pesquisadores da Bell Labs desenvolveram um dispositivo elétrico baseado em materiais semicondutores chamado de célula fotovoltaica de silício (ou célula solar) que alcançava uma eficiência de conversão de 6% da luz em eletricidade. Desde então busca-se aprimorar a eficiência do

aproveitamento da energia ofertada pelo Sol convertida em eletricidade (Machado; Miranda, 2015).

O cristal de Silício puro é péssimo condutor elétrico devido à ausência de elétrons livres, para torná-lo um semiconductor com uma eficiência de condução maior é necessário acrescentar pequenas frações de outros elementos como o Fósforo ou o Boro, como mostra a Figura 12. O processo de adicionar pequenas porcentagens de impurezas é denominado como dopagem e ocorre após a etapa de purificação do silício (Carvalho, 2021).

Figura 12 – Dopagem do Silício com Boro e Fósforo

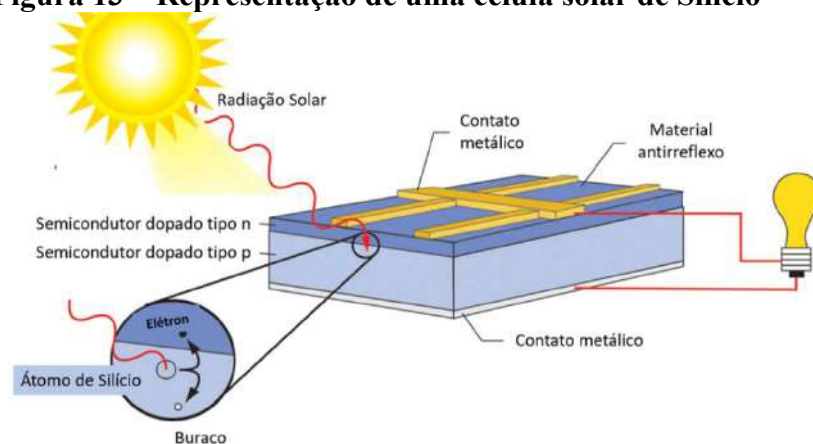


Fonte: Carvalho (2021).

O Silício dopado com o Fósforo constitui um material de elétron livre chamado de Silício tipo N, e ao dopar o Silício com o Boro o material constituído apresenta deficiência de elétron (material com carga positiva livre) chamado de Silício tipo P.

Quando os fótons da luz solar incidem sobre as células de Silício excitam os elétrons do semiconductor onde na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os “vazios” da estrutura do silício tipo P. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons se deslocam, como mostra a Figura 13 (Carvalho, 2021).

Figura 13 – Representação de uma célula solar de Silício



Fonte: Carvalho (2021).

Enquanto a luz solar estiver incidindo sobre a placa de célula solar a geração de eletricidade de corrente contínua terá intensidade proporcional a intensidade da luz incidente.

2.9.2 Placa solares

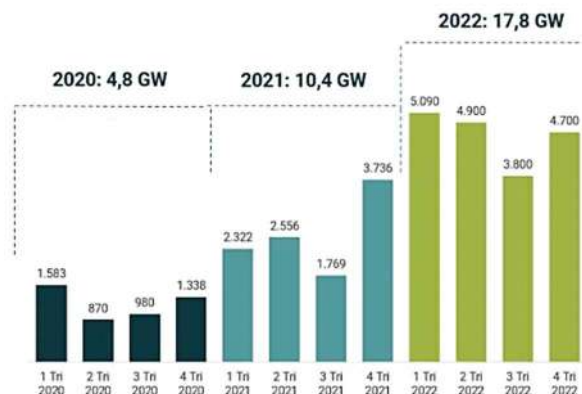
É válido salientar que existem tipos de células solares que apresentam aproveitamento energético com eficiências diferentes, por exemplo, pode-se citar a célula de silício monocristalino que apresenta uma faixa de eficiência entre 16% e 22% (com uma taxa de eficiência média de 19,2%), a célula de silício policristalino com eficiência energética em torno dos 11% a 14% e a célula de silício amorfo com eficiência de até 7% (Neris, 2022).

De acordo com Lambert *et al.* (2020), o Brasil apresenta fortes indicadores no crescimento de investimentos para implantações de placa solares fotovoltaica com o intuito de geração de energia elétrica como também em investimentos em pesquisas nas áreas de engenharia e ciências dos materiais com o objetivo de elevar o índice de eficiência do aproveitamento energético das placas solares.

Com a evolução do mercado energético solar fotovoltaico e com o surgimento de novas tecnologias em eficiência energética de materiais semicondutores, o setor de comércio fotovoltaico brasileiro tem observado um aumento significativo na importação de módulos solares em uma estimativa de 71% no ano de 2022 em comparação ao seu ano antecessor, o que representa um quantitativo superior a 17 GW de potência acumulada por meio de projetos de geração centralizada e distribuída (GREENER, 2023).

No Gráfico 11 tem-se a representação do volume de importação dos módulos solares nos quatro trimestres dos anos de 2020 a 2022.

Gráfico 11 – Volume importado [MWp] de módulos fotovoltaicos para geração centralizada e distribuída



Fonte: Greener (2023).

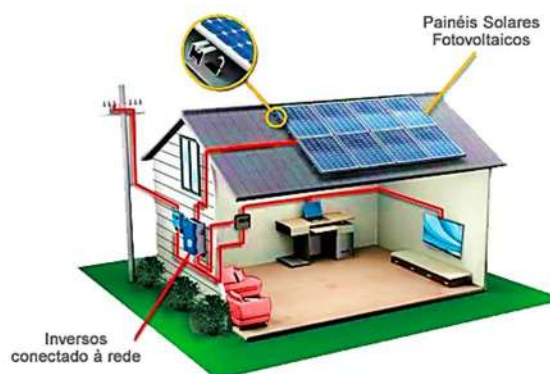
Com a diversificação dos materiais das células solares aliados a popularização da geração solar descentralizada e a queda média de 12% nos preços dos dispositivos dos sistemas de geração descentralizada

2.9.3 Geração Distribuída

Há basicamente três tipos de subsistemas de geração de energia solar fotovoltaica. A geração distribuída (GD) on-grid é o sistema que representa a modalidade de geração de energia elétrica produzida por pequenas usinas no local (ou próximo) da unidade consumidora (casa, comércio e indústrias) interligada à rede elétrica pública. Essa modalidade foi validada e prevista em lei através da Resolução Normativa Nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 2012 e permite ao proprietário produzir sua própria energia elétrica e seus excedentes são inseridos na rede de alimentação integrada e retorna como crédito em abatimentos nas suas faturas mensais de consumo.

A modalidade de geração distribuída off-grid também é caracterizada pela participação do sistema de geração solar do usuário proprietário, entretanto, a energia excedente é armazenada em dispositivos como baterias e não é inserida a rede integral. Esse tipo de sistema é útil para zonas remotas ou de difícil acesso que inviabilizam o a inserção da energia gerada a rede elétrica integrada. Além destes já mencionados há também o sistema de geração centralizada cujo é constituída por usinas de alta capacidade de geração afastadas dos centros de consumo transmitindo a energia elétrica aos usuários por meio de longas linhas de transmissão (Pereira, 2019; Caldas; Moisés, 2016; Maia, 2018). Na Figura 14 tem-se a representação da geração distribuída do sistema fotovoltaico em uma residência.

Figura 14 – Ilustração da geração solar fotovoltaico on-grid



Fonte: Pacífico (2012).

O sistema de geração distribuída possui muitos benefícios e apresenta-se como um sistema alternativo complementar ao sistema de geração centralizada em casos específicos. Em evidência desse fato, muitos estudos apontam que o sistema convencional de distribuição de energia elétrica tem se revelado propenso a falhas com confiabilidade questionável e estabilidade intermitente. Pesquisadores indicam que os motivos causadores dos problemas da rede centralizada são principalmente pela diminuição da disponibilidade de energia primária, redes de transmissão elétrica envelhecidas e o aumento significativo da implantação da energia excedente das redes de geração distribuída inseridas na rede. (Passos et al., 2024; Fan et al., 2021; Yoldas et al., 2017).

Na Tabela 9 tem-se a relação entre as fontes de energia renováveis e a quantidade de unidades consumidoras e sua potência instalada.

Tabela 9 – Fontes de energia por geração distribuída e a quantidade de unidades consumidoras em 2023.

Fonte/Combustível	Número de GD instaladas	Unid. Consumidoras que são beneficiadas com crédito	Potência instalada (KW)
Bagaço de cana	16	306	8.430,06
Biogás – ARG	30	48	11.951,64
Biogás – Floresta	16	24	6.945,40
Biogás – RA	321	1.820	48.896,05
Biogás – RU	77	4.357	37.566,69
Biomassa	7	166	12.880,00
Casca de Arroz	5	7	10.246,40
Cinética dos ventos	97	165	17.214,55
Gás natural	13	1.124	3.121,76
Lenha	1	1	2.500,00
Potencial hidráulico	90	18.664	85.239,07
<u>Radiação solar</u>	<u>1.872.592</u>	<u>2.443.789</u>	<u>20.186.961,06</u>
Resíduos florestais	6	18	10.860,00
Resíduos Sólidos Urbanos	6	6	1.876,00
Total	1.873.274	2.470.495	20.444.688,68

Fonte: ANEEL (2024).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2024), a geração de energia elétrica brasileira por meio do sistema de geração distribuída é majoritariamente por meio de sistemas solares fotovoltaicos. Observa-se pela Tabela 9 que a quantidade de instalações de GD de sistemas de energia fotovoltaica no Brasil no ano de 2023 é predominantemente significativa em relação as outras tecnologias de fontes de energia. De acordo com Piotrowski et al. (2021), a previsão estimativa do crescimento da GD do sistema solar fotovoltaico entre os brasileiros é favorável e tendenciosa uma vez que é considerado o interesse dos consumidores em produzir a própria energia visando principalmente o abatimento nos custos mensais da energia elétrica e nos possíveis créditos da energia extravasada.

2.9.4 Normatização da geração de energia elétrica solar.

De acordo com Kemmerich et al. (2020), com o veloz crescimento da adesão do sistema de geração distribuída e da alta quantidade de potência instalada acrescida ao sistema de rede elétrica observou-se a necessidade de normas que contemplassem os novos paradigmas do sistema elétrico brasileiro.

O Brasil dispõe de um conjunto de leis, resoluções normativas e normas técnicas que contemplam a padronização e homogeneidade dos processos que envolvam o sistema elétrico e o sistema de geração de energia solar fotovoltaico. Pode-se citar a Lei Nº 2427/96 que regulamenta a utilização e o consumo da energia elétrica, além das resoluções normativas RN482/2012 que permite aos consumidores gerarem sua energia elétrica e dar a possibilidade das concessionárias do setor energético elétrico comprarem os excedentes do usuário consumidor proprietário de sistemas fotovoltaicos, RN687/2015 que regulamenta o uso de créditos da geração elétrica pelo sistemas fotovoltaicos dos usuários, e normas técnicas como as normas ABNT NBR 5410:2004, ABNT NBR 5419-1:201, ABNT NBR 16690:2019 e ABNT NBR 16274:2014.

De acordo com Ijano (2023), A Lei 14.300, instituída em janeiro de 2022, que instituiu o marco legal do micro e minigeração distribuída, popularmente conhecida como o marco legal da energia solar, foi promulgada com o intuito de conceder mais segurança jurídica ao setor energético fotovoltaico brasileiro através do incentivo da sua geração energética possibilitando movimentação econômica no sistema consumidor-gerador e com isso permitir a mudança do paradigma energético brasileiro. A regulamentação 14.300/2022 permite que o consumidor gere energia para consumo próprio e ainda, caso haja excedentes, forneça o sobrepujamento da sua geração própria para a rede elétrica local. A partir desse marco, o Brasil alcançou a marca

de geração de 10 GW de geração distribuída por pequenos geradores, o que significa um aumento bastante expressivo quando comparado ao 1 GW dos anos antecessores. (ANEEL, 2022).

É válido salientar que a promulgação dessa lei gerou escarcéu entre os consumidores geradores trazendo consigo diversas críticas para o setor elétrico nacional no que tange as taxações de tarifas e encargos sobre pequenos geradores.

De acordo com Santos (2024), o sistema de geração solar fotovoltaico brasileiro apresentava alguns desafios como os custos iniciais de instalações e problemas tangentes a ausência de legislações específicas para questões detalhadas como o armazenamento, segurança, confiabilidade do sistema solar e cobranças de taxas. Mas a Lei 14.300/2022 contemplou normatizações específicas para microgeradores (até 75 kW) e minigeradores (até 5 MW). Entretanto, apesar das normalizações darem agilidade e homogeneidade ao processo de instalação e geração própria, muitos empreendedores e proprietários de sistemas fotovoltaicos queixam-se da excessividade burocrática dos trâmites de registros e das obtenções de licenças para conexão com a rede elétrica, além de alegarem que as taxações de tarifas e encargos associados à geração própria de energia por sistemas solares não são equitativas uma vez que a tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) é considerada relativamente alta para pequenos e micros geradores, acarretando impactos negativos o retorno financeiro do investimento.

2.10 Modelos matemáticos de predição

De acordo com Alencar Filho (2023), os modelos de previsões matemáticas dependem fortemente do quantitativo de dados disponíveis adquiridos para análise, da forma como esses dados estão dispostos e dos “outliers”. Dependendo da análise que se deseja fazer, há métodos quantitativos como também qualitativos, onde geralmente, para interpretações quantitativas são feitas explorações de variáveis em função de dados históricos, geralmente de séries temporais. Para estudos qualitativos, são feitas observações compostas por abordagens estruturadas em julgamentos de especialistas em dados correntes.

De acordo com Hyndman e Athanasopoulos (2021), cada análise preditiva possui sua especificidade apresentando suas particularidades como precisão, custo e metodologia. O mais comum entre as análises são os estudos por meio de séries temporais.

2.10.1 Séries temporais

De acordo com Morettin e Tolói (2018), a definição de série temporal se dá pelo conceito de um conjunto de análises ordenadas pelo tempo estabelecidas por um modelo matemático mediante a basicamente duas perspectivas: a primeira fundamenta-se no domínio do tempo apresentando modelos paramétricos (isto é, com um número finito específico de parâmetros), já segunda é estabelecida no domínio da frequência com propostas de modelos não paramétricos.

Com a análise dos dados ordenados cronologicamente, ou seja, observados sequencialmente em períodos temporais como horas, dias, semanas, meses ou anos, estima-se os próximos valores da grandeza estudada através do padrão encontrado na tendência, na sazonalidade e nos ruídos dos dados históricos (Hyndman; Athanasopoulos, 2021; Sousa et al., 2021).

A notação utilizada para descrever matematicamente uma série temporal é dada por

$$Z_{[T]} = \{z_1, z_2, z_3, z_4, \dots, z_t\}, \quad (12)$$

onde indica o tamanho da série temporal, sendo t o último instante de tempo disponível.

Logo, formalmente, é possível afirmar que a série temporal é uma realização de um processo estocástico que depende da tendência, da sazonalidade, do ciclo e o do erro encontrado nas medições (ruídos). Como mostra a equação (13)

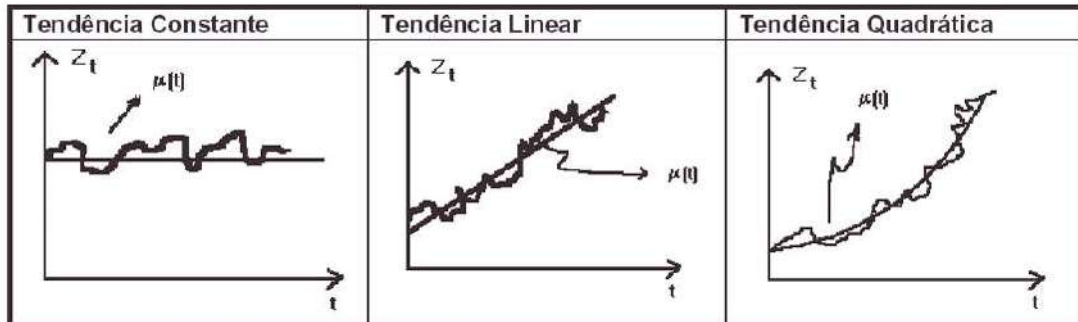
$$Z_{[T]} = T_t + S_t + C_t + E_t, \quad (13)$$

onde T_t é a componente tendência no período t que indica o “comportamento” de longo prazo da série temporal, ou seja, se as medidas dos valores apresentam um crescimento, um decréscimo ou permanecem estáveis além de apresentar a velocidade de mudança de um valor para outro, S_t é a sazonalidade que é definida como variações que ocorrem em intervalos regulares de tempo, C_t é o ciclo e é caracterizado pelas variações de auge e de declive nas séries temporais de forma amortecida e periódica ao longo da componente de tendência e E_t é a componente de erro ou também conhecida como resíduo ou ruído dos valores de uma série temporal que é definido como um comportamento de natureza aleatória, que não pode ser definido como sazonalidade ou tendência. (Gutiérrez, 2003).

Entretanto, é válido salientar que a decomposição de uma série temporal também pode ser usada com uma formulação multiplicativa, que é uma alternativa quando a variância da série não é constante (Araújo, 2022; Barros, 2015).

Comumente, trabalha-se com tendências lineares, quadráticas ou constantes como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Representação da tendência de uma série temporal



Fonte: Barros (2011).

As séries temporais trazem consigo ferramentas ricas em informações que se manifestam através de padrões. Um exemplo a ser citado é a correlação entre grandezas variáveis ao longo de um intervalo de tempo. O coeficiente de correlação linear (r) é expresso matematicamente pelo grau de linearidade entre duas variáveis e é compreendido no intervalo $-1 \leq r \leq 1$, ao qual adota-se a interpretação que à medida que o valor de r tende ao valor 1 significa que as grandezas apresentam relações diretamente proporcionais, caso o valor de r tenda ao valor -1 conclui-se que as grandezas apresentam relações inversamente proporcionais. Quando r assume valores próximos de 0 ou nulos significa que a relação entre as grandezas estudadas é baixíssima ou ainda inexistente.

Matematicamente, a correlação linear entre duas grandezas A e B pode ser expressa como

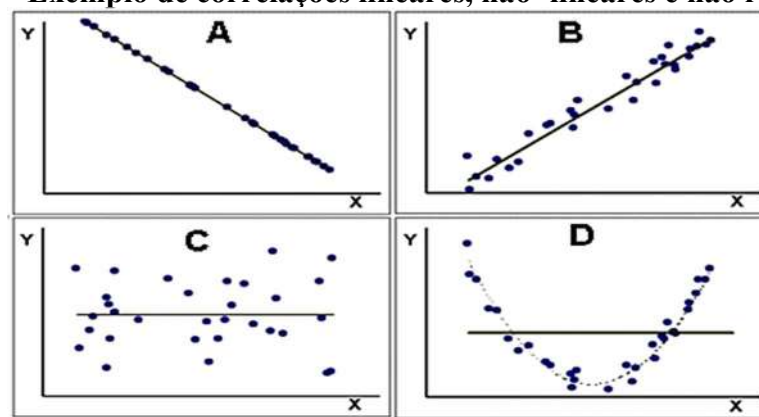
$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n A_i B_i - \sum_{i=1}^n A_i \sum_{i=1}^n B_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n A_i^2 - (\sum_{i=1}^n A_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n B_i^2 - (\sum_{i=1}^n B_i)^2}}, \quad (14)$$

e mede apenas a intensidade de relação linear entre as duas grandezas estudadas, podendo ser vantajoso ou não, uma vez que, dependendo das grandezas analisadas, a estratégia de estudo de correlação poderá precisar de um arranjo polinomial de grau $g > 1$, exponencial ou logarítmico.

Logo, é correto afirmar que duas grandezas podem não apresentar correlações lineares, mas apresentarem correlações não-lineares e vice-versa (Araújo, 2022)

Na Figura 16 tem-se um exemplo através de um gráfico de dispersão como se analisa a correlação linear ou não-linear entre duas variáveis X e Y . Onde no exemplo A tem-se uma relação linear inversamente proporcional, no exemplo B tem-se uma relação linear diretamente proporcional, no exemplo C não há relação entre X e Y e D há uma relação não-linear entre X e Y .

Figura 16 - Exemplo de correlações lineares, não- lineares e não relacionadas



Fonte: Lima Filho (2024).

A correlação está inteiramente relacionada com a regressão, cujo sua definição consiste em resultar em uma equação matemática capaz de descrever a relação entre as variáveis estudadas.

De acordo com Lima Filho (2024), o estudo da regressão entre variáveis é formalmente desenvolver uma função matemática através de um conjunto de observações pareadas (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , (X_3, Y_3) , ... , (X_n, Y_n) relativas as grandezas X e Y através da função

$$y_r = \alpha + \beta x + \varepsilon, \quad (15)$$

onde y_r é a variável resposta associada a i -ésima observação de Y , x é a i -ésima observação do valor fixado para a variável independente (e não aleatória) X , α e β são os coeficientes paramétricos que serão determinados e ε é o erro aleatório para a i -ésima observação, isto é, a significância das influências de outros fatores sobre a leitura da i -ésima observação de Y de forma aleatória.

Para determinar os coeficientes paramétricos utiliza-se o método dos mínimos quadrados, o qual é definido pelo menor valor possível da soma dos erros quadráticos das observações realizadas, isto é,

$$S_{(\alpha,\beta)} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \alpha - \beta x_i)^2, \quad (16)$$

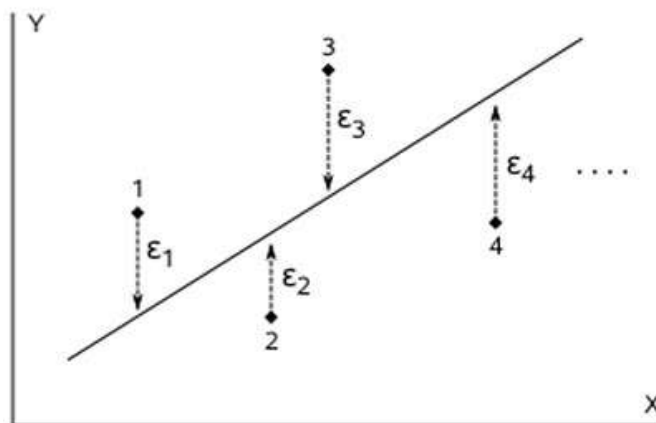
onde aplicando as derivadas parciais e igualando a zero, obtém-se o valor estimativo dos coeficientes paramétricos α e β que podem ser descritos matematicamente e respectivamente como

$$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{n} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (18)$$

Logo, entende-se que a determinação dos valores estimados dos coeficientes paramétricos de uma regressão linear é dada como um objetivo de gerar uma função que descreva uma reta que se posicione o mais próximo possível de todos os pontos relacionados aos dados estudados seguindo um critério pré-estabelecido, como mostra a Figura 17 (Lima Filho, 2024).

Figura 17 – Exemplo da representação gráfica de uma regressão linear



Fonte: Lima Filho (2024).

2.10.2 Autocorrelação

De acordo com Neusser (2016), dois grandes conceitos necessários para o aprofundamento em autocorrelação de grandezas variáveis em função do tempo são os conceitos de processo estocástico e estacionaridade de uma série temporal. Define-se como processo estocástico a análise de um conjunto de dados X_t agrupados em variáveis aleatórias indexadas por $t \in \tau$ (onde τ denota um conjunto de índices ordenados que é tipicamente identificado com o tempo), e definidas como um determinado espaço probabilístico dado, sendo a série temporal a “trajetória” observada de um processo estocástico. Já a definição de estacionaridade pode ser dada como uma função matemática da autocovariância de um processo estocástico. Isto posto, através desses conceitos introduzidos, pode-se definir a autocorrelação como uma correlação cruzada de um dado de X_t com ele mesmo e é uma ferramenta matemática utilizada para encontrar padrões, frequência ou ainda uma dado encoberto pelos ruídos da série temporal através de uma medição que informa o quando o valor do dado x_n observado no conjunto X_t influencia os valores observado que estão em sua vizinhança.

Neusser (2016) expressa a autocorrelação de um processo estocástico matematicamente através da variância de X_t , isto é, VX_t , com $VX_t < \infty$ com $t \in \mathbb{Z}$. Para uma função que tenha atribuição de dois períodos t e s , admitimos que $t, s \in \mathbb{Z}$, onde a covariância entre X_t e X_s é dita função autocovariante de X_t com notação matemática $Y_x(t, s)$ expressa por

$$Y_x(t, s) = cov(t, s) = E[(X_t - EX_t)(X_s - EX_s)] = EX_t X_s - EX_t EX_s, \quad (19)$$

onde EX_t e EX_s são os valores da média, ou valores esperados de X_t e X_s . Desta maneira, pode-se dizer que um processo estocástico será considerado estacionário quando se e somente se $t, s, r \in \mathbb{Z}$ as propriedades seguintes forem verdadeiras.

$$EX_t = \xi \text{ (constante)} \quad (20)$$

$$VX_t < \infty \quad (21)$$

$$Y_x(t, s) = Y_x(t + r, s + r). \quad (22)$$

De acordo com Araújo (2022), é mais conveniente analisar os coeficientes de autocorrelação do que os coeficientes de autocovariância. Onde pode-se expressar matematicamente a autocorrelação de processos estacionários por meio da função (ACF)

$$\rho_x = \frac{Y_x(h)}{Y_x(0)} \quad (23)$$

onde h é denotado como a ordem dos dados.

Geralmente, a autocorrelação é dada pela existência de vários coeficientes associados entre assim por meio da apresentação de um gráfico de defasagem, no R, por exemplo é comum medir a autocorrelação pequenos blocos como r_1 mede a relação y_t e y_{t-1} , r_2 mede a relação entre y_t e y_{t-2} , r_3 mede a relação entre y_t e y_{t-3} e assim sucessivamente. Logo, no R, o valor de r_n é dado por

$$r_n = \frac{\sum_{n+1}^T (y_t - \bar{y})(y_{n+1} - \bar{y})}{\sum_{n+1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (24)$$

2.10.3 Ruído branco

Araújo (2022) afirma que o conceito de ruído branco (white noise) é um dos mais importantes para muitas áreas de análise em séries temporais e análises preditivas uma vez que se trata de um processo fundamental e elementar e é bastante utilizado na construção de muitos outros processos estocásticos. Sua principal caracterização de dá pelo acontecimento de um processo estocástico não apresentar nenhuma autocorrelação.

Os ruídos brancos são altamente necessários para a determinação de resíduos em séries temporais, principalmente para modelos ARIMA, por exemplo. Outra função dos ruídos brancos em séries temporais são as construções dos então chamados passeios aleatórios (“random walk model”), onde tal modelo utiliza a série diferenciada, isto é, subtrações consecutivas entre os valores encontrados na série original, $y'(t) = y_t - y_{t-1}$, entretanto, isso será valido somente quando a série diferenciada for um ruído branco, ou seja,

$$\varepsilon_t = y_t - y_{t-1} \rightarrow y_t = \varepsilon_t + y_{t-1}. \quad (25)$$

2.10.4 Modelo matemático ARIMA

De acordo com Campos (2008), A metodologia ARIMA, proposta por Box e Jenkins em 1970, é amplamente utilizada para modelar séries temporais não-estacionárias. Ela envolve a aplicação de modelos de médias móveis integradas autoregressivos, ARIMA, que são uma expansão dos modelos lineares paramétricos ARMA, conhecidos por sua prevalência na literatura científica. Para a formulação do modelo ARIMA a partir de uma série temporal, $y(k)$, é preciso introduzir o operador de atraso (q^{-m}), definido matematicamente pela equação (26), o operador de avanço (q^{+m}), definido matematicamente pela equação (27), o operador de primeira diferença (Δ), definido matematicamente pela equação (28) e o operador de soma (S), definido matematicamente pela equação (29).

$$q^{-m}y(k) = y(k - m) \quad (26)$$

$$q^{+m}y(k) = y(k + m) \quad (27)$$

$$\Delta y(k) = y(k) - y(k - m) \quad (28)$$

$$Sy(k) = \sum_{j=0}^{\infty} y(k - j) = y(k) + y(k - 1) + y(k - 2) + \dots + y(k - m) + \dots \quad (29)$$

Pela equação (26) e (28) é possível concluir que $\Delta = 1 - q^{-m}$, e que pelas equações (26) e (29), pode-se escrever S como

$$Sy(k) = (1 + q^{-1} + q^{-2} + \dots + q^{-m} + \dots)y(k), \quad (30)$$

logo, a expressão matemática para o operador soma pode ser reduzida a

$$Sy(k) = (1 - q^{-m})^{-m}y(k) = \Delta^{-m}y(k). \quad (31)$$

Comumente, grandes quantidades de séries temporais podem apresentar uma configuração de não-estacionaridade, exemplos que podem ser citados são as análises de séries temporais do setor financeiro ou meteorológico, entretanto, é possível torná-las em estacionárias utilizando o operador da primeira diferença. Exemplo, considerando a série $y(t)$ não estacionária, ao tomar a primeira diferença, normalmente, a série resultante será estacionária. Isto é,

$$W(k) = y(k) - y(k - 1) = (1 - q^{-1})y(k) = \Delta y(k), \quad (32)$$

onde apesar de $y(k)$ não ser estacionária, $W(k)$ poderá ser estacionária (Campos, 2008).

Caso $W(k) = \Delta^d y(k)$ seja estacionária, poderá ser representada por um modelo matemático $\text{ARMA}_{(p,q)}$ (modelo auto-regressivo de médias móveis) na forma de

$$\varphi_p(q^{-p})W(k) = \theta_q(q^{-q})\varepsilon(k), \quad (33)$$

onde $\varepsilon(k)$ é o ruído branco.

Para o caso de $W(k)$ for igual a primeira diferença de $y(k)$, então a definimos como a soma integral de $W(k)$, e é modelada pelo modelo ARIMA (modelo auto-regressivo integrado de médias móveis) na forma de

$$\varphi_p(q^{-p})\Delta^d W(k) = \theta_0 + \theta_q(q^{-q})\varepsilon(k), \quad (34)$$

com ordem dos parâmetros inteiros não negativos (p,d,q) , onde p é a ordem do modelo autorregressivo (número de defasagem), d é o grau de diferenciação, isto é, a quantidade de repetições que os dados atuais tiveram valores passados subtraídos e q é a ordem do modelo de média móvel.

2.10.5 Modelo matemático SARIMA

De acordo com Espinosa *et al.* (2010) e Costa *et al.* (2023), na ocasião em que séries temporais apresentam sazonalidades em seus dados, isto é, repetições periódicas tendenciosas com padrões regulares e previsíveis, é aconselhável a utilização do modelo matemático SARIMA, que é essencialmente o modelo matemático ARIMA compreendendo também os parâmetros sazonais (P,D,Q) dos quais representam o número de termos de autorregressão sazonal, o número de diferenciações sazonais necessárias para tornar a série estacionária e o número de termos de média móvel sazonal, respectivamente. A simbologia desse modelo matemático é apresentada como SARIMA (p,d,q)(P,D,Q).

2.11 Sistema de Telecomunicação no Ceará

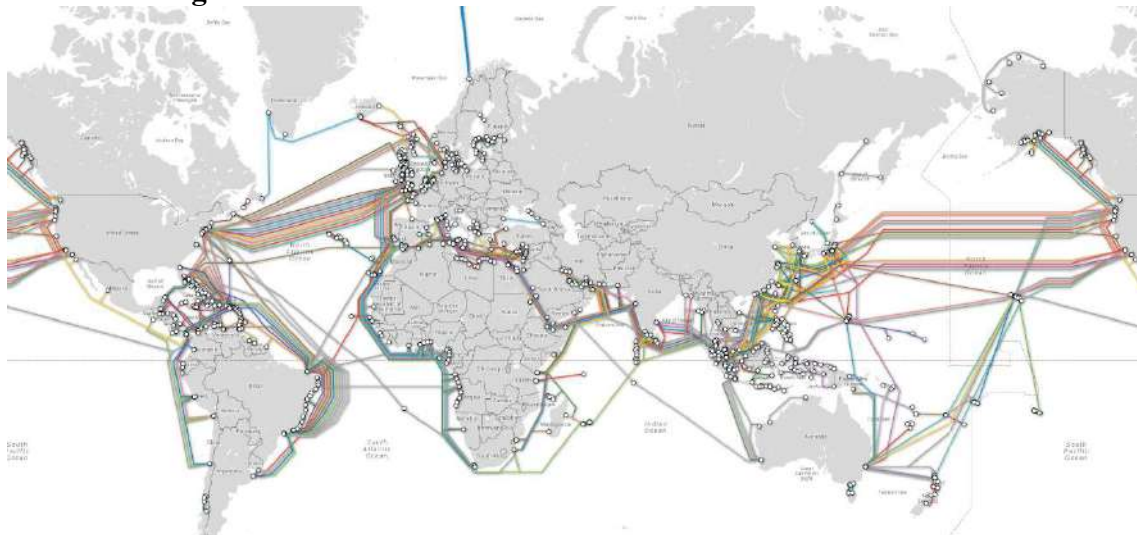
O estado do Ceará tem se conectado à rede de telecomunicações de forma expressivamente progressiva com políticas públicas que democratizam o acesso à internet. O governo do estado, visando oferecer serviço gratuito de acesso à informação e inclusão digital,

desenvolveu o programa “Ceará conectado” com o objetivo de ofertar internet em praças públicas via Wi-Fi conectando os seus 184 municípios com fibra óptica.

Em 2007, foi lançado o programa “Cinturão Digital” que tem como objetivo assegurar a qualidade e a segurança do acesso à internet a órgãos públicos do poder executivo do governo do estado, com essa implementação do programa houve a viabilização da expansão de projetos na área da segurança pública com o destaque do videomonitoramento, como também em avanços tecnológicos nas áreas de saúde, de educação e lazer social (Ceará, 2021).

Além dos programas governamentais, a cidade de Fortaleza, capital do Ceará, também se destaca por ser a segunda cidade no mundo a possuir mais conexões por fibra óptica e um hub tecnológico no Brasil. A Praia do Futuro, região litorânea da capital cearense, é o ponto estratégico para conectar o Brasil a países de outros continentes, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Cabos de conexão de internet no mar de Fortaleza -Ce



Fonte: Zardo (2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração desse estudo foram definidas etapas. A primeira etapa foi dedicada a escolha do tema, sua delimitação e a proposta dos objetivos da pesquisa. A segunda etapa foi designada para o estabelecimento dos padrões de elegibilidade do material bibliográfico para a construção do referencial teórico cujos filtros adotados foram linguagem em português (brasileiro), ano de publicação dos artigos científicos e dissertações que não excedessem a 10 anos e demais publicações com 20 anos, assunto abordado e tipo de material. O critério de seleção foi adotado por adequação dos materiais com a propostas relacionadas ao objetivo dessa pesquisa.

A etapa seguinte destinou-se a extração e mineração dos dados meteorológico e dos dados históricos do consumo e geração elétrica solar e fotovoltaica no estado do Ceará, além da busca de dados sobre o consumo de energia elétrica pelo setor de telecomunicações no estado e plotagem com tratamentos estatísticos de dados das séries temporais com os marcos temporais limites no intervalo entre os períodos de 2013 à 2023 através do Software R Studio.

3.1 Pesquisa Bibliográfica

Para a etapa da construção da base de dados do referencial teórico bibliográfico realizou-se pesquisas em repositórios de bibliotecas de universidades como a Universidade Federal do Ceará, a Universidade Federal de Minas Gerais e a Universidade Estadual do Ceará com publicações de dissertações dos cursos de mestrado acadêmico nos programas de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Física ou Ciências Físicas Aplicadas. Além de consultas realizadas em banco de dados destinados a publicações de artigos científicos como a plataforma da Scielo, Google acadêmico, Periódicos CAPES dentre outros.

Para a delimitação do tema proposto foi feita uma análise em dissertações dos cursos de engenharia elétrica, engenharia da computação, ciência da computação, física, matemática e estatística para escolher a abordagem metodológica do modelo matemático preditivo que satisfaria o objetivo da pesquisa. Isto posto, alguns filtros foram adicionados para melhor direcionar a busca pelas literaturas científicas.

