



Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

SÉRGIO OLIVEIRA PITOMBO

**INFLUÊNCIA DOS FENÔMENOS CLIMÁTICOS
EL NIÑO E LA NIÑA NA GERAÇÃO DE
ENERGIA FOTOVOLTÁICA.**

Salvador
2019

SÉRGIO OLIVEIRA PITOMBO

**INFLUÊNCIA DOS FENÔMENOS CLIMÁTICOS
EL NIÑO E LA NIÑA NA GERAÇÃO DE
ENERGIA FOTOVOLTÁICA.**

Trabalho apresentado ao Centro Univer-
sitário Senai Cimatec, como requisito para
a obtenção do Título de Doutor em Modela-
gem Computacional e Tecnologia Industrial.

Salvador
2019

SÉRGIO OLIVEIRA PITOMBO

**INFLUÊNCIA DOS FENÔMENOS CLIMÁTICOS
EL NIÑO E LA NIÑA NA GERAÇÃO DE
ENERGIA FOTOVOLTÁICA.**

Trabalho apresentado ao Centro Univer-
sitário Senai Cimatec, como requisito para
a obtenção do Título de Doutor em Modela-
gem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador:

Alex Alisson Bandeira Santos

Co-orientador:

Thiago Barros Murari

Salvador
2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

P681i Pitombo, Sérgio Oliveira

Influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na geração de energia fotovoltaica / Sérgio Oliveira Pitombo. – Salvador, 2019.

101 f. : il. color.

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

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Barros Murari.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019.

Inclui referências.

1. Recursos energéticos. 2. Solar fotovoltaica. 3. El Niño. 4. Séries temporais. 5. Cinturão solar. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Santos, Alex Álisson Bandeira dos Santos. III. Murari, Thiago Barros. IV. Título.

CDD: 621.47



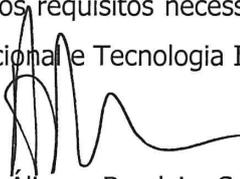
Federação das Indústrias do Estado da Bahia

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada "INFLUÊNCIA DOS FENÔMENOS CLIMÁTICOS EL NIÑO E LA NIÑA NA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA", apresentada no dia 11 de outubro de 2019, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

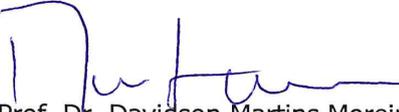
Orientador:


Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos
SENAI CIMATEC

Coorientador:


Prof. Dr. Thiago Barros Murari
FORD

Membro Interno:


Prof. Dr. Davidson Martins Moreira
SENAI CIMATEC

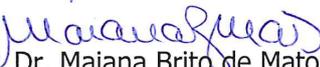
Membro Interno:


Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves
SENAI CIMATEC

Membro Externo:


Prof. Dr. Thadeu Penna
UFF

Membro Externo:


Prof. Dr. Maiana Brito de Matos
UFBA

Dedicatória

À minha família, principalmente a minha esposa Deyse pela compreensão, incentivo e carinho, a minha filha Nathália por suportar a minha ausência em vários momentos da sua vida e a minha querida mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alex Àlisson, pela oportunidade, atenção na orientação do Doutorado.

Ao Prof. Dr. Thiago Murari, pela atenção e pela excelente orientação do Doutorado.

Ao Prof.Dr. Eudemário Santana pelo apoio na primeira parte do doutorado.

Ao amigo Aloisio Nascimento, pela amizade e boa convivência durante todo o Doutorado.

Ao Centro Universitário Senai Cimatec, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado e pela concessão da bolsa de Doutorado.

*“Eu nunca penso no futuro. Ele não
tarda a chegar”*

-- Albert Einstein

RESUMO

O grande desafio que enfrentamos atualmente no setor de energia é atender à crescente demanda por eletricidade com menos impacto no meio ambiente. A América do Sul é um dos principais atores dos recursos energéticos renováveis. O Brasil acelerou o crescimento da capacidade instalada fotovoltaica em 2019. De janeiro de 2018 a janeiro de 2019, a capacidade aumentou 115,2%. Espera-se que atinja o valor de 3,3 GW até o final de 2019. O objetivo deste trabalho é analisar os impactos que os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña podem ocasionar na principal variável meteorológica, a irradiação solar, responsáveis na geração de energia solar fotovoltaica, cujos dados estejam em estações meteorológicas instaladas em cidades brasileiras que compõem o chamado “cinturão solar” e em cidades Chilenas. O método utilizado para verificar o comportamento das séries temporais foi a detrended fluctuation analysis (DFA). Os Dados de irradiação solar foram coletados em trinta e uma cidades distribuídas dentro do cinturão solar brasileiro e do Chile, em regiões com alto potencial de geração solar fotovoltaica. Os resultados mostram o impacto da El Niño Oscilação Sul no comportamento climático dos dados avaliados. É um fator que potencialmente afeta a avaliação de uma nova previsão de eficiência da usina solar, e pode levar à previsão errada da geração do potencial de energia solar a longo prazo para a região.

Palavras-Chave – recursos energéticos, solar fotovoltaica, el niño, séries temporais, cinturão solar.

ABSTRACT

The major challenge we face today in the energy sector is meeting the growing demand for electricity with less impact on the environment. South America is one of the main players in renewable energy resources. Brazil accelerated the growth of installed photovoltaic capacity in 2019. From January 2018 to January 2019, capacity increased by 115,2 %. It is expected to reach 3.3 GW by the end of 2019. The objective of this paper is to analyze the impacts that El Niño and La Niña meteorological phenomena can cause in the main meteorological variable, solar irradiation, responsible for the generation of photovoltaic solar energy, whose data are in meteorological stations installed in Brazilian cities that make up the so-called “solar belt” and in Chilean cities. The method used to verify the behavior of time series was detrended fluctuation analysis (DFA). Solar irradiation data were collected in thirty-one cities distributed within the Brazilian and Chile solar belts, in regions with high potential for photovoltaic solar generation. The results show the impact of El Niño Southern Oscillation on the climatic behavior of the evaluated data. This is a factor that potentially affects the assessment of a new solar plant efficiency forecast, and may lead to the wrong forecast of long-term solar potential generation for the region.

Keywords - energy resources, solar photovoltaic, el niño, time series, solar belt.

LISTA DE FIGURAS

1	Crescimento da capacidade instalada solar fotovoltaica mundial – Ano 2007-2017.	2
2	Geração de energia líquida das usinas de energia para a fonte de energia pública – Ano Base 2018	3
3	Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil – Ano Base 2018	4
4	Participação das fontes na expansão da capacidade instalada no Brasil – Ano Base 2018	5
5	Espectro Eletromagnético com destaque para a parte da luz visível	8
6	A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia	9
7	Efeito da variação da temperatura sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica	11
8	Variação diária da umidade do ar em função da temperatura.	12
9	Comportamento temporal da insolação global.	13
10	Efeito da variação da irradiância sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica.	15
11	Ângulos notáveis em solarimetria	17
12	Representação ilustrativa das componentes associadas a radiação solar incidente sobre um determinado plano.	19
13	Mapa de Radiação Solar Global Horizontal.	19
14	Níveis de radiação solar por região.	20
15	Potencial de geração de energia fotovoltaica no Brasil. O tamanho dos círculos azuis representa o número de habitantes em cada cidade brasileira.	21
16	Comparativo das médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa ($kWh/m^2.dia$). As caixas indicam 50% de probabilidade e as linhas os máximos e mínimos valores encontrados.	22
17	Leilão de ACR	24

18	Certificação da produção anual de energia	25
19	Oceanic Niño Index.	28
20	Condições de El Nino.	30
21	Condições Secas de El Nino.	31
22	Condições de La Niña.	32
23	Condições Úmidas de La Niña (Inverno).	32
24	Condições Úmidas de La Niña (Verão).	33
25	Condições de Neutro.	33
26	Sistema Dinâmico.	37
27	Série não-estacionária quanto ao nível e inclinação.	38
28	Um processo estocástico interpretado como uma família de variáveis aleatórias.	39
29	Processo estocástico interpretado como uma família de trajetórias.	40
30	Processo estocástico e Série temporal.	40
31	A irradiação solar acumulada foi coletadas em 25 cidades dentro do CSB, mais 6 cidades do Chile. Os estados destacados (coloridos) têm a maioria ou todas as suas respectivas áreas com uma eficiência acima de 1500 kWh/kWp por ano, dentro do CSB e do Chile.	52
32	Diagrama de blocos do modelo da metodologia.	55
33	Mapa das Estações Meteorológica de Observação de Superfície Automática - Ano 2017.	56
34	Plataformas de Coleta de Dados.	57
35	Piranômetro Fotodíodo.	58
36	Comparação entre as curvas de resposta do piranômetro de fotodíodo de silício (linha contínua verde) e do piranômetro de termopilha (linha vermelha).	59
37	Piranômetro termopilha	59
38	Variação de irradiação solar chilena para uma janela de escala de tempo superior a treze dias.	64

39	Cidades que apresentaram uma enorme variação do α para irradiação solar em uma janela de escala de tempo maior que treze dias.	66
40	Coxim (MS) é a cidade que apresentou a maior variação do coeficiente α de DFA para a irradiação solar.	66
41	Boxplot de Coxim (MS). A distribuição de La Niña é visualmente diferente, comparada com os períodos de El Niño e Neutro. O número de outliers (+) também aumentou durante o La Niña	67
42	Cidades que apresentaram pequena variação do coeficiente α de DFA de irradiação solar para janela de escala maior que treze dias.	68
43	Corumbá (MS) é a cidade mais estável entre as avaliadas.	69
44	Variação de El Niño para eventos Muito forte, Moderado e Fraco.	71
45	Variação de La Niña para eventos Forte, Moderado e Fraco.	72

LISTA DE TABELAS

1	Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica no Brasil	5
2	Valores de albedo de diferentes superfícies	16
3	Empreendimentos no Brasil.	23
4	Ocorrências de El Niño e La Niña.	29
5	Cidades das estações meteorológicas onde os dados analisados foram coletados. As cidades marcadas de 1 a 25 estão dentro do Brasil e, de 26 a 31, dentro do Chile	53
6	Coeficiente de DFA (α) da irradiação solar em menos de trinta horas . . .	61
7	Coeficiente DFA (α) de irradiação solar entre trinta horas e treze dias . . .	63
8	Coeficiente de DFA (α) de irradiação solar por mais de treze dias	65
9	Coeficiente de DFA (α) da irradiação solar por mais de treze dias, evento moderado	70
10	Coeficiente de DFA (α) da irradiação solar por mais de treze dias, evento fraco	70

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ren21	Renewable Energy Policy Network
PV	Solar Fotovoltaica
GW	Gigawatts
TWh	Terawatts-hora
MW	Megawatts
APE	Geração de Autoprodutores
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
SWERA	Solar and Wind Resource Assessment
DFA	Detrended Fluctuation Analysis
BTU	British Thermal Unit
kj	Kilojoule
(UV)	Radiação Ultravioleta
μm	Micrometros
Km	Quilômetro
W/m^2	Watt por Metro Quadrado
(kWh/m^2)	Quilowatt-hora por Metro Quadrado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IDN	Irradiação Direta Normal
IDH	Irradiação Difusa Horizontal
IGH	Irradiação Global Horizontal
kWp	Quilowatt-hora Pico
PI	Piauí

MG	Minas Gerais
CO ₂	Dióxido de Carbono
SIN	Sistema Interligado Nacional
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
CDS	Certificação de Dados Solarimétricos
CPAE	Certificação de Produção Anual de Energia
CPEC	Cálculo da Produção Anual de Energia Certificada
TMY	Typical Meteorological Year
ENSO	El Niño-Oscilação Sul
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
IOS	Índice de Oscilação Sul
ONI	Oceanic Niño Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ARIMA	Modelos Autorregressivos Integrados e de Médias Móveis
ARMA	modelos de auto-regressivos e médias móveis
ARFIMA	modelos de memória longa
DCCA	Detrended Cross-Correlation Analysis
σ DCCA	Coefficiente Detrended Cross-Correlation Analysis
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Agromet	National Rede Agro-climática
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
m/s	Metro por Segundo
hPa	Hectopascal
PCD	Plataformas de Coleta de Dados
OMM	Organização Meteorológica Mundial

ISO International Organization for Standardization

Matlab Software Matrix Laboratory

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos e Justificativas	6
2	Energia Solar	8
2.1	Variáveis Meteorológicas	10
2.1.1	Temperatura	10
2.1.2	Umidade do ar	11
2.1.3	Insolação	13
2.1.4	Radiação	14
2.2	Irradiação	15
2.2.1	Características da Irradiação Solar	15
2.2.2	Tipos de Radiação Solar	18
2.2.3	Irradiação Solar no Brasil e Chile	19
2.3	Políticas de Empreendimentos Fotovoltaicos no Brasil	23
3	Mudanças Climáticas e Impacto na Produção de Energia	27
3.1	El Niño	29
3.2	La Niña	31
3.3	Neutro	33
3.3.1	Impactos na América do Sul	34
4	Séries Temporais	36
4.1	Séries temporais	36
4.1.1	Modelos Séries temporais	38
4.1.2	Processo Estocástico	38

4.1.3	Processos Estacionários	40
4.1.4	Ruído Branco	41
4.1.5	Modelo	42
4.1.6	Componentes de uma série temporal	43
4.1.7	Modelos não estacionários	44
5	Métodos Estatísticos	45
5.1	Técnicas Estatísticas	45
5.1.1	Análise de Hurst	45
5.1.2	Análise R/S	46
5.1.3	Método DFA	48
6	Metodologias e Métodos	51
6.1	Dados	51
6.1.1	Estações de Coleta de Dados	55
6.1.2	Instrumentos de Medição	57
7	Resultados Obtidos com a Metodologia	60
7.1	El Niño e La Niña Muito Forte	60
7.2	El Niño e La Niña Fracos e Moderados	69
8	Conclusões	73
	Referências	75
	Apêndice A – Algoritmo	83

1 INTRODUÇÃO

O grande desafio enfrentado atualmente no setor energético é atender a crescente demanda de energia elétrica com o mínimo impacto ao meio ambiente. A cada dia há maiores preocupações dos governos, representantes da opinião das populações dos países, com os crescentes níveis de emissão de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas. As fontes renováveis de energia podem desempenhar um papel importante na solução do dilema de aumento da capacidade de produção de energia minimizando a interferência no meio ambiente [1].

Todas as fontes de energia existentes atualmente, renováveis ou não renováveis, impactam direta ou indiretamente no meio ambiente, em maior ou menor proporção. Portanto, o que se busca são as fontes de energia que provoquem o menor impacto ambiental possível e que possam atender as necessidades da população mundial [2].

De acordo com a Ren21 [3] a nova capacidade de energia solar fotovoltaica -PV atingiu níveis recordes. O aumento de energia solar fotovoltaica foi superior a 29 % com relação a 2016, representando 98 GW. Foi adicionada mais capacidade de produção através de energia solar fotovoltaica do que o acréscimo líquido do carvão, gás natural e energia nuclear juntos, conforme figura 1.

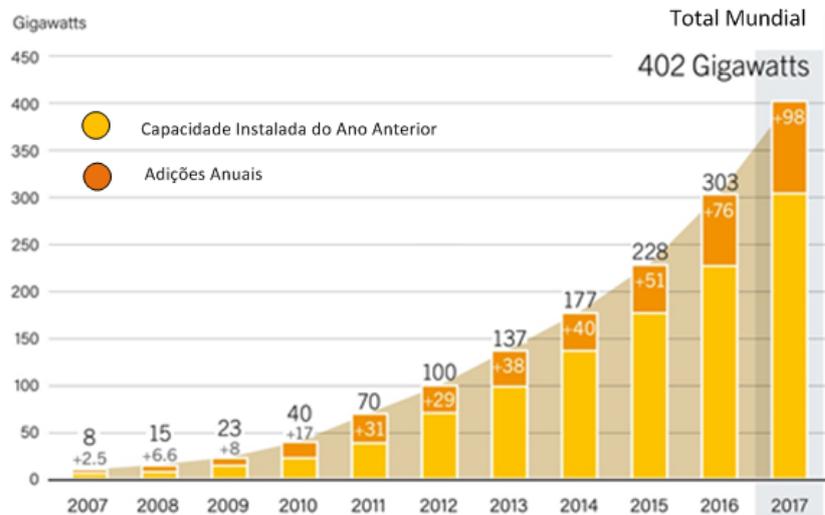


Figura 1: Crescimento da capacidade instalada solar fotovoltaica mundial – Ano 2007-2017.

Fonte: Adaptado de [3].

A energia eólica também contribuiu para o aumento de fontes renováveis com 52 GW adicionados a nível global.

Em países como Alemanha tem-se investido maciçamente em fontes renováveis com enfoque especial na geração distribuída de energia. Na Alemanha qualquer cidadão pode gerar energia elétrica e comercializar com as concessionárias sem muita burocracia [4]. Duas fontes alternativas que tem ganhado destaque na Alemanha são a solar e eólica, com destaque para fontes eólica que em 2018 geraram 111 TWh de energia com uma carga instalada de 45,9 GW ao final de 2018. Cerca de 45,7 TWh de eletricidade a partir de matrizes fotovoltaicas foram alimentadas na rede em 2018, uma carga instalada de 45,5 GW ao final de 2018, um incremento de aproximadamente 3,2 GW em relação ao ano anterior [5], conforme figura 2. Segundo dados do instituto Fraunhofer, de abril a agosto de 2018, a geração de energia mensal dos sistemas fotovoltaicos foi maior do que a das usinas a carvão em toda a Alemanha.



Figura 2: Geração de energia líquida das usinas de energia para a fonte de energia pública – Ano Base 2018

Fonte: [5].

O Brasil tem matriz energética com configuração renovável-térmica, tendo um problema que é a dependência das grandes hidrelétricas para a geração de energia, o que pode ser problemáticos em momentos de forte seca, como nos anos 2001, 2013 e 2015 [6–9]. Por exemplo, o Brasil teve uma seca severa na região amazônica nos anos de 2005 [10], 2010 [11] e 2016 [12]. A mesma condição de seca foi experimentada pela região Nordeste em 2005, 2007, 2010, 2012 e 2016 [12, 13]. É um fator que pode justificar o atual crescimento de usinas não-hidrelétricas no país [14].

A provável ocorrência de secas severas e extremas em curto prazo, em todo o país, é de 1 em 12 e 1 em 66 anos, respectivamente. A médio e longo prazo, a região Norte tem uma probabilidade de 1 em 20 para severa e 1 em 9 anos para secas extremas. As probabilidades da região Sul são de 1 em 10 para severas e 1 em 12 anos para secas extremas nas mesmas escalas de tempo [15]. De acordo com [16], as chuvas na bacia do São Francisco vêm diminuindo desde 1992, abaixo de sua média de longo prazo a cada ano, e a energia eólica e solar precisará ser mais explorada no Nordeste para sustentar o baixo potencial na produção hidroelétrica.

O balanço energético brasileiro, ano base 2018, conforme figura 3 é predominante da fonte hídrica no total da energia elétrica produzida no Brasil, embora tal fonte tenha apresentado uma redução de 2,6% na comparação com o ano anterior. As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável [17].

Em 2017, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 157.112 MW, acréscimo de 6.775 MW. Na

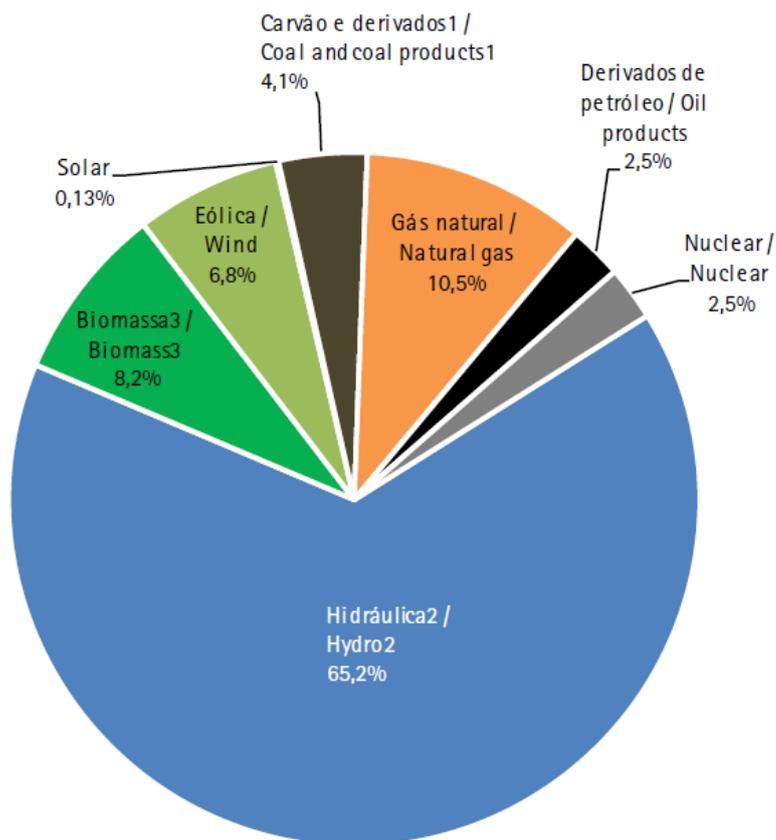


Figura 3: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil – Ano Base 2018
Fonte: [17].

expansão da capacidade instalada, figura 4, as centrais hidráulicas contribuíram com 3.350 MW, equivalente a 49,5% do total adicionado, enquanto as centrais eólicas responderam por 2.159 MW, equivalente a 31,09% da capacidade adicionada. Por fim, um grande destaque para a evolução da potência instalada foi a solar fotovoltaica que atingiu 935 MW em 2017 contra 24 MW em 2016, alcançando 0,6% na participação da expansão da capacidade instalada [17].

A geração elétrica a partir de não renováveis representou 20,8% do total nacional, contra 19,6% em 2016. A geração de autoprodutores - APE em 2017 participou com 16,5% do total produzido, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas, atingindo um montante de 96,8 TWh.

À geração nacional, somadas as importações líquidas de 36,4 TWh, asseguraram uma oferta interna de energia elétrica de 624,3 TWh, montante 0,7% superior a 2016. O consumo final foi de 526,2 TWh, representando uma expansão de 1,2% em comparação com 2016.

As resoluções da ANEEL 482/2012 e 687/2015 contribuíram muito para o aumento

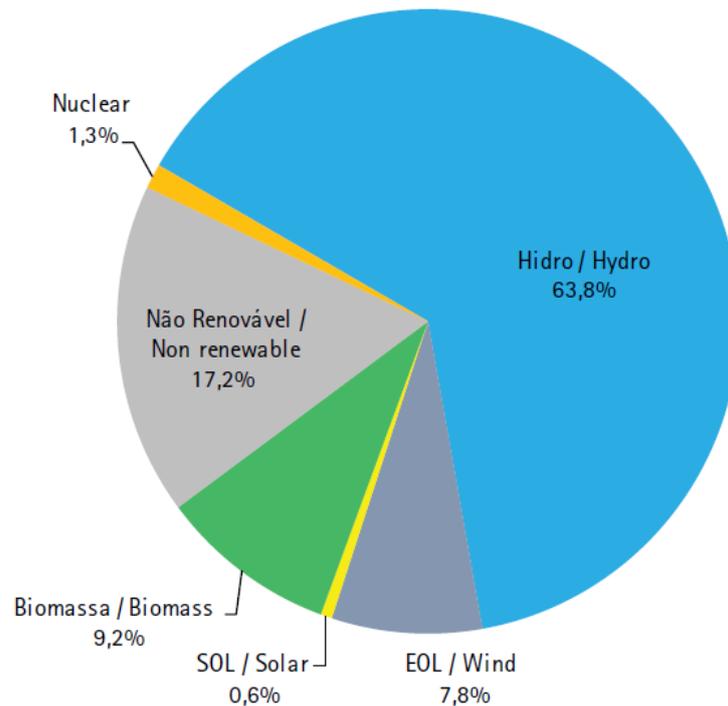


Figura 4: Participação das fontes na expansão da capacidade instalada no Brasil – Ano Base 2018

Fonte: [17]

da energia solar na matriz energética brasileira. De acordo com o boletim mensal de monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro, a fonte solar fotovoltaica no Brasil obteve, em Janeiro de 2019, um crescimento acelerado e já ultrapassa a marca de 2,47 GW de capacidade [14]. O Brasil deve chegar ao final de 2019 com 3,30 GW na matriz elétrica, o que elevaria a capacidade instalada a um salto de 44%, com a contribuição das usinas solares fotovoltaicas dos leilões de energia de reserva de 2014 e 2015. Além disso, o Plano de Expansão de Energia de 10 anos (PDE 2024) estima que a capacidade instalada de geração solar no Brasil chegará a 8300 MW até 2024 [14]. A Tabela 1 mostra a evolução da capacidade de energia solar instalada em Janeiro de 2018 e 2019, representando um aumento de 115,2 %.

Tabela 1: Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica no Brasil

Fonte: [14].

Fonte	Capacidade Instalada em Janeiro 2018 (MW)	Numero de Plantas em Janeiro 2019	Capacidade Instalada em Janeiro 2019 (MW)	Evolução da Capacidade Instalada (Janeiro 2018 - Janeiro 2019)
Solar	1.148	56.769	2470	115,2%

As energias solares e eólicas têm um papel estratégico nos esforços do Brasil para o desenvolvimento sustentável. O Brasil é um dos treze países envolvidos no projeto SWERA (Solar and Wind Resource Assessment), projetado para fornecer uma base de dados confiável de recursos de energia solar e eólica, juntamente com informações socioeconômicas, de infra-estruturas e ambientais, que permita aos governantes, avaliar o potencial de investimentos em novas tecnologias de energias renováveis [18]. A implementação dessas tecnologias facilita o fornecimento de energia em áreas remotas, como na região amazônica, e ajudar a diminuir as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera.

Os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña impactam todo o clima global, os impactos de La Niña tendem a ser opostos aos impactos de El Niño. No Brasil esse impacto do El Niño contribui para o aumento de chuvas nas regiões Sul e em partes do Sudeste e do Centro-Oeste. Enquanto que, o La Niña provoca os efeitos opostos, com a intensificação das chuvas no Nordeste, na Amazônia e em partes do Sudeste [19].

No Chile os impactos do El Niño ocorrem no inverno mais chuvosos na zona centro-sul, além de temperaturas mais quentes. Enquanto no verão, as terras altas do Chile e as regiões mais ao sul tendem a registrar condições mais secas do que o habitual. Enquanto isso, a costa norte do país tende a mostrar um aumento de temperatura [20].

1.1 Objetivos e Justificativas

O principal objetivo deste trabalho é analisar os impactos que os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña podem ocasionar na principal variável meteorológica, a irradiação solar, responsáveis na geração de energia solar fotovoltaica, cujos dados estejam em estações meteorológicas instaladas em cidades brasileiras que compõem o chamado “cinturão solar” e em cidades Chilenas.

Os resultados da aplicação da ferramenta desenvolvida permitirão alcançar os seguintes objetivos:

- Identificar a existência de auto correlações na variável meteorológica, irradiação solar, empregando a metodologia estatística de detrended fluctuation analysis - DFA;
- Identificar um padrão de comportamento, para os fenômenos climáticos, em um determinado local ou região;

- Avaliar o impacto, dos fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña, na irradiação solar da América do Sul.

2 ENERGIA SOLAR

A energia proveniente do sol é a responsável por inúmeros fenômenos naturais que ocorrem neste planeta, entre eles a formação das zonas de altas pressões, responsáveis pelos fluxos de vento. Percebe-se que a energia do sol é a responsável de forma indireta por praticamente toda a energia na terra [21]. A energia do sol que atinge a terra varia de $600\text{BTU}/\text{pé}^2/\text{dia}$ ($6.800\text{kJ}/\text{m}^2/\text{dia}$), no norte da Europa a $2.000\text{BTU}/\text{pé}^2/\text{dia}$ ($23.000\text{kJ}/\text{m}^2/\text{dia}$) nas regiões áridas próximas ao Equador.

Aproximadamente, 9% desta energia é ultravioleta, cerca de 40% se localiza na região visível e por volta de 50% é infravermelho, ou de comprimento de onda longo. Esta radiação ultravioleta (UV), é a radiação eletromagnética, ou de comprimento de onda muito curto. A palavra ultravioleta significa: radiações invisíveis que, no espectro solar, situam-se além do violeta, figura 5.

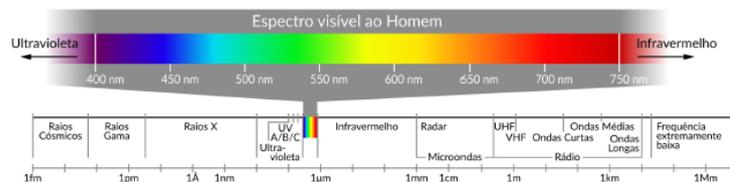


Figura 5: Espectro Eletromagnético com destaque para a parte da luz visível
Fonte: [19].

A radiação visível, figura 5, ocupa apenas estreita faixa do espectro, entre o violeta, com comprimento de onda de $0,39\ \mu\text{m}$, e o vermelho, com $0,77\ \mu\text{m}$, mas é responsável por mais de 46% da energia total radiante recebida. Portanto, a pequena faixa visível do espectro solar é muito importante para a vida. A quantidade de energia solar que chega a Terra é chamada de insolação – forma reduzida de “radiação solar incidente” [22].

O termo radiação solar será utilizado de maneira genérica para referenciar a energia eletromagnética proveniente do Sol, portanto, não sendo feita qualquer distinção em relação à unidade medida ou comprimento de onda.

A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão intrinsecamente relacionadas a conceitos astronômicos. O primeiro dos fatores a serem considerados é a posição relativa entre o Sol e a Terra. A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo a cada 365,25 dias solares. Ao longo desse período, a distância varia entre 1.470.108 km e 1.520.108 Km e, como resultado, o fluxo de radiação solar (irradiância solar) oscila entre $1.325W/m^2$ e $1.412W/m^2$. O valor médio da irradiância solar é igual a $1.366W/m^2$ é definido como a constante solar [23].

A duração do dia está intrinsecamente relacionada com as estações do ano. Por convenção astronômica, as estações são determinadas pelos:

- Solstícios - Momento em que o sol, atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador;
- Equinócios - instante em que o Sol, em sua órbita aparente, cruza o Equador terrestre.

O verão no hemisfério Sul ocorre quando o polo Sul está voltado para o Sol. O inverno ocorre quando o polo Sul está voltado para a direção oposta à do Sol, figura 6 . O termo equinócio é usado para denominar os dois dias do ano (21 de março e 22 de setembro) em que a duração do dia é igual à duração da noite em ambos os hemisférios. Nas datas de equinócios, a radiação solar incide com a mesma intensidade sobre os dois hemisférios sendo que o equinócio de março estabelece o início do outono enquanto o equinócio em setembro corresponde o início da primavera no hemisfério Sul.

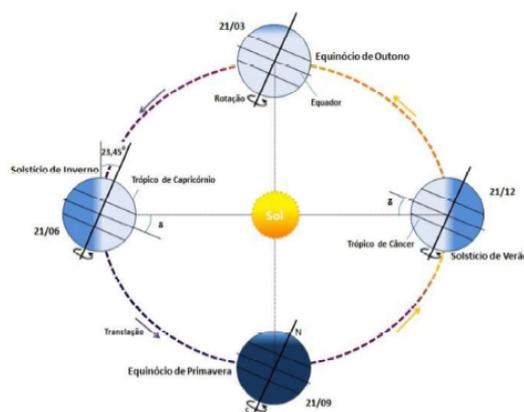


Figura 6: A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia
Fonte: [19].

2.1 Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas estão diretamente associadas ao comportamento do tempo e clima de uma determinada região. Ainda mais, influenciam na dinâmica dos ecossistemas, estando inseridas nos processos biológicos da superfície terrestre. Como a interação na superfície (solo-vegetação-atmosfera) demanda trocas de calor e massa, no entendimento de seu comportamento, faz-se necessário o uso de diversas variáveis meteorológicas, conforme verifica-se a seguir [24].

2.1.1 Temperatura

A temperatura é proporcional à energia cinética média dos átomos daquele corpo. Quanto mais alta a temperatura, mais energéticos são os átomos ou moléculas. A temperatura é de extrema importância na geração de energia elétrica através das fontes renováveis. Ao contrário do que se pode pensar, o aumento da temperatura não é favorável a geração de energia elétrica a partir da energia solar, pois atrapalha as placas fotovoltaicas e os fabricantes quantificam esse efeito através de um parâmetro conhecido como coeficiente de temperatura. Ele indica qual o percentual da potência que se perde para cada grau ($^{\circ}\text{C}$) a mais de temperatura no painel. Em casos extremos, as placas podem chegar a 70°C dependendo da hora e lugar, o que pode ter um impacto instantâneo de quase 30% na geração de energia elétrica [22]. O efeito do aumento da temperatura no desempenho de um painel fotovoltaico geralmente é negligenciado. Módulos fotovoltaicos perdem até 7% de sua potência de saída, quando operando em temperaturas próximas a 40°C [25].