No site do catálogo de teses e dissertações da CAPES foi feita uma busca por material bibliográfico compatível com o viés do estudo proposto e foi pesquisado por “séries temporais” e adicionado os filtros de (1) tipo: Mestrado (dissertação); (2) ano: “2023”, “2022”, “2021” e “2020”; (3) grande área de conhecimento: “Ciências exatas e da terra” e “Engenharias”; (4)

área de conhecimento: “Engenharia Elétrica”, “Estatística”, “Física”, “Meteorologia” e “Sensoriamento Remoto”; (5) área de avaliação: “Engenharias IV”, “Astronomia/Física” e “Matemática/Probabilidade e Estatística”; (6) área de concentração: “Engenharia de Computação”, “Engenharia Elétrica”, “Estatística”, “Estatística e Probabilidade”, “Física”, “Física Geral”, “Inteligência Computacional”, “Modelagem e Controle de Sistemas”, “Processamento de Energias”, “Processamento de Sinais e Imagens”, “Sinais e Sistemas” e “Sistemas de Computação e Telecomunicações”; (7) nome do programa: “Engenharia Elétrica”, “Engenharia Elétrica e de Computação”, “Engenharia de Teleinformática”, “Estatística” e “Física”. Resultando em 37 manuscritos de dissertação de mestrado para serem analisados e incorporados como fonte bibliográfica dos conceitos referenciais e metodológicos dessa pesquisa.

Outras bases de dados foram consultadas como por exemplo a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) com os filtros da pesquisa com (1) tipo do documento: “Dissertação”, (2) idioma: “Português (Brasil)”; (3) ano de publicação: “2020-2023”; (4) assunto: “Séries temporais previsões”. Resultando em 9 manuscritos de dissertação para análise.

3.2 Coleta de Dados

O processo da coleta de dados foi elaborado mediante a três etapas. A primeira etapa desejou-se entender a demanda histórica de consumo de energia elétrica do estado do Ceará. Para isso, foi adquirido os dados de acesso público de consumo mensal de energia elétrica por classe, região e subsistema disponível pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) pelo site <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>> onde consta dados de séries históricas de registros mensais e anuais de 2004 ao período vigente com dados organizados em segmentos de classes residencial, empresarial, serviço público dentre outros. Entretanto, o período delimitado de dados adquiridos foi de janeiro de 2013 à dezembro de 2023.

Para a coleta de dados das variáveis meteorológicas do estado do Ceará, optou-se por coletar dados de cidades cearenses que representassem zonas específicas do estado do Ceará. Segundo o IPECE (2015), o estado do Ceará é dividido em 14 grandes zonas de planejamento criadas visando o aperfeiçoamento de políticas públicas, monitoramento e implementações de atividades regionalizadas.

Cada região de planejamento agrupa municípios que apesar da sua posição geográfica relacionada por aspectos de vizinhança, há também relações de territórios com características geoambientais semelhantes. No Anexo A há uma tabela com o agrupamento dos municípios que pertencem a cada região de planejamento com sua característica geoambiental dominante.

A segunda etapa destinou-se a aquisição dos dados meteorológicos de algumas regiões do estado do Ceará. Para a mineração dos dados, foi adotado o banco de dados meteorológicos disponível pelo site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) através do site <<https://bdmep.inmet.gov.br/>> onde as grandezas analisadas foram: “velocidade do vento [m/s]”, “radiação global solar [kJ/m²]”, “temperatura do ar [°C]”, “precipitações pluviométricas [mm]” e “umidade relativa do ar [%]” com os registros horários.

Os dados disponíveis pelo INMET foram coletados em 14 estações meteorológicas distribuídas em 14 municípios espalhados pelo estado do Ceará, situados nos municípios Fortaleza, Sobral, Guaramiranga, Barbalha, Iguatu, Tauá, Quixeramobim, Morada Nova, Jaguaruana, Crateús, Campos Sales, Jaguaribe, Itapipoca e Acaraú. Na Tabela 10 estão disponíveis as informações de cada estação meteorológica utilizada como sistema de aquisição de dados para compor o banco de dados utilizado.

É válido salientar que no conjunto de dados disponíveis pelo INMET apresentou-se uma quantidade significativa de valores aleatórios escritos como “-9999”, que foram considerados como erro de leitura, e não foram contabilizados. A manifestação desses valores foi mais presente na grandeza “radiação global”.

Cada grandeza meteorológica analisada apresentou em média 8760 dados correspondentes a leituras horárias diárias por ano. Com a rejeição dos dados considerados como erro de leitura, a grandeza radiação global solar apresentou em média 4380 dados por ano, o que equivale a aproximadamente 12 horas diárias

Para a terceira etapa das coletas de dados, optou-se em adquirir os dados de geração diária eólica e solar fotovoltaica do estado do Ceará disponíveis pelo Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS) pelo site <<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-media-diaria-horaria.aspx>> onde para a geração eólica foi tomado os dados de geração diária por ano de janeiro de 2013 a dezembro de 2023. Para a geração solar, o site disponibiliza apenas dados de novembro de 2018 à data vigente. Desta forma, optou-se em limitar os dados de energia solar fotovoltaica de janeiro de 2019 a dezembro de 2023.

Tabela 10 - Principais características das estações meteorológicas utilizadas como sistema de aquisição de dados no Ceará

Estação	U.F	Região	Código (WMO)	Latitude	Longitude	Altitude	Data de Fundação
Fortaleza	CE	NE	A305	-3,83222	-38,53777	26,45	18/02/2003
Sobral	CE	NE	A306	-3,73166	-40,34555	109,62	12/02/2003
Guaramiranga	CE	NE	A314	-4,26111	-38,19749	38,2	26/05/2007
Barbalha	CE	NE	A315	-7,31805	-39,30166	409	31/05/2007
Iguatu	CE	NE	A319	-6,39666	-39,27027	233	30/05/2007
Tauá	CE	NE	A324	-6,01666	-40,28166	415	12/07/2007
Quixeramobim	CE	NE	A325	-5,17305	-39,28722	232	09/07/2007
Morada Nova	CE	NE	A332	-5,136388	-38,35638	43,6	24/08/2007
Jaguaruana	CE	NE	A339	-4,85333	-37,7769	12	10/11/2007
Crateús	CE	NE	A342	-5,18611	-40,66999	291	11/12/2008
Campos Sales	CE	NE	A347	-7,07805	-40,36305	572	07/03/2008
Jaguaribe	CE	NE	A358	-5,90527	-38,62777	184	10/09/2008
Itapipoca	CE	NE	A359	-3,48388	-39,58833	102	05/09/2008
Acaraú	CE	NE	A360	-3,12083	-40,08694	76	22/04/2009

Fonte: INMET (2024)

3.3 Tratamento dos dados.

Para a exportação dos dados para o software de plotagem R Studio, adotou-se a necessidade de agrupar todos os dados em uma única planilha. Os dados meteorológicos foram agrupados por município em planilhas do Excel e os valores “-9999”, considerados erros de leitura das grandezas meteorológicas, foram desprezados deixando células em branco.

Após exclusão dos erros de leitura, observou-se que na planilha de dados meteorológicos do município de Fortaleza, a grandeza velocidade dos ventos apresentou 5015 células em branco, a grandeza temperatura do ar apresentou 5009 células em branco, a grandeza umidade relativa do ar apresentou 6906 células em branco, a grandeza pressão atmosférica ao nível da estação meteorológica apresentou 5009 células em branco, a grandeza precipitação pluviométrica apresentou 12685 células em branco e a grandeza radiação solar global apresentou 39206 células em branco. Os demais municípios também apresentaram elevada quantidade de células em branco em todas as variáveis meteorológicas.

Para o preenchimento dessas lacunas em branco, optou-se em utilizar a média anual do respectivo período das variáveis meteorológicas para completar as colunas com os dados faltosos. Entretanto, esse processo não foi aplicado para os dados da grandeza radiação solar global, pois entendeu-se que as células preenchidas correspondiam aos valores de leitura da radiação solar no período de exposição do Sol, isto é, em média 12 horas diárias, gerando a consequência de ter células em branco para os horários da ausência da exposição solar.

Na Figura 20 tem-se uma representação da organização dos dados meteorológicos na planilha do Excel.

Figura 20 - Planilha dos dados meteorológicos

Arquivo																	Página Inicial																	Inserir																	Desenhar																	Layout da Página																	Fórmulas																	Dados																	Revisão																	Exibir																	Desenvolvedor																	Suplementos																	Ajuda																	Comentários																	Compartilhamento																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Fonte: Do próprio autor (2024).

3.4 Software de plotagem das séries temporais

O software escolhido para a plotagem de gráficos e análises das séries temporais foi o RStudio por apresentar licença livre e uma vasta gama de documentação e ferramentas específicas para análises de dados, além de vários outros fatores que evidenciaram sua adequação para a análise proposta pela pesquisa, especialmente no contexto da engenharia.

O RStudio é uma IDE (do inglês Integrated Development Environment) especificada para trabalhar em linguagem R que é bastante conhecida por suas potencialidades estatísticas e visualização de dados.

Uma das muitas vantagens da linguagem de programação R é a diversificação de pacotes como o pacote “ggplot2” que apresenta muita funcionalidade na exibição de gráficos complexos

variados de excelente qualidade de legibilidade, além de pacotes como “forecast” que proporciona análises de séries temporais por decomposição de informações cruciais para tomadas de decisões ou previsões estatísticas probabilísticas por meio de séries temporais.

O RStudio oferece um ambiente de interface interativa e integrada de fácil de manuseio, que para análise de dados é particularmente vantajoso para exploração de dados por meio de tratamentos estatísticos.

3.5 Códigos para séries temporais

Os códigos desenvolvidos no RStudio para análise dos dados de consumo energético elétrico no período de 2013 à 2023, dos dados das 14 estações meteorológicas selecionadas do Ceará e da geração de energia eólica e solar fotovoltaica do estado do Ceará estão disponíveis nos Anexos B, C e D respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

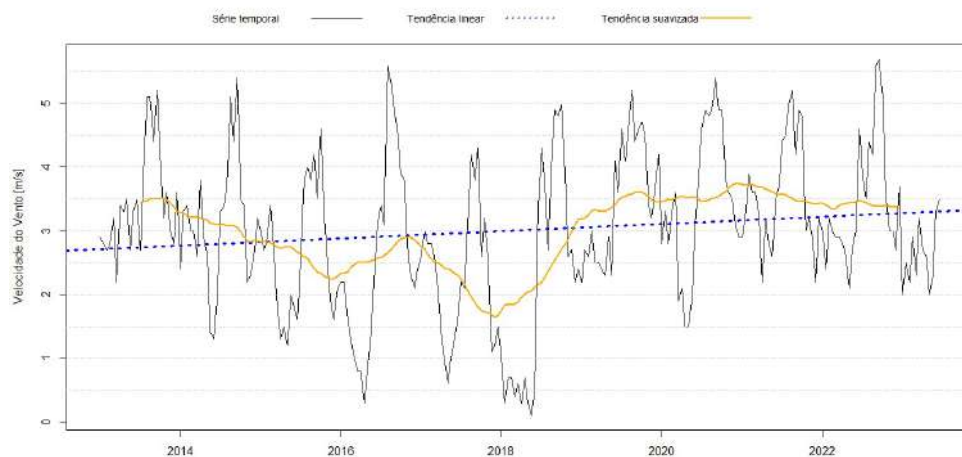
4.1 Condições meteorológicas

4.1.1 Fortaleza

O município de Fortaleza é uma área urbanizada com densidade demográfica de 7775,52 habitantes por metros quadrados (censo de 2022) e está localizada no litoral cearense (IBGE, 2023). Sabe-se que sua localização geográfica próximo ao oceano atlântico o favorece climatologicamente com brisas marítimas.

No gráfico 12, tem-se a velocidade média dos ventos em Fortaleza entre 0 e 10 metros de altura (a partir da superfície do solo) no período de 2013 e 2023, com a série temporal em linha da cor vermelha e a tendência linear na cor azul. Observa-se que a média das velocidades desse período está compreendida em aproximadamente 3 m/s com ventos apresentando constância.

Gráfico 12 - Velocidade média dos ventos em Fortaleza - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

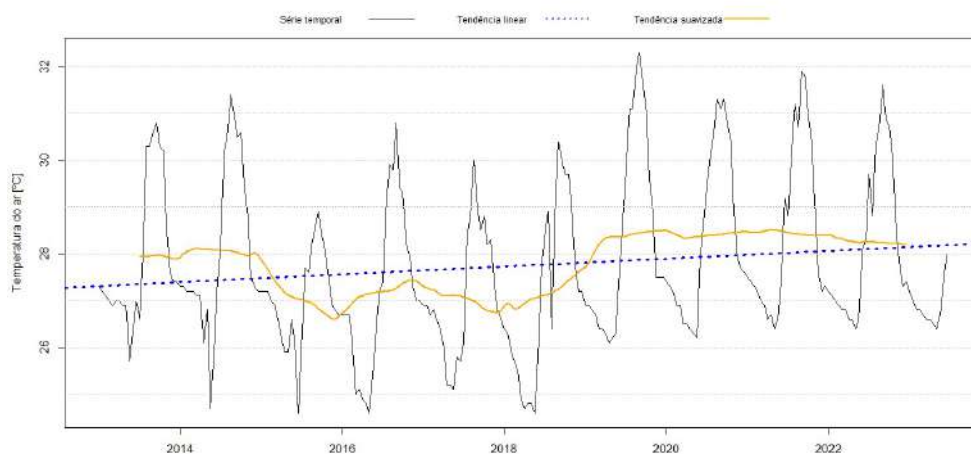
É válido salientar que a tendência linear suavizada não necessita ser obrigatoriamente uma linha reta, pois expressa o comportamento dos dados ao longo do prazo estudado, apontando a direção do crescimento, queda ou estabilidade com curvas suavizadas e ignora as variações de curto períodos e a sazonalidade dos períodos.

Observa-se que houve sucessivos declives entre os anos 2014 e 2016 e os anos de 2017 e 2018. A redução da velocidade dos ventos pode estar associada a vários fatores que influenciam a variável meteorológica. Entre as causas mais prováveis, os fenômenos

atmosféricos influenciados pela dinâmica dos oceanos Atlântico e Pacífico são fortes fatores a serem considerados, principalmente pela presença do fenômeno El Niño durante o período dos anos de dezembro de 2014 e alguns meses de 2016, em que por consequência do superaquecimento das águas do oceano Pacífico na sua zona equatorial, os ventos alísios, que normalmente sopram do sentido Leste para Oeste, são desacelerados.

Além dos ventos, a temperatura de Fortaleza também é um fator que deve ser considerado. No Gráfico 13, tem-se a série temporal da temperatura do ar em Fortaleza durante o período de 2013 a 2023. Observa-se que a tendência linear, representada pela linha azul, aponta um aumento da temperatura.

Gráfico 13 - Série temporal da temperatura de Fortaleza - CE (2013-2023)

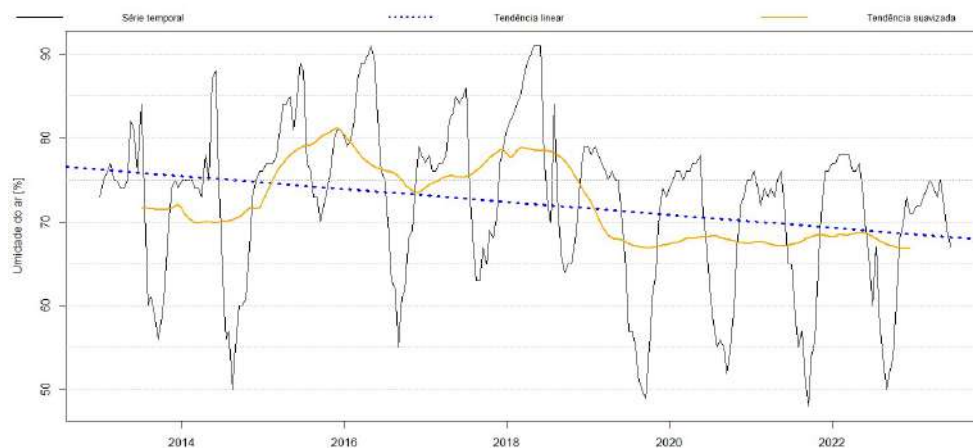


Fonte: Do próprio autor (2024).

Considerando que o ar quente retém maior quantidade de vapor de água do que o ar frio e a quantidade de vapor de água não muda instantaneamente com a temperatura, é comum que a umidade relativa do ar diminua à medida que a temperatura do ar aumente. Uma vez que a umidade relativa é a razão entre a pressão de vapor de água no estado atual pela pressão de saturação do vapor de água numa temperatura $T + \Delta T$. Ou seja, mesmo que a quantidade de vapor de água contida do ar aumente, a capacidade de retenção desse vapor aumenta proporcionalmente com a variação da temperatura. Como resultado desse processo, a fração da saturação do ar com o vapor d'água diminui levando a redução da umidade relativa.

No Gráfico 14, observa-se que, pela linha azul da tendência linear, a umidade relativa foi reduzida em aproximadamente 10% e que nos anos de 2018 a 2023 houve uma média menor do que o intervalo de tempo entre os anos de 2013 e 2018.

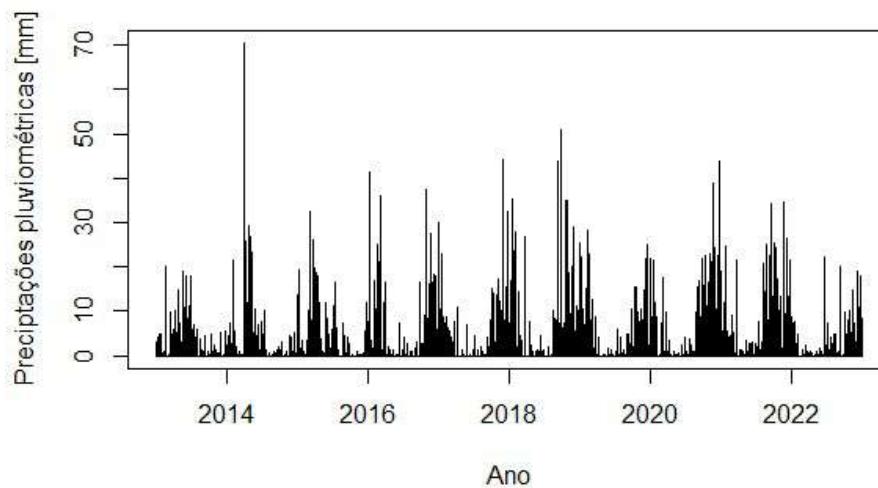
Gráfico 14 - Umidade relativa de Fortaleza - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

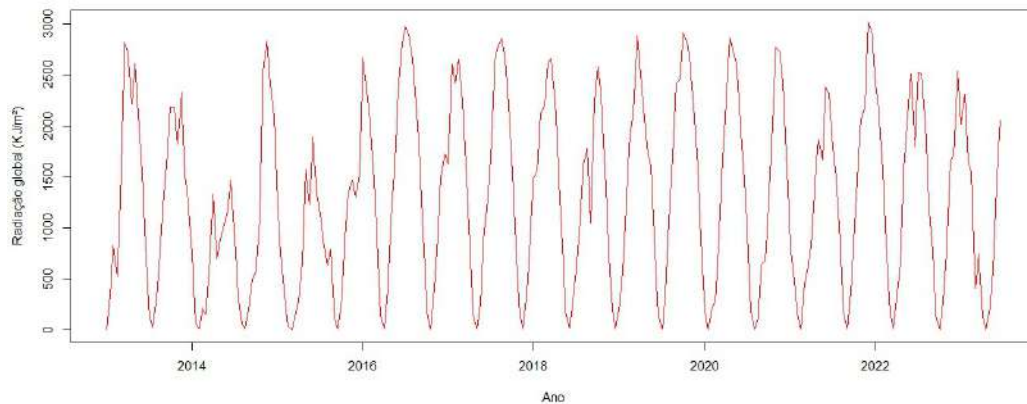
O baixo índice de precipitações pluviométricas em Fortaleza favorece a preservação do ar em temperaturas constantes e secas, os Gráficos 15 e 16 são, respectivamente, as séries temporais da precipitação pluviométrica e da radiação solar global em Fortaleza nos períodos de 2013 a 2023.

Gráfico 15 - Precipitação pluviométrica em Fortaleza - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 16 - Radiação solar global em Fortaleza -CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.2 Sobral.

Sobral é a quinta cidade mais populosa do estado do Ceará com uma densidade demográfica estimada em 98,15 habitantes por metro quadrado, segundo o censo de 2022 (BRASIL, 2023).

A velocidade dos ventos em Sobral em uma altura compreendida entre 0 e 10 metros de altura (a partir da superfície) apresenta uma média estimada entre 2 e 2,5 metros por segundo. Apesar de possuir barreiras de ventos naturais como montanhas e serras elevadas, como é o caso da serra de Meruoca, uma formação de elevações com picos de altitude variados nas proximidades do município de Sobral que pode servir de barreira física para bloquear ou desviar o fluxo natural dos ventos, Sobral pode ter ocorrências de ventos fortes e contínuos principalmente por seus padrões de sazonalidades de seca.

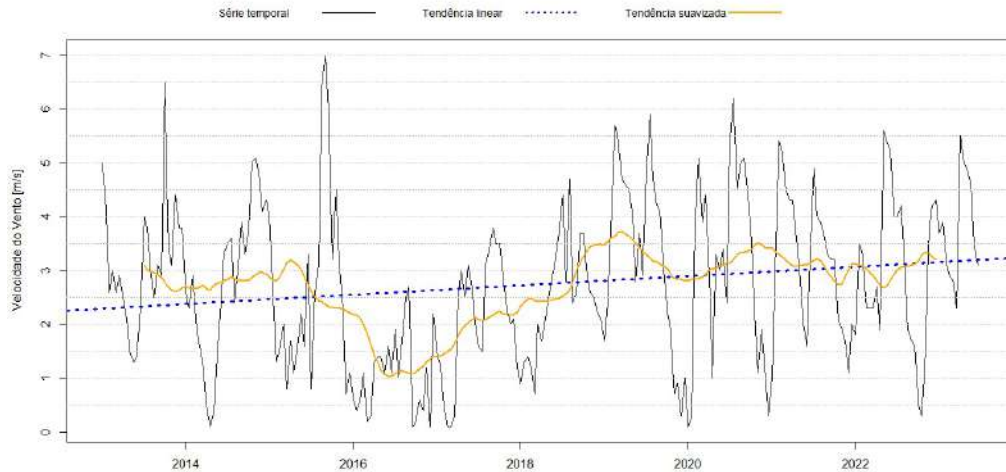
Além das formações geológicas, a vegetação local e as ações antropogênicas como as construções civis podem não somente influenciar a redução da velocidade dos ventos rasteiros como também no microclima da região alterando a temperatura e umidade local.

No Gráfico 17 é apresentado a série temporal da velocidade dos ventos em sobral nos períodos de 2013 a 2023 e a sua tendência linear suavizada.

É válido salientar que por ser uma zona urbanizada com tendências de progresso de investimentos em infraestrutura e desenvolvimento econômico, Sobral apresenta redução em áreas verdes, com o qual pode acarretar o agravamento do fenômeno de “ilha de calor” que é

potencializado pela sua localização no semiárido cearense caracterizado pela baixa umidade e baixo índice de precipitações pluviométricas.

Gráfico 17 - Velocidade dos Ventos em Sobral - CE (2013-2023)

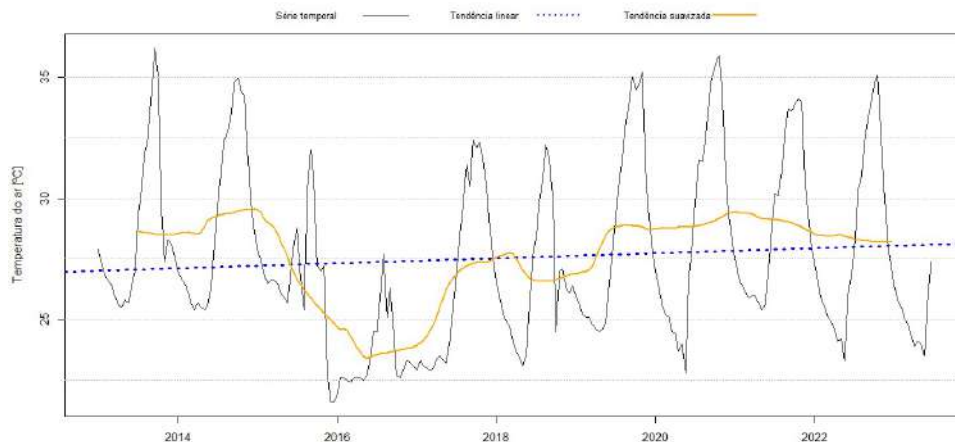


Fonte: Do próprio autor (2024).

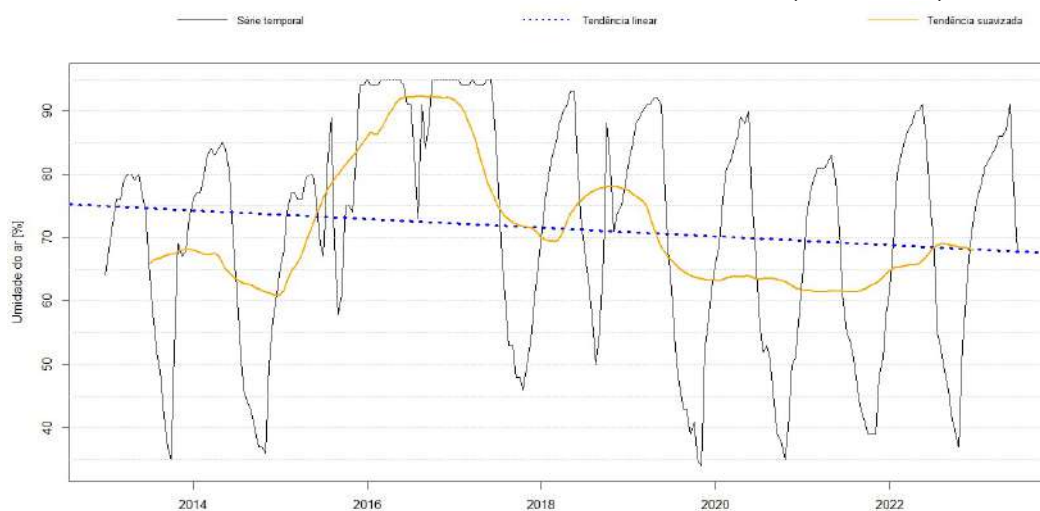
De acordo com a análise dos dados de temperatura e de umidade da cidade de Sobral, observou-se que durante o intervalo estudado a cidade teve uma temperatura média de $27,5^{\circ}\text{C}$, variando entre a temperatura mínima de $17,3^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima de $39,6^{\circ}\text{C}$. A média da umidade relativa de Sobral no período estudado foi de 73% variando entre pontos de 36% e 97% dependendo da estação sazonal da seca e da quadra chuvosa.

Nos Gráficos 18 e 19 tem-se respectivamente as séries temporais da temperatura do ar e da umidade relativa de Sobral durante o período de 2013 e 2023.

Gráfico 18 - Série temporal da temperatura do ar em Sobral (2013-2023)

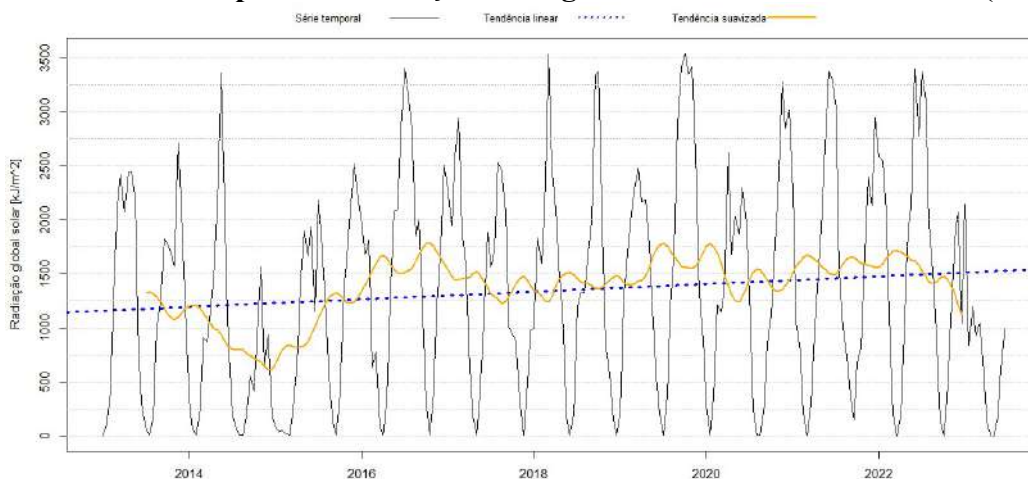


Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 19 - Umidade relativa do ar em Sobral (2013-2023)

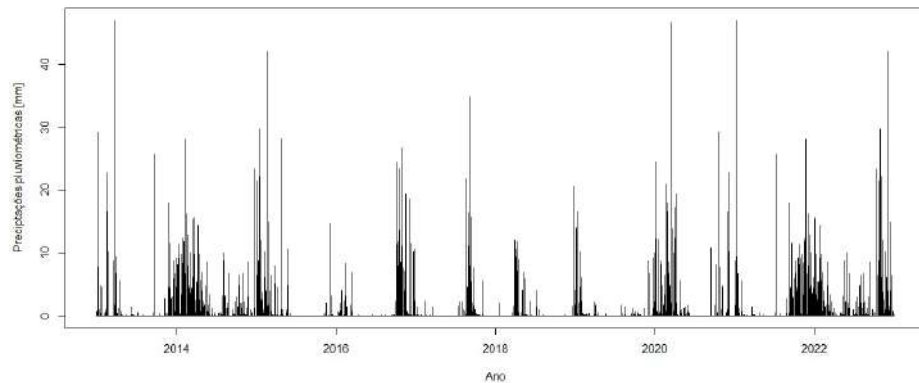
Fonte: Do próprio autor (2024).

Observou-se também que Sobral possui grande potencialidade para o aproveitamento energético fotovoltaico. Os Gráficos 20 e 21 mostram que a cidade possui elevados índices de radiação global solar e pouca precipitação de chuva, o que favorece o aproveitamento da energia solar. Entretanto, a crise hídrica tem sido um desafio para o poder público da cidade.

Gráfico 20 - Série temporal da radiação solar global horária em Sobral - CE (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 21 - Precipitação pluviométrica em Sobral -CE (2013-2023)



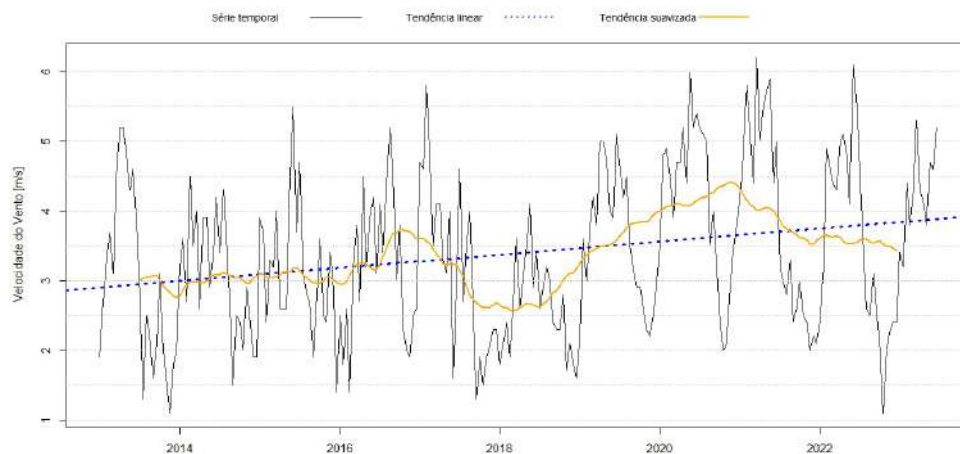
Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.3 Guaramiranga

A cidade de Guaramiranga fica localizada na região do Maciço do Baturité no sertão central no Norte do estado do Ceará, situada a uma altura estimada em 865 metros acima do nível do mar, a cidade cearense é conhecida por apresentar uma temperatura mais amena com o microclima da região definido por tropical úmido (Guaramiranga, 2024).

A média da velocidade dos ventos em Guaramiranga no período estudado é de aproximadamente 3 m/s a uma altura compreendida em 0 e 10 metros (a partir da superfície do solo). A cidade apresenta uma topografia montanhosa que influencia bastante para o desvio e a redução dos ventos, gerando brisas, principalmente nas zonas mais altas da cidade. No Gráfico 22 tem-se a série temporal da velocidade dos ventos em Guaramiranga e sua tendência linear.

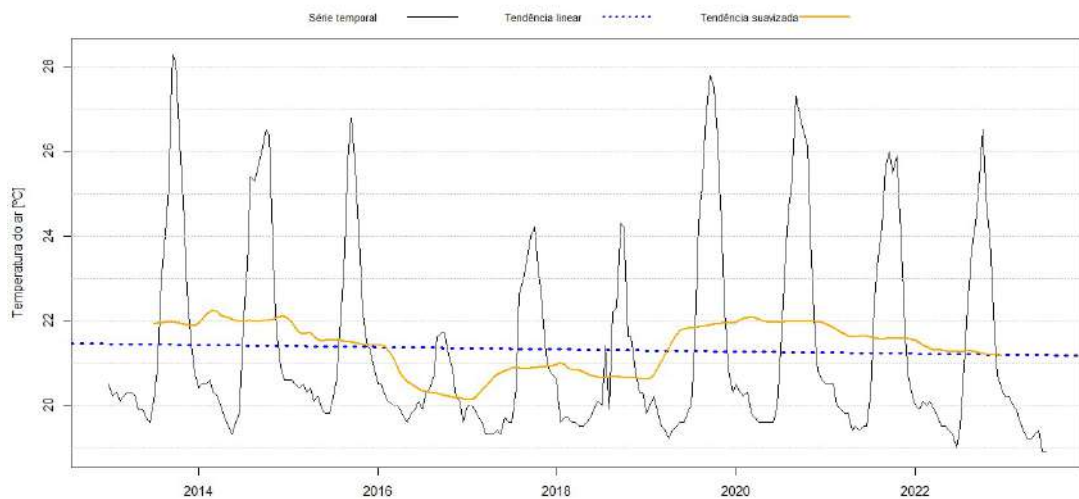
Gráfico 22 - Série temporal da velocidade dos ventos em Guaramiranga - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura da cidade no período de 2013 e 2023 apresentou uma variação entre a temperatura mínima de 13,4°C e a temperatura máxima de 30,8°C com uma média de 20,5°C. No Gráfico 23 tem-se a série temporal e a tendência linear suavizada da temperatura do ar em Guaramiranga.

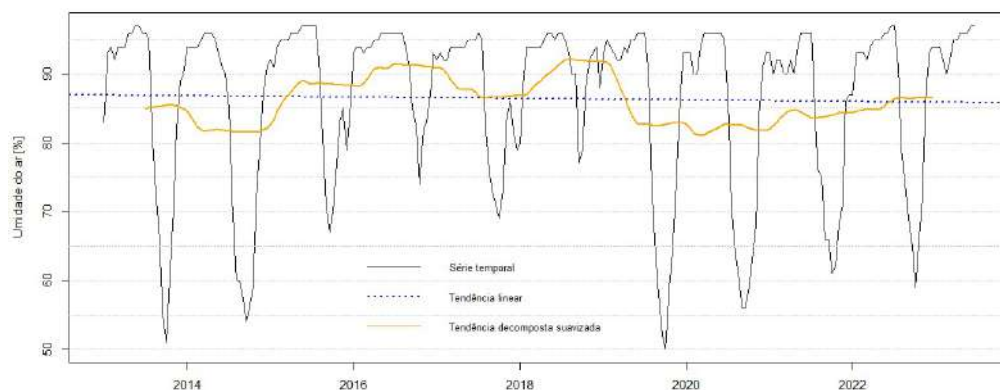
Gráfico 23 - Série temporal da temperatura de Guaramiranga - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

A umidade média da cidade durante o período de 2013 e 2023 é de aproximadamente 85%, variando entre a umidade mínima de 32% e a umidade máxima de 100% dependendo da época do ano. No Gráfico 24 apresenta-se a série temporal da umidade da cidade nesse período.