Em [26,27] os autores apresentam o efeito da temperatura sobre a curva característica I-V, a figura 7 mostra as curvas características de uma célula de 1cm^2 , sob intensidade de radiação solar incidente constante, variando-se a temperatura da célula. Pode-se observar uma diminuição na tensão de circuito aberto proporcional ao aumento da temperatura. Essa taxa de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura é chamada β e, para o silício, assume valores tipicamente ao redor de $-2,3\text{mV}^{\circ}\text{C}^{-1}$.

A diminuição da tensão de circuito aberto altera toda a curva, sendo que a célula sofre uma nítida perda de potência com o aumento da temperatura. A corrente de curto circuito apresenta um incremento com o aumento da temperatura, da ordem de $0,0003\text{A}^{\circ}\text{C}^{-1}$ é chamada de α . Esse acréscimo reflete-se também na potência, sendo, porém, insuficiente para compensar a perda de potência causada pela diminuição da tensão. A taxa de

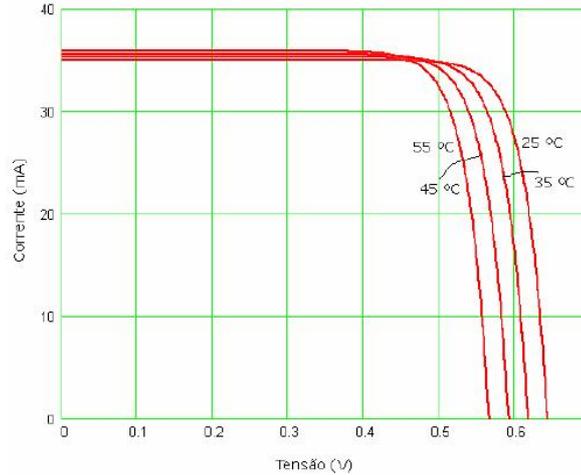


Figura 7: Efeito da variação da temperatura sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica

Fonte: [27].

variação da corrente de curto circuito com a temperatura é denominada α [26].

Com o aperfeiçoamento dos métodos científicos, atualmente é necessário medir a temperatura com muita precisão. As escalas termométricas são utilizadas para medir a temperatura (medida do grau de agitação das moléculas). A definição da escala de temperatura é medida em grau, possuindo várias escalas, sendo as mais conhecidas, o grau Celsius, que aparece nos termômetros comuns, a Fahrenheit, usada nos países de influência britânica, e a escala absoluta Kelvin, mas que começam a ser contados a partir do zero absoluto [28].

O termômetro é o instrumento usado para medir a temperatura dos corpos. A construção de um termômetro está baseada no uso de alguma grandeza física que depende da temperatura, como o volume de um gás mantido a pressão constante, o volume de um corpo e a resistência elétrica de condutores metálicos entre outras grandezas.

2.1.2 Umidade do ar

Se o conteúdo de vapor d'água na atmosfera permanecer constante, um decréscimo na temperatura aumentará a umidade relativa e um aumento na temperatura diminuirá a umidade do ar, conforme mostra a Figura 8.

Normalmente, o valor da umidade relativa do ar é denotado em porcentagem, e suas condições variam até a saturação, ou condições supersaturadas, de acordo com a temperatura. De outra forma, podemos dizer que umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que

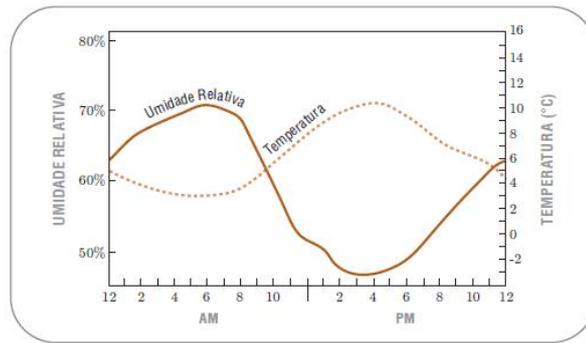


Figura 8: Variação diária da umidade do ar em função da temperatura.

Fonte: [24].

poderia haver na mesma temperatura (ponto de saturação) [28].

A umidade relativa do ar é um dos indicadores usados na meteorologia para realizar previsões do tempo. Essa umidade presente no ar é decorrente de uma das fases do ciclo hidrológico, o processo de evaporação da água [28].

A umidade absoluta é a razão entre a massa de vapor d'água e o volume total de ar que o contém (g/m^3) e muda com a pressão. A densidade do ar seco, ao nível do mar, é aproximadamente $1,276g/m^3$. A umidade absoluta é, em geral, menor que $0,005 g/m^3$; isto é menos que 0,5 % em vapor [19]. A medida da quantidade de umidade existente a cada momento torna-se elemento de grande importância meteorológica. Essa importância torna-se ainda maior devido às características termodinâmicas do vapor de água. As seguintes unidades são empregadas, em geral, para exprimir as diversas quantidades associadas ao vapor de água na superfície [24]:

- Tensão do vapor em hPa;
- Temperatura do ponto de orvalho em graus Celsius (°C);
- Umidade relativa em porcentagem (%).

A Umidade provoca a corrosão nos painéis fotovoltaicos pela entrada de umidade nas camadas do painel onde se encontra a moldura metálica e o vidro. O sódio presente no vidro reage com a umidade e essa reação resulta em corrosão que se dá principalmente nas bordas dos painéis [29].

Quando se trata em quantificar a umidade do ar, diversos instrumentos são utilizados; entretanto, sua mensuração é complexa. Para se ter um valor apreciável, essa observação deve ser medida por meio de instrumentos especiais chamados “higrômetros”.

Os higrômetros variam de construção de acordo com o tipo de observação a que se destinam. No entanto, na prática, as observações mais precisas de umidade do ar são feitas por instrumentos chamados “psicrômetros”.

2.1.3 Insolação

Dá-se o nome de insolação ao número de horas de brilho solar livre de quaisquer nuvens capazes de interrompê-lo. A sua observação sistemática, além de valiosa à agricultura, contribui poderosamente para a determinação dos climas. A Figura 9 exemplifica o comportamento minuto a minuto da insolação em condições de céu claro e em céu parcialmente nublado [30]. A saída de energia solar fotovoltaica é proporcional à insolação, o

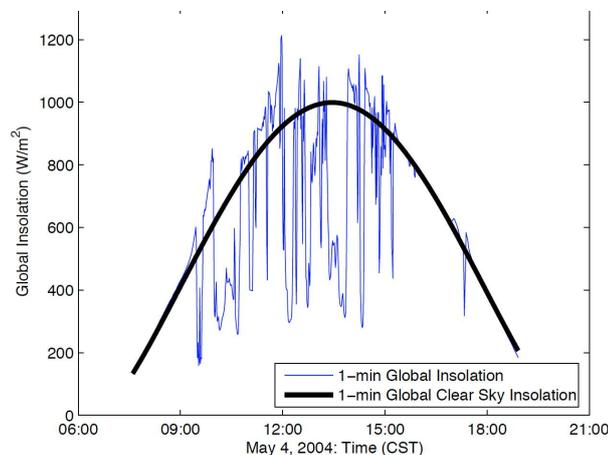


Figura 9: Comportamento temporal da insolação global.
Fonte: [30]

índice de céu claro pode ser usado para quantificar a variabilidade da geração fotovoltaica. Deve-se ter um cuidado significativo no processo para reconhecer que o índice de céu claro é uma propriedade de uma localização geográfica específica em um momento específico [30].

O Brasil é um dos poucos países no mundo, que recebe uma insolação superior a 3000 horas por ano. E na região Nordeste conta com uma incidência média diária entre 4,5 a 6 kWh. Por si só estes números colocam o país em destaque no que se refere ao potencial solar [31].

Instrumento

O instrumento adotado pelo INMET destinado a medir a insolação é o heliógrafo do tipo Stokes-Campbell. O aparelho compõe-se de uma perfeita esfera de vidro, suspensa em um sólido suporte semicircular, tendo por baixo uma armação metálica em forma de

concha, em cuja face interna existem vãos formados por seis ranhuras independentes e concêntricas com a esfera. Os raios solares focalizados convergem, através do vidro, sobre uma tira de cartolina (heliograma), conforme a época do ano, de modo que os raios do Sol vão queimando progressivamente a cartolina, desde que não haja nuvens capazes de interceptar os raios solares [24].

2.1.4 Radiação

O Sol envia para o espaço uma grande quantidade de energia, que se propaga em todas as direções, denominada energia radiante ou radiação. Daí a designação de radiação solar à energia proveniente do Sol, cuja energia é recebida pela Terra na forma de ondas eletromagnéticas. Esse tipo de radiação é a fonte primária de energia que o globo terrestre dispõe, e a sua distribuição variável no tempo e no espaço é a geratriz de todos os processos atmosféricos. Esta radiação disponível à superfície terrestre divide-se em três componentes:

- Direta: Vem "diretamente" desde o disco solar;
- Difusa: Proveniente de todo o céu, exceto do disco solar, das nuvens, gotas de água, etc;
- Refletida: Proveniente da reflexão no chão e dos objetos circundantes.

A soma das três componentes é denominada como radiação global.

No Instituto Nacional de Meteorologia/INMET, algumas estações Climatológicas Principais (CP) medem a radiação solar direta e difusa a fim de dar subsídios ao estudo das transformações de energia, distribuição de radiação na superfície do globo. A radiação solar e a temperatura são os dois principais fatores que influenciam a produção de energia pelos módulos fotovoltaicos. A corrente gerada pelo módulo varia linearmente com a irradiância, enquanto que a tensão varia logaritmicamente. Com o aumento da radiação, aumenta a temperatura da célula e, conseqüentemente, ela tende a reduzir a eficiência do módulo. Isso ocorre porque a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível, usualmente, desconsiderada nas aplicações práticas [32].

Em [26] o autor mostra as curvas que representam a influência da irradiação solar na corrente de curto circuito de um modulo fotovoltaico, conforme mostrado na figura 10. As curvas características foram obtidas de uma célula de $1cm^2$ mantida em temperatura

constante e sob diferentes condições de iluminação. Pode-se observar um incremento na corrente de curto circuito proporcional à intensidade de radiação solar incidente, enquanto a tensão de circuito aberto aumenta logarithmicamente, exceto para valores de irradiância muito baixos.

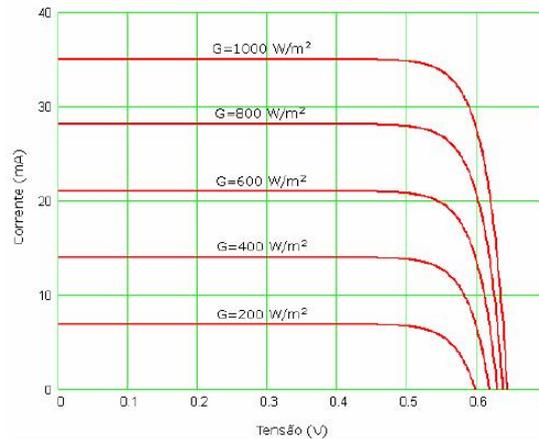


Figura 10: Efeito da variação da irradiância sobre o comportamento de uma célula Fotovoltaica.

Fonte: [26]

Instrumentos radiativos

Há uma gama de instrumentos desenvolvidos para a medição da radiação solar. Esses instrumentos têm denominações especiais, de acordo com sua finalidade. No INMET adota-se o piranógrafo ou actinógrafo e o piranômetro.

Unidade de medida

A radiação solar é medida em calorías por centímetro quadrado de superfície por minuto, representada por ($cal.cm^{-2}.min^{-1}$) ou em ($watt.m^{-2}$) de superfície. Uma caloría é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um grama de água pura de 14,5° a 15,5°. A equivalência entre as duas unidades é: $1 cal.cm^{-2}.min^{-1} = 797,3 Wm^{-2}$ [24].

2.2 Irradiação

2.2.1 Características da Irradiação Solar

Conforme a [33], irradiância é a potência que incide em uma superfície por unidade de área, normalmente medida em watt por metro quadrado (W/m^2). Em certos casos, esta pode ser referente somente a um determinado comprimento de onda ou a uma faixa destes,

sendo o valor integralizado da irradiância observada definida como irradiância total. A irradiância é expressa pela letra "G".

O termo irradiação solar é empregado para determinar a irradiância total que incide em determinada superfície em certo intervalo de tempo, sendo dada em quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m^2) ou joules por metro quadrado. Quando a irradiação for integrada no tempo de uma hora é expressa pela letra "I", e pela letra "H", quando esta for integrado no tempo de um dia.

Aproximadamente 19% da radiação recebida pela atmosfera da terra é absorvida pelas nuvens e por outros gases, e 31% são refletidos de volta para o espaço pelas nuvens e pela atmosfera. Os 50% restantes da energia solar incidente chegam à superfície da Terra e são quase completamente absorvidos, sendo que 3% são refletidos. A fração de luz refletida pelo planeta e por sua atmosfera é chamada de albedo [22].

Conforme a ABNT NBR 10899, o albedo é um índice relativo à fração da irradiância solar, recebida em uma unidade de área, devido à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo [33].

A tabela 2 mostram os valores de albedo para diferentes superfícies obtidos através do software PVsyst.

Tabela 2: Valores de albedo de diferentes superfícies

Material/Paisagem	Albedo
Aço galvanizado muito sujo	0,08
Aço galvanizado novo	0,35
Alumínio	0,85
Asfalto	0,15
Asfalto molhado	0,18
Asfalto seco	0,55 - 0,75
Concreto	0,25 - 0,35
Deserto	0,30
Floresta	0,05 - 0,18
Gramado	0,18 - 0,23
Lavoura	0,26
Nuvens	0,60 - 0,90
Savana	0,20 - 0,25
Situação Urbana	0,14 - 0,22
Telhas vermelhas	0,33

A quantidade de insolação que atinge o topo da atmosfera é de aproximadamente $1.360W/m^2$, também chamada de constante solar. A insolação em um determinado local

da superfície terrestre pode variar de 0 a $1,50W/m^2$, depende da latitude, do horário do dia, da estação do ano e do grau de nuvens presentes. A latitude e a estação do ano são resultantes da geometria da órbita da terra ao redor do sol, que é quase circular, mas o eixo em torno do qual a Terra gira ao redor de si mesma é inclinada 23.5° em relação a esse plano de movimento. Assim sendo, o polo norte está inclinado em direção ao sol durante o verão do hemisfério norte e na direção oposta durante o inverno. No verão o hemisfério norte fica exposto a um maior numero de horas de Sol, a quantidade de radiação solar que atinge uma superfície horizontal é maior. No inverno, a insolação é dispersa sobre uma área horizontal maior por causa do ângulo de inclinação, assim menos radiação atinge a Terra por causa da absorção e da dispersão pela atmosfera.

A figura 11 mostra os ângulos importantes para a solarimetria. A compreensão geométrica e espacial destas variáveis permite descrever a posição do Sol em relação à um ponto na superfície terrestre e descrever numericamente a variabilidade diária e sazonal do Sol.

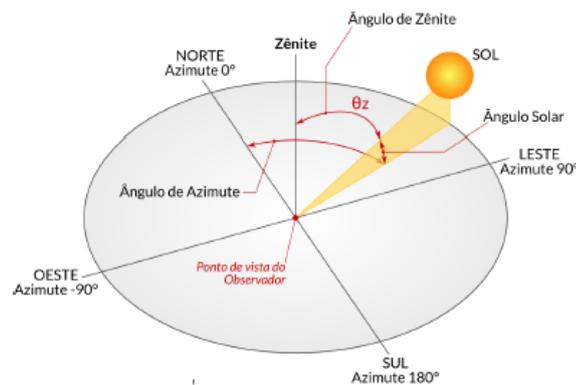


Figura 11: Ângulos notáveis em solarimetria .
Fonte: [23].

A elevação do sol ou o ângulo dele acima do horizonte é denominado altitude. A altitude do sol é uma função da latitude na qual você se encontra; quanto mais para o Norte, mais baixo o Sol estará.

O ângulo horário solar corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre -180° e $+180^\circ$. Por convenção, durante a manhã é positivo, a tarde é negativo e, ao meio dia assume o valor zero. O azimute solar ou ângulo azimutal é o ângulo entre o Sol e o norte e, por definição, varia entre -180° e $+180^\circ$, sendo os valores negativos correspondentes ao leste.

2.2.2 Tipos de Radiação Solar

A radiação ao passar pela atmosfera é espalhada em várias direções na superfície terrestre e divide-se em direta e difusa, como mostrado na Figura 12.

A radiação solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera. Os tipos de radiação são [23]:

- Radiação Direta Normal - IDN: É a parte da radiação que alcança a superfície terrestre sem sofrer interferências e que incide perpendicularmente à superfície;
- Radiação Difusa Horizontal- IDH : A parte da radiação que sofre interferências pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc.);
- Radiação Direta Horizontal : É a taxa de energia por unidade de área do feixe solar direto numa superfície horizontal. Pode ser determinada como o produto entre a radiação direta normal (IDN) e o cosseno do ângulo zenital solar;
- Radiação no Plano Inclinado: É a taxa de energia total por unidade de área incidente sobre um plano inclinado na latitude do local em relação à superfície da Terra;
- Radiação Refletida: Proveniente da reflexão no chão e dos objetos circundantes;
- Radiação global horizontal - IGH é definida como a soma do fluxo de duas radiações.