Gráfico 24 - Série temporal da umidade relativa em Guaramiranga - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

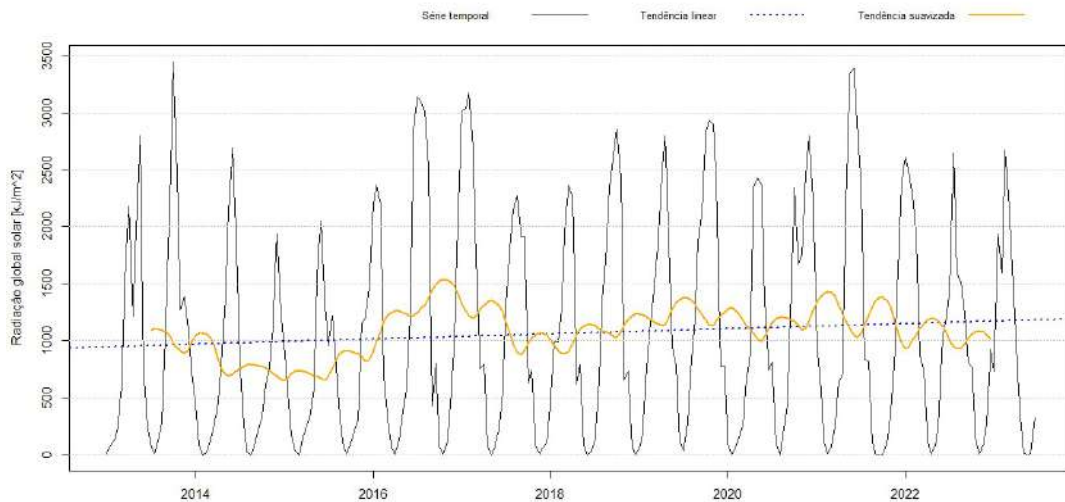
A radiação solar global média em Guaramiranga durante o período estudado foi de 895,4 KJ/m², tendo como valor máximo de registro 4867,4 KJ/m².

Considerando a altitude da cidade e a grande umidade do ar, pode-se imaginar que esses fatores contribuem para a presença constante de nuvens e grande nebulosidade que

consequentemente afetam a quantidade de raios luminosos solares que incidem ao solo, de modo que poderá ser um fator que implique na baixa eficiência do aproveitamento energético solar fotovoltaico.

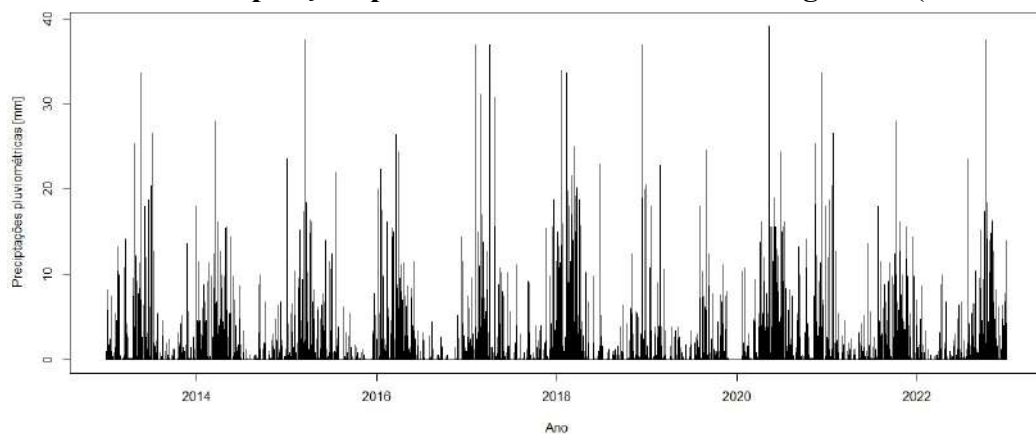
Nos Gráficos 25 e 26 tem-se as séries temporais dos registros de radiação solar e precipitações pluviométricas em Guaramiranga entre 2013 e 2023.

Gráfico 25 - Radiação solar global em Guaramiranga - CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 26 - Precipitações pluviométricas em Guaramiranga - CE (2013-2023)

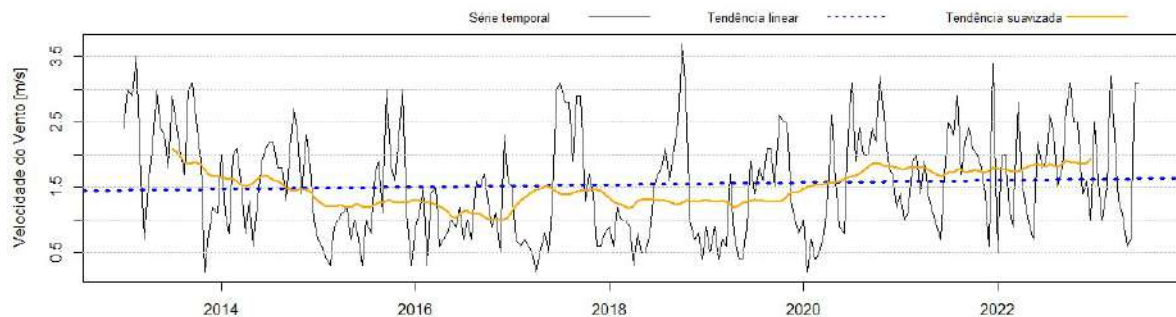


Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.4 Barbalha

Barbalha é um município cearense localizado na região do Cariri que apresenta microclima tropical com temperaturas elevadas durante todo o ano e com sazonalidade de ventos bem variada. No Gráfico 27, tem-se a série temporal da velocidade dos ventos em Barbalha no período entre 2013 e 2023. Observa-se que durante o período estudado a velocidade média do vento em uma altura compreendida entre 10 metros de altura a partir do solo foi de aproximadamente 1,5 m/s, com manifestações excepcionais de ventos com velocidades de 8,6 m/s.

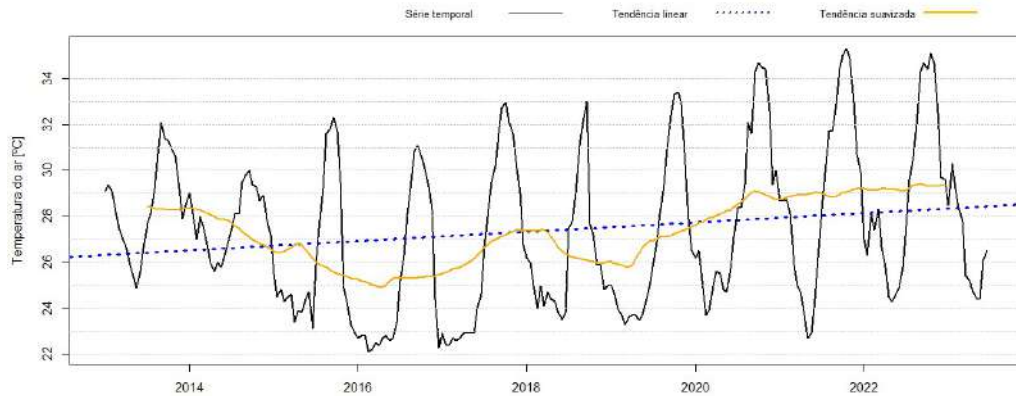
Gráfico 27 - Série temporal da velocidade dos ventos em Barbalha - CE (2013-2023)



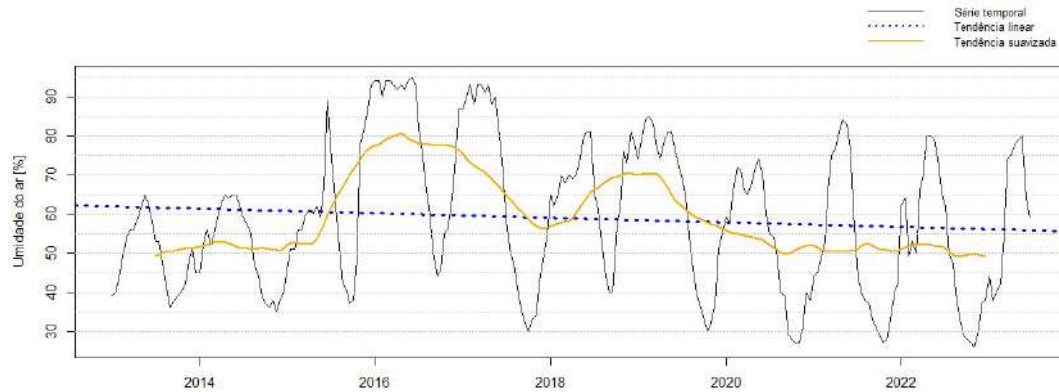
Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura do ar em Barbalha apresentou um aumento de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$ nos últimos 10 anos entre o período de 2013 e 2023, com uma tendência de redução na umidade relativa do ar em aproximadamente 7%, onde a média da umidade relativa durante esse intervalo foi de 62%, variando entre os pontos mínimos de 12% e 97% dependendo da época do ano. Nos Gráficos 28 e 29 tem-se a série temporal da temperatura e da umidade relativa, respectivamente.

Gráfico 28 - Série temporal da temperatura de Barbalha - CE (2013-2023)



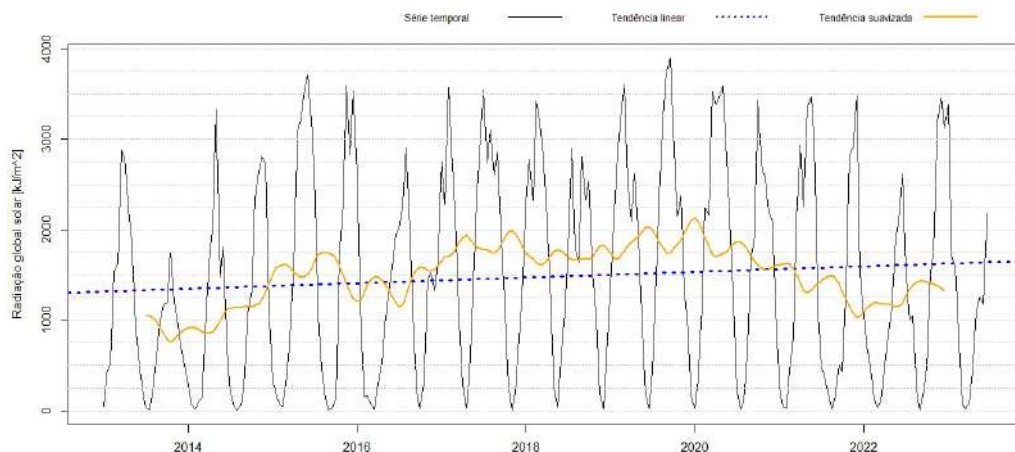
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 29 - Série temporal da umidade relativa em Barbalha (2013-2023)

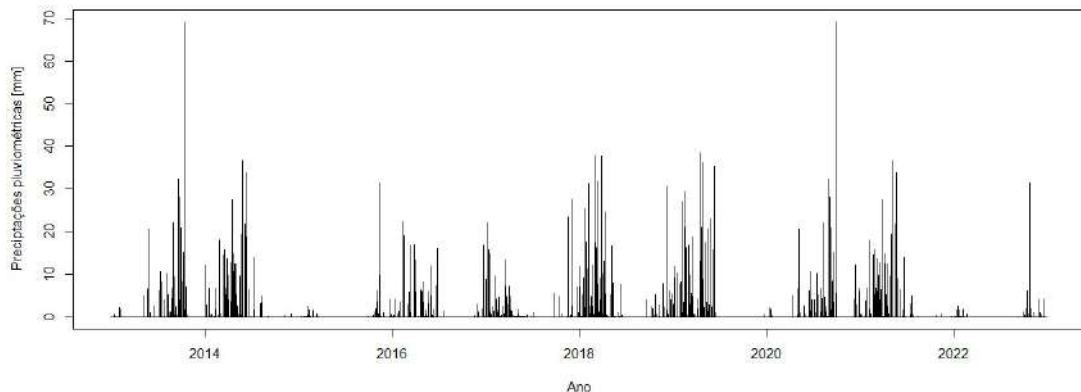
Fonte: Do próprio autor (2024).

Sabe-se que a precipitação pluviométrica de Barbalha é influenciada pela zona de convergência intertropical, apresentando sazonalidade com maior índice de precipitações entre o mês de fevereiro e maio. Quando o período chuvoso cessa, Barbalha recebe intensa quantidade de radiação solar ao longo do ano. Durante o período estudado, observou-se que Barbalha alcançou índice de radiação de $4818,3 \text{ kJ/m}^2$, com média de 1680 kJ/m^2 .

Nos Gráficos 30 e 31, observa a radiação solar e a quantidade de precipitações em Barbalha durante o intervalo de 2013 e 2023, respectivamente, onde é possível é notar que a radiação solar global durante esse período apresentou uma tendência linear de crescimento, o que favorece e incentiva investimentos para o aproveitamento energético por meio da energia solar fotovoltaica.

Gráfico 30 - Série temporal da radiação solar global em Barbalha (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 31 -Precipitação pluviométrica em Barbalha (2023-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.5 Iguatu

O município de Iguatu está localizado na região centro Sul do estado do Ceará, com o semiárido como clima predominante. Iguatu apresenta uma velocidade de vento média de 2,3 m/s a uma altura de 10 metros a partir do solo, temo como velocidade máxima registrada 9,9 m/s. O Gráfico 32 mostra a série temporal da velocidade dos ventos em Iguatu entre os anos de 2013 e 2023. É possível notar que houve uma tendência linear de redução ao longo do tempo que pode ser justificada por efeitos naturais ou antropogênicos. Os fatores mais comuns que podem estar associados a esse fenômeno seja o desmatamento e mudança na utilização do solo, crescimento urbano, aquecimento local com geração de ilhas de calor e fenômenos climáticos cíclicos.

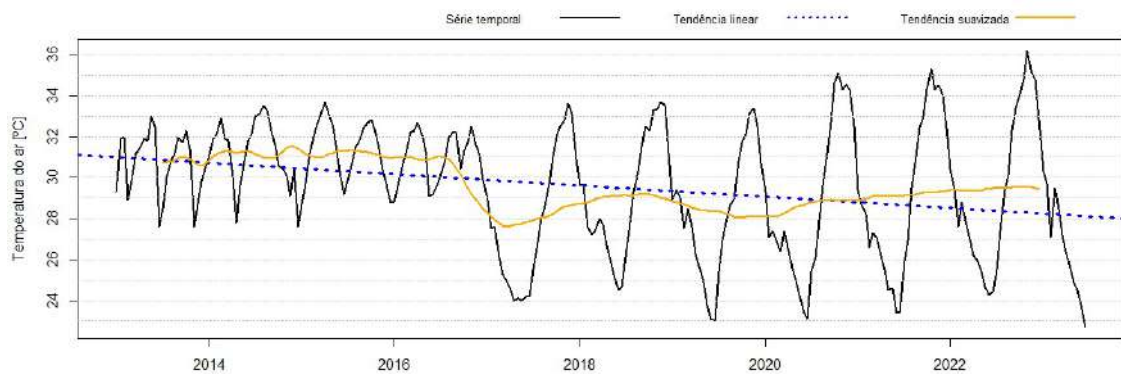
Gráfico 32 - Série temporal da velocidade dos ventos em Iguatu (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura média durante o período de 2013 a 2023 foi de 27,2°C, com manifestações de onda de calor com temperaturas de 38,4°C. Entretanto, de acordo com os dados analisados, observou-se que a partir do ano de 2017 ao ano de 2023 houve episódios de

temperaturas mais amenas, alcançando registros de 25°C, ou ainda em 2019 com temperaturas mínimas de 17,5°C proporcionando maior amplitude na variação da temperatura causando um arrefecimento na temperatura do ar. O Gráfico 33 mostra a série temporal da temperatura do ar em Iguatu.

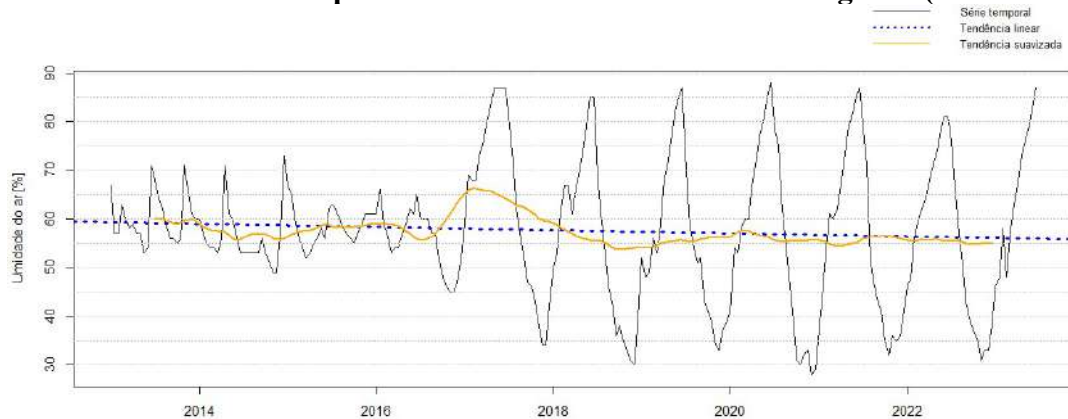
Gráfico 33 - Série temporal da temperatura do ar em Iguatu- CE (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

A umidade relativa em Iguatu apresentou média de 55% no intervalo de 2013 a 2023, com pontos mínimos de 8% e máximos de 100%, com uma tendência de redução de aproximadamente 5% ao longo do tempo estudado. No Gráfico 34 tem-se a série temporal da umidade relativa do ar em Iguatu durante o intervalo de 2013 a 2023.

Gráfico 34 - Série temporal da umidade relativa do ar em Iguatu (2013-2023)



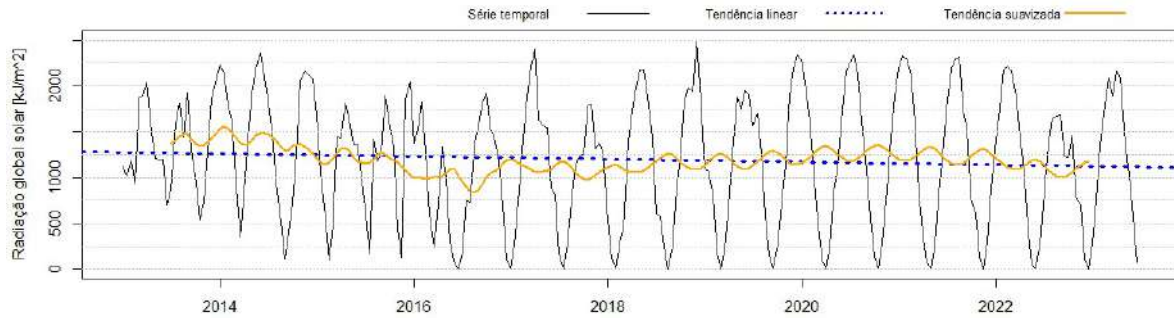
Fonte: Do próprio autor (2024).

Observou-se que os registros coletados da umidade relativa do ar entre os anos de 2013 e 2017 pela estação meteorológica de Iguatu apresentaram variação controlada em relação aos registros de 2017 a 2024 que apresentaram amplitudes bem maiores.

A quantidade de precipitação e a radiação solar global na cidade podem ser consideradas dois fatores meteorológicos que favorecem o aproveitamento energético solar na região, uma

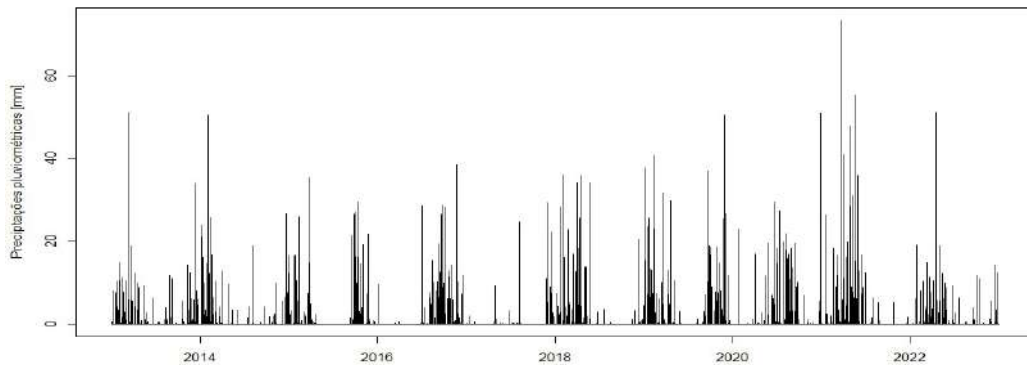
que, de acordo com o Gráfico 35, a cidade possui presença constante da radiação solar com registros máximos de 2539,3 kJ/m² e com uma média de 1043,85 kJ/m² durante o intervalo de 2013 e 2023, apresentando uma baixa taxa de precipitações durante o período, conforme mostra o Gráfico 36.

Gráfico 35 - Radiação solar global em Iguatu (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 36 - Precipitação pluviométrica em Iguatu (2013-2023)



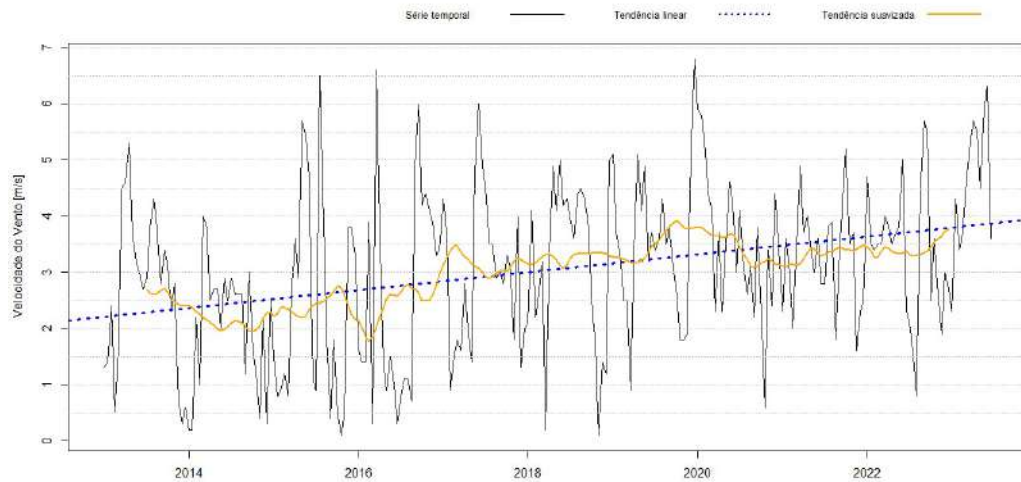
Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.6 Tauá

Tauá é uma cidade cearense localizada na região do Sertão dos Inhamuns, o segundo maior município cearense em extensão territorial, apresenta um microclima semiárido quente, apresentando uma quadra chuvosa com predominância no primeiro semestre do ano.

Após a análise dos dados, observou-se que a velocidade média dos ventos em Tauá durante o período de 2013 a 2023 é de aproximadamente 2,9 m/s, com velocidade máxima alcançando até 10,3 m/s. No Gráfico 37 tem-se a série temporal da velocidade dos ventos em Tauá no período de 2013 a 2023. Observa-se que a tendência linear nesse intervalo evidencia um aumento na velocidade dos ventos, o que pode significar uma alta potencialidade para o aproveitamento eólico.

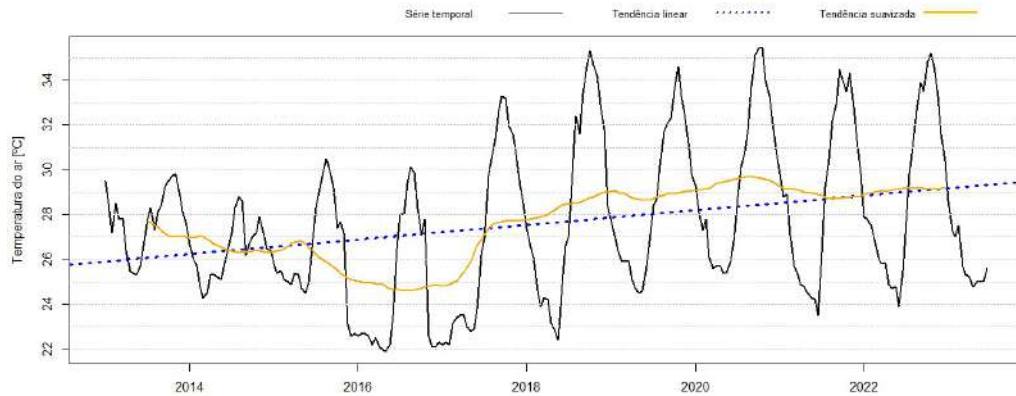
Gráfico 37 - Velocidade do vento em Tauá (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura de Tauá apresentou uma média de 27°C durante o intervalo de 10 anos, tendo como temperatura mínima de 16,4°C e temperatura máxima de 38,7°C. No Gráfico 38, observa-se que durante o intervalo de tempo estudado, a tendência linear da temperatura foi crescente, e é estimada em um aumento de aproximadamente 1°C.

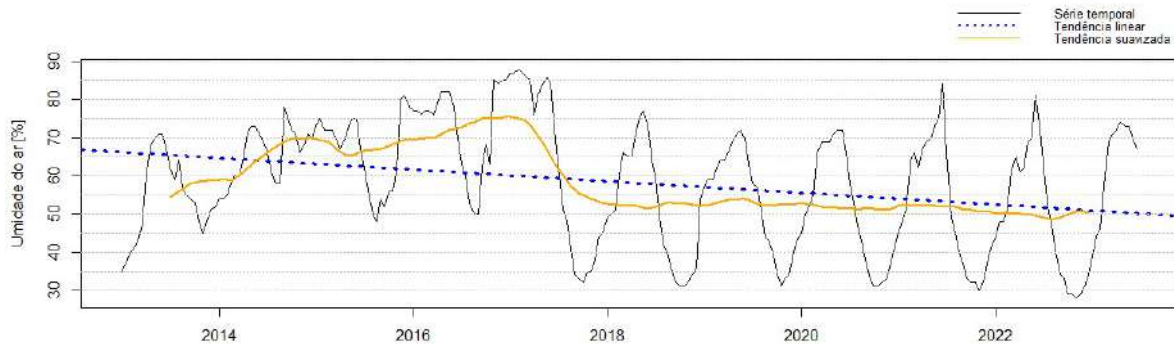
Gráfico 38 - Temperatura de Tauá (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

A umidade relativa de Tauá apresentou uma média de 58%, alcançando pontos mínimos de 11% e pontos máximos de 98% por cento. No Gráfico 39 tem-se a apresentação da série temporal da umidade relativa do ar em Tauá durante os anos de 2013 e 2023.

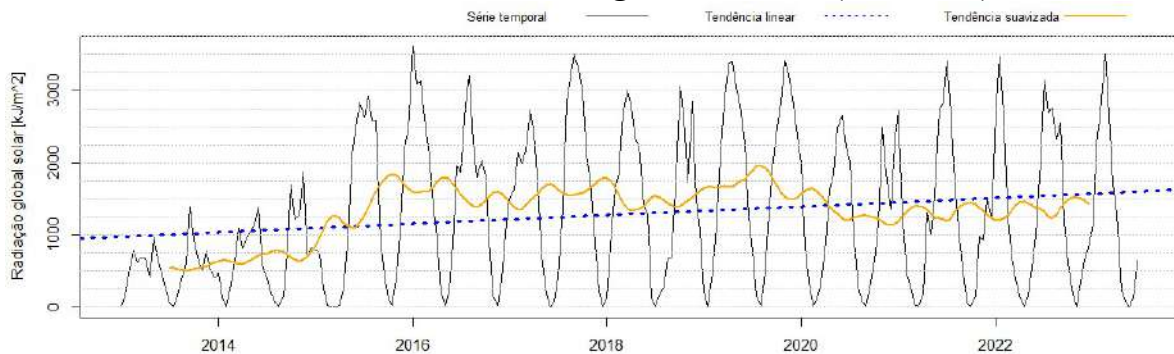
Gráfico 39 - Umidade relativa de Tauá (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

No que tange a potencialidade solar para o aproveitamento energético em Tauá, observou-se que a cidade apresentou condições favoráveis para a implantação de sistemas de aproveitamento energético fotovoltaico durante o período de 2013 e 2023. Com uma média de $1516,6 \text{ kJ/m}^2$ durante o intervalo de tempo observado, a cidade teve picos máximos de expressivos de $6260,5 \text{ kJ/m}^2$. O Gráfico 40 apresenta a série temporal da radiação solar global em Tauá no período dos anos de 2013 a 2023.

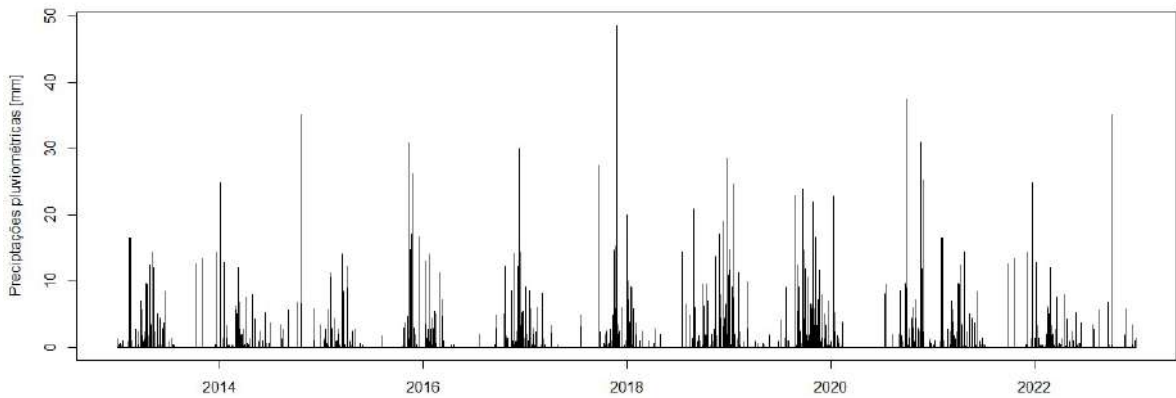
Gráfico 40 - Radiação solar global em Tauá (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

Sabe-se que em regiões mais ensolaradas e com menor presença de nebulosidade, como nuvens chuvosas, o aproveitamento de energia solar é significativamente maior. Tauá se destaca por atender perfeitamente a essas condições. No Gráfico 41, é apresentada a quantidade de precipitações em Tauá durante o período de 2013 a 2023.

Gráfico 41 - Precipitações pluviométricas em Tauá (2013-2023)

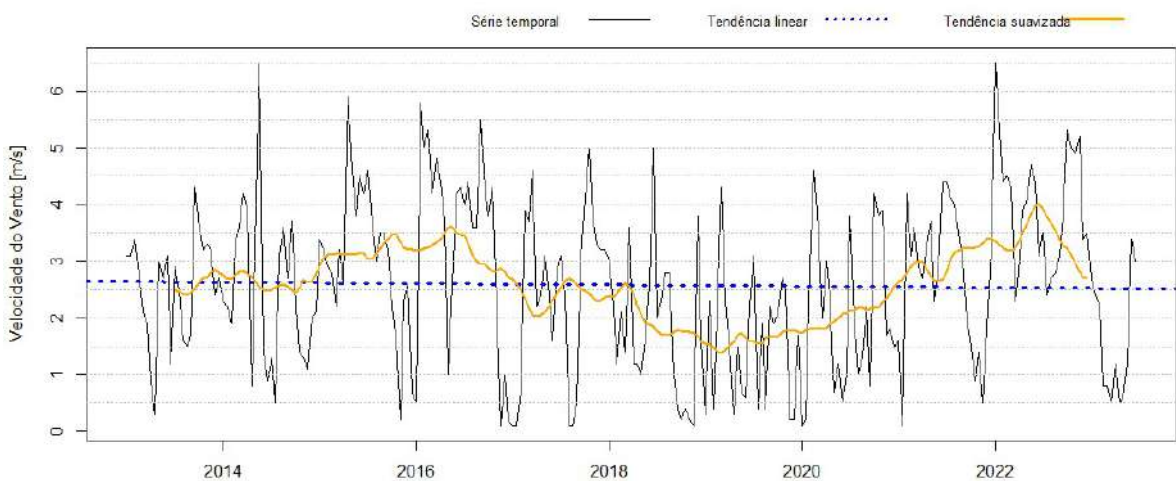


Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.7 Quixeramobim

Quixeramobim é uma cidade cearense situada no sertão do Ceará, onde predomina o microclima semiárido. Esse clima é caracterizado por altas temperaturas constantes ao longo do ano e poucas precipitações. Entre 2013 e 2023, a velocidade média dos ventos foi de 2,7 m/s, com picos de até 11,4 m/s. O Gráfico 42 ilustra a série temporal dos registros da velocidade do vento nesse período.

Gráfico 42 - Velocidade dos ventos em Quixeramobim (2013-2023)

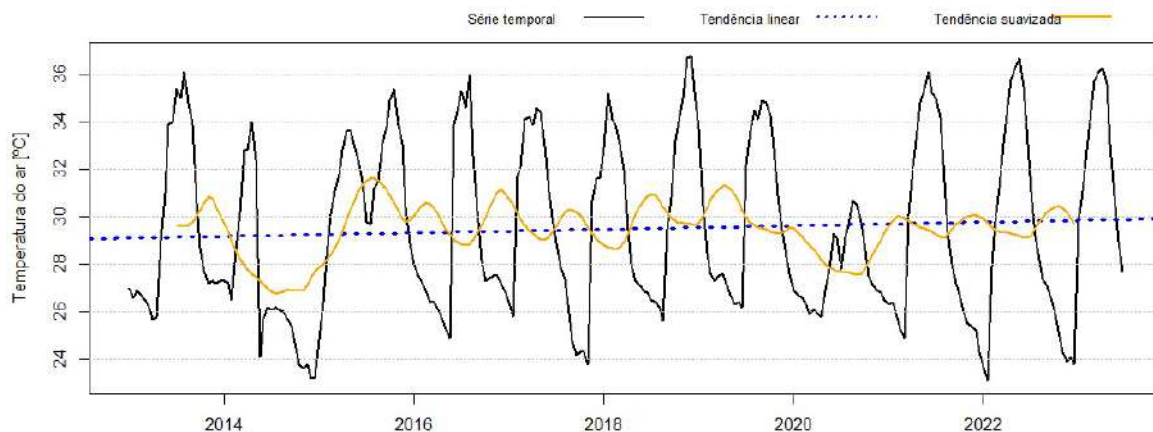


Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura média do ar na cidade durante esse período foi de aproximadamente 27°C, com picos de 38,9°C e temperatura mínima de 17,5°C. A umidade relativa média do ar

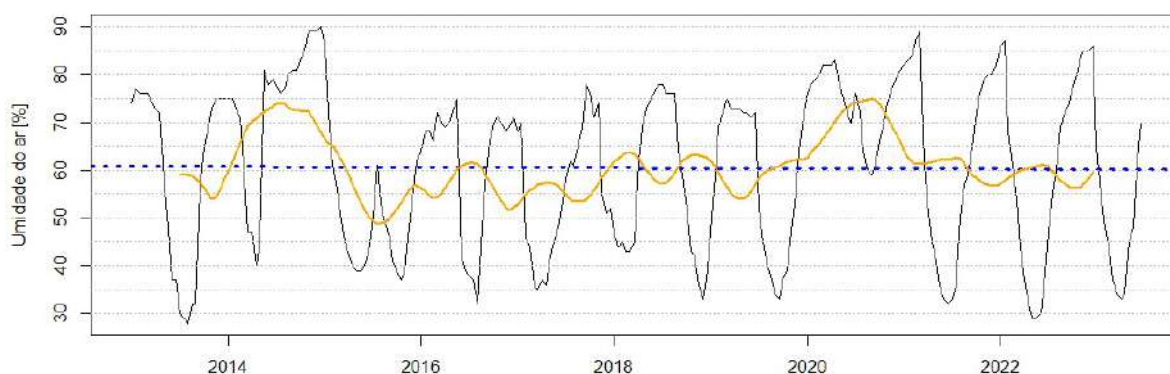
foi de 63%. Nos Gráficos 43 e 44 temos as séries temporais da temperatura e da umidade relativa em Quixeramobim dos anos de 2013 a 2023.