A relação entre essas radiações pode ser definida como:

$$IGH = IDN \times \cos z + IDH$$

Sendo: $\cos z$ = Cosseno do ângulo zenital.

O ângulo zenital é formado entre a normal da superfície terrestre e a posição do sol no céu em um determinado instante de um determinado dia.

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre, é de maior importância para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo

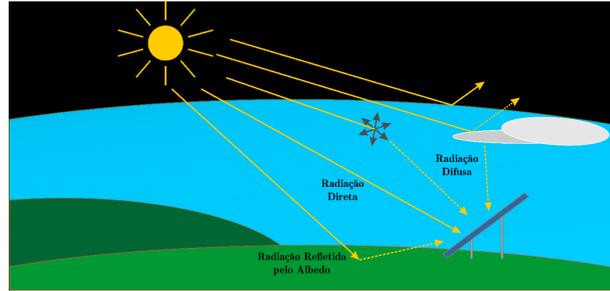


Figura 12: Representação ilustrativa das componentes associadas a radiação solar incidente sobre um determinado plano.

Fonte: [14].

aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações [34].

A figura 13 mostra o mapa mundial de recursos solares e fornece um resumo da energia solar estimada disponível para geração de energia e outras aplicações de energia. Representa a média a longo prazo do total diário da irradiação horizontal global (IGH).

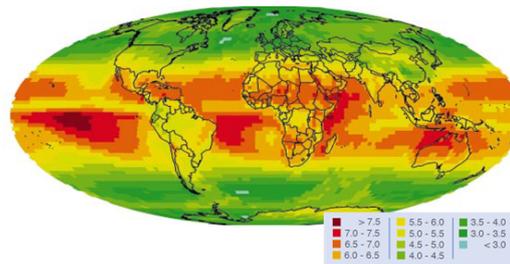


Figura 13: Mapa de Radiação Solar Global Horizontal.

Fonte: [35].

2.2.3 Irradiação Solar no Brasil e Chile

O valor médio anual do total diário de irradiação solar para as cinco regiões brasileiras são mostrados na figura 14.

A região Nordeste apresenta o maior potencial solar, com valor médio do total diário da irradiação global horizontal de $5,49 \text{ kWh/m}^2$. Os altos índices de irradiação solar, no Nordeste, são explicados pela baixa nebulosidade, principalmente no Sertão. A figura 15 mostra o mapa do alto potencial do Brasil para a geração de energia fotovoltaica, com destaque para o "Cinturão Solar", região que vai do Nordeste ao Pantanal, passa pelo norte



Figura 14: Níveis de radiação solar por região.

Fonte: [23].

de Minas Gerais e pega o sul da Bahia e o nordeste de São Paulo. Apresenta o rendimento anual máximo de energia (medido em kWh de energia anual gerada por kWp de energia fotovoltaica instalada) para todo o território brasileiro.

Os máximos de irradiação solar anual estão situados no setor Norte e Nordeste, exceto na região costeira, na Chapada Diamantina na Bahia e na sub-região da Zona da mata, onde está inserido o estado do Maranhão. Os maiores índices de irradiação solar observam-se no Sertão, onde são observados os menores totais pluviométricos no Nordeste [36].

As regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam totais diários próximos para a irradiação global horizontal em torno de $5,07 kWh/m^2$. A irradiação global média no plano inclinado na região Sudeste apresentou total diário de $5,26 kWh/m^2$, enquanto na região Centro-Oeste apresentou $5,20 kWh/m^2$. Os valores relativamente mais baixos da irradiação solar na região Norte se justificam pelas características climáticas desta região, onde a nebulosidade frequente reduz a irradiância solar que incide na superfície. Com isso a irradiação global média nos planos horizontal e inclinado apresenta valores próximos aos obtidos para a região Sul e a irradiação direta normal fica inferior à de todas as outras regiões do país [23].

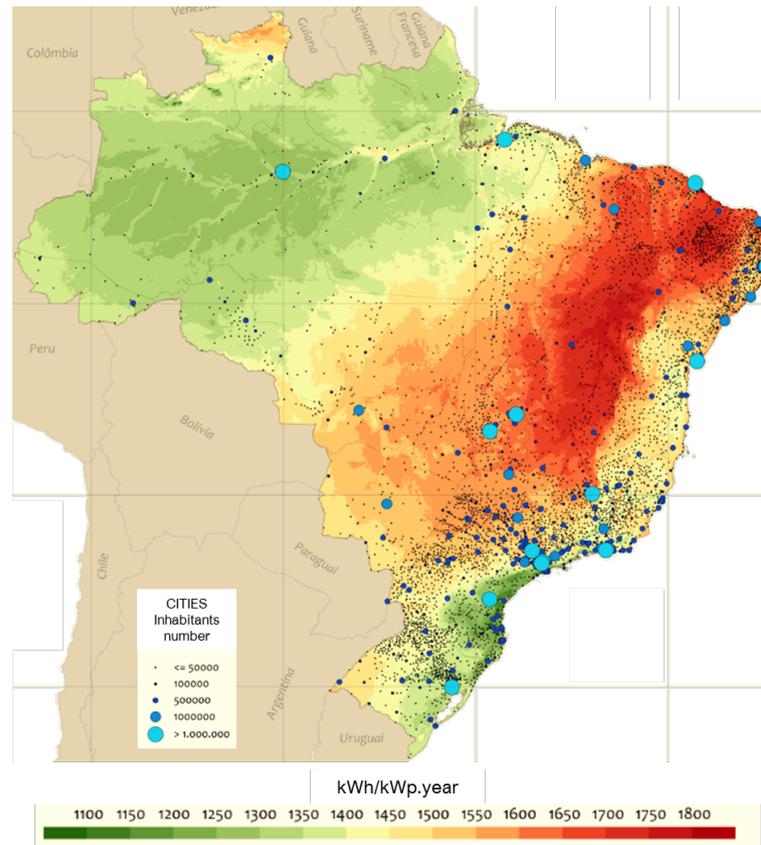


Figura 15: Potencial de geração de energia fotovoltaica no Brasil. O tamanho dos círculos azuis representa o número de habitantes em cada cidade brasileira.

Adaptado de [19].

Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo o país. O valor máximo de irradiação global, $6,5 \text{ kWh}/\text{m}^2$, ocorre no Norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. A menor irradiação solar global, $4,25 \text{ kWh}/\text{m}^2$, ocorre no litoral norte de Santa Catarina [36].

Em [23] destacou o alto nível e a baixa variabilidade da radiação solar do Brasil em comparação, com o que se observa em países onde essa tecnologia já está bem estabelecida, como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França. A figura 16 compara a variabilidade da irradiação global horizontal média mensal nas cinco regiões brasileiras com esses países. A comparação é feita na forma de box-plot, as linhas verticais os valores máximos e mínimos e os losangos vermelhos as médias. Percebe-se que o Brasil apresenta níveis bastante elevados de irradiação solar com uma variabilidade mensal muito mais baixa, indicada pela altura das caixas. O Sul do Brasil apresenta características similares às encontradas nos países europeus, em especial no que se refere a variabilidade mensal, já que se encontra em latitudes mais altas e, portanto, com maiores diferenças na duração do

dia entre as estações do ano. O Nordeste do Brasil supera os países ibéricos em termos de irradiação solar média mensal, com a característica de possuir uma variabilidade mensal bastante inferior.

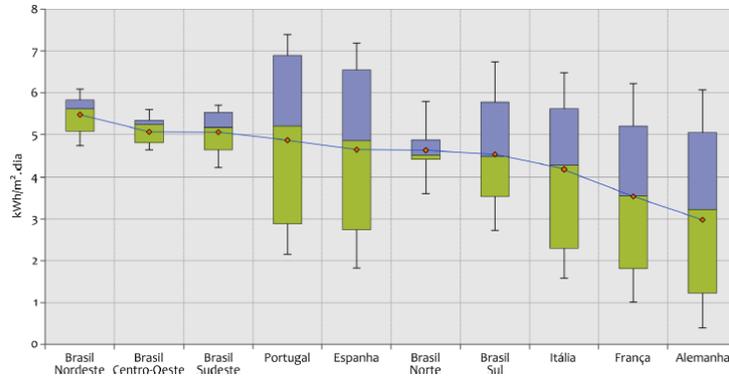


Figura 16: Comparativo das médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa ($kWh/m^2.dia$). As caixas indicam 50% de probabilidade e as linhas os máximos e mínimos valores encontrados.

Fonte: [23].

O norte do Chile (deserto de Atacama) possui uma irradiação global de $3,30 kWh/m^2$ em superfícies de inclinação de latitude [37]. Em 2014, foi iniciado um grande projeto de usina solar na região do Atacama, e será o maior projeto solar da América Latina, a ser utilizado principalmente por empresas de mineração com operações na região [38]. O país pode atingir a meta de 20 % de sua capacidade a partir de fontes renováveis, antes do prazo de 2025 [39], mesmo na ausência de subsídios do governo [38]. Além disso, o Chile foi o primeiro país da América Latina a criar um imposto sobre o carbono. O Congresso aprovou o chamado imposto verde em setembro de 2014 [38].

Em relação aos investimentos em energia renovável, Brasil e Chile se destacam no continente da América do Sul. Ambos são o primeiro e o segundo países de destino para investimento estrangeiro, no financiamento de ativos de energia limpa, na região, atraindo o maior investimento de financiadores estrangeiros de 2010 a 2016. O Brasil recebeu US 12,78 bilhões e o Chile, US 6,92 bilhões. Para referência, no mesmo período, a América Latina recebeu um total de US 36,1 bilhões em investimentos em energia limpa de financiadores estrangeiros [40].

A tabela 3 mostra os empreendimentos de energia fotovoltaica no Brasil e a situação atual. Conforme dados [41], o Brasil possui atualmente 2228 empreendimentos em operação, perfazendo uma potência instalada de 1.3 GW de energia solar. Existem

ainda 53 empreendimentos de fonte fotovoltaica que a construção ainda não foi iniciada o que deve acrescentar ao sistema mais 1,31 GW de energia elétrica. Com a conclusão dos 17 empreendimentos em construção, o que se dará no período de médio prazo, entrarão em operação mais 487 MW de potencia instalada ao Sistema Interligado Nacional.

Tabela 3: Empreendimentos no Brasil.
Fonte: [21].

Quantidade	Situação	Potência Associada (KW)
53	Construção não iniciada	1.312.291
17	Construção	487.220
2228	Operação	1.306.502

Existem atualmente três grandes empreendimentos de energia fotovoltaica no Brasil, o Parque Solar Nova Olinda - PI, o Solar Pirapora - MG e Solar Ituverava, na Bahia, com capacidade para 196 MW.

O parque solar Nova Olinda - PI, a 380 quilômetros de Teresina, inaugurado em novembro de 2017, possui 930 mil placas de captação de energia fotovoltaica, evitando a emissão de aproximadamente 350 mil toneladas de CO_2 na atmosfera e tem potencia instalada de 210 MW, o empreendimento é capaz de suprir 300 mil domicílios. O parque é administrado pela empresa italiana Enel, que conseguiu autorização para a construção e operação do parque por meio de leilão realizado em 2015.

Ao custo aproximado de R\$ 2 bilhões, a usina solar de Pirapora, localizada no estado de Minas Gerais (MG) será o maior projeto fotovoltaico de geração centralizada da América Latina, quando estiver em operação plena, o complexo terá uma capacidade de 400 MW e mais de um milhão de painéis solares. Seus módulos estão fixados a 1,2 m do solo em trackers de eixo horizontal, que acompanham a posição do sol durante o decorrer do dia. A usina estará concluída ao final do primeiro semestre de 2020. Atualmente a usina está com 321 MW de potencia [41].

2.3 Políticas de Empreendimentos Fotovoltaicos no Brasil

No Brasil para participar dos leilões de compra de energia elétrica, para o Sistema Interligado Nacional – SIN, onde serão celebrados contratos de comercialização no Ambiente

de Contratação Regulada – ACR, é estabelecida a forma de apresentação da documentação de empreendimentos fotovoltaicos com vistas ao processo de Cadastramento e Habilitação Técnica dos empreendimentos na Empresa de Pesquisa Energética – EPE .

Dentre outros documentos, deverá ser apresentada no ato do cadastramento a Certificação de Dados Solarimétricos - CDS e a Certificação de Produção Anual de Energia - CPAE, conforme descrito na figura 17.

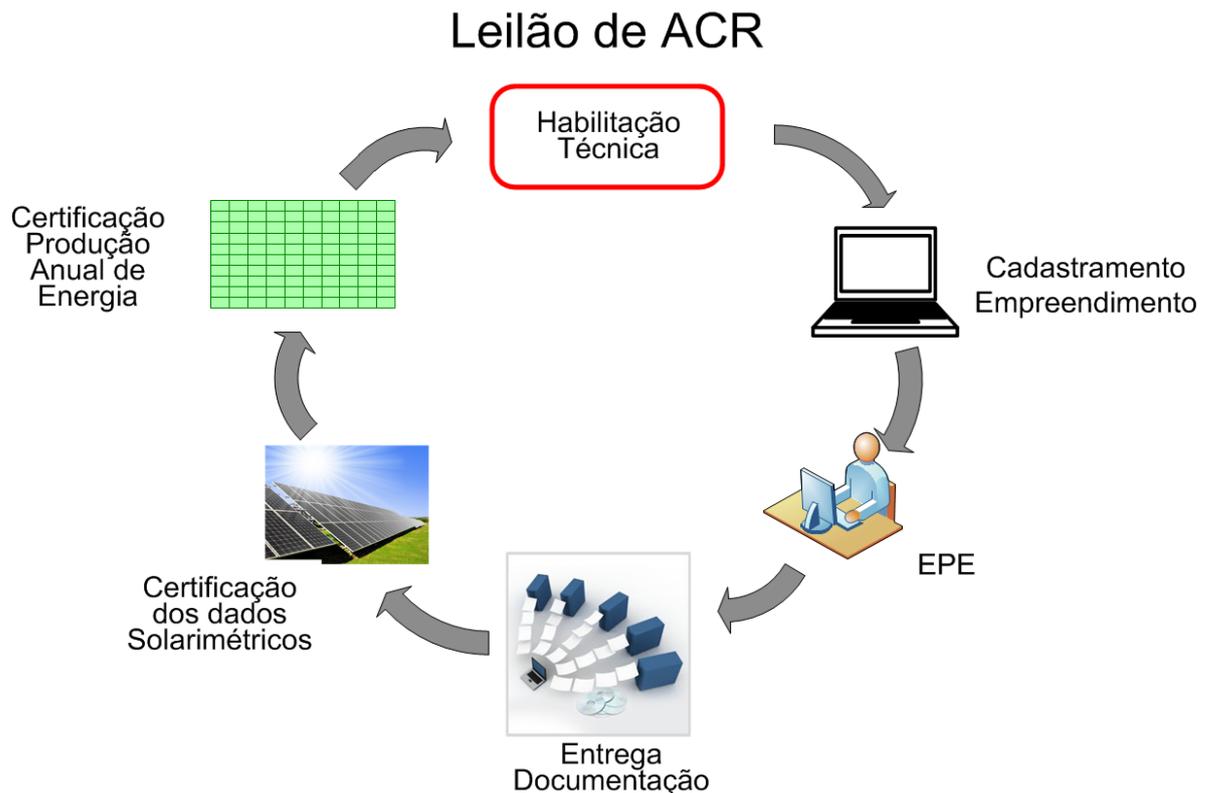


Figura 17: Leilão de ACR

A descrição da correlação dos dados medidos com dados de longo prazo (pelo menos 10 anos) é exigida para aumentar a confiabilidade dos dados solarimétricos utilizados no Cálculo da Produção Anual de Energia Certificada - CPEC, e que o uso das medições implique na redução das incertezas globais do projeto.

São comparados os dados medidos com os dados correspondentes ao mesmo período obtidos a partir de modelos e dados de satélites, na base de tempo mais discretizada disponível, e avaliada a necessidade de um ajuste nos dados de longo prazo utilizados para a obtenção do TMY (Typical Meteorological Year), este utilizado no cálculo da produção anual de energia certificada, conforme mostrado na figura 18.