Gráfico 43 - Temperatura de Quixeramobim (2013-2023)



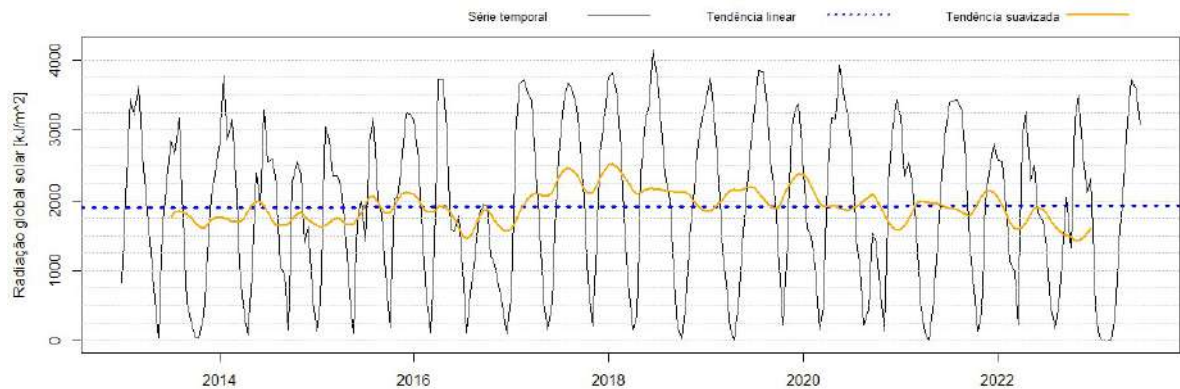
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 44 - Umidade relativa do ar em Quixeramobim (2013-2023)

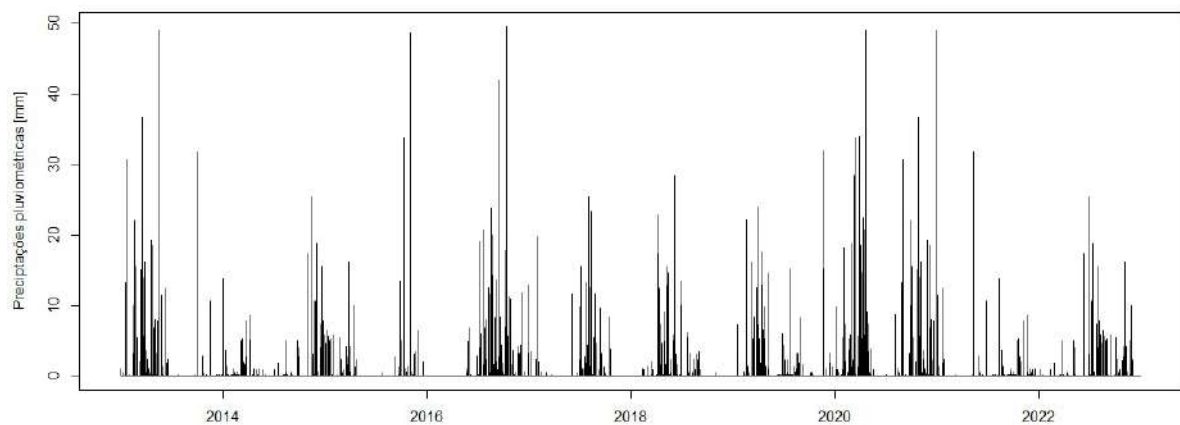


Fonte: Do próprio autor (2024).

A radiação solar global média em Quixeramobim durante o intervalo de 2013 e 2023 foi de aproximadamente $1722,1 \text{ kJ/m}^2$, com a manifestações de picos com carga energética de $4248,9 \text{ kJ/m}^2$. Com baixos índices de precipitações, Quixeramobim também se apresenta um potencial município para o aproveitamento energético solar e fotovoltaico. Nos Gráficos 45 e 46 apresentam, respectivamente, as séries temporais da radiação solar e da precipitação pluviométrica na cidade de Quixeramobim no período de 2013 e 2023.

Gráfico 45 - Série temporal da radiação solar em Quixeramobim (2013-2023)

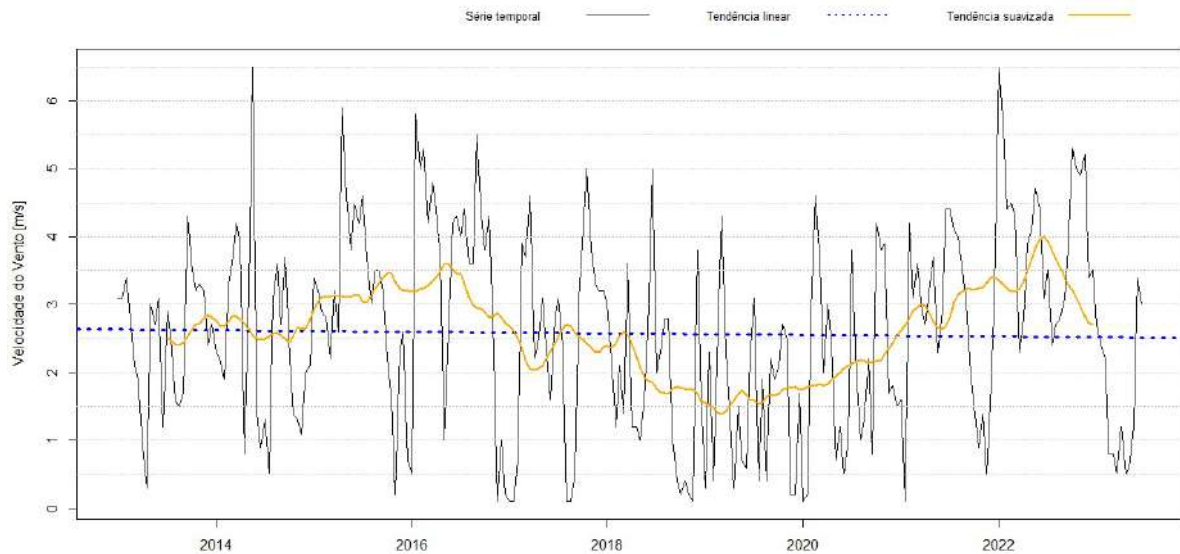
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 46 - Precipitação pluviométrica em Quixeramobim (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

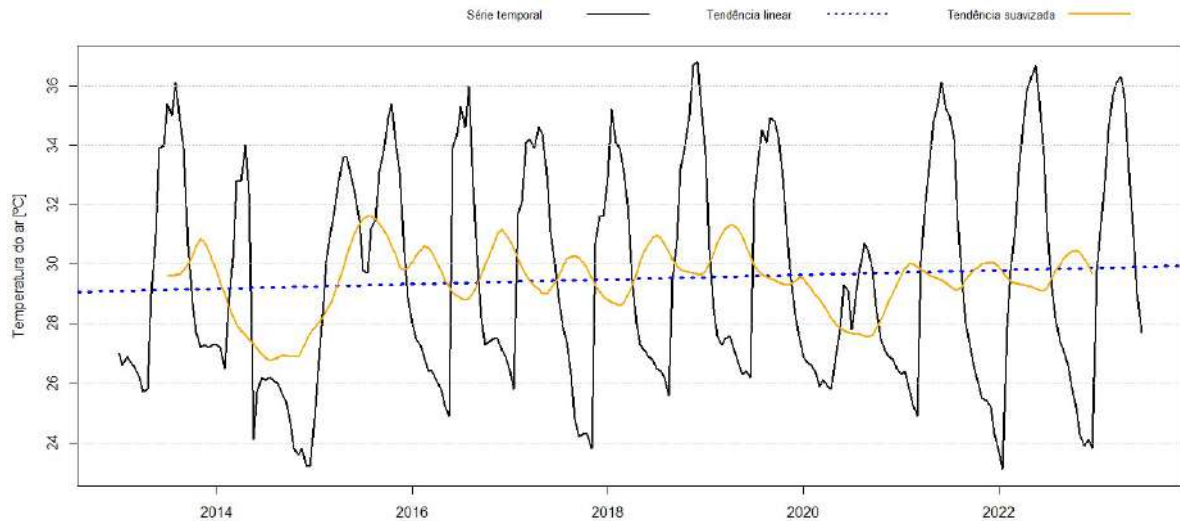
4.1.8 Morada Nova

O município de Morada Nova é uma cidade localizada na mesorregião do Jaguaribe e apresenta o microclima semiárido como predominante com vegetação caatinga arbustiva aberta com abundância. A velocidade dos ventos nessa cidade durante os anos de 2013 e 2023 teve uma média de 2,7 m/s a uma altura compreendida entre 0 e 10 metros (a partir do solo), com registros surpreendentes de velocidade de ventania alcançando 17,9 m/s. No Gráfico 47 tem-se a representação da série temporal da velocidade dos ventos no intervalo de tempo supracitado.

Gráfico 47 - Série temporal da velocidade dos ventos em Morada Nova (2013-2023)

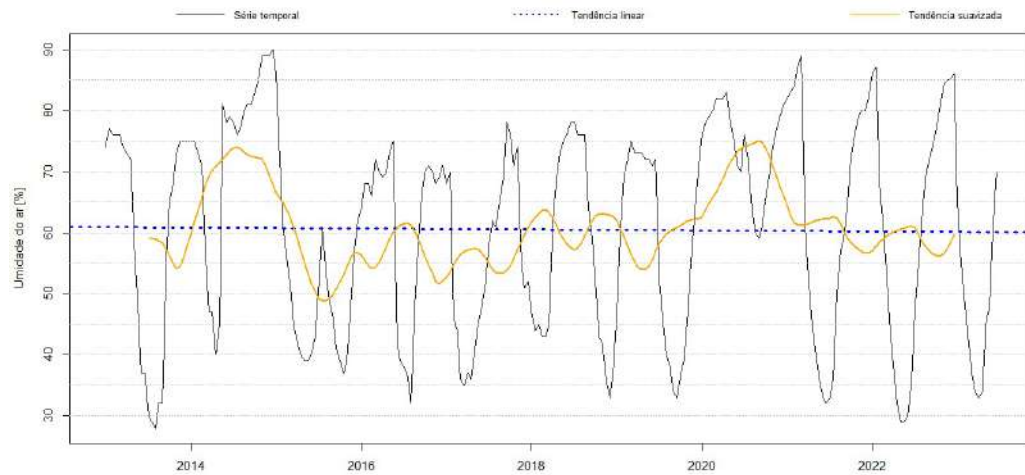
Fonte: Do próprio autor (2024).

Os dados coletados mostraram que a temperatura média da cidade de Morada Nova durante o período de 2013 e 2023 foi de 27 °C, podendo alcançar picos de 38,6 °C, com uma umidade relativa média de 67%. Nos Gráficos 48 e 49 pode-se observar a variação da temperatura e da umidade relativa, respectivamente, nas séries temporais.

Gráfico 48 - Série temporal da Temperatura em Morada nova (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

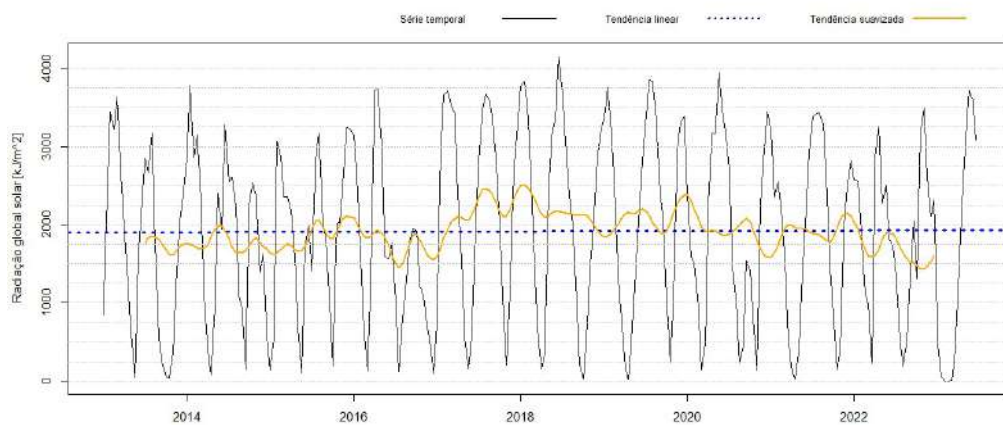
Gráfico 49 - Série temporal da umidade relativa de Morada Nova (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

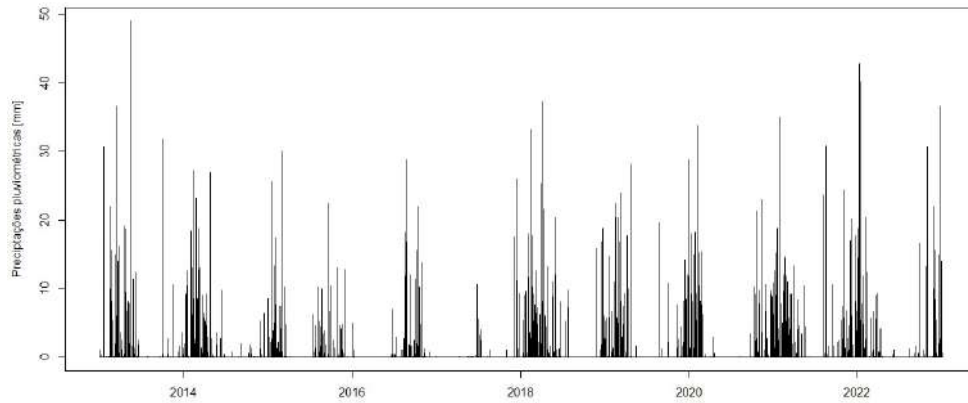
A média da radiação solar na cidade de Morada Nova durante o período de 2013 a 2023 foi de aproximadamente $1478,5 \text{ kJ/m}^2$ com picos de $5389,5 \text{ kJ/m}^2$. Com alta potencialidade solar e com a dias ensolarados constantes, Morada Nova é um município cearense que apresenta boas condições climáticas para o aproveitamento fotovoltaico. Nos Gráficos 50 e 51, tem-se a representação da série temporal da radiação solar global e do índice de precipitação na cidade de Morada Nova.

Gráfico 50 - Série temporal da radiação solar global de Morada Nova (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 51- Precipitação pluviométrica em Morada Nova (2013-2023)

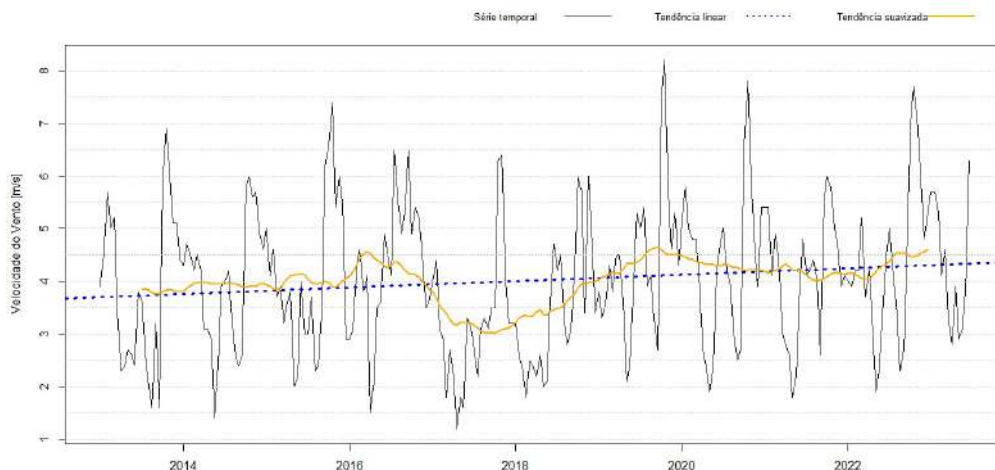


Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.9 Jaguaruana

Jaguaruana é um município cearense localizado na região do vale do Jaguaribe, com clima característico do semiárido, os dados coletados apontam que durante o período de 2013 e 2023 a velocidade média dos ventos a uma altura de até 10 metros nessa cidade foi de aproximadamente 2,9 m/s, podendo alcançar velocidades máximas de 9,2 m/s. No Gráfico 52 tem-se a série temporal da velocidade média dos ventos na cidade.

Gráfico 52 - Velocidade dos ventos em Jaguaruana (2013-2023)

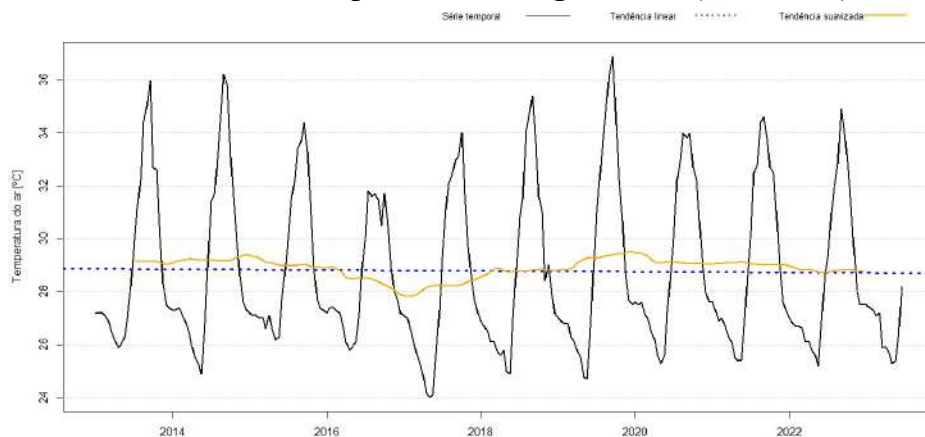


Fonte: Do próprio autor (2024).

Com temperatura característica do clima semiárido, o município de Jaguaruana se destacou em atingir uma das maiores temperaturas entre os anos de 2013 e 2023, com pico de 44,8 °C, apresentando uma média de aproximadamente 28 °C. Com a temperatura elevada é natural que a umidade relativa seja baixa, o que pode ser um risco para a saúde humana devido

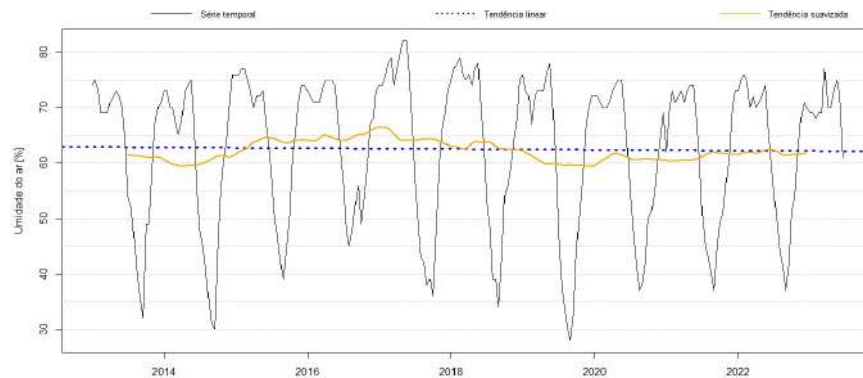
a sensação térmica elevada que pode desencadear crises de exaustão térmica e problemas. A umidade relativa média durante esse intervalo de 10 anos foi de aproximadamente 67%, com registros de umidades mínimas de 1%. Os Gráficos 53 e 54 mostram respectivamente as séries temporais da temperatura e da umidade relativa de Jaguaruana.

Gráfico 53 - Temperatura de Jaguaruana (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

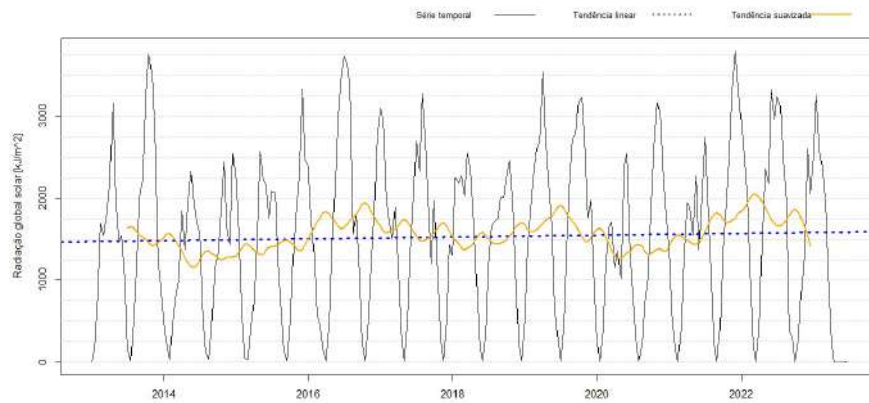
Gráfico 54 - Umidade relativa do ar de Jaguaruana (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

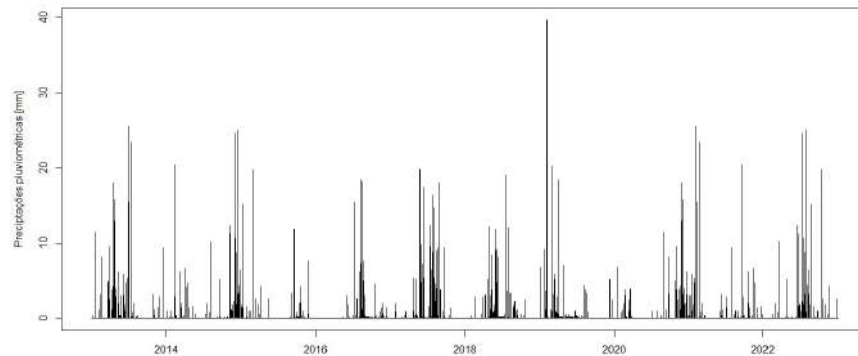
A cidade de Jaguaruana também apresentou uma média de 1570,8 kJ/m² de radiação solar, com picos alcançando o marco de 4715,8 kJ/m², com baixo índices de chuvas. Os Gráficos 55 e 56 mostram respectivamente as séries temporais da radiação solar global e dos índices de precipitações pluviométrica em jaguaruana entre os anos de 2013 e 2023.

Gráfico 55 - Radiação solar global em Jaguaruana (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

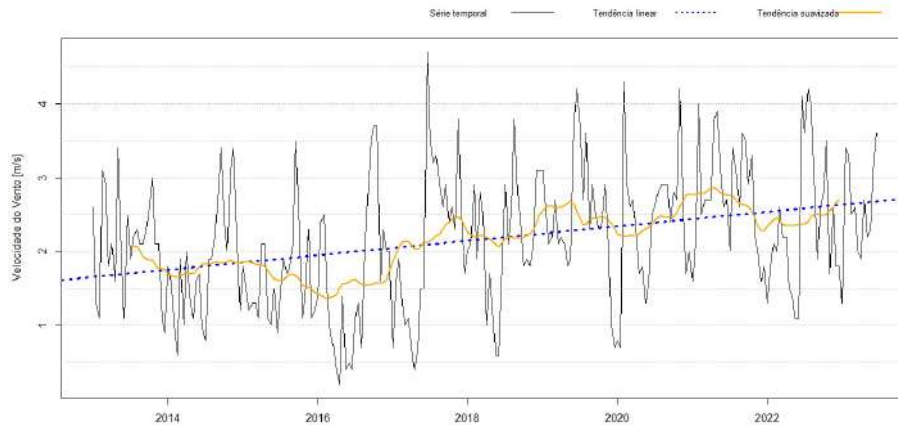
Gráfico 56 - Precipitações pluviométricas em Jaguaruana (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

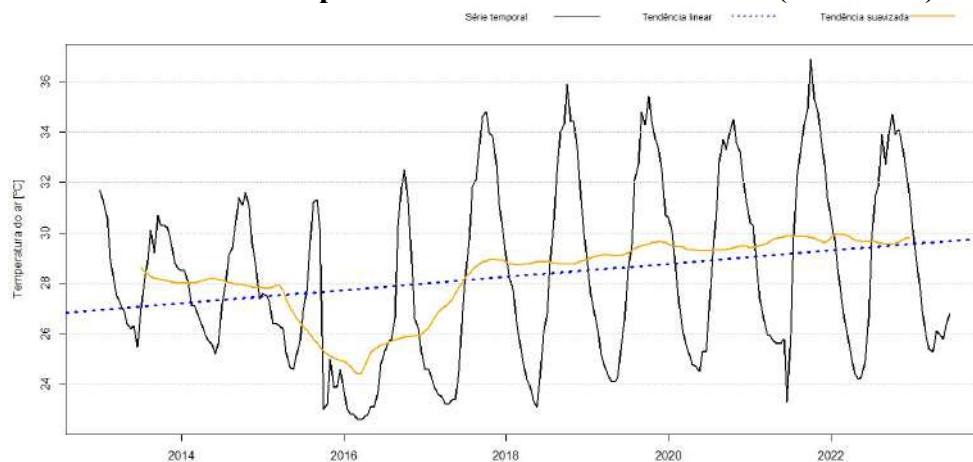
4.1.10 Crateús

Crateús é uma cidade situada no lado Oeste do estado do Ceará e apresenta microclima típico do semiárido quente, com vegetações arbóreas como florestas caducifólios espinhosas e sub-caducifólios tropicais pluviais. De acordo com os dados coletados, a cidade teve uma velocidade dos ventos média de aproximadamente 1,9 m/s entre os anos de 2013 e 2023, com picos de 7,6 m/s. O Gráfico 57 apresenta a série temporal da velocidade média dos ventos da cidade de Crateús no período entre 2013 e 2023.

Gráfico 57 - Velocidade média dos ventos em Crateús (2013-2023)

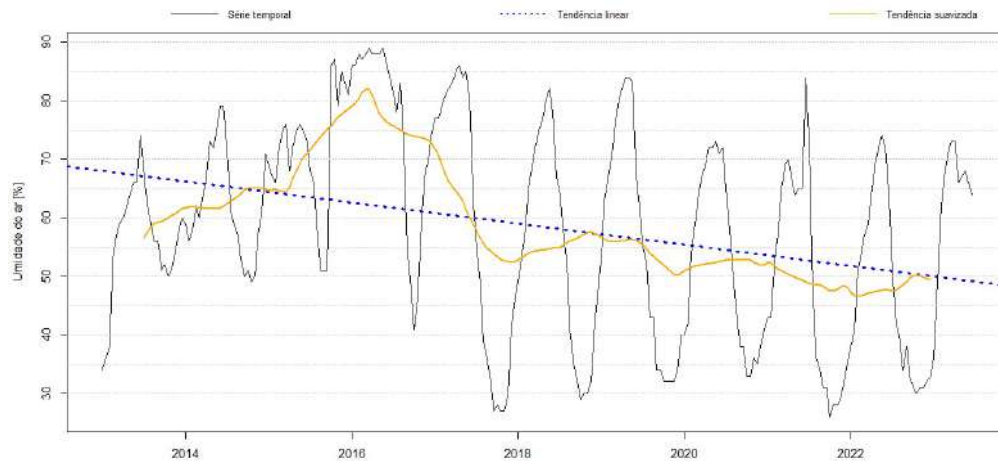
Fonte: Do próprio autor (2024).

Observou-se também que a cidade apresentou temperatura média elevada, com um registro de aproximadamente 27,5 °C, alcançando temperaturas máximas de 39,8 °C, de tal maneira que os meses de junho, julho, agosto e setembro apresentaram as maiores temperaturas. Com a temperatura do ar elevada é comum que a umidade relativa do ar se apresente com valores menores que a sua temperatura, e com isso notou-se que a umidade relativa média durante o período de 10 anos foi de 58%. No Gráfico 58 e 59 tem-se, respectivamente, as séries temporais da temperatura média e da umidade relativa do ar na cidade de Crateús no intervalo de tempo de 2013 a 2023.

Gráfico 58 - Temperatura do ar média de Crateús (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

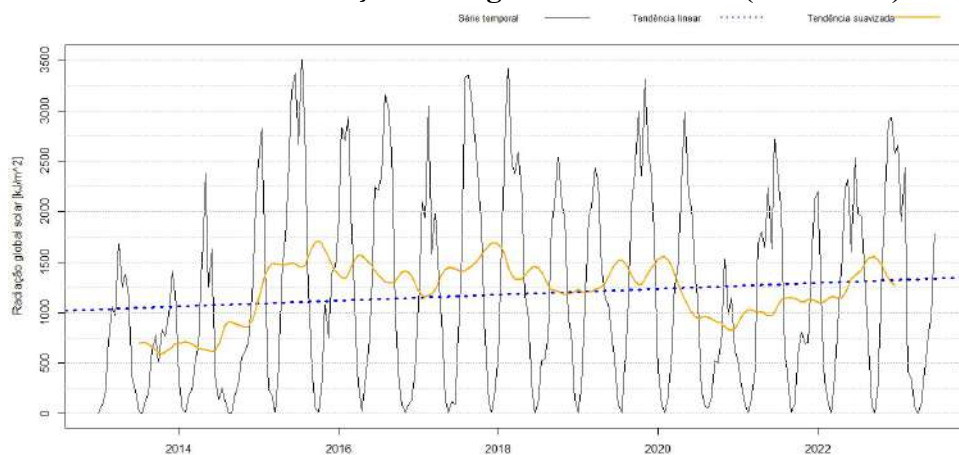
Gráfico 59 - Umidade relativa média do ar de Crateús (2013-2023)



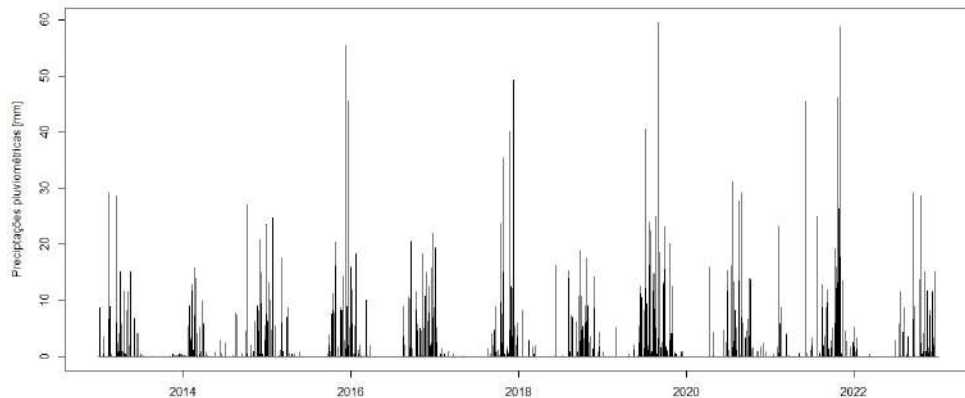
Fonte: Do próprio autor (2024).

A análises dos dados históricos da radiação solar global em Crateús mostram que a cidade também possui uma potencialidade fotovoltaica, uma média de radiação global aproximadamente de $1346,6 \text{ kJ/m}^2$, com picos registrados de $6608,6 \text{ kJ/m}^2$. Com baixos índices de precipitações, observou-se que no intervalo de 10 anos, as chuvas mostraram-se sazonais com ocorrências no primeiro semestre no ano, principalmente entre janeiro e abril. Nos Gráficos 60 e 61 tem-se respectivamente a série temporal da radiação solar e o gráfico de quantidade de precipitações média por ano da cidade de Crateús.

Gráfico 60 - Radiação solar global em Crateús (2013-2023)



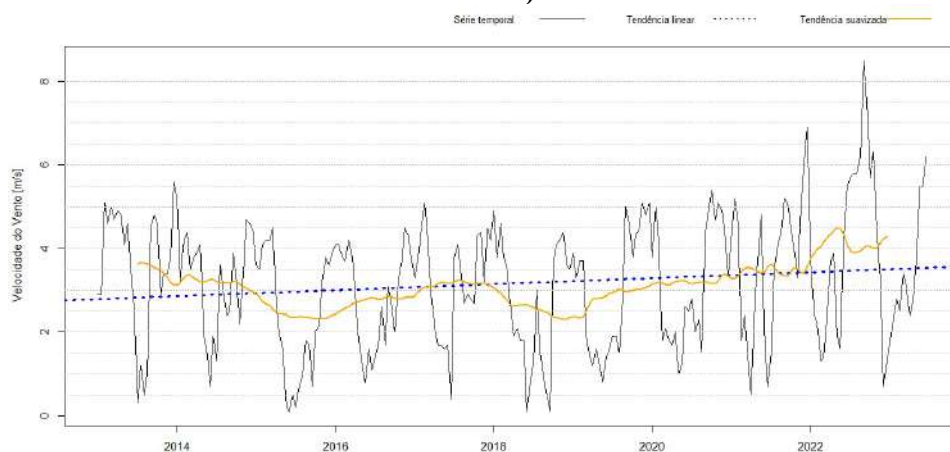
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 61 - Precipitação pluviométrica em Crateús (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.11 Campos Sales

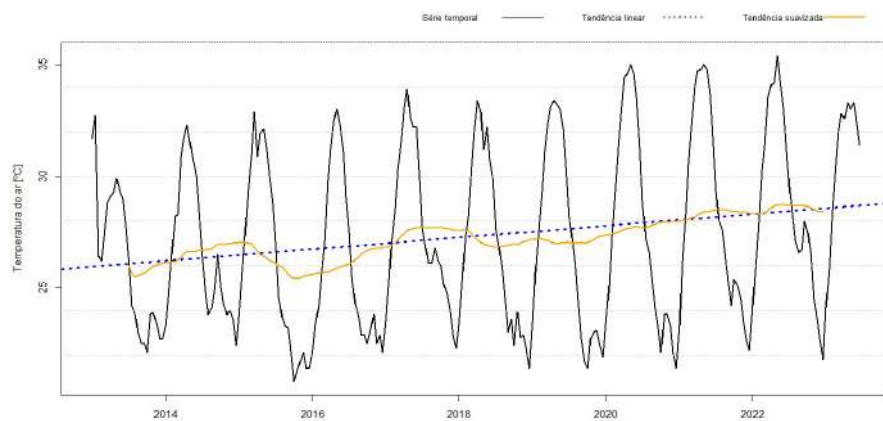
Campos Sales fica situada no sul do estado, na região da chapada do Araripe. Os dados revelam que a velocidade média dos ventos em Campos no intervalo de 10 anos foi de aproximadamente 2,4 m/s, com máxima em 10,3 m/s a uma altura de 10 metros a partir do solo. No Gráfico 62 tem-se a série temporal da velocidade média dos ventos em Campo Sales no período de 2013 a 2023. Observa-se que do ano de 2020 ao ano de 2023 a velocidade dos ventos mostrou-se com maior amplitude, alcançando velocidades médias superiores a 5 m/s, fenômeno que pode ter várias explicações desde dinamismo atmosférico sazonal à ações antropogênicas como o efeito de canalização dos ventos ou redução da vegetação para construção de áreas urbanas.

Gráfico 62 - Série temporal da velocidade média dos ventos em Campos Sales (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

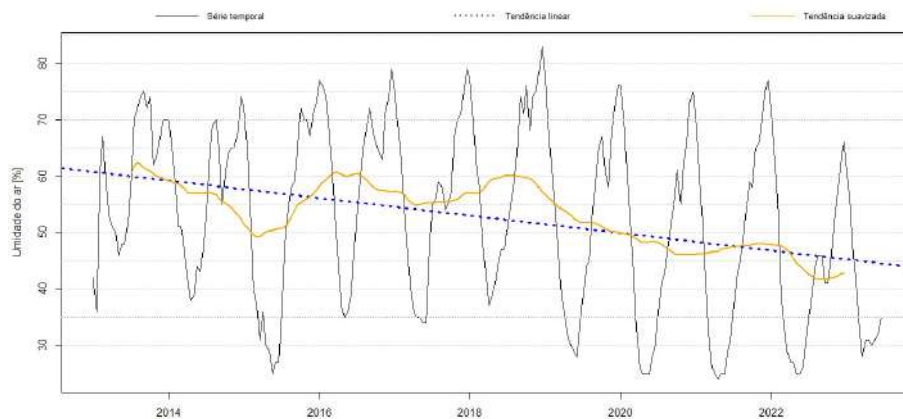
A temperatura do ar da cidade de Campos Sales durante os 10 anos apresentou uma média de aproximadamente 25,3 °C, com máxima em 37,3 °C, onde os meses de agosto, setembro e outubro apresentaram uma sazonalidade de altas temperaturas. É notório que a temperatura nessa cidade apresentou uma tendência de aumento, isto é, com o passar do tempo, a temperatura da cidade ficou cada vez mais quente. Em relação a umidade relativa do ar, a média no período de 10 anos foi de aproximadamente 63% e apresentou uma tendência linear de redução entre os anos de 2013 e 2023. Os Gráficos 63 e 64 mostram respectivamente as séries temporais da temperatura e umidade relativa do ar em Campos Sales de 2013 a 2023.

Gráfico 63 - Temperatura do ar em Campos Sales (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 64 - Umidade relativa do ar em Campos Sales (2013-2023)

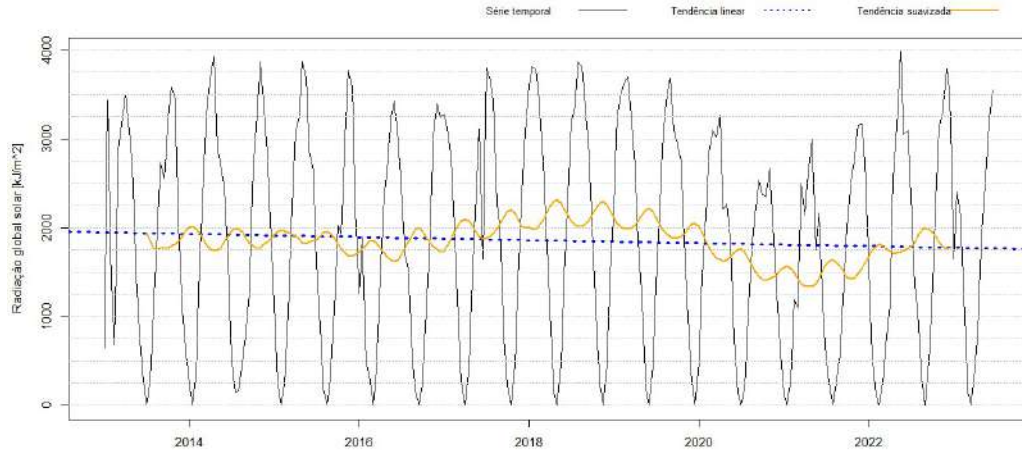


Fonte: Do próprio autor (2024).

A cidade também apresenta pouca precipitação e alta taxa de radiação solar. De acordo com a análise dos dados, Campos Sales registrou uma média de 1253,1 kJ/m² no intervalo de 10 anos, com máximas alcançando o marco de 5893,4 kJ/m². E a precipitação de chuva nessa região foi sazonal ocorrendo entre os meses de dezembro e abril. Nos Gráficos 65 e 66 tem-se

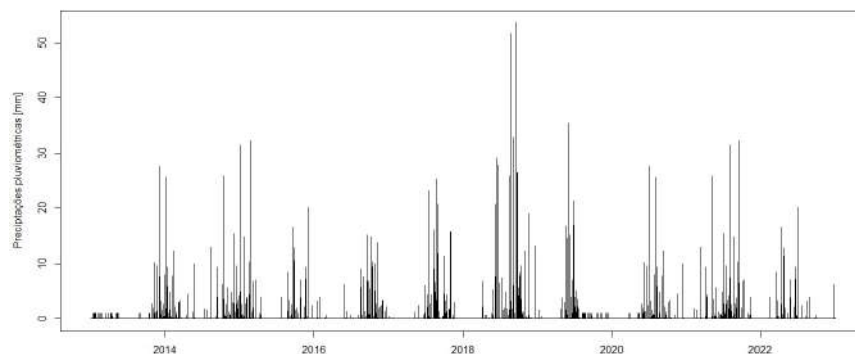
a representação da radiação solar e da precipitação pluviométrica em Campos Sales entre os anos de 2013 e 2023.

Gráfico 65 - Radiação solar global de Campos Sales (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

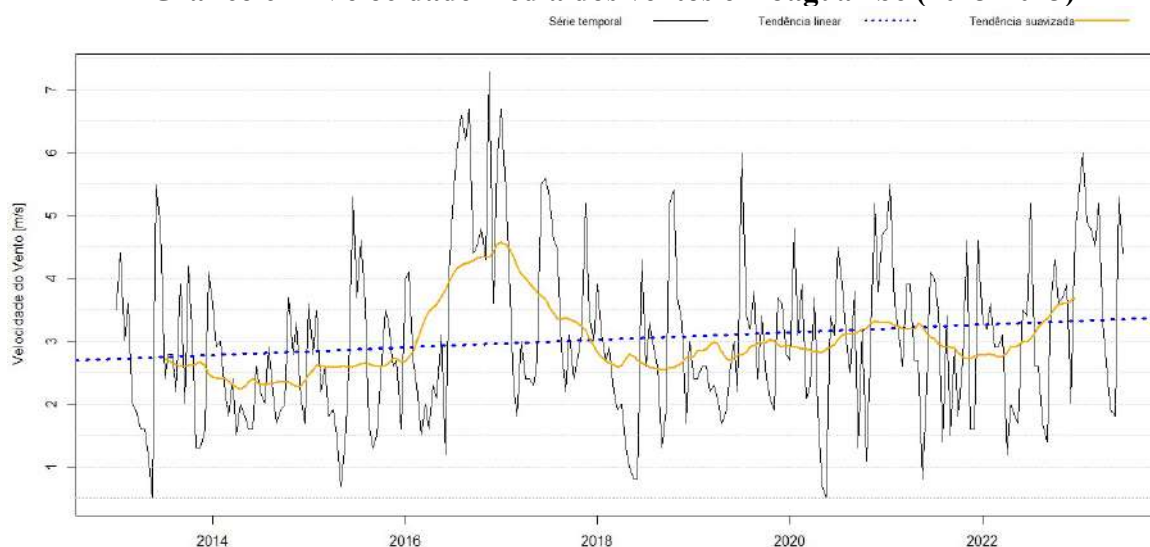
Gráfico 66 - Precipitação pluviométrica em Campos Sales (2013-2023)



Fonte: Do próprio autor (2024).

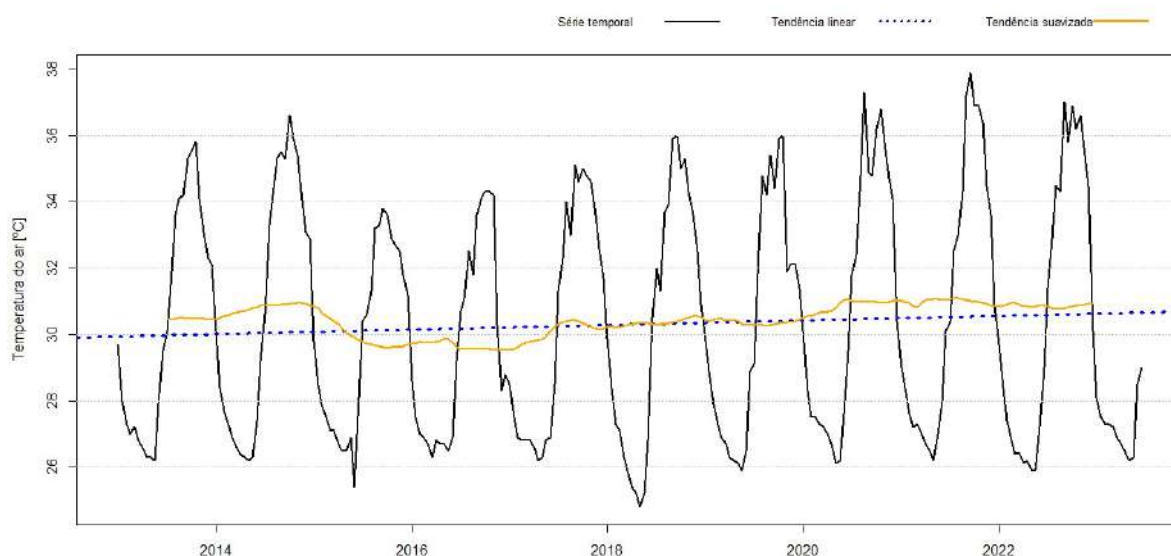
4.1.12 Jaguaribe

O município de Jaguaribe fica na região sul do estado e é uma das cidades que compõe o vale do Jaguaribe. De acordo com os dados estudados, a cidade apresentou uma velocidade média de 2,4 m/s, com picos em 13,2 m/s a uma altura de 10 metros a partir do solo. Os meses que possuíram maior intensidade de ventos durante 10 anos foram os meses de agosto e setembro. No Gráfico 67 tem-se a série temporal da velocidade média dos ventos em Jaguaribe no período de 2013 a 2023.

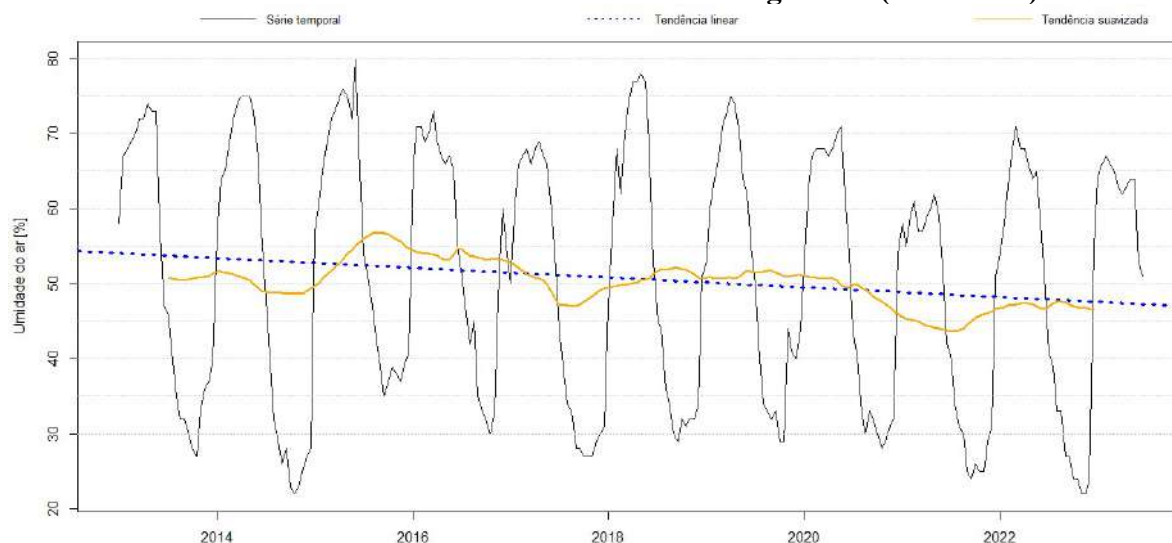
Gráfico 67 - Velocidade média dos ventos em Jaguaribe (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura média da cidade entre os anos de 2013 e 2023 foi de aproximadamente 28,4 °C, com máximas de 40,2 °C, onde os meses mais quentes do ano são os meses de outubro, novembro e dezembro. Já a umidade relativa do ar apresentou uma média de 54%. Os gráficos 68 e 69 mostrarão respectivamente as séries temporais com a temperatura e umidade relativa do ar na cidade de Jaguaribe entre os anos de 2013 e 2023.

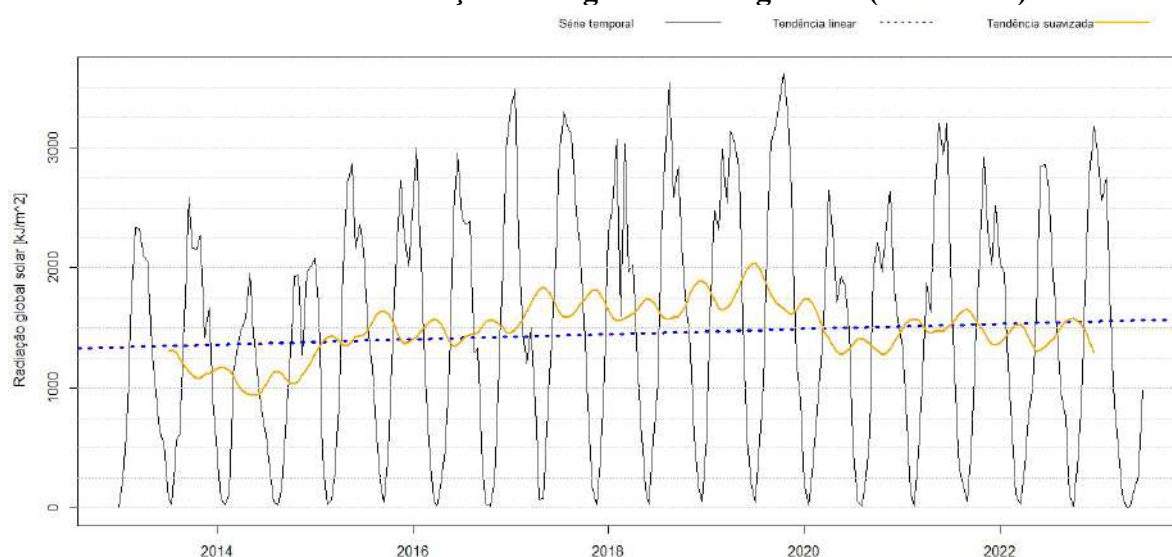
Gráfico 68 - Temperatura do ar em Jaguaribe (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

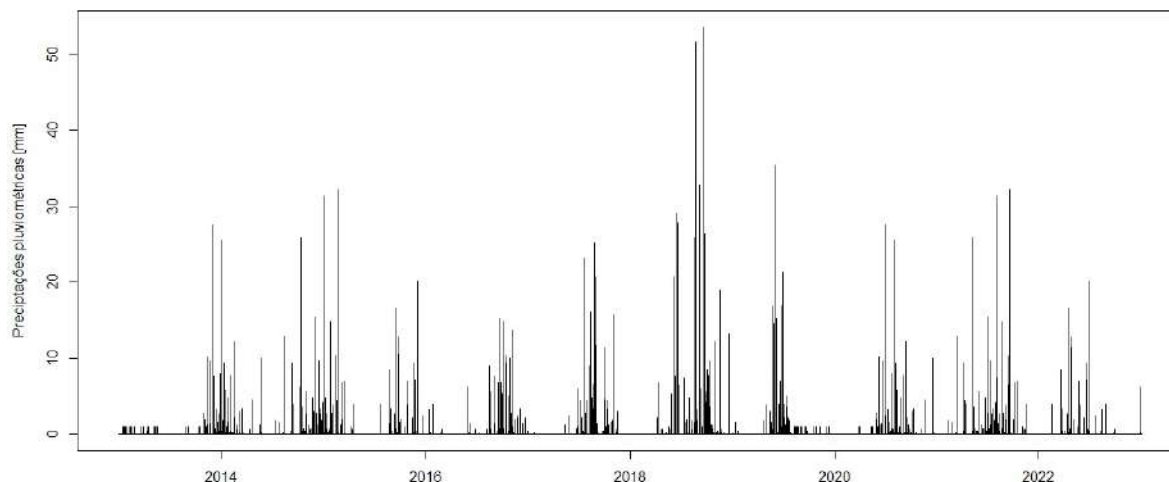
Gráfico 69 - Umidade relativa do ar em Jaguaribe (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

Os dados mostram que Jaguaribe também desfruta de uma abundante potencialidade solar fotovoltaico. No intervalo de 10 anos, a cidade registrou uma média de $1400,9 \text{ kJ/m}^2$ de radiação solar global, com máximas alcançando $5005,6 \text{ kJ/m}^2$. Os Gráfico 70 e 71 mostram respectivamente a radiação solar global da cidade de Jaguaribe e o quantitativo de precipitações pluviométricas na cidade entre 2013 e 2023.

Gráfico 70 - Radiação solar global em Jaguaribe (2013-2023)

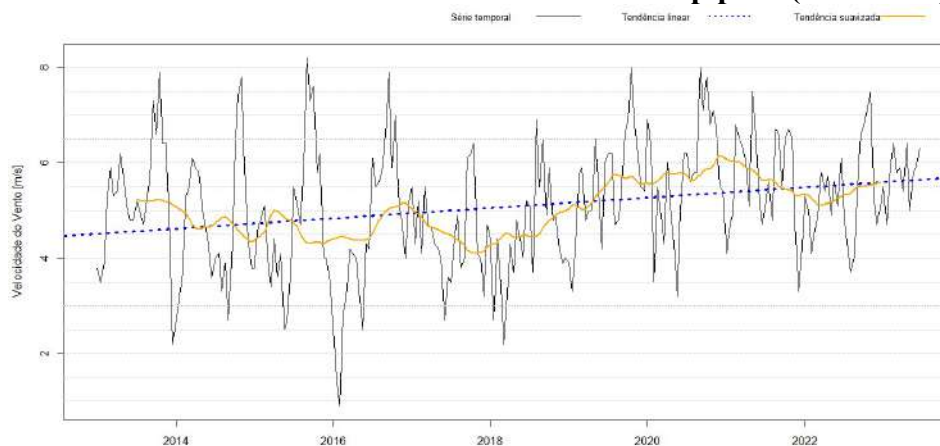
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 71 - Precipitações pluviométricas em Jaguaribe (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.13 Itapipoca

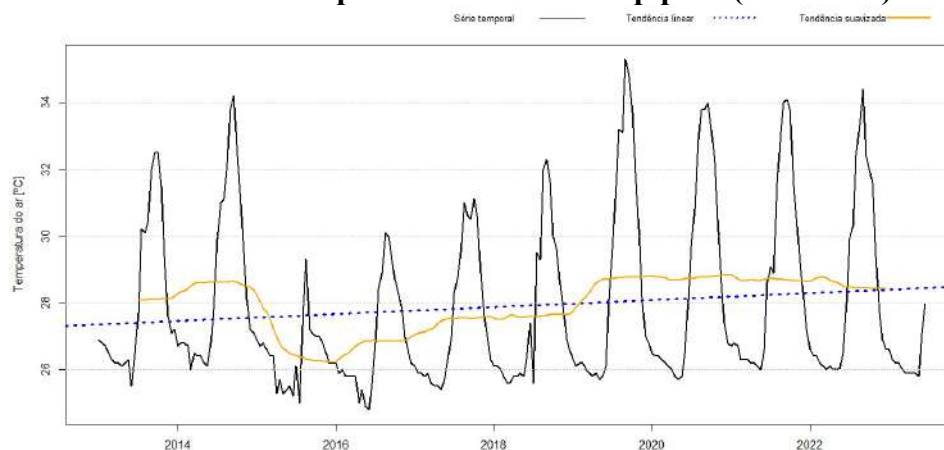
Itapipoca é um município situado no norte do estado do Ceará e apresenta uma diversidade de clima, pois em sua extensão territorial existe a presença dos três microclimas referentes as zonas litoral, serra e sertão. Mas é comum que o clima semiárido quente seja predominante. De acordo com os dados estudados, a cidade de Itapipoca teve uma velocidade média de ventos de aproximadamente 4 m/s no intervalo de 10 anos, alcançando velocidades máximas de 10,5 m/s. Os meses que apresentaram ventos mais fortes foram os meses de agosto, setembro e outubro. No Gráfico 72 tem-se a série temporal da velocidade média dos ventos de Itapipoca nos anos de 2013 a 2023.

Gráfico 72 - Velocidade média dos ventos de Itapipoca (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

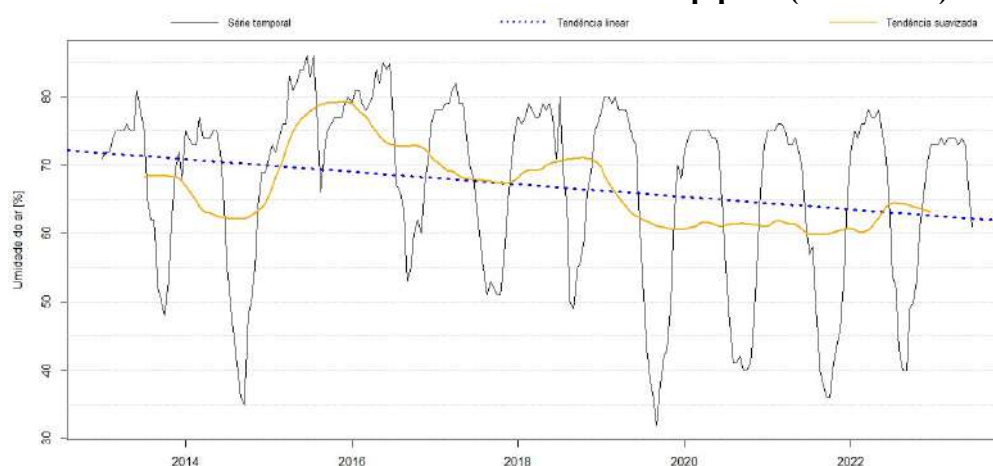
A temperatura média do ar da cidade durante o intervalo de 10 anos foi de aproximadamente de 26,6 °C, com máxima em 40,5 °C, com sazonalidade de temperaturas mais elevadas nos meses de setembro, outubro e novembro. A Umidade relativa apresentou uma média de 70%. Nos Gráficos 73e 74 tem-se respectivamente a série temporal da temperatura e da umidade relativa do ar da cidade de Itapipoca durante o intervalo de tempo entre 2013 e 2023.

Gráfico 73 - Temperatura do ar em Itapipoca (2013-2023)



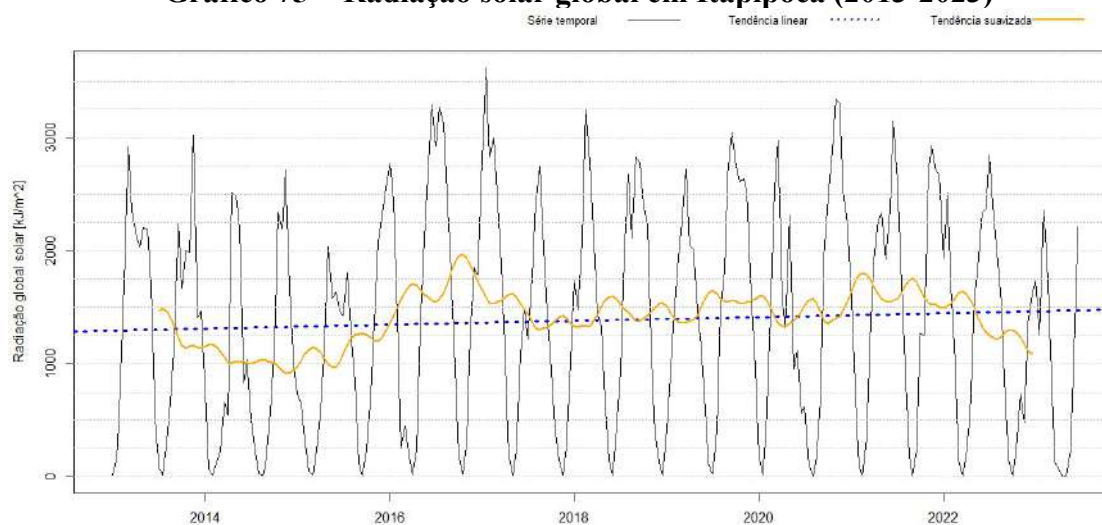
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 74 - Umidade Relativa do ar em Itapipoca (2013-2023)

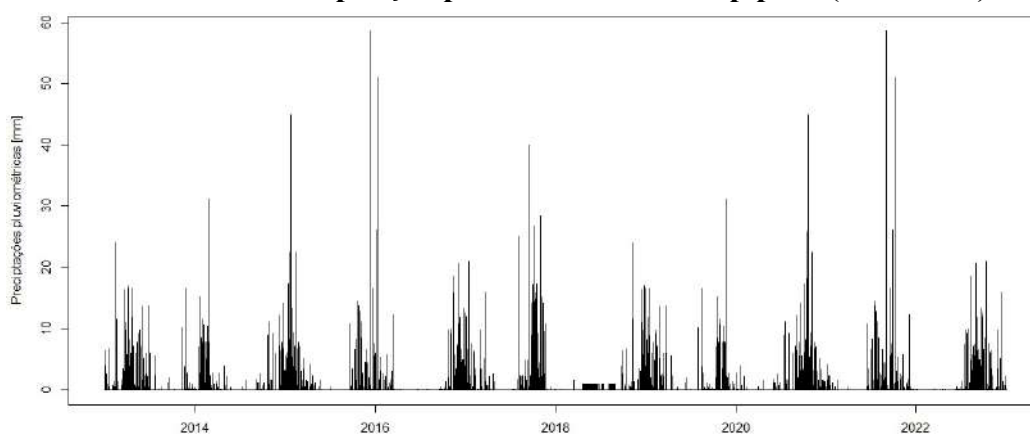


Fonte: Do próprio autor (2024).

A cidade também apresentou abundância em radiação solar com uma média de 1140,55 kJ/m², com máximas em aproximadamente 3971,4 kJ/m², com o período chuvoso no primeiro semestre do ano, principalmente entre os meses de fevereiro e maio. Nos Gráficos 75 e 76 estão representados o quantitativo da radiação solar global e a precipitação pluviométrica respectivamente em 10 anos.

Gráfico 75 - Radiação solar global em Itapipoca (2013-2023)

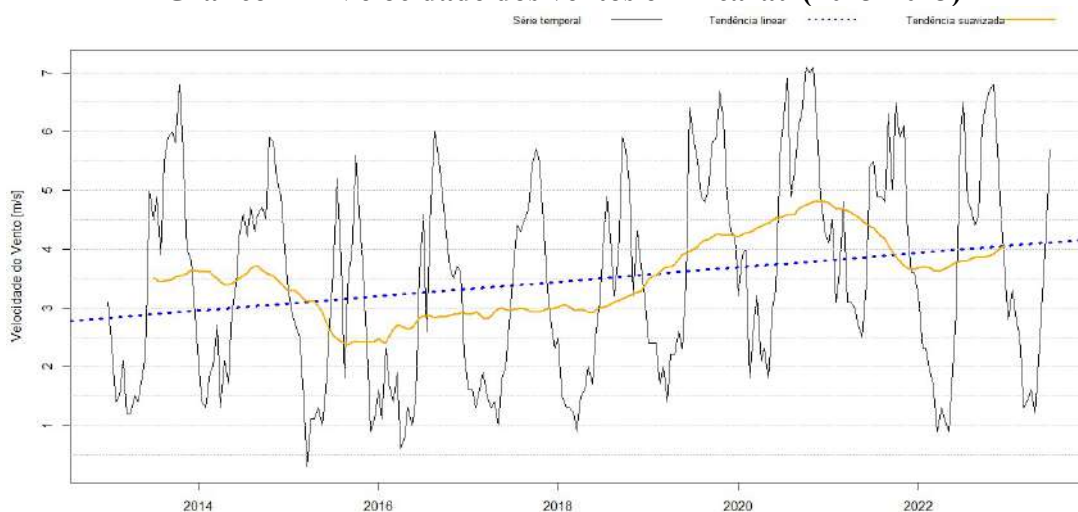
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 76 - Precipitação pluviométrica em Itapipoca (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

4.1.14 Acaraú

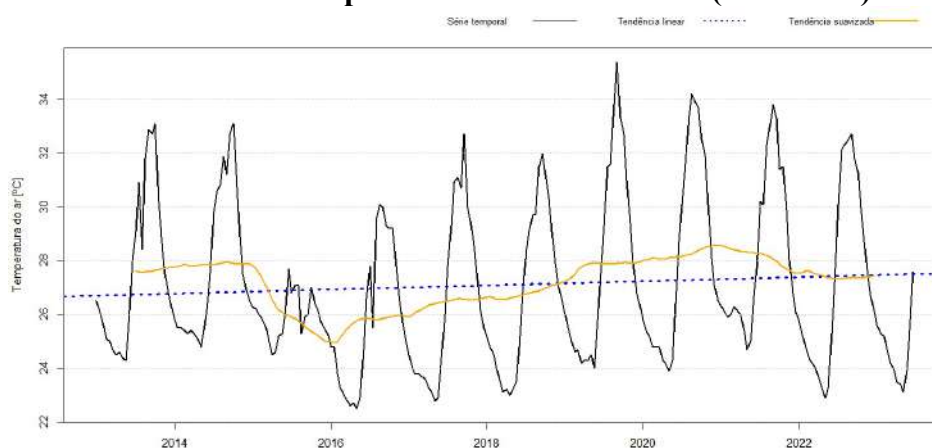
Acaraú é um município localizado ao Noroeste do estado Cearense e é pertencente a microrregião do Camocim. De acordo com os dados, Acaraú registrou a velocidade média dos ventos no período de 10 anos em aproximadamente 2,8 m/s, com máximas em 8,9m/s, onde os meses em que se sopraram os ventos mais intensos foram os meses de setembro e outubro. No Gráfico 77 tem-se a série temporal da velocidade dos ventos em Acaraú no período de 2013 a 2023 em uma altura de aproximadamente 10 metros de altura a partir do solo.

Gráfico 77 - Velocidade dos ventos em Acaraú (2013-2023)

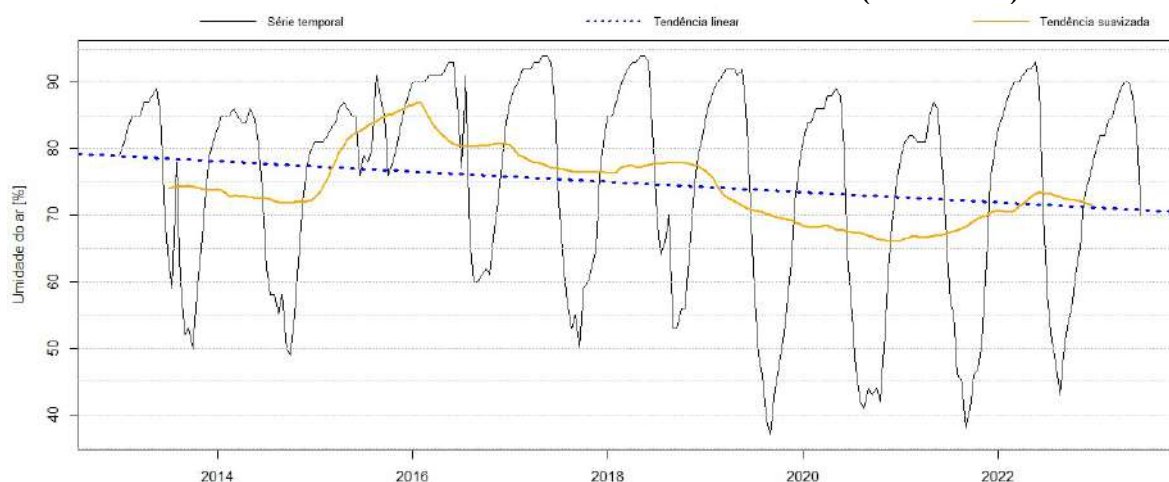
Fonte: Do próprio autor (2024).

A temperatura média de Acaraú em 10 anos foi de aproximadamente 25,8 °C, com máximas de 37 °C e comumente, os meses que apresentaram as maiores temperaturas durante os anos estudados foram os meses de outubro, novembro e dezembro.

A Umidade relativa do ar durante os 10 anos apresentou uma média de 80%. O valor da umidade relativa elevado em comparação aos outros municípios no mesmo período pode ser explicado pela proximidade da cidade de Acaraú do litoral cearense. Os Gráficos 78 e 79 mostram respectivamente a série temporal da temperatura e da umidade do ar em Acaraú entre os anos de 2013 e 2023.

Gráfico 78 - Temperatura do ar em Acaraú (2013-2023)

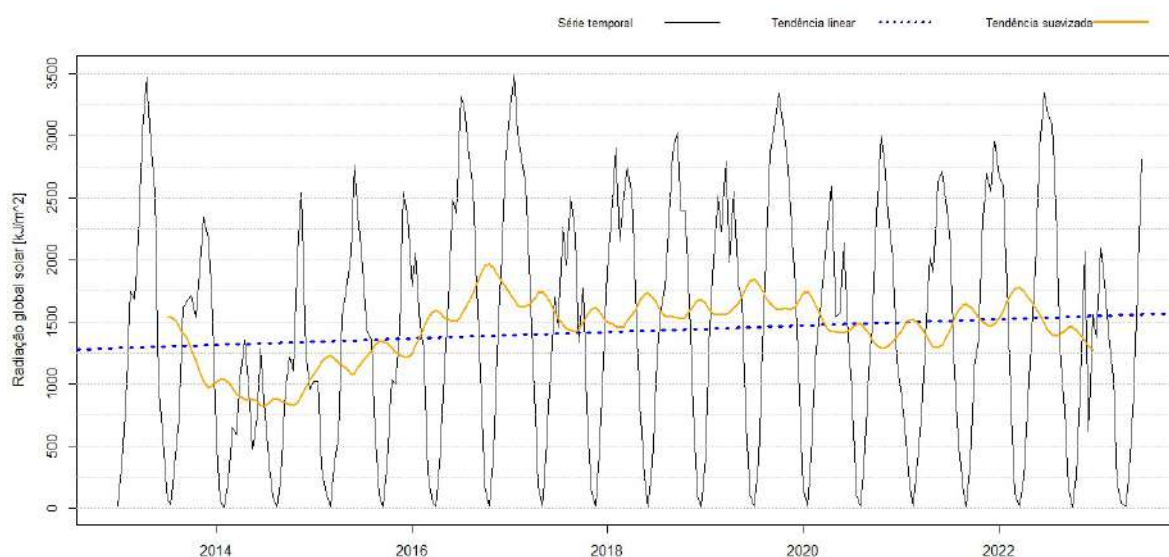
Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 79 - Umidade relativa do ar em Acaraú (2013-2023)

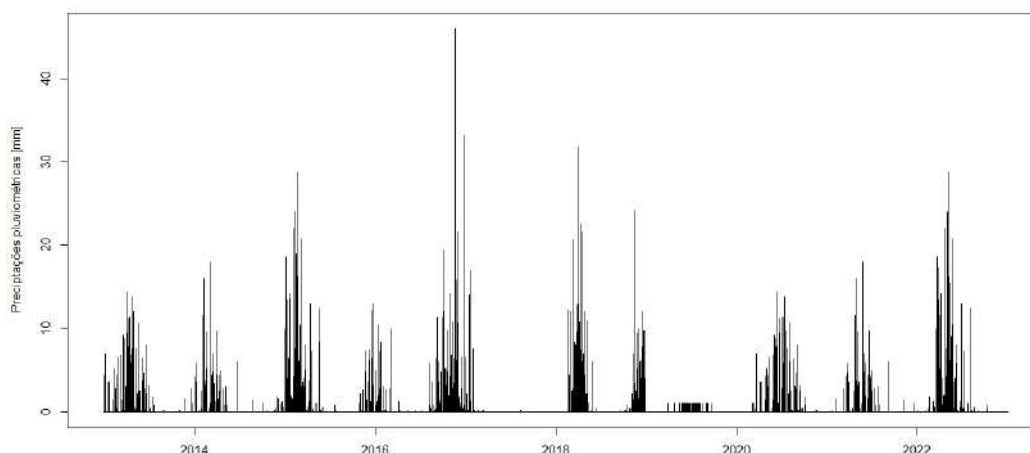
Fonte: Do próprio autor (2024).

A análise dos dados aponta que a cidade também disponibiliza abundância em potencialidade solar, uma que a média da radiação solar global na cidade é aproximadamente $1164,95 \text{ kJ/m}^2$, com picos em $5225,8 \text{ kJ/m}^2$, com pouca chuva. A quadra chuvosa do município é sazonal e ocorre principalmente no primeiro semestre do ano, nos meses de fevereiro a abril.

Nos Gráficos 80 e 81 tem-se o quantitativo médio da radiação solar global e da precipitação pluviométrica em Acaraú no intervalo entre 2013 e 2023.

Gráfico 80 - Radiação solar global em Acaraú (2013-2023)

Fonte: Do próprio autor (2024).