Os dados solarimétricos medidos no local do empreendimento devem atender aos se-

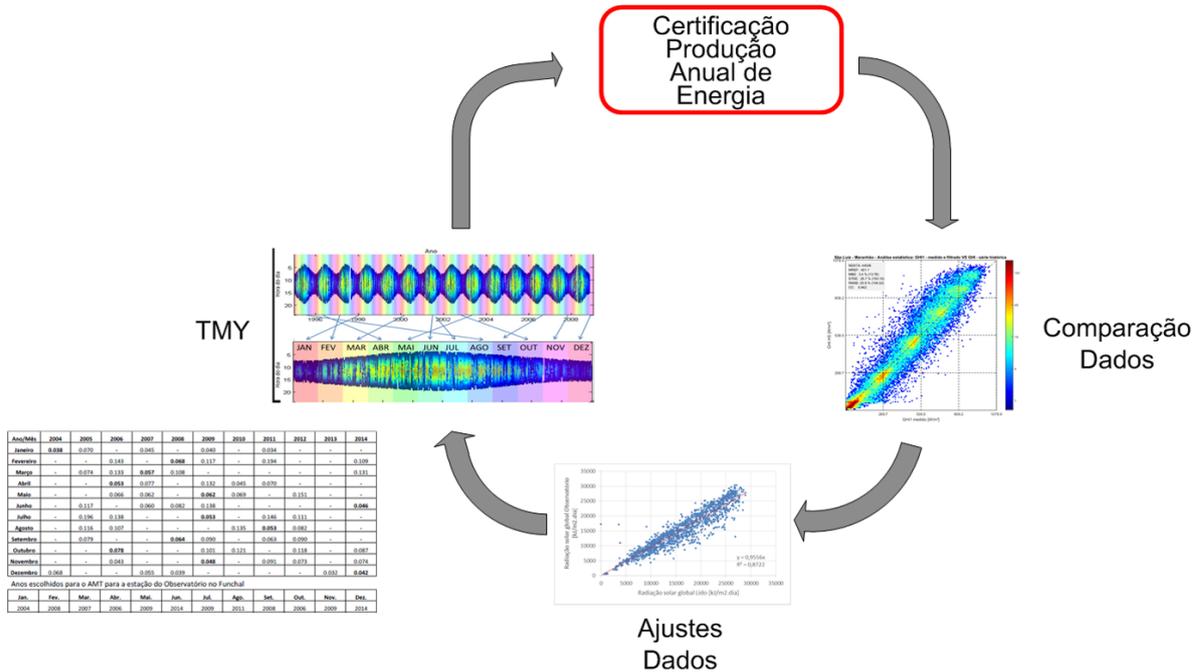


Figura 18: Certificação da produção anual de energia

guintes itens [17]:

- a) As medições deverão ser realizadas em pelo menos uma estação solarimétrica, dentro de um raio de até 10 km do local do empreendimento;
- b) Deverão ser medidas as seguintes grandezas: Irradiação Global Horizontal, dados de temperatura, da umidade relativa do ar e velocidade do vento;
- c) A frequência de medição deverá ser a cada segundo e os dados integralizados a cada dez minutos;
- d) A campanha de medições deverá ter período não inferior a 12 (doze) meses consecutivos;
- e) O índice de perda de dados deverá ser inferior a 10% e o período contínuo de ausência de medições não poderá superar 15 (quinze) dias;
- f) No caso de perdas de dados, deve-se informar a taxa de perda e a origem da recuperação dos dados por meio de correlação com outras fontes representativas da região.

Conforme o item “b”, as variáveis meteorológicas irradiação global horizontal, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento devem ser medidas. Neste capítulo, descreve-se as regras para participar dos leilões de compra de energia elétrica, e a importância da correlação dos dados medidos com dados de longo prazo, aumentando a con-

fiabilidade dos dados solarimétricos utilizados no cálculo da produção de energia elétrica. As variáveis meteorológicas medidas nas estações solarimétricas foram apresentadas anteriormente.

3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTO NA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Os processos de troca de energia e umidade, entre componentes do sistema climático da terra, determinam o comportamento do clima, e alterações destes processos podem afetar o clima regional e global. Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña são chamados ENSO (El Niño-Oscilação Sul) e são fases opostas de um padrão de clima natural em todo o Oceano Pacífico tropical que oscila a cada 3 a 7 anos em média [42, 43]. O ciclo ENSO é um termo científico que descreve as flutuações de temperatura entre o oceano e a atmosfera no leste central do Pacífico Equatorial. Esses eventos levam a diferenças significativas em relação à temperatura média dos oceanos, ventos, pressão superficial e precipitação em partes do Oceano Pacífico Tropical [42].

A fase quente (El Niño) e fase fria (La Niña) levam a diferenças significativas em relação à temperatura média dos oceanos, ventos, pressão superficial e precipitação em partes do Pacífico tropical. A fase Neutra indica que as condições estão próximas de sua média de longo prazo [42].

O fenômeno ENOS é caracterizado por anomalias de temperatura da superfície do mar TSM no Pacífico equatorial, e sua caracterização é feita através dos seguintes índices:

- Índice de Oscilação Sul - IOS – Diferença de pressão entre duas regiões distintas;
- Índices Niño - ONI - (Oceanic Niño Index).

Os índices Niño são definidos como Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4, que são as anomalias de TSM médias em diferentes regiões do Pacífico equatorial.

O índice ONI, tornou-se o padrão que a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) utiliza para identificar os eventos El Niño e La Niña no Pacífico tropical. O ONI é uma medida do ENOS, e outros índices podem ser utilizados para confirmar os fenômenos nos períodos.

Os eventos são definidos como 5 estações consecutivas sobrepostas de três meses acima

da anomalia de + 0,5 para eventos quentes (El Niño) e ou abaixo da anomalia de -0,5 para eventos frios (La Niña).

O limiar é subdividido em eventos Fraco (com uma anomalia de 0,5 a 0,9), Moderado (1,0 a 1,4), Forte (1,5 a 1,9) e Muito Forte (2,0). A figura 19 mostra os valores de ONI (Oceanic Niño Index) de 1950 a 2018. Nesta tabela para um evento ser classificado como fraco, moderado, forte ou muito forte, ele deve ter igualado ou ultrapassado o limite por pelo menos três períodos consecutivos sobrepostos de três meses. Os períodos de calor (vermelho) e frio (azul), com base em um limiar de +/- 0,5C para o ONI.

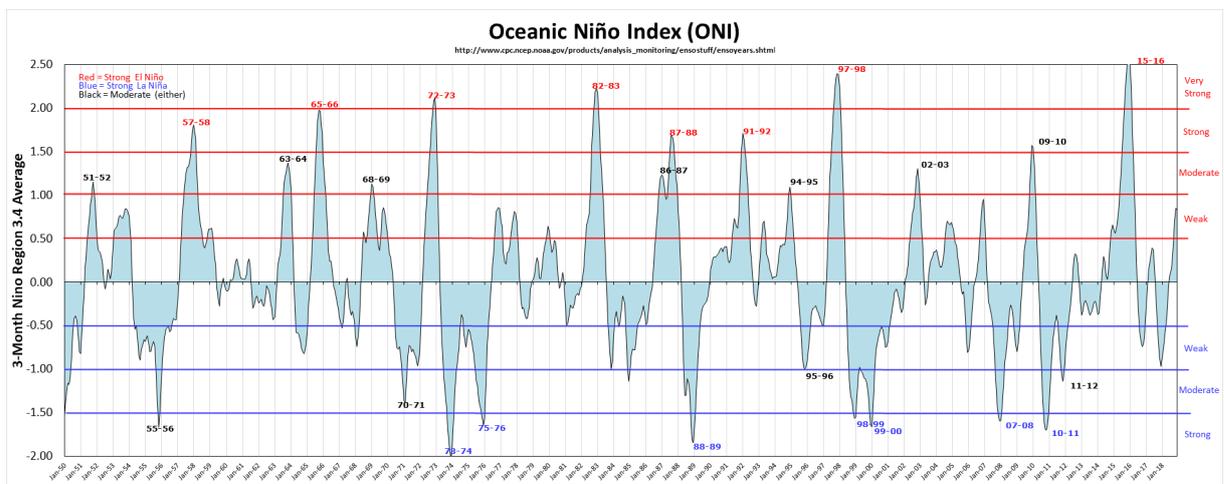


Figura 19: Oceanic Niño Index.

Fonte: [42].

Enquanto o El Niño consiste no aquecimento anormal do Oceano Pacífico Equatorial, a La Niña é o inverso, provocando o resfriamento do Pacífico Equatorial [44].

A Tabela 4 mostra as ocorrências de El Niño e La Niña no mundo e suas intensidades baseadas nos valores do Índice Oceânico de 1950 a 2018. Os eventos foram classificados como fracos, moderado, forte ou muito forte

Tabela 4: Ocorrências de El Niño e La Niña.

Fonte: [42].

El Niño				La Niña		
Fraco	Moderado	Forte	Muito Forte	Fraco	Moderado	Forte
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		

3.1 El Niño

A palavra El Niño é derivada do espanhol, e refere-se a presença de águas quentes que todos os anos aparecem na costa norte de Peru na época de Natal. Os pescadores do Peru e Equador chamaram a esta presença de águas mais quentes de Corriente de El Niño em referência ao Niño Jesus ou Menino Jesus [42, 43]. O enfraquecimento dos ventos alísios, aqueles que sopram de leste para oeste, na região equatorial, provoca não somente a presença das águas quentes da Corrente El Niño, mas também as mudanças na atmosfera próxima à superfície do oceano [45]. Com esse aquecimento do oceano e com o enfraquecimento dos ventos, começam a ser observadas mudanças da circulação da atmosfera nos níveis baixos e altos, determinando mudanças nos padrões de transporte de umidade, portanto variações na distribuição das chuvas em regiões tropicais e de latitudes médias e altas. Observa-se em algumas regiões do globo aumento ou queda de temperatura [44, 46].

Próximo à superfície (baixos níveis da atmosfera), os ventos são de oeste para leste, em altos níveis os ventos são de leste para oeste. Assim sendo, o ar que sobe no Pacífico Equatorial Central e Oeste, desce no Pacífico Leste, juntamente com os ventos alísios em baixos níveis da atmosfera e os ventos de oeste para leste em altos níveis da atmosfera, forma a chamada célula de circulação de Walker [47, 48]. Durante o El Niño, os ventos de superfície em todo o Pacífico tropical são mais fracos do que o normal. As temperaturas

oceânicas no Oceano Pacífico central e oriental são mais quentes do que a média, e as chuvas estão abaixo da média na Indonésia e acima da média na região central ou oriental do Pacífico [49, 50].

A figura 20 mostra as condições para o El Niño com anomalia generalizada de circulação de Walker, sobrepostos no mapa das anomalias médias da temperatura da superfície do mar. O aquecimento do oceano na região central e leste do Pacífico (laranja) ajuda a deslocar um ramo ascendente da Circulação Walker para 180 ° leste, enquanto os afundamentos dos ramos se deslocam para o continente Marítimo e o norte da América do Sul.

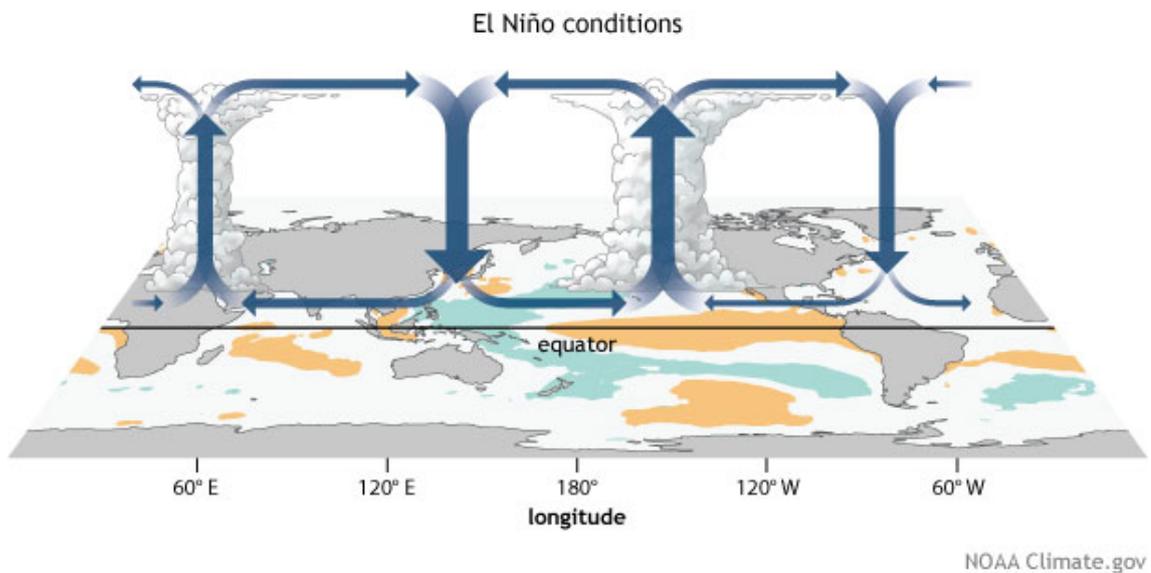


Figura 20: Condições de El Niño.
Fonte: [42].

O movimento ascendente do ar (que está ligado a tempestades e chuvas) aumenta na região central ou oriental do Pacífico, e a pressão na superfície tende a ser menor que a média. Enquanto isso, um aumento no movimento do ar na Indonésia aumenta a pressão superficial e o ressecamento [49]

A figura 21 mostra as condições mais secas, do que as normais, são observadas no sudeste da África e norte do Brasil, durante a estação de inverno do norte (Dezembro a Fevereiro). As condições mais úmidas que o normal são observadas ao longo da costa oeste da América do Sul tropical e em latitudes subtropicais da América do Norte (Costa do Golfo) e América do Sul (sul do Brasil até a região central da Argentina).

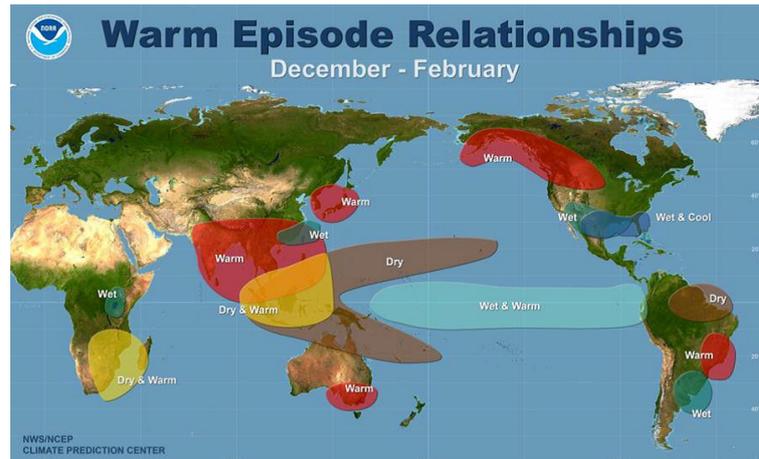


Figura 21: Condições Secas de El Niño.
Fonte: [42].

3.2 La Niña

Os ventos de superfície em todo o Pacífico tropical são mais fortes que o normal, e a maior parte do Oceano Pacífico tropical é mais fria que a média.

A figura 22 mostra a anomalia generalizada de circulação de Walker (dezembro-fevereiro) durante os eventos de La Niña, sobrepostos no mapa das anomalias médias da temperatura da superfície do mar. Águas mais quentes geram evaporação e consequentemente movimentos ascendentes, que por sua vez geram nuvens de chuva e que geram a célula de Walker, que em anos de La Niña fica mais alongada que o normal [42, 51]. A região com grande quantidade de chuvas é do nordeste do Oceano Índico à oeste do Oceano Pacífico passando pela Indonésia, e a região com movimentos descendentes da célula de Walker é no Pacífico Equatorial Central e Oriental. É importante ressaltar que tais movimentos descendentes da célula de Walker no Pacífico Equatorial Oriental ficam mais intensos que o normal o que inibe, e muito, a formação de nuvens de chuva.

Em geral, episódios de La Niñas também têm frequência de 2 a 7 anos, todavia tem ocorrido em menor quantidade que o El Niño durante as últimas décadas [50]. Além do mais, os episódios de La Niña têm períodos de aproximadamente 9 a 12 meses, e somente alguns episódios persistem por mais que 2 anos. Outro ponto interessante é que os valores das anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) em anos de La Niña têm desvios menores que em anos de El Niño, ou seja, enquanto observam-se anomalias de até 4, 5°C acima da média em alguns anos de El Niño, em anos de La Niña as maiores anomalias observadas não chegam a 4°C abaixo da média [44, 50].