Gráfico 81 - Precipitações pluviométricas em Acaraú (2013-2023)

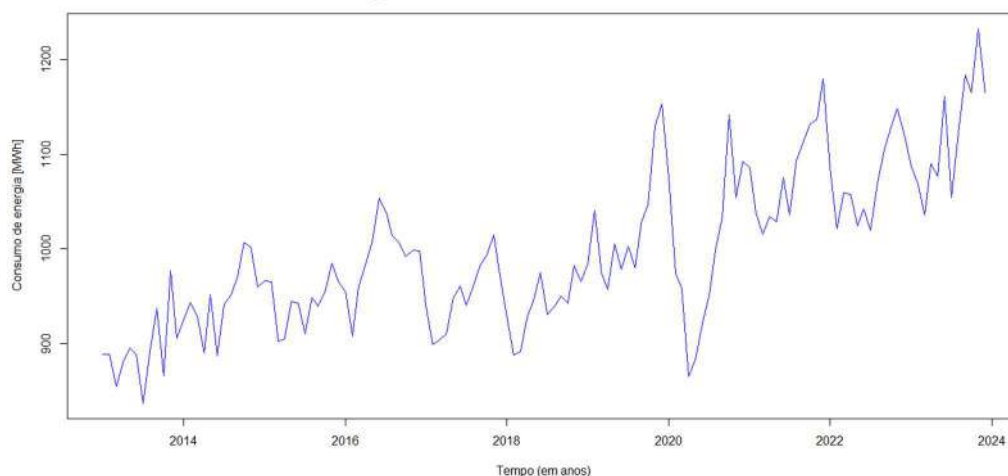
Fonte: Do próprio autor (2024).

4.2 Consumo de energia elétrica do estado do Ceará

De acordo com a análise dos dados, o estado do Ceará consumiu aproximadamente 10.707,64 MWh durante o ano de 2013 com o registro de maior consumo no mês de novembro, com aproximadamente 976,75 MWh. Para o ano de 2023, em relação ao montante consumido no ano de 2013, observou-se que houve um crescimento no consumo de 20,38%, chegando a expressivos 13.447,32 MWh.

No Gráfico 82 observa-se a série temporal que determina o crescimento no consumo de energia do estado do Ceará. A possível explicação para esse fenômeno pode estar associada ao crescimento populacional e demográfico do estado nos últimos 10 anos. De acordo com o censo demográfico de 2022, a estimativa do quantitativo populacional do estado é de aproximadamente 8,7 milhões de habitantes, com densidade demográfica equivalente a 59,07 habitante por quilômetro quadrado, o que representa um crescimento de aproximadamente 4,02% quando comparado ao censo de 2010 que apresentava uma estimativa de 8,4 milhões de moradores, com estimativa de densidade demográfica equivalente a 56,7 habitante por quilômetro quadrado (IBGE, 2024).

Gráfico 82 - Série temporal do consumo de energia elétrica do estado do Ceará no período de 2013 a 2023

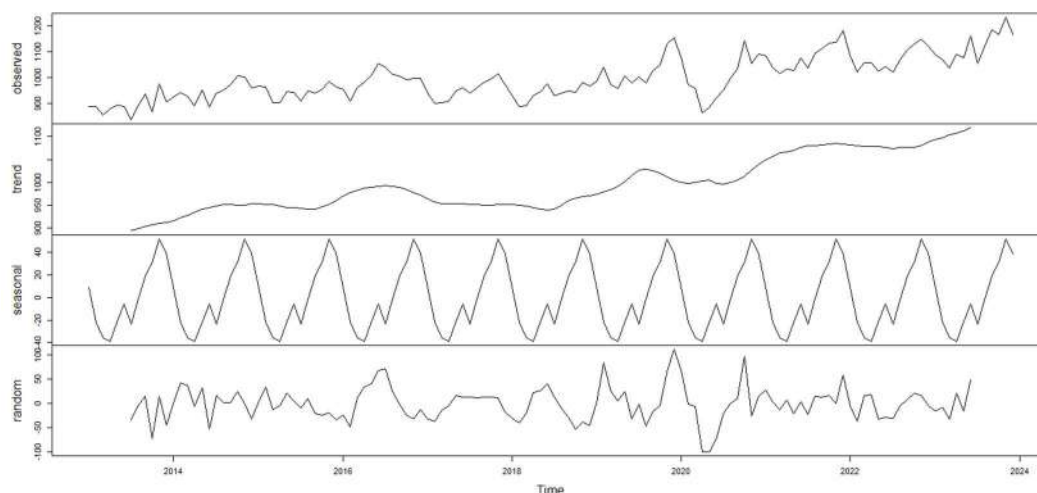


Fonte: Do próprio autor (2024).

Outros fatores que podem ter influenciado fortemente no aumento do consumo de energia elétrica no estado do Ceará é o desenvolvimento do setor industrial, mudanças no clima e sensações térmicas, além do índice de qualidade de vida.

No Gráfico 83 há a decomposição da série temporal do consumo de energia elétrica do estado do Ceará em tendência (gráfico “trend”), sazonalidade (gráfico “seasonal”) e dados aleatórios (gráfico “random”).

Gráfico 83 - Decomposição da série temporal do consumo de energia elétrica do Ceará entre os anos de 2013 e 2023



Fonte: Do próprio autor (2024)

Observa-se que durante o período estudado fica evidente que a tendência do consumo é crescente e que há sazonalidade dos picos de consumos máximos. É válido salientar que os dados de consumo apontam um padrão em relação ao segundo semestre do ano. Para os anos

de 2013, 2015, 2017, 2018, 2022 e 2023 o mês em que houve maior registro de consumo de energia elétrica foi o mês de novembro. Para os anos de 2014 e 2020 o mês de outubro foi o mês que registrou maior índice de consumo de energia elétrica. E para os anos de 2019 e 2021 o mês de maior consumo foi em dezembro.

De acordo com a FUNCEME (2021), a segunda metade no ano é mais propenso a baixas umidades devido à ausência de precipitações pluviométricas podendo ter variações crescentes de temperaturas do ar. Os meses de setembro a dezembro são marcados historicamente por suas altas temperaturas. Este fenômeno é chamado no Ceará de “B-R-O-BRÓ”. Entre o mês de agosto e setembro a temperatura chega a variar até 1°C.

De acordo com ONS (2024), o consumo de energia elétrica pode ser influenciado pelas condições meteorológicas devido a utilização de eletrodomésticos ou máquinas frigoríficas na tentativa de promover o arrefecimento de ambientes domésticos e empresariais.

No tocante ao consumo de energia elétrica em função da utilização de instrumentos para fins da rede de telecomunicações, pode-se afirmar que houve um crescimento significativo na infraestrutura da rede de serviços em telecomunicações no estado do Ceará, o que pode ter desencadeado uma parcela do consumo acrescido ao longo do tempo observado no Gráfico 82.

De acordo com a Secretaria do Desenvolvimento Econômico e do Trabalho (SEDET) do estado do Ceará (2024), o mercado de telecomunicações do Ceará apresenta crescimento acima da média nacional. Dados disponibilizados pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) evidenciam que houve um auge superior a 165% de dados transmitidos em 2022 em relação a residências com conexão de banda larga fixa. Esse valor para essa modalidade de conexão é correspondente a 25% dos domicílios cearenses, superando a média do Brasil de 20%. A tendência é que até 2025 as conexões dessa modalidade possam ultrapassar a marca de 1 milhão de domicílios.

É imprescindível o estudo da eficiência e resiliência energética elétrica para o setor dos serviços de telecomunicações pois segundo o relatório anual de estatística de energia elétrica da Empresa de Pesquisa em Energia (EPE) (2022), os serviços de telecomunicações ocupam a 4ª posição no ranking entre os 10 setores comerciais que mais consomem energia elétrica no Brasil, apresentando um montante de 3.591 giga watt-hora (GWh), equivalentes a aproximadamente 5,2% de participação no consumo total de energia elétrica do país.

Durante a pesquisa observou-se a dificuldade da baixa disponibilidade de dados públicos do consumo energético do setor de telecomunicações do estado do Ceará para o período de 10 anos. Entretanto, a câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE)

disponibiliza abertamente dados do consumo de energia elétrica do estado do Ceará do setor comercial de serviços de Telecomunicações no período de 12 meses como mostra o Gráfico 84.

Gráfico 84 - Variação do consumo de energia elétrica para o setor comercial de serviços de telecomunicações no estado do Ceará entre os meses de julho de 2023 e junho de 2024

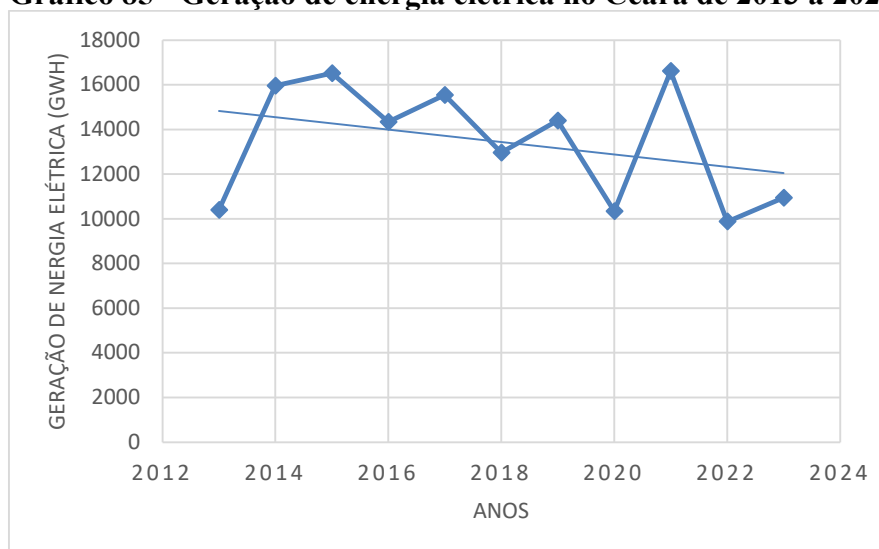


Fonte: CCEE (2024)

Considerando o Gráfico 84, observa-se que a variação do consumo de energia através do setor de telecomunicações nos períodos entre julho de 2023 e junho de 2024 foi de aproximadamente 10%, essa informação pode ser reflexo da popularização do acesso aos serviços de telefonia e internet cujo tem avançado e contemplado cada vez mais cearenses. De acordo com os dados da Pesquisa Nacional de Amostra a Domicílio (PNAD) do IBGE de 2022, cerca de 88,9% dos cearenses que participaram da pesquisa amostral possuem acesso à internet, e isso significa um aumento de 35,7% quando comparado ao ano de 2016, além do quantitativo de cearenses portadores de telefones fixos ou móveis que em 2022 alcançou valores expressivos de 96,6%, que quando comparado a amostra estatística do ano de 2016 reflete um crescimento de 3,5% (IBGE, 2023).

4.2 Geração de energia elétrica no estado do Ceará

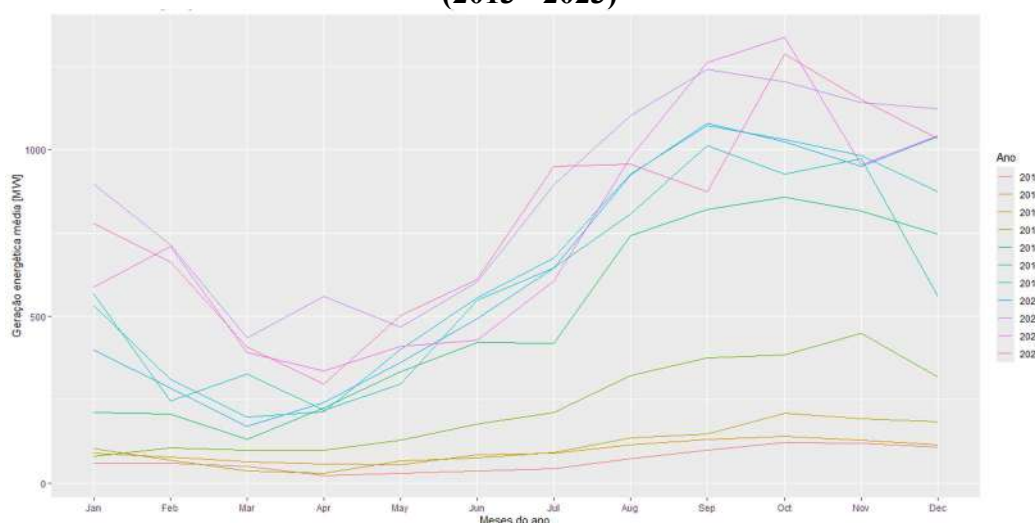
De acordo com os dados disponibilizados pelos relatórios anuais estatísticos da empresa de pesquisa energética dos anos de 2013 e 2023 observa-se que houve um aumento no montante da geração de energia elétrica no estado do Ceará em aproximadamente 4,93% percentuais, com o registro de maior produção de energia elétrica no ano de 2021 com o potencial de 16.609 GWh. Entre os anos de 2015 e 2020 observa-se que houve uma variação média percentual de - 5,82%. No Gráfico 85 tem-se a evolução da geração total de energia elétrica no estado do Ceará do ano de 2013 ao ano de 2023.

Gráfico 85 - Geração de energia elétrica no Ceará de 2013 a 2023

Fonte: Do próprio autor (2024).

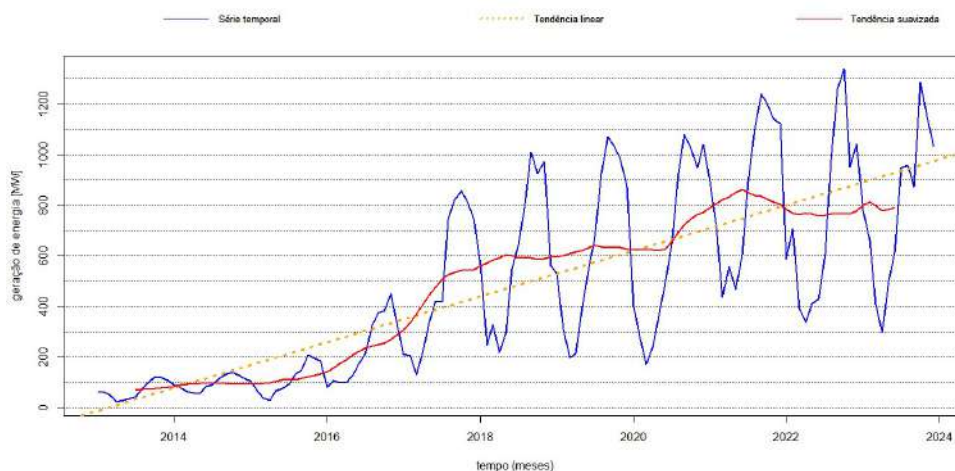
4.2.1 Geração de energia eólica no estado do Ceará

No contexto da geração de energia elétrica renovável, o estado do Ceará vem se destacando pelo avanço em políticas públicas e em investimentos em tecnologias para o setor sustentável. No Gráfico 86 e 87 expõe-se a série temporal da geração eólica média diária por mês e anual do Ceará, respectivamente, do ano 2013 ao ano de 2023. É possível afirmar que no intervalo de tempo de 10 anos a geração de energia eólica aumentou cerca de 79,03% quando comparada a potência gerada de 60.792,4 MWh do ano de 2013 e a potência gerada de 289.921,2 MWh do ano de 2023.

Gráfico 86 - Série temporal da geração eólica média diária por mês do estado do Ceará (2013 - 2023)

Fonte: do próprio autor (2024)

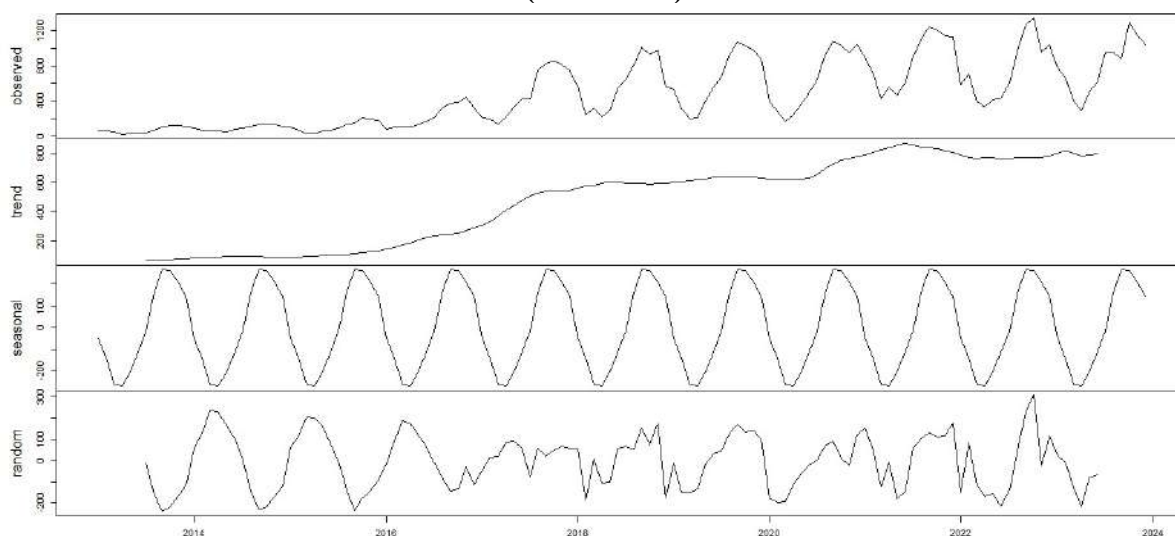
Gráfico 87 – Série temporal da geração média diária por ano da geração eólica do estado do Ceará (2013-2023)



Fonte: do próprio autor (2024)

No Gráfico 88 tem-se a decomposição da série temporal anual da geração eólica do estado do Ceará, onde é possível notar a presença forte da sazonalidade e da tendência crescente ao longo dos anos, o que fortalece a expectativa de um futuro promissor para a exploração desse recurso abundante.

Gráfico 88 - Decomposição da série temporal de geração eólica anual do estado do Ceará (2013-2023)



Fonte: do próprio autor (2024)

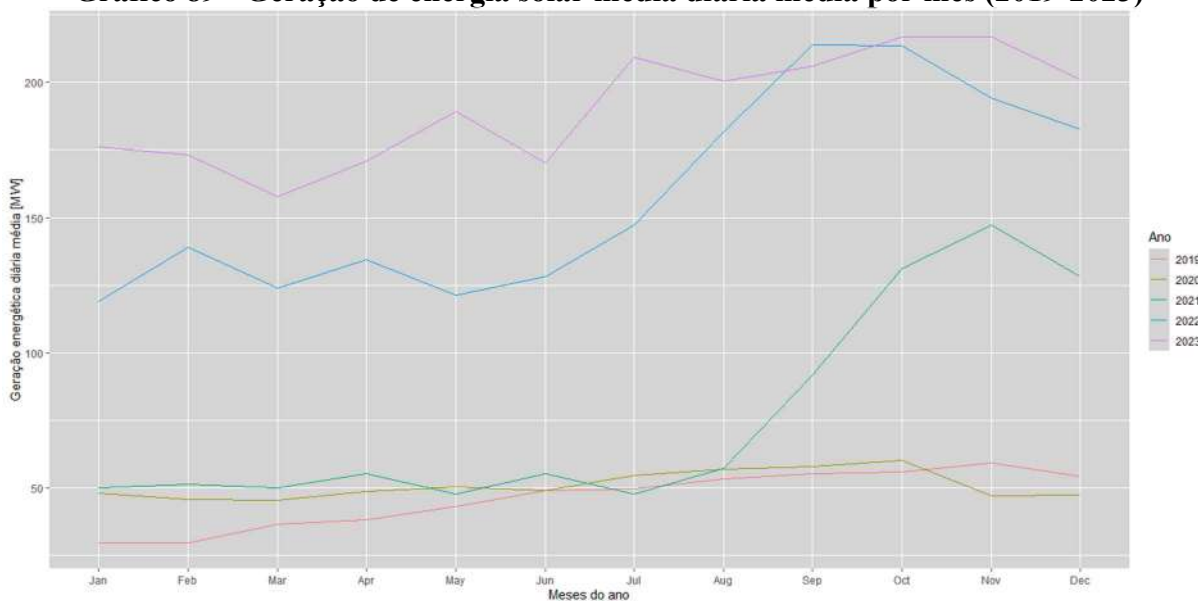
É possível afirmar que, de acordo com os dados, a potencialidade geradora maior está no segundo semestre do ano, ocorrendo principalmente entre os meses de agosto e outubro.

4.2.2 Geração de energia solar no estado do Ceará

De acordo com os dados disponibilizados pela ONS, nos últimos cinco anos o estado do Ceará tem apresentado crescimento notável na geração de energia solar, consolidando-se como um dos líderes nacionais nesse segmento. Com uma produção média diária por mês de aproximadamente 185,2 MW em 2023, a geração de energia elétrica por meio da fonte da radiação solar quadruplicou sua potencialidade de instalações em comparação a média de geração diária por mês do ano de 2019, cujo apresentava índices de geração diária de aproximadamente 46,2MW.

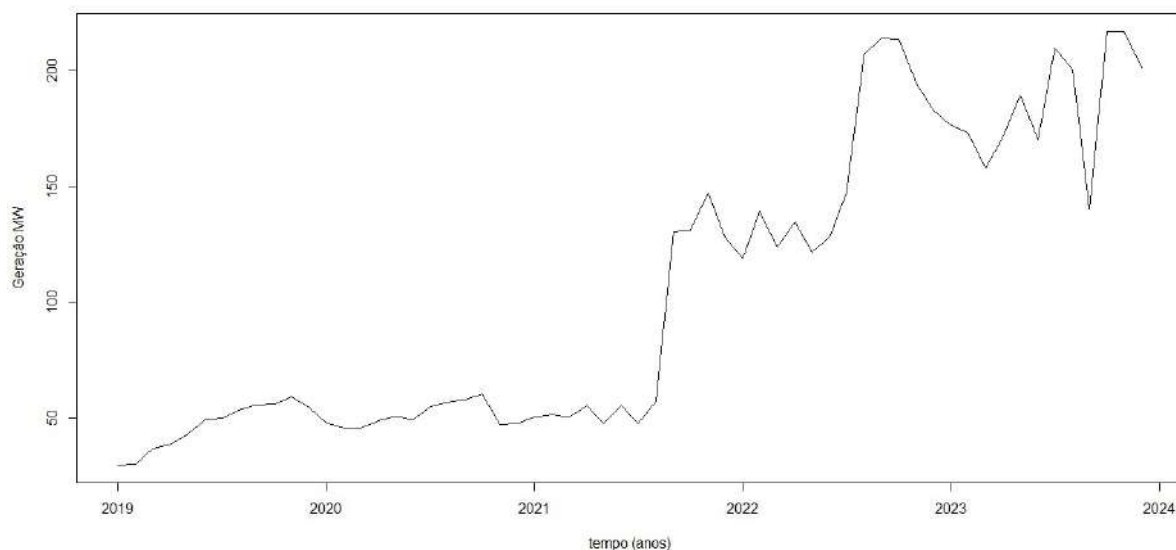
No Gráfico 89 tem-se a geração diária média por mês de cada ano entre o intervalo de 2019 e 2023. Observa-se que no ano de 2022 houve o dobro de geração de energia elétrica por fonte solar do ano de 2021, com produções médias diárias de 160,4 MW em relação a 79,3MW do seu ano antecessor.

Gráfico 89 - Geração de energia solar média diária média por mês (2019-2023)



Fonte: do próprio autor (2024)

No Gráfico 90 tem-se a série temporal da geração média diária por mês de energia solar aos longos dos anos no intervalo de tempo entre 2019 e 2023. É possível notar que no período de cinco anos a geração de energia fotovoltaica no Ceará foi expressivamente progressiva.

Gráfico 90 - Série temporal da Geração de energia solar no estado do Ceará (2019-2023)

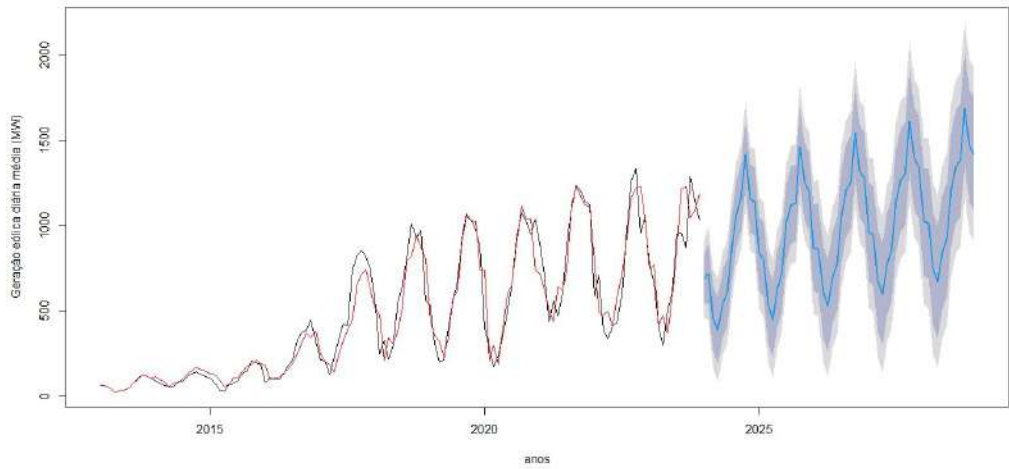
Fonte: do próprio autor (2024)

4.3 Predição de geração eólica energética no estado do Ceará

Com o intuito de esboçar um modelo estatístico de predição da potencialidade de geração de energia elétrica oriunda das fontes eólica com os dados públicos de geração média diária por mês disponibilizados pela ONS, observou-se que o modelo estatístico mais eficiente para previsão dos possíveis futuros registros de geração energética eólica no estado do Ceará é o modelo SARIMA(1,0,0)(1,1,0), onde devido a sazonalidade dos fortes ventos na segunda metade do ano, principalmente entre os meses de agosto e outubro, mostrou-se eficaz pela capacidade de auferir os padrões cíclicos e variações anuais da velocidade do escoamento do vento com leituras mais precisas.

No Gráfico 91 tem-se a série temporal com a previsão de geração eólica diária média por mês no estado do Ceará para os próximos 5 anos, isto é, 2024-2028, onde a linha preta representa a série temporal dos dados de geração registrados nos anos de 2013 ao ano de 2023, a linha vermelha é o resíduo aleatório do modelo comparado a série histórica registrada e a linha azul é a previsão para os possíveis valores de geração

Gráfico 91 - Série temporal do modelo preditivo SARIMA (1,0,0)(1,1,0) para a geração eólica do Ceará entre (2024-2028)



Fonte: do próprio autor (2024).

Os parâmetros métricos estatísticos de ME (erro médio), MAE (erro médio absoluto), RMSE (raiz do erro quadrático médio), MAPE (erro absoluto percentual médio), MASE (erro absoluto médio escalado), ACF1 (Autocorrelação no Lag 1), MPE (erro percentual médio), σ^2 (sigma ao quadrado), LOG LIKELIHOOD (log-verossimilhança), AIC (critério de informação de akaike), AICc (critério de informação de akaike corrigido) e BIC (critério de informação bayesiano) do modelo supracitado estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores dos parâmetros estatísticos do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0)

ME	-0,13
RMSE	106,76
MAE	71,73
MPE	-7,78
MAPE	19,7
MASE	0,59
ACF1	-0,07
σ^2	12860
LOG LIKELIHOOD	-748,31
AIC	1484,83
AICc	1485,18
BIC	1495,98

Fonte: do próprio autor (2024).

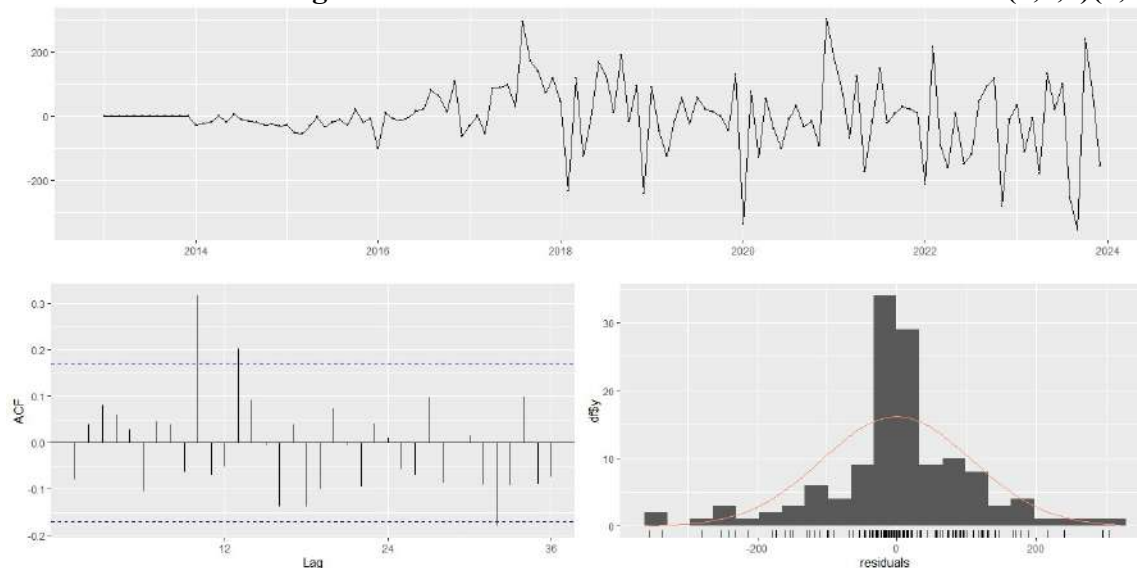
O diagnóstico estatístico dos resíduos do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0) para a previsão dos dados de geração diária média mensal da energia eólica do estado do Ceará foi feito através da análise da normalidade de distribuição dos ruídos, média com tendência a zero e da variância contante, obtendo-se os gráficos de autocorrelação, histograma dos ruídos e o gráfico de ajuste, como mostra o Gráfico 92.

É possível notar que a os lags no gráfico ACF apresenta uma sazonalidade e que a maioria estão dentro na zona de confiança, o que significa que os dados do modelo possuem baixa autocorrelação o que é ponto positivo para a qualidade do modelo escolhido, entretanto, o modelo possui falhas na distribuição normal dos resíduos, e isso pode comprometer a inferência estatística das previsões feitas pela série temporal.

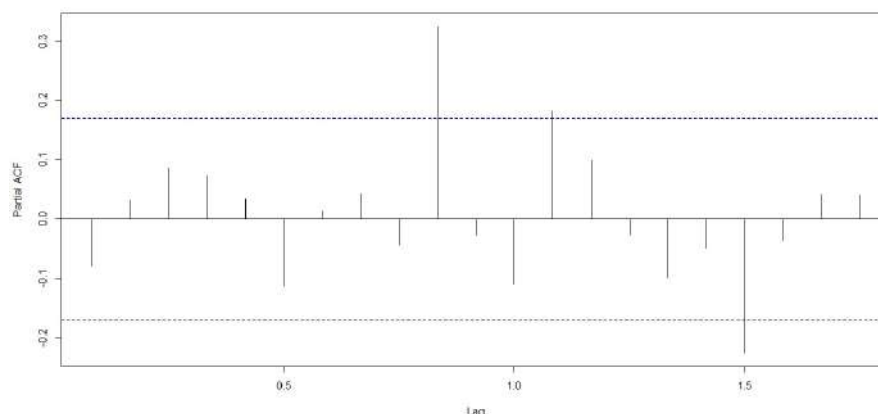
A análise dos resíduos pelo gráfico de ajuste permitiu averiguar a constância da variância. Com uma média muito próximo ao valor zero, pode-se dizer que o modelo apresenta uma qualidade minimamente satisfatória.

O Gráfico 93 apresenta a autocorrelação parcial dos resíduos do modelo SARIMA. É possível observar que a maioria dos lag também estão dentro da zona de confiança o que mostram baixa dependência temporal entre as defasagens intermediárias e não estacionariedade da série temporal.

Gráfico 92 - Gráfico diagnóstico estático dos resíduos do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0)



Fonte: do próprio autor (2024).

Gráfico 93 - Gráfico PACF do modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0)

Fonte: do próprio autor (2024).

Na Tabela 13 tem-se os possíveis valores da média da geração eólica diária por mês gerados pelo modelo SARIMA (1,0,0)(1,1,0), onde a coluna Point Forecast representa a previsão pontual, isto é, o valor previsto principal para cada ponto da série temporal futura. As colunas Lo 80 e Hi 80 representam o limite inferior e o limite superior, respectivamente, do intervalo de confiança de 80% da previsão da série temporal. E as colunas Lo 95 e Hi 95 representam o limite inferior e o limite superior, respectivamente, do intervalo de confiança de 95% da previsão da série temporal

Tabela 12 - Previsão dos possíveis valores para a geração eólica média diária por mês do estado do Ceará

Mês/Ano	Point Forecast	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
jan/24	685,90	540,57	831,22	463,63	908,16
fev/24	719,22	542,68	895,77	449,22	989,22
mar/24	456,40	266,80	646,00	166,43	746,37
abr/24	387,88	192,38	583,39	88,88	686,88
mai/24	540,82	342,57	739,08	237,62	844,02
jun/24	613,30	413,75	812,85	308,12	918,48
jul/24	877,49	677,33	1077,64	571,37	1183,60
ago/24	1066,38	865,93	1266,83	759,82	1372,94
set/24	1164,59	964,01	1365,18	857,82	1471,37
out/24	1414,74	1214,09	1615,40	1107,87	1721,62
nov/24	1159,14	958,46	1359,83	852,22	1466,06
dez/24	1142,72	942,02	1343,42	835,78	1449,67
jan/25	837,21	622,56	1051,85	508,94	1165,47
fev/25	798,12	577,15	1019,08	460,18	1136,05
mar/25	539,87	315,95	763,78	197,42	882,31
abr/25	450,35	225,05	675,65	105,79	794,92

mai/25	629,25	403,29	855,20	283,68	974,82
jun/25	719,64	493,38	945,91	373,60	1065,69
jul/25	1019,49	793,08	1245,91	673,22	1365,77
ago/25	1120,28	893,79	1346,77	773,90	1466,67
set/25	1130,05	903,52	1356,57	783,61	1476,48
out/25	1459,18	1232,64	1685,72	1112,72	1805,64
nov/25	1262,34	1035,79	1488,88	915,87	1608,81
dez/25	1196,65	970,10	1423,20	850,18	1543,13
jan/26	870,68	618,89	1122,48	485,59	1255,78
fev/26	866,93	603,97	1129,89	464,77	1269,10
mar/26	606,46	338,35	874,56	196,42	1016,49
abr/26	527,19	256,67	797,71	113,47	940,92
mai/26	693,42	421,76	965,09	277,95	1108,89
jun/26	775,08	502,87	1047,28	358,78	1191,38
jul/26	1057,52	785,06	1329,98	640,83	1474,22
ago/26	1201,31	928,72	1473,89	784,43	1618,19
set/26	1254,23	981,59	1526,87	837,26	1671,20
out/26	1544,82	1272,15	1817,49	1127,81	1961,83
nov/26	1319,31	1046,62	1591,99	902,28	1736,34
dez/26	1277,66	1004,97	1550,35	860,62	1694,70
jan/27	961,67	673,43	1249,92	520,85	1402,50
fev/27	940,68	645,33	1236,03	488,98	1392,38
mar/27	681,29	382,61	979,97	224,50	1138,08
abr/27	597,02	296,78	897,27	137,84	1056,21
mai/27	769,43	468,44	1070,42	309,11	1229,76
jun/27	855,35	554,01	1156,70	394,49	1316,22
jul/27	1146,29	844,78	1447,80	685,17	1607,41
ago/27	1269,10	967,51	1570,69	807,85	1730,34
set/27	1300,96	999,33	1602,59	839,66	1762,26
out/27	1610,36	1308,71	1912,00	1149,03	2071,69
nov/27	1398,83	1097,18	1700,49	937,49	1860,17
dez/27	1345,46	1043,80	1647,12	884,11	1806,81
jan/28	1024,60	706,34	1342,86	537,86	1511,34
fev/28	1012,02	686,16	1337,89	513,65	1510,39
mar/28	752,10	422,68	1081,52	248,30	1255,90
abr/28	670,28	339,18	1001,37	163,91	1176,64
mai/28	839,67	507,78	1171,56	332,08	1347,25
jun/28	923,51	591,24	1255,78	415,34	1431,67
jul/28	1210,30	877,85	1542,75	701,86	1718,74
ago/28	1343,34	1010,81	1675,88	834,77	1851,91
set/28	1385,48	1052,91	1718,06	876,85	1894,11
out/28	1685,71	1353,11	2018,30	1177,05	2194,37

nov/28	1467,35	1134,75	1799,96	958,68	1976,03
dez/28	1419,70	1087,09	1752,31	911,02	1928,38

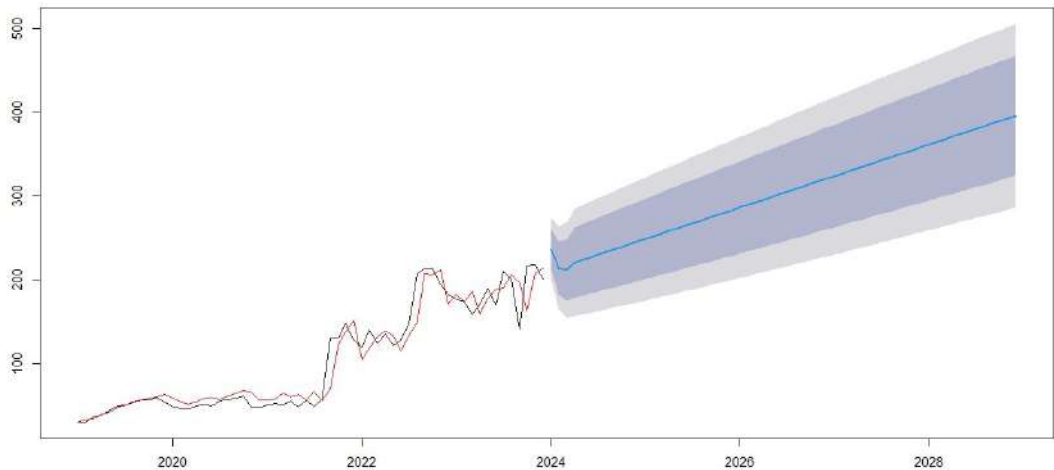
Fonte: do próprio autor (2024).