A figura 23 mostra, durante a estação de inverno do norte, as condições mais úmidas,

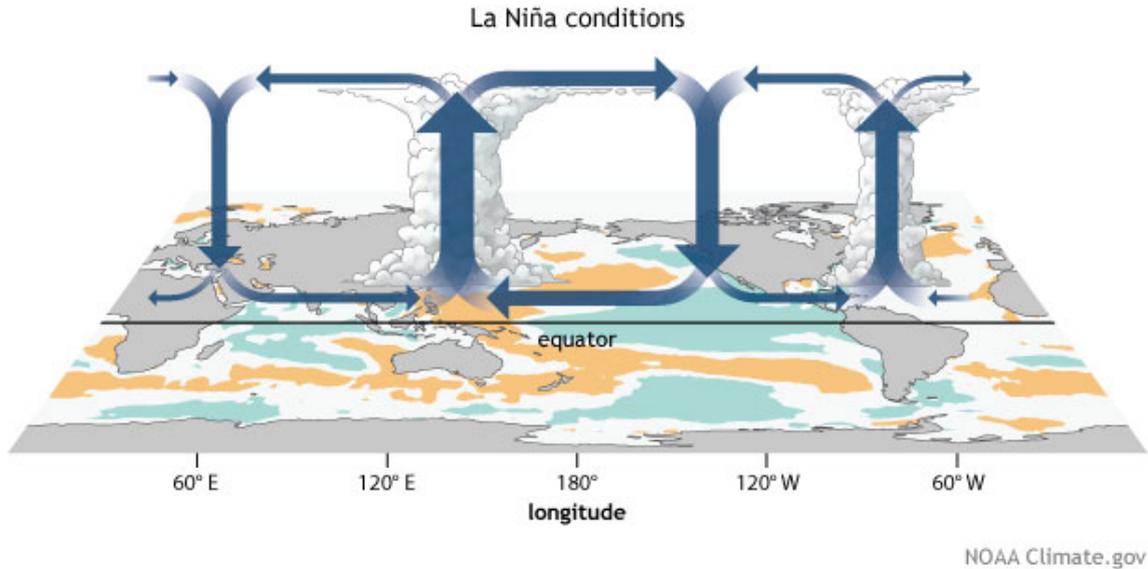


Figura 22: Condições de La Niña.
Fonte: [42].

do que o normal, no sudeste da África e norte do Brasil. Durante a temporada de verão do norte, as chuvas de monções indianas tendem a ser maiores que o normal, especialmente no noroeste da Índia [52].



Figura 23: Condições Úmidas de La Niña (Inverno).
Fonte: [42].

Na figura 24 são mostradas as condições mais secas, do que as normais, ao longo da costa oeste da América do Sul tropical e em latitudes subtropicais da América do Norte (Costa do Golfo) e América do Sul (sul do Brasil até a Argentina central) durante suas respectivas estações de inverno.

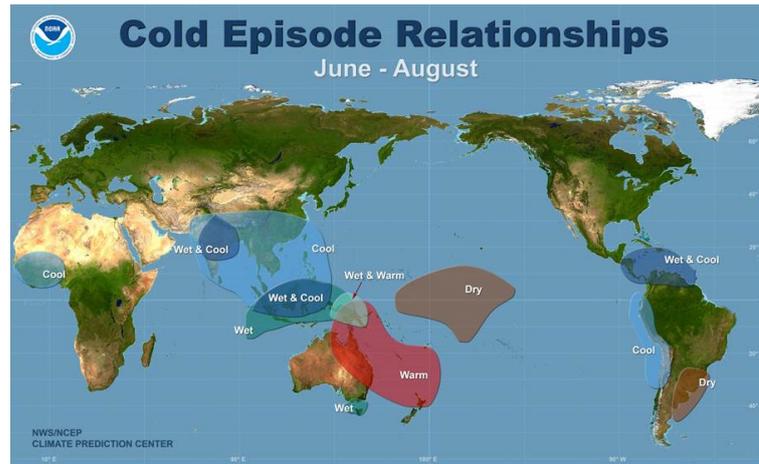


Figura 24: Condições Úmidas de La Niña (Verão).
Fonte: [42].

3.3 Neutro

O estado Neutro significa que as temperaturas do oceano, padrões de chuva, vento e convecção (aumento do ar) e precipitação no Pacífico tropical estão próximas das médias de longa prazo; frequentemente coincide com a transição entre períodos de El Niño e La Niña. A figura 25 mostra a convecção associada aos ramos ascendentes da Circulação Walker e é encontrada no continente Marítimo, no norte da América do Sul e no leste da África [42].

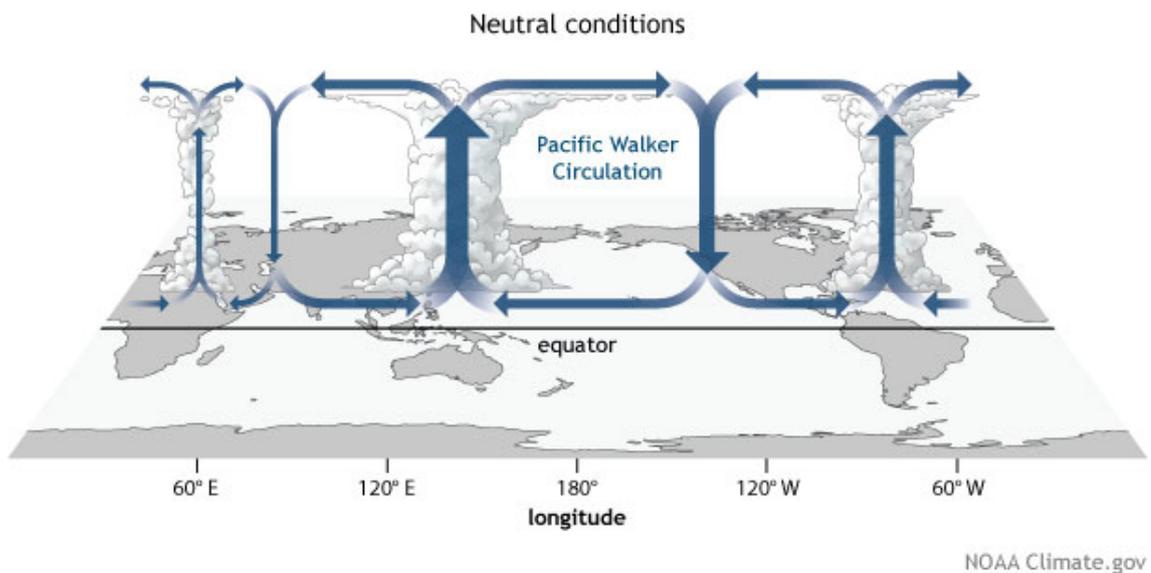


Figura 25: Condições de Neutro.
Fonte: [42]

3.3.1 Impactos na América do Sul

Os efeitos do ENSO no clima são heterogêneos nas regiões brasileiras. Em geral, verifica-se uma redução da precipitação nas regiões Nordeste e Norte durante o El Niño, em contraste com a região Sul que enfrenta maior frequência de chuvas intensas. Esta condição é invertida no período La Niña, com o Norte-Nordeste do Brasil experimentando um aumento nas chuvas e o Sul ficando seco [53].

Várias análises de campos meteorológicos sugerem que a circulação de verão nas monções e a precipitação durante os eventos de El Niño são modificadas por perturbações em grande escala e pelo aquecimento atípico da superfície na região sudeste brasileira na estação da primavera. Além disso, este evento mostra uma forte variação sub-sazonal [54].

A América do Sul é um ponto quente da seca em algumas projeções meteorológicas futuras devido ao seu potencial para reagir drasticamente ao aquecimento e secas excessivas, e os eventos de El Niño são preditores importantes para secas severas no nordeste brasileiro e na Amazônia [55,56]. A maior seca analisada, entre 1982 e 2017, é a conhecida seca de 2016 (El Niño), um período seco sem precedentes [12].

O El Niño está associado a chuvas acima da média no centro do Chile durante o inverno e o final da primavera. O La Niña está relacionado à precipitação abaixo da média no mesmo período e região. El Niño é seco e La Niña molhado no centro-sul do Chile durante o verão [57]. Há também um estudo sobre o impacto técnico e econômico dos recursos eólicos do Chile [20].

Em [58] fornece um estudo geral da diminuição da radiação solar em quatro zonas climáticas do nordeste do Brasil, o que pode ser atribuído ao efeito do aquecimento global influenciado pelo ENSO. Por outro lado, a variabilidade da irradiação solar no deserto de Atacama é influenciada pelo ENSO. Esses fenômenos resultarão em anos com irradiação solar significativamente diferente da TMY [59]. As séries temporais de irradiação solar exibem características associadas aos fenômenos climáticos El Niño e La Niña, revelando que a radiação solar descendente pode ser considerada como um indicador indireto para esses fenômenos [60].

Isso traz a seguinte pergunta: Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña afetam uniformemente a irradiação solar e, conseqüentemente, a previsão de produção de energia solar na América do Sul? O objetivo desta tese é estabelecer as mudanças de comportamento das séries temporais de irradiação solar e o ENSO. Essas relações podem ser usadas para orientar previsões para novas usinas de energia solar. Portanto, o escopo deste trabalho é limitado à avaliação da variável irradiação solar no Brasil e no Chile.

4 SÉRIES TEMPORAIS

4.1 Séries temporais

A série temporal pode ser estudada para obter o processo gerador da série, utilizando valores passados para fazer previsões e descrever o comportamento da série.

Conforme descrição de [61] a série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, tendo seus dados equidistância e apresentando uma dependência da série.

Por isso, uma série temporal pode representar fenômenos de vários tipos como:

- A energia elétrica consumida mensalmente em uma determinada região;
- O Produto Interno Bruto de um País anualmente;
- O preço de uma commodity na bolsa de valores de 10 em 10 minutos;
- A concentração de CO_2 diária na atmosfera medida em determinado local;
- A quantidade de peças em um estoque de uma fábrica ao fim de cada semana

Para [62] série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo. Seja Z a variável observada e t a variável tempo. Uma série temporal é definida por Z_t , $t=1,2,3,\dots,n$, onde n , representa o tamanho da série. Assim Z é uma função de t simbolizada por:

$$Z = f(t)$$

Se Z_t é um conjunto de observações correlacionadas entre si, conforme uma ordem cronológica de tempo, tem-se uma série temporal. A série temporal é o procedimento pelo qual são identificados os segregados e fatores relacionados com o tempo que influenciam os valores observados na série. Uma vez identificados, podem ser usados para auxiliar na interpretação e na projeção de valores da série temporal [63].

A série temporal Z_t pode ser discreta ou contínua; multivariada, com mais de duas variáveis; ou univariada, somente com uma variável. O tempo pode ser multidimensional, com mais de uma dimensão; ou unidimensional, com uma única dimensão.

Segundo [62] existem, basicamente, dois enfoques, com objetivos bem determinados, utilizados nos procedimentos de análise de séries temporais. No primeiro enfoque, análise é concebida no domínio de frequência, e os modelos propostos são modelos não paramétricos, por exemplo, a análise espectral. O segundo enfoque a análise é realizada no domínio temporal, ou seja, é considerada a evolução temporal do processo, e os modelos propostos são modelos paramétricos e usando funções de autocorrelações. Como exemplos de modelos paramétricos tem-se os modelos ARIMA (modelos autorregressivos integrados e de médias móveis). A partir da série temporal obtida é possível [63]:

- Fazer previsões de valores futuros da série de curto, médio e longo prazo;
- Investigar o mecanismo gerador da série temporal; por exemplo, analisando uma série de irradiação solar, podemos querer saber como essas irradiações interferem na geração solar fotovoltaica;
- Procurar periodicidades relevantes nos dados;
- Descrever apenas o comportamento da série; utilizando de medidas estatísticas descritivas, como a construção de gráficos, a verificação de tendências, ciclos e variações sazonais, etc;

Muitas situações no campo das ciências físicas, exatas, biológicas e humanas freqüente o conceito de sistema dinâmico, submetendo-se a uma série de entrada $X(t)$, uma série de saída $Z(t)$ e uma função de transferência $v(t)$, conforme figura 26



Figura 26: Sistema Dinâmico.

Fonte: [62].

Identificar se uma série é estacionária, se desenvolve no tempo uma média constante, que venha a caracterizar algum padrão de equilíbrio estável, é um fator extremamente importante nos estudos de séries temporais. Normalmente as séries temporais apresentam-se com características de não estacionariedade.

O modelo ARIMA (auto-regressivos integrados médias móveis) é capaz de descrever estatisticamente séries estacionárias e não estacionárias, desde que não apresentem comportamento explosivo [62]. Uma série temporal pode apresentar característica de estacionariedade durante um período longo ou apenas em períodos muito curtos, mudando de nível e/ou de inclinação, conforme figura 27.

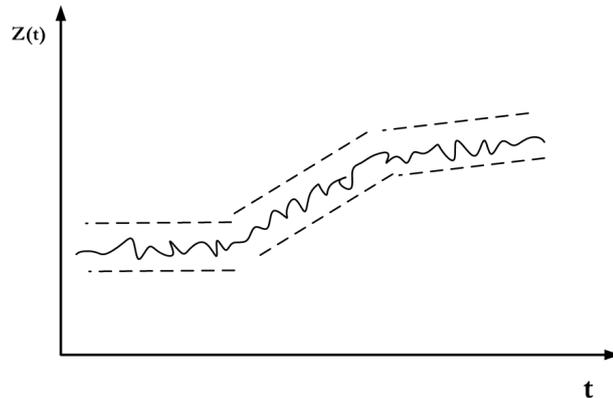


Figura 27: Série não-estacionária quanto ao nível e inclinação.
Fonte: [62]

4.1.1 Modelos Séries temporais

Os modelos utilizados para descrever séries temporais são controlados por leis probabilísticas, e são caracterizados como processos estocásticos.

4.1.2 Processo Estocástico

Matematicamente um processo estocástico pode ser definido como uma coleção de variáveis aleatórias ordenadas no tempo e definidas em um conjunto de pontos T , que pode ser discreto ou contínuo.

Seja T como um conjunto arbitrário, um processo estocástico é uma família $Z = \{Z(t), t \in T\}$, tal que, para cada $t \in T$, $Z(t)$ é uma variável aleatória [62] [64]. O conjunto T , normalmente é, considerado como o conjunto dos inteiros Z , $Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$, ou o conjunto dos R , e o conjunto das variáveis aleatórias (Va), equiespaçadamente no tempo, definidas num mesmo espaço de probabilidade Ω .

Na realidade $Z(t)$ é uma função de dois argumentos, $Z(t, \omega), t \in T, \omega \in \Omega$, conforme figura 28

Ao analisar a Figura 28 verifica-se, que para cada $t \in T$, teremos uma v.a. $Z(t, \omega)$,

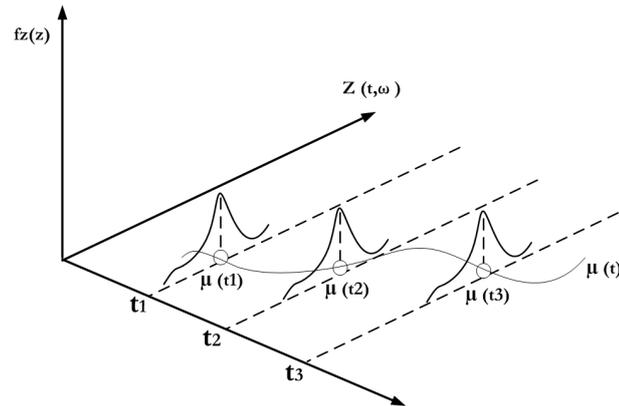


Figura 28: Um processo estocástico interpretado como uma família de variáveis aleatórias.
Fonte: [62].

como uma distribuição de probabilidade, ou seja é possível que a função densidade de probabilidade (fdp) no momento t_1 difira da fdp no momento t_2 , mas a situação usual é aquela em que fdp de $Z(t, \omega)$ é a mesma para todo $t \in T$.

Se designarmos as possíveis realizações de $Z(t, \omega)$ por $Z^{(1)}(t), Z^{(2)}(t), \dots, Z^{(n)}(t)$, poderemos chamar o conjunto de todas as possíveis trajetórias como “ensemble”.

Segundo [62] uma maneira de analisar uma distribuição de probabilidade $Z(t, \omega)$, para um t fixo, é levar em consideração durante a análise a quantidade de trajetórias que passam por uma ”janela” de amplitude Δ de modo que, tal quantidade de trajetórias será relacionada à $f_z(Z)$. Δ , se $f_z(Z)$ for a fdp de $Z(t, \omega)$, conforme figura 29.

O conjunto de possíveis valores do processo é chamado de espaço de estados que pode ser discreto (e.g. o número de chamadas que chegam a uma central telefônica a cada 2 horas) ou contínuo (e.g. a temperatura do ar em uma localidade observada em intervalos de 1 hora). Na prática costuma-se descrever um processo estocástico através das funções média, variância e autocovariância. Estas funções são definidas a seguir para o caso contínuo sendo que definições similares se aplicam ao caso discreto.