4.4 Predição de geração solar energética no estado do Ceará

O modelo estatístico de predição para os próximos cinco anos (2024-2028) esboçado para os possíveis futuros valores de produção energética solar fotovoltaica do estado do Ceará através dos dados históricos disponibilizados pela ONS foi o modelo ARIMA (0,1,4), onde para análise dos dados da série temporal não foi necessário aplicação de casos autorregressivos, entretanto, houve uma diferenciação para torná-la estacionária e uma aplicação de ordem 4 para a média móvel dos dados históricos da série temporal de 2019 a 2023.

No Gráfico 94 tem-se a previsão estatística da geração média diária por mês de energia solar fotovoltaica no estado do Ceará para os próximos cinco anos. Observa-se que a tendência de geração é crescente ao longo dos anos, isto é, que cada ano supere a geração média diária do seu respectivo ano antecessor. A linha preta na série temporal representa os dados históricos registrados mensalmente de janeiro de 2019 a dezembro de 2023, a linha vermelha representa os resíduos do modelo ARIMA (0,1,4) comparado aos dados registrados e a linha azul representa os possíveis valores de geração para os a nos de 2024 a 2028.

Gráfico 94 - Série temporal do modelo predito ARIMA (0,1,4) para a geração de energia solar no estado do Ceará para os anos de 2024-2028



Fonte: do próprio autor (2024).

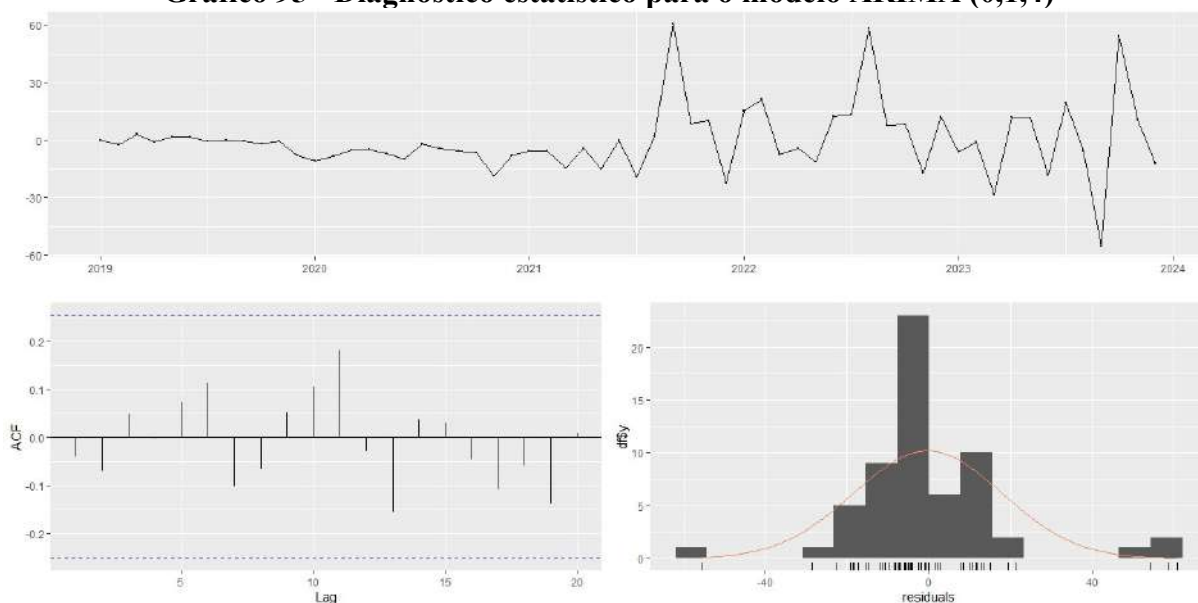
Os parâmetros métricos estatísticos do modelo ARIMA (0,1,4) para geração de energia eólica estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros métricos estatísticos do modelo ARIMA (0,1,4)

ME	-0,31
RMSE	18,05
MAE	11,75
MPE	-4,28
MAPE	11,6
MASE	0,29
ACF1	-0,04
σ^2	362,4
LOG LIKELIHOOD	-252,57
AIC	523,14
AICc	524,76
BIC	535,61

Fonte: do próprio autor (2024).

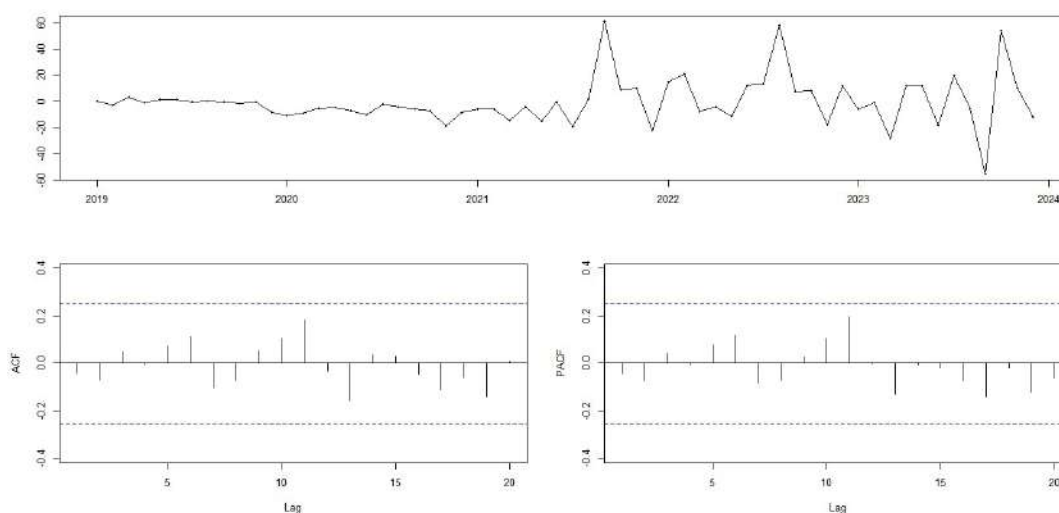
No Gráfico 95 tem-se um resumo do diagnóstico estatístico do modelo ARIMA (0,1,4) em relação a sua autocorrelação, normalidade e variância. É possível observarmos que esse amodelo apresenta baixa autocorreção entre as defasagens temporais dos seus resíduos, o que corrobora para a qualidade do modelo, entretanto, apresenta falhas em sua normalidade.

Gráfico 95 - Diagnóstico estatístico para o modelo ARIMA (0,1,4)

Fonte: do próprio autor (2024).

No tocante a análise de autocorrelação, o Gráfico 96 mostra a qualidade do modelo nas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial evidenciando que os valores adquiridos não têm dependência temporal entre si.

Gráfico 96 - Análise da autocorrelação do modelo ARIMA (0,1,4)



Fonte: do próprio autor (2024).

Na Tabela 14 tem-se os possíveis futuros valores de geração diária média por mês de energia solar no estado do Ceará para os anos de 2024 e 2028 obtidos pelo modelo estatístico ARIMA (0,1,4).

Tabela 14 - Possíveis valores de geração solar diária média mensal no Ceará para os anos de 2024-2028

Mês/ano	Point Forecast	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
jan/24	236,143	211,75	260,54	198,83	273,45
fev/24	213,926	181,96	245,89	165,04	262,81
mar/24	211,065	174,12	248,01	154,57	267,56
abr/24	220,264	178,26	262,26	156,03	284,5
mai/24	223,4	180,69	266,12	158,07	288,73
jun/24	226,536	183,12	269,95	160,13	292,94
jul/24	229,672	185,56	273,78	162,21	297,13
ago/24	232,809	188,02	277,6	164,3	301,31
set/24	235,945	190,48	281,41	166,41	305,48
out/24	239,081	192,95	285,21	168,54	309,63
nov/24	242,217	195,44	289	170,67	313,76
dez/24	245,353	197,93	292,78	172,83	317,88

jan/25	248,489	200,43	296,55	174,99	321,99
fev/25	251,625	202,94	300,31	177,17	326,08
mar/25	254,761	205,46	304,06	179,36	330,16
abr/25	257,897	207,98	307,81	181,56	334,23
mai/25	261,034	210,52	311,55	183,77	338,29
jun/25	264,17	213,06	315,28	186	342,34
jul/25	267,306	215,6	319,01	188,23	346,38
ago/25	270,442	218,16	322,73	190,48	350,41
set/25	273,578	220,72	326,44	192,73	354,42
out/25	276,714	223,28	330,15	195	358,43
nov/25	279,85	225,85	333,85	197,27	362,43
dez/25	282,986	228,43	337,54	199,55	366,42
jan/26	286,122	231,01	341,23	201,84	370,4
fev/26	289,259	233,6	344,91	204,14	374,38
mar/26	292,395	236,2	348,59	206,45	378,34
abr/26	295,531	238,8	352,27	208,76	382,3
mai/26	298,667	241,4	355,93	211,09	386,25
jun/26	301,803	244,01	359,6	213,42	390,19
jul/26	304,939	246,62	363,25	215,75	394,12
ago/26	308,075	249,24	366,91	218,1	398,05
set/26	311,211	251,87	370,56	220,45	401,97
out/26	314,347	254,49	374,2	222,81	405,89
nov/26	317,483	257,12	377,84	225,17	409,79
dez/26	320,62	259,76	381,48	227,54	413,69
jan/27	323,756	262,4	385,11	229,92	417,59
fev/27	326,892	265,05	388,74	232,31	421,48
mar/27	330,028	267,69	392,36	234,7	425,36
abr/27	333,164	270,34	395,98	237,09	429,24
mai/27	336,3	273	399,6	239,49	433,11
jun/27	339,436	275,66	403,21	241,9	436,97
jul/27	342,572	278,32	406,82	244,31	440,83
ago/27	345,708	280,99	410,43	246,73	444,69
set/27	348,845	283,66	414,03	249,15	448,54
out/27	351,981	286,33	417,63	251,58	452,38
nov/27	355,117	289,01	421,23	254,01	456,22
dez/27	358,253	291,69	424,82	256,45	460,06
jan/28	361,389	294,37	428,41	258,89	463,89
fev/28	364,525	297,05	432	261,34	467,71
mar/28	367,661	299,74	435,58	263,79	471,54
abr/28	370,797	302,43	439,16	266,24	475,35
mai/28	373,933	305,13	442,74	268,7	479,16
jun/28	377,07	307,82	446,31	271,17	482,97

jul/28	380,206	310,52	449,89	273,64	486,77
ago/28	383,342	313,23	453,46	276,11	490,57
set/28	386,478	315,93	457,02	278,59	494,37
out/28	389,614	318,64	460,59	281,07	498,16
nov/28	392,75	321,35	464,15	283,55	501,95
dez/28	395,886	324,06	467,71	286,04	505,73

Fonte: do próprio autor (2024).

É válido ressaltar que os valores obtidos na coluna point forecast são os valores de predição principais, isto é, são os valores que o modelo estatístico apresenta como média para a geração naquele período. Os valores das colunas Lo 80 e Hi 80 representam os possíveis valores de geração solar que estão compreendidos no intervalo de confiança de 80% de assertividade da previsão da série temporal entre o Limite inferior e limite superior, respectivamente. Já os valores que estão presentes nas colunas Lo 95 e Hi 95 representam os possíveis valores de geração solar no intervalo de confiança de 95% de assertividade da previsão da série temporal.

5 CONCLUSÃO

Com um significativo potencial de geração de energia renovável devido às suas condições climáticas favoráveis com elevados índices de radiação solar e de velocidade de vento constante ao longo do ano, o Ceará apresenta forte tendência de crescimento da geração energética nos setores eólico e solar para os próximos cinco anos, de modo que o quantitativo de energia gerado poderá suprir a demanda de consumo estadual do setor de telecomunicações, além de servirem como complemento de alimentação energética para as infraestruturas da rede de telecomunicações para a melhoria da resiliência e da estabilidade da rede elétrica, podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Em relação as condições econômicas, investimentos em estruturas de energia renovável são compensados pela economia a longo prazo, e para o setor de telecomunicações a viabilidade pode ser evidenciada pela redução dos custos operacionais reduzindo a dependência de fontes fósseis.

Contudo, para maximizar o aproveitamento da potencialidade eólica e solar do Estado do Ceará para o abastecimento da rede de telecomunicação é imprescindível levar em consideração os desafios e limitações que ainda persistem em comprometer o avanço do setor. A variabilidade dos recursos naturais alinhados a dependência da condição meteorológica é um fator que pode afetar diretamente a geração de energia eólica e solar, por isso, a problemática da mudança climática pode ser uma ameaça ao planejamento energético global. Além disso, políticas públicas de incentivo e um quadro regulatório claro e favorável são essenciais para atrair investimentos e fomentar o crescimento do setor no estado. O apoio governamental na forma de subsídios, financiamentos e parcerias público-privadas pode acelerar significativamente a adoção de tecnologias renováveis.

Outro fator que pode ser barreira para o avanço da maximização da exploração da potencialidade eólica e solar é o aparato tecnológico e operacional do recurso humano para manutenção e desenvolvimento de projetos.

Entretanto, apesar das dificuldades, o estado do Ceará apresenta-se com excelentes condições para tornar-se paradigma no setor de telecomunicações com infraestrutura de abastecimento elétrico integrada às fontes de energia eólica e solar. E que para que haja progresso constante nesse segmento é necessário que as políticas públicas em comum acordo com os investidores do setor de telecomunicação possam celebrar acordos consolidar o Ceará como um modelo de eficiência energética e sustentabilidade, garantindo um fornecimento

energético confiável para as telecomunicações e promovendo o desenvolvimento socioeconômico da região.

5.1 Trabalhos futuros

A relevância do tema discutido nesta dissertação é clara, especialmente considerando a crescente demanda por integrar fontes renováveis de energia nos setores estratégicos, como o de telecomunicações. O progresso nessa área de pesquisa é fundamental para expandir o entendimento sobre o potencial energético do Ceará, abordando os desafios técnicos, econômicos e climáticos que afetam diretamente a implementação e a eficácia dos sistemas de energia renovável. Aprofundar-se nessas questões pode não apenas estabelecer o Ceará como um exemplo em sustentabilidade, mas também ajudar no desenvolvimento de políticas públicas e soluções tecnológicas em nível nacional.

A continuidade dos estudos é justificada pela urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas, que representam um risco significativo à estabilidade dos recursos energéticos renováveis. Pesquisas futuras podem focar na modelagem e previsão das condições ambientais para uma melhor gestão da variabilidade dos recursos naturais, além de desenvolver estratégias que minimizem os impactos dessas mudanças no planejamento energético. Investigações relacionadas ao aperfeiçoamento das tecnologias de captação e armazenamento de energia também são essenciais, permitindo uma maior resiliência e estabilidade do sistema elétrico diante das oscilações na geração de energia eólica e solar.

Sugestões para trabalhos futuros:

- I. Modelagem climática aplicada ao planejamento energético: Desenvolver modelos preditivos para avaliar o impacto das variabilidades climáticas na geração de energia eólica e solar no Ceará.
- II. Desenvolvimento de tecnologias avançadas de armazenamento: Explorar novas soluções para armazenamento de energia renovável, como baterias de alta eficiência e sistemas híbridos, com foco na estabilidade da rede elétrica.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, Rafael Almeida Ferreira. A geopolítica das energias renováveis: o brasil em meio a um cenário global em transformação. **Monções**: Revista de Relações Internacionais da UFGD, [S.L.], v. 11, n. 22, p. 118-150, 15 dez. 2022. Universidade Federal de Grande Dourados. <http://dx.doi.org/10.30612/rmufgd.v11i22.14541>.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). (Aneel) (org.). **Lista de usinas por estados/municípios**. 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ALENCAR FILHO, César Lédio de. **Previsão de carga para consumidores de baixa renda no estado do Ceará**. 2023. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

ALMEIDA, D. A.; SILVA, L. de N. A. FERNANDES, J. A. F.; MARQUES, E. R. F.; CEDIEL, L. C. Zoneamento para exploração de energia solar fotovoltaica (PV) no Ceará através da integração entre sistema de informações geográficas e análise multicritério. In: Congresso brasileiro de gestão ambiental, XI, 2020, Vitória - Es. **Anais [...]**. Vitória: Ibeas, 2020. p. 1-5.

ALQATTAN, Nael et al. Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven. *Renewable Energy Focus*, v. 27, p. 97-110, 2018.

AMARAL, Bianca Mesquita. **Modelos VARX para geração de cenários de vento e vazão aplicados à comercialização de energia**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011

ANEEL (Brasil). Ministério de Minas e Energia. **Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e minigeração distribuída**. 2022. Elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ARAÚJO, Felipe Bezerra Pimentel. **Análise de series temporais em dados do setor do petróleo e gás natural**. 2022. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

AZEVEDO, Lara Gabrielle Silva. **Um olhar geopolítico sobre as fontes de energia que movem o mundo**. 2021. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Graduação em Geografia, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiania, 2021.

BARROS, Matheus Ferreira de. **Análise e previsão de séries temporais utilizando amortecimento exponencial com múltiplos ciclos e técnicas de simulação na produção de energia eólica**. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BARROS, Mônica. **Processos estocásticos**. 2011. Disponível em: <http://www.mbarros.com/artigo.aspx?artigoid=28>. Acesso em: 12 abr. 2024.

BORGES, A. **Brasil entra no ranking dos dez maiores países com energia solar do mundo**. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/brasil-entra-no-ranking-dos-dez-maiores-paises-com-energia-solar-do-mundo/>. Acesso em: 02 dez. 2023.

BORGES, F. Q. Crise de energia elétrica no Brasil - uma breve reflexão sobre a dinâmica de suas origens e resultados. **Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar - Issn 2675-6218**, [S.L.], v. 2, n. 10, p. 1, 2 nov. 2021. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar. <http://dx.doi.org/10.47820/recima21.v2i10.809>.

BRASIL. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Ministério de Minas e Energia. **Unidades com Geração Distribuída**. 2024. Elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 06 abr. 2024.

BRASIL. IBGE. (org.). **IBGE Cidades**: Fortaleza. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>. Acesso em: 09 jun. 2024.

BRASIL. IBGE. **IBGE Cidades**: Sobral. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/sobral/panorama>. Acesso em: 10 jun. 2024.

BRASIL. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (org.). **Panorama Ceará**. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/panorama>. Acesso em: 11 out. 2023.

BRASIL. IBGE. **Censo demográfico de 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=destaques>. Acesso em: 14 maio 2024.

BROCK, Fred V.; RICHARDSON, Scott. **Sistemas de medição em hidrometeorologia**. São Paulo: Usp, 2003. 137 p. Apostila Traduzida do livro meteorological measurement system de Fred Brock e Scott Richardson. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/material/apereira/AGM5786/pdf/Apostila%20Completa.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2024.

BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI, Ervin. **Wind energy handbook**. England: John Wiley & Sons, 2001.

CALDAS, Helder Henri Silva e; MOISÉS, Antônio Luiz Silva. geração fotovoltaica distribuída: estudo de caso para consumidores residenciais de salvador - Ba. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 164-180, 30 mar. 2016. Universidade Federal do Parana. <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v5i1.45270>.

CAMILO, Antônio Rafael Moreira. **Energia solar no brasil: uma breve revisão de literatura**. 2018. 34 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afrobrasileira, Redenção, 2018.

CAMPOS, Roger Júnio. **Previsão de séries temporais com aplicações a séries de consumo de energia elétrica**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CARVALHO, J. Vitor. **Sistema fotovoltaico personalizado – guia completo da energia solar**. 2021. Disponível em: <https://oakenergia.com.br/sistema-fotovoltaico-guia-completo-energia-solar/>. Acesso em: 04 abr. 2024.

CASTRO, R. M.G. **Introdução à energia eólica: energias renováveis e produção descentralizada**. 4. ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2004

CAVALCANTI, Matheus Beserra. **Maximização da eficiência de parques eólicos por otimização do posicionamento espacial dos aerogeradores**. 2023. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Civil, Escola de Engenharias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

CCEE (Brasil). Câmara de Comércio de Energia Elétrica (org.). **Consumo**. 2024. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/consumo>. Acesso em: 27 mar. 2021.

CCEE (Brasil). Câmara de Comércio de Energia Elétrica. **Geração**. 2024. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/dados-geracao>. Acesso em: 05 jan. 2024.

CCEE. **Consumo de Energia**. 2024. Elaborado pela Câmara de Comercio de Energia Elétrica - CCEE. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/consumo>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CEARÁ. Funceme. Secretaria dos Recursos Hídricos. **B-R-O Bró: Ceará entra no período de umidade mais baixa e temperaturas máximas intensas**. 2021. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=9545>. Acesso em: 15 maio 2024.

CEARÁ. Ipece. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (ed.). **Ceará ocupa o 13º lugar no ranking energético nacional e tem como principais matrizes de energia a termelétrica e a eólica**. 2018. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/2018/12/12/ceara-ocupa-o-13o-lugar-no-ranking-energetico-nacional-e-tem-como-principais-matrizes-de-energia-a-termelétrica-e-a-eolica/#:~:text=%C3%89%20importante%20ressaltar%20que%20o,produ%C3%A7%C3%A3o%20t%C3%A9rmica%20proveniente%20de%20biomassa.&text=O%20Cear%C3%A1%20consolidou%2Dse%20como,da%20pot%C3%A4ncia%20instalada%20do%20Cear%C3%A1..> Acesso em: 18 dez. 2023.

CEARÁ. IPECE. Secretaria de Planejamento e Gestão (org.). **Textos para discussões**: as regiões de planejamento do estado do Ceará. 111. ed. Fortaleza: IPECE, 2015. Desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa e Estratégias Econômicas do Ceará - IPECE.

CEARÁ. Seduc. Secretaria de Educação. **Geografia do Ceará**. 2011. Disponível em: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/01/turismo_geografiadoceara.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.

COSTA, Denis C.L.; NUNES, Marcus V.A.; VIEIRA, João P.A.; BEZERRA, Ubiratan H.. Decision tree-based security dispatch application in integrated electric power and natural-gas networks. **Electric Power Systems Research**, [S.L.], v. 141, p. 442-449, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.027>.

COSTA, Denis Carlos Lima; SOARES, Jaiza de Souza; BATISTA, Patrícia Raquel do Nascimento; SERRA, Jhonathan Alexandre Furtado Meninea; REIS, Adriane Cristina Fernandes; SILVA, Fernando José Aguirre Ramos da. O gás natural como transição para geração de energia limpa. In: congresso brasileiro interdisciplinar em ciências e tecnologia., 2023, S.L. **Anais do IV CoBICET**. S.L: Cobcet, 2023. p. 1-6.

COSTA, Fernanda Raquel Rodrigues; ROCHA, Miriam Karla; MAIA, Macilene Maria Monteiro; YAMASHITA, Gabrielli Harumi. **Previsão de demanda em uma empresa de serviços elétricos**: uma análise comparativa dos modelos ARIMA e SARIMA. 2023. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

COSTA, Gabriel Brito; LYRA, Roberto Fernando da Fonseca. Análise dos padrões de vento no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 31-38, março. 2012.

COSTA, Heictor Alves de Oliveira; COSTA, Denis Carlos Lima; MENESES, Lair Aguiar de. A interdisciplinaridade Aplicada ao Despacho Otimizado das Redes Integradas de Energia Elétrica e de Gás Natural utilizando o Algoritmo Genético. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 1-21, 21 fev. 2021. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12641>.

CRIEKEMANS, D. The geopolitics of renewable energy: different or similar to the geopolitics of conventional energy? ISA Annual Convention, Montreal: ISA, p. 1-52, 19 mar. 2011

CTGÁS-ER (Rio Grande do Norte). Centro de Tecnologias do Gás & Energias Renováveis (org.). **Normalização e Desempenho de Aerogeradores**. Natal: CTGÁS-ER, 2012.

Dados Mundiais. **Clima do Ceará**. 2023. Disponível em: <https://www.dadosmundiais.com/america/brasil/clima-ceara.php>. Acesso em: 17 dez. 2023.

De ARAÚJO, R. S.; De SOUSA, F. L. N.; VANDERLEY, P. S.; BENTES, S. O. da S.; GOMES, L. M.; FERREIRA, F. C. L. Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. **Research, Society And Development**, [S.L.],

v. 11, n. 11, p. 1, 29 ago. 2022. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33893>.

DUARTE, Victória Regina. **Avaliação de risco na implantação de geração eólica utilizando análise de sensibilidade**. 2018. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Sistemas de Energia, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

DUTRA, Ricardo Marques. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro**. 2001. 309 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

EPE (Brasil). Empresa de Pesquisa Energética (org.). **Painel de monitoramento do consumo de energia elétrica**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 fev. 2024.

EPE (org.). **Matriz Energética e Elétrica**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 20 dez. 2023.

Equipe editorial de Conceito.de. (3 de Fevereiro de 2011). Atualizado em 12 de Outubro de 2020. **Energia** - O que é, conceito e definição. Conceito.de. <https://conceito.de/energia>

ESPINOSA, Mariano Martinez; PRADO, Silvia Maria; GHELLERE, Maikelli. Uso do modelo SARIMA na previsão do número de focos de calor para os meses de junho a outubro no Estado de Mato Grosso. **Ciência e Natura**, Santa Maria, Brasil, v. 32, n. 2, p. 7-21, 2010.

FAN, Zhen; FAN, Bo; PENG, Jiangkai; LIU, Wenxin. Operation Loss Minimization Targeted Distributed Optimal Control of DC Microgrids. **Ieee Systems Journal**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 5186-5196, dez. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jsyst.2020.3035059>.

Felipe, T. J. S. **Energia eólica no estado do Ceará: impactos gerados e contribuição para o desenvolvimento sustentável**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

FERREIRA, A. L.; SILVA, F. B.; SOUSA, H.; GOMES, R.; BAITILO, R. **Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas**: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis do sistema interligado nacional (ano-base 2021). São Paulo: IEMA, 2022. 63 p.

FONSECA, J. V. N. **Desenvolvimento e testes de bancada para aquisição de dados aerodinâmicos**. 2019. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Aeroespacial, Faculdade Unb Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

FONTANET, F. A. **Avaliação de uma opção de espera de um parque eólico pelo método de opções reais**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FRANCISCO, W. de C. **Localização geográfica do Brasil**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/localizacao-geografica-brasil.htm>. Acesso em: 03 jan. 2024.

FREIRE, A. I.; FONTGALLAND, IL. Perspectivas e desafios econômicos da geração de energia eólica na região Nordeste do Brasil. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 1, pág. e58911125429, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v1i1.25429. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/25429>. Acesso em: 28 nov. 2023.

FREITAS, D. M. de. **Nexo energia-água: estudo de caso para a matriz elétrica do ceará 2050**. 2021. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

GARCÍA, Felipe Hernández. **Análise experimental e simulação dos sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos**. 2004. 208 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GEJIMA JUNIOR, Michel Yasuyuki. **Avaliação do potencial eólico no pico dos dias em brazópolis/mg**. 2021. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

GREENER (Brasil). **A Evolução do mercado fotovoltaico no brasil pelos dados do estudo estratégico de geração distribuída**. 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/evolucao-do-mercado-fotovoltaico-no-brasil/>. Acesso em: 04 abr. 2024.

GUARAMIRANGA. Guaramiranga. Prefeitura Municipal de Guaramiranga (org.). **O município: Dados do Município**. 2024. Elaborado pela prefeitura do município de Guaramiranga. Disponível em: <https://www.guaramiranga.ce.gov.br/omunicipio.php#:~:text=Est%C3%A1%20situado%20a%2095%20km,C%2C%20proporcionando%20um%20frio%20agrad%C3%A1vel..> Acesso em: 20 jun. 2024.

GUTIÉRREZ, José Luis Carrasco. **Monitoramento da instrumentação da barragem de corumbá-i por redes neurais e modelos de box & jenkins**. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GWEC (Bélgica). Conselho Global de Energia Eólica (org.). **Relatório global de vento 2022**. 2022. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

HEWITT, Paul G.. **Física conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

HORN, Diego Anderson. **Análise numérica da esteira aerodinâmica formada por uma turbina eólica com dimensionamento ótimo de Betz**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. Forecasting: principles and practice. In: **FORECASTING: principles and practice**, 3. ed - OTexts: Melbourne, Australia, 2021. Disponível em: <<https://otexts.com/fpp3/>>. Acesso em: 10 abril. 2024.

IBGE. **Síntese de Indicadores Sociais**. 2023. Elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/rendimento-despesa-e-consumo/9221-sintese-de-indicadores-sociais.html>. Acesso em: 25 jun. 2024.

IEA (org.). **Sistemas energéticos renováveis**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables>. Acesso em: 20 dez. 2023.

IEA. International Energy Agency (org.). **Participação na geração de eletricidade renovável por tecnologia, 2000-2028**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-renewable-electricity-generation-by-technology-2000-2028>. Acesso em: 02 jan. 2024.

IEA. International Energy Agency (org.). **Patentes e a transição energética: tendências globais em inovação em tecnologia de energia limpa**. Tendências globais em inovação em tecnologia de energia limpa. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/patents-and-the-energy-transition>. Acesso em: 03 jan. 2024.

IEMA (Brasil). Instituto de Energia e Meio Ambiente (org.). **Emissões de gases de efeito estufa de usinas termelétricas cresceram 75%**. 2022. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-de-usinas-termelétricas-cresceram-75-20221215>. Acesso em: 14 fev. 2024.

IJANO, Gabriel Loureiro Melo. **A regulação da energia solar: da tutela ambiental ao advento da lei nº 14.300/2022, que instituiu o marco legal da energia solar**. 2023. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Direito, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, S.L, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Projected Costs of Generating Electricity 2015**. IEA, 215p., 2015. Disponível em: < <https://webstore.iea.org/projected-costs-of-generating-electricity-2015> >. Acesso em: 15 mar. 2024.

IPCC (S.L). Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (org.). **Relatório de Síntese AR6: mudanças climáticas 2023**. Mudanças Climáticas 2023. 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 17 fev. 2024.

IPECE (Ceará). Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Panorama da produção de energia elétrica no estado do Ceará: um enfoque para a matriz eólica**. Fortaleza: Ipece, 2018. (Informe Nº 141 – Dezembro/2018). ISSN: 2594-8717

KEMMERICH, Pedro Camargo; FIGUEIRA, Henrique Horst; MICHELS, Leandro. Evolução da normatização para conexão à rede elétrica de sistemas fotovoltaicos no mundo: uma revisão. In: Congresso brasileiro de energia solar, 8., 2020, Fortaleza. **Anais CBENS**. Fortaleza: Cbnes, 2020. p. 1-11.

KEOHANE, Robert O.; VICTOR, David G.. The Transnational Politics of Energy. **Daedalus**, [S.L.], v. 142, n. 1, p. 97-109, jan. 2013. MIT Press - Journals. http://dx.doi.org/10.1162/daed_a_00196.

LAMBERT, José Antonio; MARQUES, Fernando Nunes; SILVA, Luciano de Souza da Costa e; LEMOS, Danielle Moreira. Geração de energia elétrica por meio de placas solares fotovoltaicas. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 6, p. 40240-40249, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n6-530>.

Leitão, R. A. de O. **Uma análise do desenvolvimento da energia eólica no mundo, no Brasil e seu cenário atual no estado do Ceará**. 2019. 54 f. Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Teoria Econômica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LIMA FILHO, Luiz Medeiros de Araujo. **Correlação e Regressão**. Departamento de Estatística da Universidade Federal da Paraíba - Slide Aula 9. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.de.ufpb.br/~luiz/AED/Aula9.pdf> f. Acesso em: 05 jun. 2024.

LIRA, M. A. T; MELO, M. L. da S.; RODRIGUES, L. M.; SOUZA, T. R. M. de. Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO2 no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 389-397, set. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786343046>.

MACHADO, Melissa Gurgel de Abreu. **BENEFÍCIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO ESTADO DO CEARÁ – BRASIL**. 2020. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente, Universidade do Porto, Porto, 2020.

MAIA, Rian Sardinha. **Energia Solar: o desenvolvimento de um novo mercado**. 2018. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MARQUES, Ruberiada Silva Caminha de Menezes. **ENERGIA RENOVÁVEL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO CEARÁ**. 2010. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

MARQUES, Vinícius. **Climas do Brasil**. Disponível em: <https://www.significados.com.br/climas-do-brasil/>. Acesso em: 03 jan. 2024.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172008000100005>.

Medeiros-Feitosa, J. R.; Oliveira, C. W. Estudo comparativo dos dados de precipitação do satélite TRMM e postos pluviométricos no estado do Ceará, Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, [S.L.], v. 2, n. 65, p. 257-280, 29 jun. 2020. Universidad Nacional de Costa Rica. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.65-2.10>.

MONTAÑEZ, Jefry Anderson Mora. **Gerenciamento, Produção e Controle de Potência para um Sistema Híbrido de Energia Renovável**. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

MONTERO, L. R. R.; BEZERRA, V. R.; MEDEIROS, K. M. de; LIMA, C. A. P. de. Proposta do aproveitamento do potencial da microgeração eólica na zona rural, urbana e litorânea brasileira. In: Congresso nacional de ensino e pesquisa em ciências, 5., 2020, Campina Grande. **E-book**. S.L: Conapesc, 2021. p. 1-19.

MORAIS, George Lopes. **Projeto aerodinâmico de pás de uma turbina eólica**. 2018. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2018.

MORETTIN, P. A.; TOLÓI, C. M. C. Análise de séries temporais: modelos lineares univariados. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, v. 1, 2018.

MOURA, J. D. F. Aumento da eficácia na geração de energia elétrica proveniente dos parques eólicos em decorrência da crise hídrica no Brasil. **Revista Valore**, [S.L.], v. 7, p. 111-120, 21 mar. 2022. Instituto de Cultura Técnica Sociedade Civil Ltda. <http://dx.doi.org/10.22408/rev7020221084111-120>.

MOUSINHO, Maria Cândida Arrais de Miranda; TORRES, Ednildo Andrade; MELO, Silvio Alexandre Beisl Vieira de; JANARDHANAN, Nanda Kumar. GEOPOLÍTICA DE MUDANÇA DE ENERGIA: qual é o papel da sustentabilidade na geopolítica global de energia? **Revista Brasileira de Estratégia e Relações Internacionais**, S.L, v. 6, n. 12, p. 84-110, jul. 2017.

Muniz, L. F. et al. Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. 2017.

NERIS, A. **Tudo o que você precisa saber sobre placas fotovoltaicas**. 2022. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-placas-fotovoltaicas/#:~:text=A%20tecnologia%20existente%20nas%20placas%20de%20sil%C3%ADcio%20monocristalino,reconhecer%20uma%20placa%20fotovoltaica%20de%20sil%C3%ADcio%20monocristalino%20%28mono-Si%29..> Acesso em: 02 dez. 2023.

NEUSSER, Klaus. **Time series econometrics**. Berna, Suíça: Springer, 2016.

NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani; SOUZA, Acir Mércio Loredó; ROCHA, Marcelo Maia. **Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico**. Design & Tecnologia, Rio Grande do Sul, v. 2, n. 4, p. 10-23, dez. 2012.

OLIVEIRA, A. M. Q.; PINHEIRO, J. G. L. **Energia renovável com utilização da energia eólica**. Episteme Transversalis, [S.l.], v. 11, n. 1, maio 2020. ISSN 2236-2649. Disponível

em: <<http://revista.ugb.edu.br/ojs302/index.php/episteme/article/view/2133>>. Acesso em: 18 fev. 2024.

OMER, A. et al. Water scarcity in the YellowRiver Basin under future climate change and human activities. **Science of the Total Environment**, v. 749, p. 1-13, 2020.

ONS (Brasil). **Evolução da carga no sistema interligado nacional e subsistemas**. 2024. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/BoletimMensalCarga_mar%C3%A7o_2024.pdf](https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/BoletimMensalCarga_mar%C3%A7o_2024.pdf). Acesso em: 26 maio 2024.

PACÍFICO, Fernando. **Energia solar deve abastecer rede de clientes em Campinas a partir de 2013**. 2012. Elaborada por equipe de artes do G1 Campinas. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2012/09/energia-solar-deve-abastecer-rede-de-clientes-em-campinas-partir-de-2013.html>. Acesso em: 05 abr. 2024.

PASSOS, Caroline Tedesco Santos; FERRI, Giovane Lopes; FARDIN, Jussara Farias; MEDINA, Augusto César Rueda. Métodos de identificação de sombreamento parcial em painéis fotovoltaicos de geração distribuída: uma breve revisão na literatura. **Brazilian Journal Of Production Engineering**, S.L, v. 10, n. 1, p. 12-23, 06 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i1.42263>.

PAULINO, N. **De onde vem a energia elétrica que abastece o Ceará?** saiba como funciona. Saiba como funciona. 2021. Matéria do jornal Diário do Nordeste. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/metro/de-onde-vem-a-energia-eletrica-que-abastece-o-ceara-saiba-como-funciona-1.3133225>. Acesso em: 18 dez. 2023.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PEREIRA, Naron Xavier. **desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no brasil: geração distribuída vs geração centralizada**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2019.

PICOLO, Ana Paula; RÜHLER, Alexandre J.; RAMPINELLI, Giuliano Arns. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 01-13, dez. 2014. *FapUNIFESP (SciELO)*. <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172014000400007>.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

PIOTROWSKI, Leonardo Jonas; KNAK NETO, Nelson; ABAIDE, Alzenira da Rosa; FARRET, Felix Alberto. Análise Técnica da Inserção de Veículos Elétricos e Geração Fotovoltaica no Sistema de Distribuição. **Proceedings Of The 13Th Seminar On Power Electronics And Control (Sepoc 2021)**, [S.L.], v. , n. , p. 1-6, 18 maio 2021. Sepoc. <http://dx.doi.org/10.53316/sepoc2021.044>.

RESEARCHGATE. Funcionamento de um aerogerador. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Eschema-geral-de-funcionamento-deum-aerogerador-15_fig5_292623126> Acesso em:

SALES, Alice. **Ambientalistas e indígenas lutam contra instalação de usina Termelétrica no Ceará.** 2023. Disponível em: [https://agenciaeconordeste.com.br/ambientalistas-e-indigenas-lutam-contra-instalacao-de-usina-termeletrica-no-ceara/#:~:text=O%20Cear%C3%A1%20abriga%205%20termel%C3%A9tricas,UTE%20Fortaleza%20\(Enel%20Brasil%20S.A.\).](https://agenciaeconordeste.com.br/ambientalistas-e-indigenas-lutam-contra-instalacao-de-usina-termeletrica-no-ceara/#:~:text=O%20Cear%C3%A1%20abriga%205%20termel%C3%A9tricas,UTE%20Fortaleza%20(Enel%20Brasil%20S.A.).) Acesso em: 14 fev. 2024.

SANTOS, Weriton Carlos dos; FIGUEIRA, Ronaldo Gomes; FLORIAN, Fabiana. LA ENERGÍA SOLAR Y SUS IMPACTOS EN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED DESPUÉS DE LA LEY 14.300/22. **Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar - Issn 2675-6218**, [S.L.], v. 5, n. 5, p. 1-14, 8 maio 2024. Editora RECIMA21 LTDA. <http://dx.doi.org/10.47820/recima21.v5i5.5202>.

SEDET - CE (Ceará). Secretaria do Desenvolvimento Econômico e do Trabalho (org.). **Hub Tecnológico: Protagonismo global.** Disponível em: <https://cearaterradasoportunidades.sedet.ce.gov.br/hub-tecnologico/#:~:text=O%20mercado%20de%20telecomunica%C3%A7%C3%B5es%20no,165%25%20no%20tr%C3%A1fego%20de%20dados..> Acesso em: 17 maio 2024.

SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p.895-869, mar. 2022. <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4654>.

SILVA, J. A. Energia eólica no Brasil: avanços e desafios. **Princípios**, [S.L.], v. 42, n. 167, p. 179-202, 2023. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/principios.2675-6609.2023.167.010>.

SILVA, Wendell Cassermiro da; RAIHER, Augusta Pelinski. Análise espacial do consumo de energia elétrica no ceará: um exame desenvolvimentista com estruturas verticais. **Revista Econômica do Nordeste**, [S.L.], v. 54, n. 4, p. 28-50, 30 nov. 2023. Banco do Nordeste do Brasil S/A. <http://dx.doi.org/10.61673/ren.2023.1413>.

SOARES, M.; COSTA, H. K. de M. O segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil: uma avaliação das crises hídricas enfrentadas em 2001 e 2021. **Conjecturas**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 307-321, 25 fev. 2022. Uniao Atlantica de Pesquisadores. <http://dx.doi.org/10.53660/conj-676-719>.

SOUSA, A. R. D. S. et al. Análise de séries temporais. Porto Alegre: Sagah Educação S.A, 2021.

STEGEN, K. Redrawing the Geopolitical Map: International Relations and Renewable Energies. In: SCHOLTEN, D. The Geopolitics of Renewables. Lecture Notes in Energy, v. 61. Cham: Springer, 2018, p. 75-95. Disponível em: <https://www.springer.com/br/book/9783319678542>. Acesso em: 29 dez. 2023

Suliano, D. C; Magalhães, K. A; Soares, R. B. **A influência do clima no desempenho da economia cearense**. Fortaleza: IPECE, 2009. 56 v.

TEIXEIRA, F. J. C. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**. Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH), Fortaleza, Ceará, Brasil, mar. 2018..

TEIXEIRA, Marco Antonio Casadei; RAMOS, Heidy Rodriguez; AGUIAR, Alexandre de Oliveira e. Perspectivas de Novos Materiais Alternativos ao Silício para a produção de Células Solares Fotovoltaicas: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, S.L, v. 09, n. 71, p. 48-62, out. 2021.

VARELA, A. **Ceará foi o Estado que mais aumentou o consumo de energia elétrica em 2021**. 2022. Disponível em: <https://focus.jor.br/ceara-foi-o-estado-que-mais-aumentou-o-consumo-de-energia-eletrica-em-2021/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

VIEIRA, Michael Raphael Soares. **Energia acessível e de qualidade: os desafios para a garantia de acesso à energia renovável no Amazonas**. 2022. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.

VOGT, Hans Heinrich. **Análise estrutural de pás de gerador eólico de pequeno porte feitas de fibra vegetal brasileira**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2007. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

YOLDAŞ, Yeliz; ÖNEN, Ahmet; MUYEEN, S.M.; VASILAKOS, Athanasios V.; ALAN, İrfan. Enhancing smart grid with microgrids: challenges and opportunities. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 72, p. 205-214, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.064>.

ZUFFO, Antônio Carlos. O Sol, o motor das variabilidades climáticas. **Revista Dae**, [S.L.], v. 63, n. 198, p. 6-24, 2015. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.142>.

**ANEXO A – TABELA DE AGRUPAMENTO DOS MUNICÍPIOS POR
CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS NAS ZONAS DE PLANEJAMENTO DO
ESTADO DO CEARÁ**

(Continua)

RP	Nº de municípios	Municípios componentes	Características geoambientais	Área (km²)
Cariri	29	Abaicara, Altaneira, Antonina do Norte, Araripe, Assaré, Aurora, Barbalha, Barro, Brejo Santo, Campos Sales, Caririaçu, Crato, Farias Brito, Granjeiro, Jardim, Jati, Juazeiro do Norte, Lavras da Mangabeira, Mauriti, Milagres, Missão Velha, Nova Olinda, Penaforte, Porteiras, Potengi, Salitre, Santana do Cariri, Tarrafas e Várzea Alegre.	Domínios naturais da chapada do Araripe, sertões e serras secas.	17.298,35
Centro Sul	13	Acopiara, Baixio, Cariús, Catarina, Cedro, Icó, Iguatu, Ipaumirim, Jucás, Orós, Quixelô, Saboeiro e Umari.	Domínios naturais dos sertões, serras secas e planície ribeirinha.	11.581,50
Grande Fortaleza	19	Aquiraz, Caucaia, Cascavel, Chorozinho, Eusébio, Fortaleza, Guaiúba, Horizonte, Itaitinga, Maracanaú, Maranguape, Pacajus, Pacatuba, Paracuru, Paraipaba, Pindoretama, São Luís do Curu, São Gonçalo do Amarante e Trairi.	Domínios naturais da planície litorânea, tabuleiros costeiros, serras úmidas e sertões.	7.434,91

(Continuação)

RP	Nº de municípios	Municípios componentes	Características geoambientais	Área (km²)
Litoral Leste	6	Aracati, Beberibe, Fortim, Icapuí, Itaiçaba e Jaguaruana.	Domínios naturais da planície litorânea, tabuleiros costeiros e planície ribeirinha.	4.631,20
			Domínios naturais da planície litorânea, tabuleiros costeiros, planície litorânea, sertões e planície ribeirinha.	
Litoral Norte	13	Acaraú, Barroquinha, Bela Cruz, Camocim, Chaval, Cruz, Granja, Itarema, Jijoca de Jericoacoara, Marco, Martinópolis, Morrinhos e Uruoca.	Domínios naturais da planície litorânea, tabuleiros costeiros, planície litorânea, sertões e planície ribeirinha.	9.336,50
Litoral Oeste / Vale do Curu	12	Amontada, Apuiarés, General Sampaio, Irauçuba, Itapajé, Itapipoca, Miraima, Pentecoste, Tejuçuoca, Tururu, Umirim e Uruburetama.	Domínios naturais da planície litorânea, tabuleiros costeiros, planície litorânea, serras secas e úmidas, sertões e planície ribeirinha.	8.890,58
Maciço de Baturité	13	Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Barreira, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Itapiúna, Mulungu, Ocara, Pacoti, Palmácia e Redenção.	Domínios naturais das serras úmidas e secas e dos sertões.	3.707,30

(Continuação)

RP	Nº de municípios	Municípios componentes	Características geoambientais	Área (km²)
Serra da Ibiapaba	9	Carnaubal, Croatá, Guaraciaba do Norte, Ibiapina, Ipu, São Benedito, Tianguá, Ubajara e Viçosa do Ceará.	Domínios naturais do Planalto da Ibiapaba e dos sertões.	5.697,30
Sertão Central	13	Banabuiú, Choró, Deputado Irapuan Pinheiro, Ibaretama, Ibicuitinga, Milhã, Mombaça, Pedra Branca, Piquet Carneiro, Quixadá, Quixeramobim, Senador Pompeu e Solonópole.	Domínios naturais dos sertões e das serras secas.	16.014,27
Sertão de Canindé	6	Boa Viagem, Canindé, Caridade, Itatira, Madalena e Paramoti.	Domínios naturais dos sertões e das serras secas.	9.202,34
Sertão de Sobral	18	Alcântaras, Cariré, Coreaú, Forquilha, Frecheirinha, Graça, Groaíras, Massapê, Meruoca, Moraújo, Mucambo, Pacujá, Pires Ferreira, Reriutaba, Santana do Acaraú, Senador Sá, Sobral e Varjota.	Domínios naturais dos sertões, das serras úmidas e secas, e da planície ribeirinha.	8.533,50
Sertão dos Crateús	13	Ararendá, Catunda, Crateús, Hidrolândia, Independência, Ipaporanga, Ipueiras, Monsenhor Tabosa, Nova Russas, Novo Oriente, ...	Domínios naturais dos sertões e das serras secas.	20.591,20

(Continuação)

RP	Nº de municípios	Municípios componentes	Características geoambientais	Área (km²)
Sertão dos Crateús	13	(continuação) Poranga, Santa Quitéria e Tamboril.	Domínios naturais dos sertões e das serras secas.	20.591,20
Sertão dos Inhamuns	5	Aiuaba, Arneiroz, Parambu, Quiterianópolis e Tauá.	Domínios naturais dos sertões.	10.863,39
Vale do Jaguaribe	15	Alto Santo, Ererê, Iracema, Jaguaretama, Jaguaribara, Jaguaribe, Limoeiro do Norte, Morada Nova, Palhano, Pereiro, Potiretama, Quixeré, Russas, São João do Jaguaribe e Tabuleiro do Norte.	Domínios naturais das planícies ribeirinhas, da chapada do Apodi, da planície litorânea, dos tabuleiros costeiros e dos sertões.	15.011,98

Fonte: IPECE, 2015.

ANEXO B – CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA A ANÁLISE DA SÉRIE TEMPORAL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DO CEARÁ NO SOFTWARE R STUDIO.

```
#####
##### Consumo de energia elétrica do estado do Ceará - 2013 - 2023 #####
#####

# Adicionando os dados de consumo mensal para cada ano em uma variável
dados_anos <- list(
  "2013" = c(888.393, 888.336, 854.292, 879.856, 895.137, 888.268, 836.396, 891.915,
    936.809, 865.843, 976.758, 905.633),
  "2014" = c(925.025, 943.695, 928.567, 889.692, 951.714, 886.364, 940.659, 951.073,
    971.410, 1006.509, 1002.098, 959.696),
  "2015" = c(966.140, 964.966, 901.727, 904.228, 944.587, 942.599, 910.506, 948.245,
    939.268, 953.910, 984.712, 964.838),
  "2016" = c(954.361, 907.792, 959.585, 982.875, 1008.021, 1054.048, 1039.477, 1013.589,
    1006.298, 991.681, 998.315, 997.808),
  "2017" = c(940.311, 898.841, 904.027, 909.923, 947.928, 960.184, 940.416, 960.147,
    981.978, 993.947, 1014.667, 971.779),
  "2018" = c(929.186, 887.547, 891.238, 929.001, 945.059, 974.874, 930.143, 938.638,
    949.722, 942.583, 982.044, 965.405),
  "2019" = c(984.199, 1040.897, 974.015, 956.851, 1005.255, 978.450, 1002.393, 979.548,
    1027.544, 1047.135, 1129.966, 1153.700),
  "2020" = c(1075.697, 974.262, 957.893, 864.446, 883.507, 920.802, 951.198, 998.160,
    1033.609, 1141.902, 1054.111, 1092.363),
  "2021" = c(1085.910, 1038.589, 1015.890, 1034.344, 1028.166, 1075.617, 1035.544,
    1093.206, 1113.104, 1132.069, 1137.521, 1180.349),
  "2022" = c(1086.223, 1021.496, 1059.032, 1057.343, 1024.214, 1042.009, 1020.016,
    1069.170, 1104.910, 1129.274, 1148.793, 1122.092),
  "2023" = c(1088.303, 1068.882, 1035.483, 1090.440, 1076.829, 1161.788, 1054.384,
    1122.570, 1184.136, 1165.718, 1233.003, 1165.783)
)

# Criando a série temporal
dados_mensais <- unlist(dados_anos)
consumo <- ts(dados_mensais, start = c(2013, 1), frequency = 12)

# Plotando a série temporal
plot.ts(consumo, main = "Consumo de energia do estado do Ceará (2013-2023)",
  ylab = "Consumo de energia [MWh]", xlab = "Tempo (anos)", col = "blue")

# Ajuste de tendência linear
tempo <- time(consumo)
modelo <- lm(consumo ~ tempo)
lines(tempo, modelo$fitted, col = "red", lty = 2)

# Análise de normalidade
qqnorm(consumo, main = "QQ-Plot do Consumo de Energia")
qqline(consumo)
```

```
shapiro.test(consumo)

# Teste de estacionalidade
library(urca)
teste_kpss <- ur.kpss(consumo)
summary(teste_kpss)

# Autocorrelação
acf(consumo, main = "ACF do Consumo de Energia")
pacf(consumo, main = "PACF do Consumo de Energia")
Box.test(consumo, type = "Ljung-Box")

# Decomposição da série temporal
library(forecast)
decomposicao <- decompose(consumo)
plot(decomposicao)

# Média móvel
media_movel <- ma(consumo, order = 3)
lines(media_movel, col = "green", lty = 2)

# Histograma
hist(consumo, main = "Histograma do Consumo de Energia", col = "lightblue", breaks = 15,
      xlab = "Consumo [MWh]")
```

ANEXO C - EXEMPLO DO CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA A ANÁLISE DAS
SÉRIES TEMPORAIS DOS DADOS METEOROLÓGICOS DOS DADOS EXTRAÍDOS
DAS 14 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NO ESTADO DO CEARÁ.

```
#####
####                                Dados Meteorológicos                                ###
#####

install.packages("readxl") # instalando pacote para importar planilhas do excel
library(readxl)
library(ggplot2)
library(forecast)

#construindo vetores com os dados das variáveis
install.packages("dplyr") # instalando a biblioteca
library(dplyr)

# Substituir valores missing - velocidade dos ventos
install.packages("tidyr")
library(tidyr)

#rota dos dados de geração - planilha com os dados
file.choose()
rota_dados_meteorologicos <-
"C:\\Users\\lcsna\\OneDrive\\Documentos\\EXCEL\\BANCO_DE_DADOS_DISSERTACA
O.xlsx"

# planilhas dos bancos de dados
excel_sheets(rota_dados_meteorologicos)

#carregar os dados
str(dados_meteorologicos_fortal)
sapply(dados_meteorologicos_fortal, function(x) sum(is.na(x)))
sapply(dados_meteorologicos_fortal, function(x) sum(is.nan(x)))

##### leitura de planilhas do excel #####
dados_meteorologicos_fortal <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Fortaleza")
dados_meteorologicos_barba <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Barbalha")
dados_meteorologicos_iguatu <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Iguatu")
dados_meteorologicos_taua <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Taua")
dados_meteorologicos_qxrm <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet =
"Quixeramobim")
dados_meteorologicos_mn <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet =
"Morada Nova")
dados_meteorologicos_jgrn <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Jaguaruana")
dados_meteorologicos_crts <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Crateus")
dados_meteorologicos_cs <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Campos Sales")
dados_meteorologicos_jgrb <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Jaguaribe")
dados_meteorologicos_itppk <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Itapipoca")
dados_meteorologicos_akr <- read_excel(rota_dados_meteorologicos, sheet = "Acarau")
```

```
##### Município de Fortaleza #####
```

```
##### velocidade do vento em Fortaleza #####
```

```
vel_fortal_2013 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2013
vel_fortal_2014 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2014
vel_fortal_2015 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2015
vel_fortal_2016 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2016
vel_fortal_2017 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2017
vel_fortal_2018 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2018
vel_fortal_2019 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2019
vel_fortal_2020 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2020
vel_fortal_2021 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2021
vel_fortal_2022 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2022
vel_fortal_2023 <- dados_meteorologicos_fortal$Vel_vento_2023
```

```
vel_vento_fortal <- c(vel_fortal_2013, vel_fortal_2014, vel_fortal_2015,
                      vel_fortal_2016, vel_fortal_2017, vel_fortal_2018, vel_fortal_2019,
                      vel_fortal_2020, vel_fortal_2021, vel_fortal_2022, vel_fortal_2023)
```

```
#tratando os valores da velocidade (excluindo os valores corrompidos)
```

```
# Filtrar o vetor para excluir valores 0, -9999 e NA
```

```
vel_vento_fortal_filtrado <- vel_vento_fortal[vel_vento_fortal != 0 & vel_vento_fortal != -
9999 & !is.na(vel_vento_fortal)]
```

```
min(vel_vento_fortal_filtrado)
max(vel_vento_fortal_filtrado)
median(vel_vento_fortal_filtrado)
```

```
#contando os dados do meu vetor
length(vel_vento_fortal_filtrado)
```

```
# Criar a série temporal
```

```
vel_vento_fortal_ts <- ts(vel_vento_fortal_filtrado, start = c(2013, 1), end= c(2023,12),
frequency = 24)
```

```
# Adicionar a linha de tendência
```

```
indice_tempo_fortal <- time(vel_vento_fortal_ts)
tendencia_vvent_fortal <- lm(vel_vento_fortal_ts ~ indice_tempo_fortal)
```

```
# Decompondo e plotando a série temporal
```

```
decomp_vel_vent_fortal <- decompose(vel_vento_fortal_ts)
```

```
# Visualizar a série temporal
```

```
plot(vel_vento_fortal_ts, main = "", xlab = "", ylab = "Velocidade do Vento [m/s]")
abline(h=seq(0.5, 8, by=0.5), col="gray", lty= "dotted")
abline(tendencia_vvent_fortal, col= "blue", lwd=3, lty= "dotted")
lines(decomp_vel_vent_fortal$trend, col= "orange", lwd=2)
```

```

legend("topright", legend=c(" Série temporal", " Tendência linear", " Tendência suavizada"),
      col=c("black", "blue", "orange"),
      lty=c(1, 3, 1), lwd=c(1, 2, 2),
      bty="n", # Remove a caixa ao redor da legenda
      xpd=TRUE, # Permite desenho fora da região de plotagem
      inset=c(0.1, -0.20), # Ajusta a posição da legenda dentro do gráfico
      cex=0.9, # Reduz o tamanho do texto da legenda
      x.intersp= -6, # Reduz o espaço horizontal entre os itens
      y.intersp= 2.1, # Ajusta o espaço vertical entre os itens
      horiz= TRUE) # Coloca os itens da legenda em uma linha horizontal

```

```
##### Temperatura do ar em Fortaleza #####
```

```

temp_fortal_2013 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2013
temp_fortal_2014 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2014
temp_fortal_2015 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2015
temp_fortal_2016 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2016
temp_fortal_2017 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2017
temp_fortal_2018 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2018
temp_fortal_2019 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2019
temp_fortal_2020 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2020
temp_fortal_2021 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2021
temp_fortal_2022 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2022
temp_fortal_2023 <- dados_meteorologicos_fortal$Temp_2023

```

```

temp_fortal <- c(temp_fortal_2013, temp_fortal_2014, temp_fortal_2015, temp_fortal_2016,
                temp_fortal_2017, temp_fortal_2018, temp_fortal_2019, temp_fortal_2020,
                temp_fortal_2021, temp_fortal_2022, temp_fortal_2023)

```

```

temp_fortal_filtrado <- temp_fortal[temp_fortal != 0 & temp_fortal != -9999 &
!is.na(temp_fortal) &
                                temp_fortal >=10]

```

```

length(temp_fortal_filtrado)
min(temp_fortal_filtrado)
max(temp_fortal_filtrado)
median(temp_fortal_filtrado)

```

```
# Criar a série temporal
```

```
temp_fortal_ts <- ts(temp_fortal_filtrado, start = c(2013, 1), end = c(2023,12), frequency = 24)
```

```
# Adicionar a linha de tendência
```

```

indice_tempo_fortal1 <- time(temp_fortal_ts)
tendencia_fortal1 <- lm(temp_fortal_ts ~ indice_tempo_fortal1)

```

```
# Decompondo e plotando a série temporal
```

```
decomp_temp_fortal <- decompose(temp_fortal_ts)
```

```
# Visualizar a série temporal
```

```

plot(temp_fortal_ts, lwd=1, main = "", xlab = "", ylab = "Temperatura do ar [°C]")
abline(h=seq(25, 33, by= 1), col= "gray", lty= "dotted")

```

```

abline(tendencia_fortal1, col="blue", lty= "dotted", lwd=3)
lines(decomp_temp_fortal$trend, col= "orange", lwd =2)

legend("topright", legend=c(" Série temporal", " Tendência linear", " Tendência suavizada"),
      col=c("black", "blue", "orange"),
      lty=c(1, 3, 1), lwd=c(1, 2, 2),
      bty="n", # Remove a caixa ao redor da legenda
      xpd=TRUE, # Permite desenho fora da região de plotagem
      inset=c(0.1, -0.20), # Ajusta a posição da legenda dentro do gráfico
      cex=0.8, # Reduz o tamanho do texto da legenda
      x.intersp= -6, # Reduz o espaço horizontal entre os itens
      y.intersp=3.0, # Ajusta o espaço vertical entre os itens
      horiz= TRUE) # Coloca os itens da legenda em uma linha horizontal

##### precipitação pluviométrica em Fortaleza #####

precipit_fortal_2013 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2013
precipit_fortal_2014 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2014
precipit_fortal_2015 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2015
precipit_fortal_2016 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2016
precipit_fortal_2017 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2017
precipit_fortal_2018 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2018
precipit_fortal_2019 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2019
precipit_fortal_2020 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2020
precipit_fortal_2021 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2021
precipit_fortal_2022 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2022
precipit_fortal_2023 <- dados_meteorologicos_fortal$Precipt_2023

Precipt_fortal <- c(precipit_fortal_2013, precipit_fortal_2014, precipit_fortal_2015,
                    precipit_fortal_2016, precipit_fortal_2017, precipit_fortal_2018, precipit_fortal_2019,
                    precipit_fortal_2020, precipit_fortal_2021, precipit_fortal_2022, precipit_fortal_2023)

#tratando os valores da velocidade (excluindo os valores corrompidos)

# Filtrar o vetor para excluir valores 0, -9999 e NA

Precipt_fortal_filtrado <- Precipt_fortal[Precipt_fortal != -9999 & !is.na(Precipt_fortal)]
min(Precipt_fortal_filtrado)
max(Precipt_fortal_filtrado)
median(Precipt_fortal_filtrado)

#contando os dados do meu vetor
length(Precipt_fortal_filtrado)

# Criar a série temporal
Precipt_fortal_ts <- ts(Precipt_fortal_filtrado, start = c(2013, 1), end=c(2023,12), frequency =
8760)

# Visualizar a série temporal

```

```
plot(Precipt_fortal_ts, main = "Precipitações pluviométricas em fortal (2013-2023)", xlab =
"Ano", ylab = "Precipitações pluviométricas [mm]")
```

```
##### Radiação solar global em Fortaleza #####
```

```
rad_solar_fortal_2013 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2013
rad_solar_fortal_2014 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2014
rad_solar_fortal_2015 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2015
rad_solar_fortal_2016 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2016
rad_solar_fortal_2017 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2017
rad_solar_fortal_2018 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2018
rad_solar_fortal_2019 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2019
rad_solar_fortal_2020 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2020
rad_solar_fortal_2021 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2021
rad_solar_fortal_2022 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2022
rad_solar_fortal_2023 <- dados_meteorologicos_fortal$Radia_glob_2023
```

```
rad_solar_fortal <- c(rad_solar_fortal_2013, rad_solar_fortal_2014, rad_solar_fortal_2015,
rad_solar_fortal_2016,
rad_solar_fortal_2017,rad_solar_fortal_2018, rad_solar_fortal_2019,
rad_solar_fortal_2020,
rad_solar_fortal_2021,rad_solar_fortal_2022, rad_solar_fortal_2023)
```

```
rad_solar_fortal_filtrado <- rad_solar_fortal[ rad_solar_fortal != 0 & rad_solar_fortal != -9999
& !is.na(rad_solar_fortal)]
```

```
min(rad_solar_fortal_filtrado)
max(rad_solar_fortal_filtrado)
median(rad_solar_fortal_filtrado)
```

```
# Criar a série temporal
```

```
rad_solar_fortal_ts <- ts(rad_solar_fortal_filtrado, start = c(2013, 1), end = c(2023,12),
frequency = 24)
```

```
# Decompondo e plotando a série temporal
```

```
decomp_rad_solar_fortal <- decompose(rad_solar_fortal_ts)
plot(decomp_rad_solar_fortal$trend)
```

```
# Adicionar a linha de tendência
```

```
indice_tempo_fortal3 <- time(rad_solar_fortal_ts)
tendencia_fortal3 <- lm(rad_solar_fortal_ts ~ indice_tempo_fortal3)
```

```
# Visualizar a série temporal
```

```
plot(rad_solar_fortal_ts, main = "", xlab = "", ylab = "Radiação global solar [kJ/m^2]")
abline(h= seq(0,4000, by= 250), col="gray", lty="dotted")
abline(tendencia_fortal3, col="blue", lwd=3, lty = "dotted")
lines(decomp_rad_solar_fortal$trend, col= "orange", lwd=2)
```

```
legend("topright", legend=c(" Série temporal", " Tendência linear", " Tendência suavizada"),
col=c("black", "blue", "orange"),
```

```
lty=c(1, 3, 1), lwd=c(1, 2, 2),
bty="n", # Remove a caixa ao redor da legenda
xpd=TRUE, # Permite desenho fora da região de plotagem
inset=c(-0.10, -0.20), # Ajusta a posição da legenda dentro do gráfico
cex=0.8, # Reduz o tamanho do texto da legenda
x.intersp= -6, # Reduz o espaço horizontal entre os itens
y.intersp=0.5, # Ajusta o espaço vertical entre os itens
horiz= TRUE) # Coloca os itens da legenda em uma linha horizontal
```

```
##### Umidade relativa do ar em Fortaleza #####
```

```
umid_fortal_2013 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2013
umid_fortal_2014 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2014
umid_fortal_2015 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2015
umid_fortal_2016 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2016
umid_fortal_2017 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2017
umid_fortal_2018 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2018
umid_fortal_2019 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2019
umid_fortal_2020 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2020
umid_fortal_2021 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2021
umid_fortal_2022 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2022
umid_fortal_2023 <- dados_meteorologicos_fortal$Umid_2023
```

```
umid_fortal <- c(umid_fortal_2013, umid_fortal_2014, umid_fortal_2015,
                umid_fortal_2016, umid_fortal_2017, umid_fortal_2018, umid_fortal_2019,
                umid_fortal_2020, umid_fortal_2021, umid_fortal_2022, umid_fortal_2023)
```

```
#tratando os valores da velocidade (excluindo os valores corrompidos)
```

```
# Filtrar o vetor para excluir valores 0, -9999 e NA
```

```
umid_fortal_filtrado <- umid_fortal[umid_fortal != 0 & umid_fortal != -9999 &
!is.na(umid_fortal)]
```

```
min(umid_fortal_filtrado)
max(umid_fortal_filtrado)
median(umid_fortal_filtrado)
```

```
#contando os dados do meu vetor
length(umid_sobral_filtrado)
```

```
# Criar a série temporal
```

```
umid_fortal_ts <- ts(umid_fortal_filtrado, start = c(2013, 1), end = c(2023,12) , frequency =
24)
```

```
# Decompondo e plotando a série temporal
```

```
decomp_umid_fortal <- decompose(umid_fortal_ts)
```

```
plot(decomp_umid_fortal$trend)
```

```
# Adicionar a linha de tendência
```

```
indice_tempo_fortal2 <- time(umid_fortal_ts)
```

```
tendencia_fortal2 <- lm(umid_fortal_ts ~ indice_tempo_fortal2)
```

```

# Visualizar a série temporal
plot(umid_fortal_ts, main = "", xlab = "", ylab = "Umididade do ar [%]")
abline(tendencia_fortal2, col= "blue", lwd= 3 , lty="dotted")
abline(h=seq(30,95, by= 5), col="gray", lty="dotted")
lines(decomp_umid_fortal$trend, col="orange", lwd=2 )

# Adicionando a legenda
legend("topright", legend=c(" Série temporal", " Tendência linear", " Tendência suavizada"),
      col=c("black", "blue", "orange"),
      lty=c(1, 3, 1), lwd=c(1, 2, 1),
      bty="n", # Remove a caixa ao redor da legenda
      xpd=TRUE, # Permite desenho fora da região de plotagem
      inset=c(-0.15, -0.15), # Ajusta a posição da legenda dentro do gráfico
      cex=0.8, # Reduz o tamanho do texto da legenda
      x.intersp= 2.5, # Reduz o espaço horizontal entre os itens
      y.intersp= 2.0, # Ajusta o espaço vertical entre os itens
      horiz= TRUE) # Coloca os itens da legenda em uma linha horizontal

```

ANEXO D - EXEMPLO DO CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA A ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS MODELAGEM DE PREDIÇÃO PARA POTENCIALIDADE DE GERAÇÃO EÓLICA E FOTOVOLTAICA NO ESTADO DO CEARÁ.

```
#instalando a biblioteca para a leitura da planilha no excel;
library(readxl)
library(dplyr)
library(ggplot2)

#determinando o caminho para puxar os dados da planilha do excel;
file.choose()
gEolica <- "C:\\Users\\lcsna\\OneDrive\\Área de
Trabalho\\Dados_dissertação\\geracao_eolica.xlsx"
#acessando a planilha do excel;
excel_sheets(gEolica)
#declarando variavel para a leitura da planilha
bancoDados <- read_excel(gEolica, sheet = "geracao_eolica")
gMedia <- bancoDados$MÉDIA

min(gMedia)
max(gMedia)
median(gMedia)

stgMedia <- ts(gMedia, start = c(2013,1), end = c(2023,12), frequency = 12)
plot(stgMedia)

#média móvel
library(forecast)
mediaGeracao <- ma(stgMedia, order = 3, centre = TRUE)
plot(stgMedia, col = "blue", xlab = "tempo (meses)", ylab = "geração de energia [MW]")
lines(mediaGeracao, col = "red")

#decomposição da série
decomposicao <- decompose(stgMedia)
plot(decomposicao, col="blue")

ggseasonplot(stgMedia, start= c(2013), end=c(2023)) +
  labs(y = "Geração energética média [MW]", x = "Meses do ano") +
  ggtitle("Média mensal da geração eólica no Ceará") +
  scale_color_discrete(name = "Ano")
#suavização
mediaSuavizada <- tsclean(stgMedia)
#comparação
plot(stgMedia, lwd=2, col = "blue", xlab = "tempo (meses)", ylab = "geração de energia [MW]")
abline(h= seq(0,1300, by= 100), col="black", lty="dotted")
# Adicionar a linha de tendência
indice_tempo <- time(stgMedia)
```

```

tendencia_linear <- lm(stgMedia ~ indice_tempo)
abline(tendencia_linear, col="orange", lwd =3, lty = "dotted")
#decomposição
decomposicao <- decompose(stgMedia)
plot(decomposicao)
lines(decomposicao$trend, col="red", lwd=2)

legend("topright", legend=c(" Série temporal", " Tendência linear", " Tendência suavizada"),
      col=c("blue", "orange", "red"),
      lty=c(1, 3, 1), lwd=c(1, 2, 1),
      bty="n", # Remove a caixa ao redor da legenda
      xpd=TRUE, # Permite desenho fora da região de plotagem
      inset=c(-0.15, -0.15), # Ajusta a posição da legenda dentro do gráfico
      cex=0.8, # Reduz o tamanho do texto da legenda
      x.intersp= 0.3, # Reduz o espaço horizontal entre os itens
      y.intersp=0.2, # Ajusta o espaço vertical entre os itens
      horiz= TRUE) # Coloca os itens da legenda em uma linha horizontal
modelo_auto <- (auto.arima(stgMedia, trace = T, stepwise = F,
                          approximation = F, max.p = 10, max.q = 10,
                          max.P = 8, max.Q = 8))

summary(modelo_auto)
checkresiduals(modelo_auto)
shapiro.test(resid(modelo_auto))
qqnorm(resid(modelo_auto))
qqline(resid(modelo_auto))
acf(resid(modelo_auto))
pacf(resid(modelo_auto))
plot(stgMedia)
lines(stgMedia-modelo_auto$resid, col = "red")
previsão_auto <- forecast(modelo_auto, h=60)
plot(previsão_auto, ylab = "Geração eólica diária média (MW)", xlab = "anos")
lines(stgMedia-modelo_auto$resid, col = "red")
prev_auto <- as.data.frame(previsão_auto)
View(prev_auto)

```