Média

$$\mu(t) = E[Z(t)]$$

Variância

$$\sigma^2(t) = Var[Z(t)]$$

Autocovariância

$$\gamma(t_1, t_2) = E[Z(t_1) - \mu(t_1)][Z(t_2) - \mu(t_2)]$$

Segundo [63], frequentemente tem-se apenas uma realização do processo estocástico

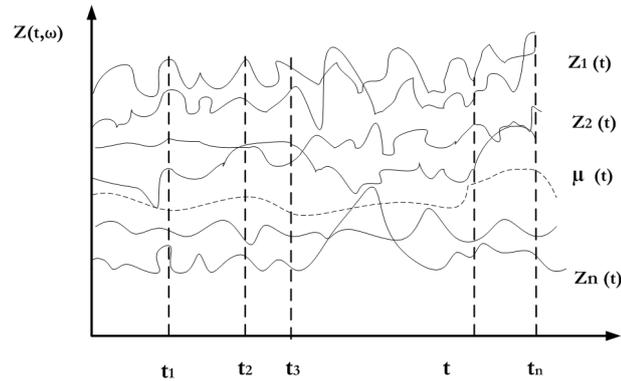


Figura 29: Processo estocástico interpretado como uma família de trajetórias.
Fonte: Adaptado de [62].

em análise, portanto dificilmente se conhece todas as funções de distribuição até a N ésima ordem. Sendo necessário realizar uma inferência do mecanismo gerador da série figura 30.

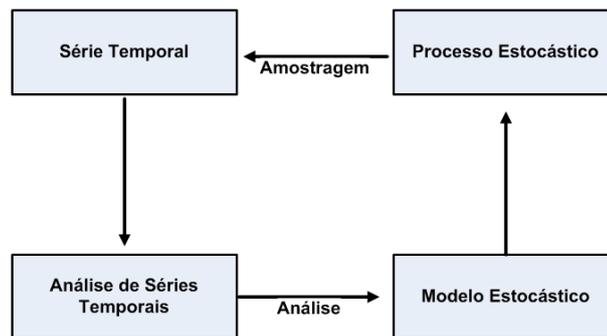


Figura 30: Processo estocástico e Série temporal.
Fonte: [63]

A figura 30 demonstra o objetivo do estudo das séries temporais, considerando um processo estocástico, retira-se uma amostra finita de observações (série temporal), e através do estudo dessa amostra, é possível atribuir um modelo estocástico com propósito de inferir sobre o comportamento da realidade [63].

4.1.3 Processos Estacionários

Uma acentuada classe de modelos estocásticos corresponde ao processo estacionário. O conjunto de variáveis aleatórias $Z = \{Z(t), t \in T\}$ é dito estacionário, se as estatísticas do conjunto de dados não variarem nos instantes t e $t+k$, para $K=0,1,2,\dots,n$, ou seja [61]:

$$E[Zt] = E[Zt + K]$$

$$\text{Var}[Zt] = \text{Var}[Zt + K]$$

Os processos estacionários podem ser estritamente estacionários, ou fortes, e estacionariedade de segunda ordem, ou fraca. O processo é dito estacionários fortes se todas as informações finito- dimensionais permanecem as mesmas sob translação de tempo, ou seja [65].

$$F(Z_1, \dots, Z_n; t_1 + \tau, \dots, t_n + \tau) = F[Z_1, \dots, Z_n; t_1, \dots, t_n]$$

Para quaisquer t_1, \dots, t_n, τ de T .

Isso significa que todas as distribuições unidimensionais são invariantes sob translação do tempo, logo a média $\mu(t)$ e a variância $v(t)$ são constantes finitas. Sendo:

$$\mu(t) = \mu,$$

$$v(t) = \sigma^2,$$

para todo $t \in T$.

Um processo estocástico $Z = \{Z(t), t \in T\}$ dito francamente estacionário ou estacionário de segunda ordem se e somente se:

1. $E[Zt] = \mu(t) = \mu$ constante para todo $t \in T$.
2. $E[Z^2(t)] < \infty$, para todo $t \in T$.
3. $\gamma(t_1, t_2) = \text{Cov}\{Z(t_1), Z(t_2)\}$, é uma função de $|t_1 - t_2|$.

Um processo de segunda ordem dá-se Z tal que (2) esteja satisfeito.

4.1.4 Ruído Branco

Conforme [61], ruído branco é a sequência de variáveis aleatórias, não correlacionadas, e identicamente distribuídas, com média zero e variância constante, com distribuição normal. O termo se aplica a uma sequência de erros aleatórios, com média e variância constante, e sem autocorrelação. Muito utilizado em estudos de séries temporais. Um ruído branco é temporalmente homogêneo, estacionário e sem dependência temporal. Segundo [66] se a série temporal não for caracterizada como persistente ou antipersistente e for descorrelacionada é tida com um ruído branco.

4.1.5 Modelo

É um artifício matemático que tem por finalidade representar a realidade na lei de seus efeitos, espelhando a representação formal de uma realidade empírica. O modelo deve ser parcimonioso, ou seja, deve fornecer a racionalidade de todos os fatos empíricos considerados [67]. A modelagem de séries pressupõe a utilização de uma série temporal cujo período de estimação de seus parâmetros é representativo de toda a série a ser estimada.

A palavra modelo pode ser denotada como uma representação simplificada da realidade, estruturada de tal maneira que possibilite a compreensão do funcionamento total ou parcial de uma dada realidade ou fenômeno [63].

As séries temporais podem ser classificadas, quanto à previsão, como de curto, médio e longo prazo, isso dependendo do valor associado ao horizonte máximo de previsão. O horizonte de previsão estará correlacionado com o grau de previsibilidade da série e com o erro de previsão.

Quando forem identificadas mudanças significativas geradas a partir da origem, a qualidade da previsão de um modelo, não podem ser sustentadas, em relação àquelas utilizadas para a construção do modelo [63].

Os modelos de previsão de série, normalmente, fundamentam-se na suposição de que observações passadas contêm propriedades sobre o padrão de comportamento da série. O objetivo dos métodos, neste caso, é estabelecer diferença entre o padrão de qualquer ruído que possa estar contido nas observações para daí então usar esse padrão para prever valores ou movimentos futuros da série [65].

Os modelos podem ser representados por duas caracterizações:

- A. Paramétricos (número de parâmetro é finito).
- B. Não-paramétricos (número infinito de parâmetros).

Nos modelos paramétricos (domínio do tempo), os mais utilizados são os modelos de auto-regressivos e médias móveis (ARMA) , os modelos auto-regressivos integrados e de médias móveis (ARIMA), modelos de memória longa (ARFIMA), modelos estruturais, modelos não-lineares e os modelos de erro (ou de regressão). Os modelos não-paramétricos mais utilizados são a função de autocovariância (autocorrelação) e a transformada de Fourier.

4.1.6 Componentes de uma série temporal

Uma série temporal (Y_t) pode resultar na combinação de quatro componentes, tendência (T_t), Ciclo (C_t), Sazonalidade (S_t), e erro (E_t), ou por partes delas.

Quando esses componentes da série temporal são independentes podem ser relacionados de formato aditivo:

$$Y_t = T_t + C_t + S_t + E_t$$

Se os diferentes componentes são interdependentes o formato é multiplicativo:

$$Y_t = T_t * C_t * S_t * E_t$$

para $t = 1, \dots, n$.

O modelo aditivo é recomendado, por exemplo, quando S_t não depende das outras componentes, como em [63].

Conforme [67] uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, geralmente, compostas por quatro elementos:

Sazonalidade ou Fator Sazonal: relata as flutuações periódicas de comprimento constante, repetido em períodos fixos, associado, normalmente, a mudanças climáticas. Em uma série temporal a sazonalidade corresponde às oscilações de subida e de queda que sempre ocorrem em um determinado período do ano, mês, semana ou dia. As componentes sazonal e cíclica apresentam diferenças significativas. A sazonal possui movimentos facilmente previsíveis, ocorrendo em intervalos regulares de tempo, enquanto os componentes cíclicos tendem a ser irregulares.

Tendência: A tendência de uma série temporal indica o seu comportamento de longo prazo, isto é, se ela cresce, decrece, ou permanece estável, e qual a velocidade destas mudanças. Ao longo de vários anos, a tendência verificar o sentido de deslocamento da série, podendo aumentar, diminuir ou permanecer constante.

Erro ou ruído aleatório: é uma variação aleatória do sinal ao redor do seu valor médio, é o que o modelo estimado não consegue captar, ou seja, é tudo aquilo que as outras componentes da série não conseguem explicar. Um erro é dito um ruído branco quando possui distribuição normal, média de seus componentes igual a zero e a variância constante, indicando assim, que o modelo elaborado conseguiu explicar o máximo de série

de dados.

Ciclo: é o movimento da série que se repete ao longo dos períodos de tempo, tendo uma longa duração, a qual varia de ciclo para ciclo ou se repete, em períodos muito longos. São movimentos ondulatórios caracterizado por oscilações de subida e de queda nas séries, de forma suave e repetida, ao longo da componente de tendência que, ao longo de vários anos, tende a periodicidade.

4.1.7 Modelos não estacionários

Os modelos ARIMA, auto-regressivo integrado de médias móveis, são modelos estatísticos lineares para análise de séries temporais.

Conforme [68]os modelos ARIMA baseiam-se na ideia de que uma série temporal não estacionaria poder ser modelada a partir de diferenciações e da inclusão de um componente autoregressivo e de um componente média móvel. Os termos autoregressivos correspondem a defasagens da série transformada, ou seja, série estacionária induzida por diferenciação e as médias móveis correspondem a defasagens de erros aleatórios. O termo integrado refere-se ao processo de diferenciação da série original para torna-la estacionária.

5 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

5.1 Técnicas Estatísticas

Existem várias metodologias estatísticas para evidenciar a existência de correlação em séries temporais. Entre os diversos modelos pode-se citar: análise R/S de Hurst; os métodos: Detrended Fluctuation Analysis (DFA); Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA); e o coeficiente Detrended Cross-Correlation Analysis (σ DCCA) [69], como verifica-se a seguir [28].

Todos os algoritmos dos métodos estatísticos empregadas neste trabalho foram desenvolvidos pelo autor no ambiente MATLAB e estão apresentados no apêndice A.

5.1.1 Análise de Hurst

O britânico Harold E. Hurst (1880 - 1978), em seus estudos de hidrologia, passou a investigar problemas de dimensionamento de represas, principalmente relacionados aos reservatórios de água do rio Nilo, de modo que a represa não transbordasse nem ficasse muito vazia [70]. Na construção de um modelo, uma parte do sistema deve ser assumida como incontrolável, no caso, o fluxo das águas das chuvas, de comportamento aleatório.

A partir desta suposição, Hurst descobriu um novo método estatístico, método esse, descritor no livro Long-Term Storage: An Experimental Study [71]. Esse método que tem larga aplicabilidade na análise de todas as séries temporais, podendo ainda classificá-las, distinguindo a série temporal randômica de uma não-randômica.

Hurst observou, através de muitos anos de estudos, a existência de uma tendência de um ano de grande enchente ser seguido por outro ano de grande enchente e um ano de pouca enchente ser seguido por outro ano de pouca enchente. Esse fenômeno apresentava um comportamento persistente, aparentava um comportamento não-aleatório de anos bons e anos ruins. Caso contrário, se um ano de muita enchente fosse acompanhado por outro ano de pouca enchente, esse fenômeno era considerado como anti-persistente [72].

Hurst mediu os volumes máximos e mínimos de um reservatório de água (amplitude) e calculou o desvio-padrão dos fluxos de água em um determinado período de tempo, de modo que R/S seria a razão entre a amplitude (Rt) e o desvio padrão (St) das vazões de água.

Hurst percebeu que, ao repetir esse procedimento para a mesma série, em diversos períodos de tempo, havia uma função relacionando este resultado com o número de observações que faziam parte do cálculo. Diante dessas observações, Hurst propôs o coeficiente de Hurst (H) Posteriormente, verificou que essa relação também era válida para outros fenômenos naturais [63].

O coeficiente de Hurst (H) tem o objetivo de encontrar e estabelecer a intensidade da tendência, ou seja, quantificar a tendência em uma série.

5.1.2 Análise R/S

A análise R/S ou análise de reescalonamento, foi definida por Hurst em 1951, com o objetivo de fornecer uma estimativa para o coeficiente de Hurst (H) em uma série, classificar as séries temporais e fornecer informações sobre o grau de auto-correlação da série analisada.

Seja $\xi_{(t)}$ uma série temporal e $\bar{\xi}$ a sua média em um período de τ intervalos de tempo, a expressão é [73].

$$\bar{\xi}_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t)$$

Determina-se a variação da média para u. De modo que a soma da variação acumulada da média, para os períodos de 1 a τ é denido por

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \bar{\xi}_{\tau}],$$

Calcula-se o desvio padrão,

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \bar{\xi}]^2 \right\}^{1/2}$$

Defini-se $R(\tau)$ (alcance) como a diferença entre o mínimo e o máximo,

$$R(\tau) = \text{Max}_{1 \leq t \leq \tau} [X(t, \tau)] - \text{Min}_{1 \leq t \leq \tau} [X(t, \tau)]$$

Divide-se $R(\tau)$ pelo desvio padrão $S(\tau)$.

$$\frac{R}{S} = \frac{R(\tau)}{S(\tau)}$$

Se para tamanhos distintos de τ a relação R/S seguir uma lei de potência, então tem-se,

$$\frac{R}{S} = (\tau/2)^H,$$

onde H que é denominado coeficiente de Hurst.

O valor de H pode ser obtido através da relação entre R/S e τ , em um gráfico log x log.

Os valores do expoente de Hurst variam entre 0 e 1, e têm a seguinte definição:

- ($H = 0,50$) a série é aleatória ou decorrelacionada.
- ($0,00 < H < 0,50$) a série tem um comportamento antipersistente.
- ($0,50 < H < 1,00$) a série é persistente.

5.1.3 Método DFA

O método DFA é denominado de análise de flutuações sem tendências, Detrended Fluctuation Analysis, pode ser aplicado para verificar correlações de longo alcance em séries temporais não-estacionárias. O método é uma evolução da análise R/S clássica de Hurst e vem sendo amplamente aplicado em diversas áreas [74].

Uma das vantagens do DFA em relação aos métodos convencionais, é que este permite a detecção de auto similaridade que faz parte de uma serie não estacionária e que também evita uma falsa detecção de auto similaridade aparente, que pode ser um elemento de tendência externa.

A principal vantagem para a aplicação do método DFA, em relação aos outros métodos, é que ele busca subtrair possíveis tendências da série original e fazer uma análise das flutuações de dados, pois evita a detecção de falsas correlações, que são artefatos de não estacionaridades nas séries temporais.

O DFA tem sido amplamente aplicado em séries temporais não estacionárias incluindo o seguinte: transporte [75] , combustão [76], proteínas [77], dengue [78], sistemas astrofísicos [79], manchas [80], avaliação de estruturas de nuvens [81, 82] e análises de previsão do tempo [83–91], incluindo irradiação solar [83, 92, 93].

O método DFA é descrito através de uma sequência de passos para determinar a auto correlação de uma série temporal e não estacionária. Os passos são apresentados a seguir. Uma série temporal qualquer x_i , com $i= 1,2,3\dots N$, onde N é o número total de elementos da serie x_i . Primeiramente a serie temporal deverá ser integrada logo, calcula-se a somatória do desvio padrão de cada registro $x(i)$ em relação à média na série completa, obtendo a série integrada. A série temporal original x_i , é a irradiação solar acumulada (MJ/m^2) a cada 3 horas, com $i = 1, \dots, N$ e N é a número total de medições registradas. A série temporal x_i é integrada,conforma expressão:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})$$

Onde:

\bar{X} é a media aritmética dos valores de $x(i)$, com $i= 1,2,3,\dots,N$, e K é um número inteiro menor que N . Posteriormente divide-se a série integrada $y(k)$ em intervalos de tamanhos

iguais de amplitude n não sobrepostos e removemos a tendência, efetuando a subtração da série integrada $Y(k)$ em cada intervalo, pelo ajuste de uma curva que representa essa tendência $Y_n(k)$, dentro do intervalo.

Segundo [74], para quantificar as flutuações para um intervalo de tamanho n calcula-se a função de flutuação, definida por:

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y(k) - Y_n(k))^2}$$

Em um processo iterativo repete-se esse cálculo para diversos tamanhos de intervalo n para que possa aferir a relação entre $F(n)$ e o tamanho do intervalo n .

Para verificarmos se há uma lei de potência entre essas duas variáveis basta plotar os gráficos destas em escalas logarítmicas e observar se há um comportamento linear. Caso isso ocorra, teremos a seguinte lei de potência:

$$F_{DFA}(n) \approx n^\alpha$$

Onde: α significa um parâmetro de autoafinidade que expressa as propriedades de correlação de lei de potência de longo alcance.

Além disso, o expoente α será usado para avaliar as influências de correlação de longo alcance no comportamento futuro. O expoente α é classificado de acordo com as seguintes regras, como aplicado anteriormente por [76, 94–98]:

- $(0,00 < \alpha < 0,50)$ será um parâmetro de auto-correlações anti-persistentes, significa que os valores grandes (pequenos) têm maior probabilidade de serem seguidos por valores pequenos (grandes);
- $(\alpha = 0,50)$ descrevendo uma série sem memória, ruído branco, representa um passeio aleatório, e a série original apresenta valor zero para a função de autocorrelação, isto é, a função de auto correlação terá decaimento exponencial;
- $(0,50 < \alpha < 1,00)$ será um parâmetro de auto-similaridade, indica que a série original apresenta auto-correlações de longo alcance persistentes, significando que

os valores grandes (pequenos) têm maior probabilidade de serem seguidos por valores grandes (pequenos);

- ($\alpha = 1,00$) a série representa um ruído do tipo $1/f$;
- ($\alpha > 1,00$) Será um parâmetro sub-difusivo.
- ($\alpha = 1,50$) Ruído marron

6 METODOLOGIAS E MÉTODOS

6.1 Dados

Os dados das séries temporais de irradiação solar foram fornecidos pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela plataforma de coletas de dados automáticos, coletados em estações distribuídas em varias regiões do Brasil, no chamado Cinturão Solar Brasileiro (CSB) e pelo National Rede Agro-climática (Agromet), em estações meteorológicas do Chile [23].

A figura 31 mostra o Cinturão Solar Brasileiro (CSB), que vai do Nordeste ao Pantanal, incluindo o norte de Minas Gerais, o sul da Bahia e o norte e o nordeste de São Paulo. Demonstrando que o Brasil tem potencial enorme de geração de energia elétrica através da fonte solar, pois tem uma incidência de muita luz solar e durante um longo período. Assim como, a região do deserto do Atacama no Chile.

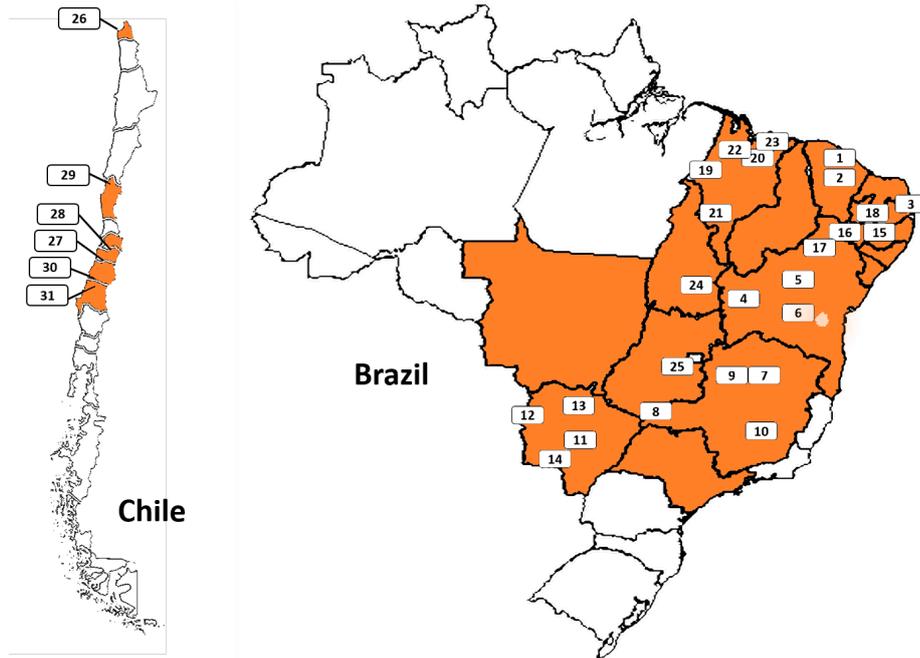


Figura 31: A irradiação solar acumulada foi coletadas em 25 cidades dentro do CSB, mais 6 cidades do Chile. Os estados destacados (coloridos) têm a maioria ou todas as suas respectivas áreas com uma eficiência acima de 1500 kWh/kWp por ano, dentro do CSB e do Chile.

Fonte: Adaptado de [19].

A região escolhida tem um enorme potencial para geração solar fotovoltaica, onde a maioria ou todas as suas respectivas áreas com uma eficiência acima de 1500 kWh/kWp por ano [19]. Além disso, foram avaliados conjuntos de dados de trinta e uma cidades selecionadas aleatoriamente (Figura 31 e Tabela 5).

Tabela 5: Cidades das estações meteorológicas onde os dados analisados foram coletados. As cidades marcadas de 1 a 25 estão dentro do Brasil e, de 26 a 31, dentro do Chile

Tag	Estados ou Regiões	Cidade
1	Ceará	Canindé
2	Ceará	Quixeramobim
3	Paraíba	Capim
4	Bahia	São Desidério
5	Bahia	Irecê
6	Bahia	Piatã
7	Minas Gerais	Montes Claros
8	Minas Gerais	Santa Vitória
9	Minas Gerais	Santa Fé
10	Minas Gerais	Belo Horizonte
11	Mato Grosso do Sul	Campo Grande
12	Mato Grosso do Sul	Corumbá
13	Mato Grosso do Sul	Coxim
14	Mato Grosso do Sul	Jardim
15	Pernambuco	Arcoverde
16	Pernambuco	Belém do São Francisco
17	Pernambuco	Petrolina
18	Pernambuco	São José do Egito
19	Maranhão	Açailândia
20	Maranhão	Coroatá
21	Maranhão	Riachão
22	Maranhão	Santa Inês
23	Maranhão	Urbano Santos
24	Tocantins	Chapada da Natividade
25	Goiás	Anápolis
26	Arica and Parinacota	Lluta Bajo, Arica
27	Maule	Botalcura, Pencahue
28	O'Higgins	El Tambo
29	Coquimbo	Las Rojas, La Serena
30	Maule	Los Despachos, Cauquenes
31	Bío Bío	Coronel de Maule

Nos anos de coletas de dados, foram observadas lacunas de horas, dias, ou meses na aquisição dos dados, muitas vezes por falhas nas medições. Diante deste problema, foi realizada uma qualificação dos dados de irradiação solar e retiradas as estações com séries de dados muito curtas ou com medições incoerentes.

Os dados utilizados neste trabalho foram observações das médias de 3 em 3 horas de irradiação solar global para período de ocorrências de El Niño considerados como muito forte e La Niña considerados como forte, conforme mostrado na Tabela 4. Os períodos utilizados para a coleta dos dados foram determinados como:

- La Niña (Forte)- 01 de Junho de 2010 à 01 de Junho de 2011;
- El Niño (Muito Forte) - 01 de Junho de 2015 à 01 de Junho de 2016 ;
- Neutro - 01 de Junho de 2013 à 01 de Junho de 2014.

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se em análises das séries temporais extraídas das diversas estações meteorológicas instaladas em cidades que compoem o cinturão solar brasileiro e do Chile.

A figura 32 apresenta um diagrama funcional da metodologia estruturada na forma de diagrama de blocos. A seguir será mostrada de forma breve cada etapa da metodologia proposta.

Determinar a Variável Meteorológica: inicialmente, deve ser selecionada a variável meteorológica que será analisada, baseado nos critérios de variáveis mais impactantes na geração de energia solar fotovoltaica;

Determinar as estações: devem ser determinadas as estações meteorológicas, existentes no cinturão solar brasileiro e no Chile, onde serão coletados os dados da variável meteorológica selecionada acima, bem como, a disponibilidade desses dados meteorológicos;

Determinar o Período: o período de coleta de dados deve ser determinado com base nos períodos de ocorrências de El Niño e La Niña considerados como muito forte, forte, moderado e fraco. No período Neutro não ocorrem à incidência de El Niño e La Niña;

Coletar Dados das Estações: nesse bloco são realizadas as coletadas de dados da variável meteorológica escolhida, nas estações existentes no cinturão solar brasileiro e nas estações do Chile;

Apuração de Dados: nesse bloco os dados da variável meteorológica são qualificados e retiradas as estações com algum tipo de problema nas séries temporais dos dados.

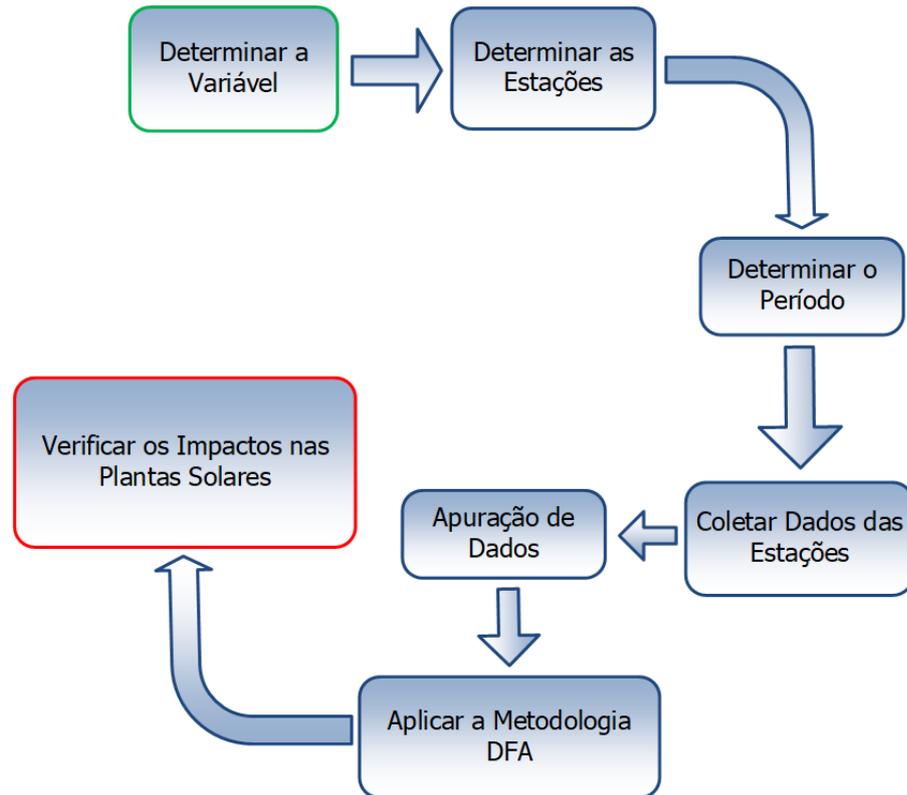


Figura 32: Diagrama de blocos do modelo da metodologia.

Aplicar a Metodologia DFA: a aplicação da metodologia DFA visa prospectar as auto afinidades em séries temporais de longo alcance e não estacionárias, sendo uma metodologia bastante aplicada em diversas áreas do conhecimento. A aplicação da metodologia consiste em plotar os gráficos para melhor análise da auto-afinidade das séries históricas da variável meteorológica, todos os gráficos foram plotados no software OriginPro 8; verificar a Classificação de α onde é avaliado os valores do coeficiente de correlação α , das séries da variável meteorológica, indicando a existência de persistência, antipersistência ou aleatoriedade da série;

Verificar os Impactos nas Plantas Solares: verificar os impactos na estimativa de geração de energia em larga escala nas plantas solares, coletadas durante o ENSO, podendo afetar a avaliação da previsão de eficiência da usina solar.

6.1.1 Estações de Coleta de Dados

Existem no Brasil, dois institutos que realizam previsões meteorológicas, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes institutos abrangem grande parte do território nacional (figura 33), e realizam a coleta de dados referente



Figura 34: Plataformas de Coleta de Dados.

Fonte: [19]

1993 com 250.000 estações meteorológicas é a maior do seu tipo e fornece uma capacidade única de fornecer as previsões mais locais com base em pontos de dados meteorológicos reais [99].

Um grande número de estações meteorológicas, existente hoje, são automáticas, pois realizam medições programadas de variáveis meteorológicas, através de sistemas informatizados que gerenciam a coleta de dados em intervalos de tempo (dia, hora, minuto), ou em tempo predeterminado.

6.1.2 Instrumentos de Medição

Esta seção apresenta os principais instrumentos utilizados em medição para aquisição de dados em estações meteorológicas, com foco em atender as exigências de qualidade requeridas pelo setor energético, principalmente nas medições exigidas nos leilões de energia.

A grande importância das medições de radiação solar, tanto a componente global, como a direta e indireta, para o desenvolvimento de projetos que visam a conversão da energia solar em outras fontes de energia e estudos das condições climáticas e atmosféricas. Uma estação meteorológica visando o monitoramento solar consiste, de um pireliômetro para medir irradiância direta normal (IDN), um piranômetro para aquisição da irradiância horizontal global (IGH) e um piranômetro sombreado para medir a irradiância horizontal difusa (IDH) [23].

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) e Organização Internacional de Normas (ISO) definiram os tipos de piranômetros e pireliômetros, suas especificações de desempenho, métodos de calibração, etc. Os instrumentos que cumprem as classificações da OMM e ISO, fornecem informações precisas das medições de irradiação solar em todas as condições meteorológicas. Uma vez que o mundo meteorológico e a comunidade científica usam os mesmos tipos de instrumentos, os dados podem ser comparados com medições de redes meteorológicas e estações meteorológicas e satélites, em vários locais, independente do tipo de sistema de energia solar [100].

Conforme a ISO 9060 os piranômetros podem ser reconhecidos e agrupados em duas tecnologias diferentes: tecnologia de termopilha e tecnologia de semicondutores de silício (fotodíodo) [101].

Piranômetro Fotodíodo

Conforme a ISO 9060, o piranômetro de fotodíodo (célula de silício) pode detectar a porção do espectro solar entre 400 nm (nanômetros) e 900 nm, com a detecção mais eficiente entre 350 nm e 1100 nm. Apresenta uma célula semicondutora como elemento sensor que converte diretamente a radiação solar em corrente elétrica proporcional à irradiância solar incidente.

A figura 35 mostra um piranômetro fotodíodo que é composto por uma cúpula de alojamento, um fotodíodo e um difusor ou filtros ópticos [102].



Figura 35: Piranômetro Fotodíodo.
Fonte: [102].

A conversão é influenciada pela temperatura com um aumento na corrente produzida pelo aumento de temperatura (aproximadamente $0,1\%/^{\circ}\text{C}$). Os piranômetros de fotodíodo são classificados como equipamentos de “segunda classe” por apresentar maiores incertezas

de medição do que os piranômetros de termopilha. A principal origem da imprecisão das medições é a sua resposta espectral (400 nm e 1100 nm) conforme mostrado na figura 36. São mais robustos e de menor custo, tornando-os atraentes em aplicações que não necessitam de muita certeza de medições [102].

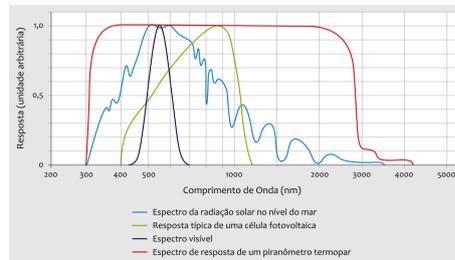


Figura 36: Comparação entre as curvas de resposta do piranômetro de fotodiodo de silício (linha contínua verde) e do piranômetro de termopilha (linha vermelha).

Fonte: [23].

Piranômetro termopilha

O piranômetro é um sensor destinado a medir a irradiância solar global (direta e indireta) normalmente no campo hemisférico (plano horizontal), utilizando uma termopilha colocada no interior de duas semiesferas de vidro concêntricas, que converte a energia térmica em energia elétrica, em uma diferença de potencial elétrico proporcional à irradiância solar incidente na termopilha. Um piranômetro de termopilha geralmente mede 300 a 50000 nanômetros com uma sensibilidade espectral bastante plana, e uma resposta excelente no ângulo sólido de 180° (resposta de cosseno), o que contribui para a redução de incertezas das medições realizadas pelo sensor, conforme a figura 37

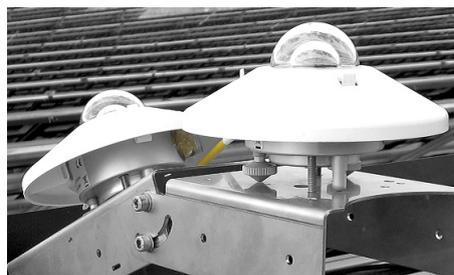


Figura 37: Piranômetro termopilha

Fonte: [102].

Pireliômetro

O pireliômetro é um radiômetro que emprega o mesmo princípio de medida da irradiação solar utilizado no piranômetro por termopilha. No entanto, este instrumento é dotado de um colimador com abertura suficiente para possibilitar que apenas a componente irradiação direta normal (IDN) incida no sensor.

7 RESULTADOS OBTIDOS COM A METODOLOGIA

A apresentação dos resultados alcançados nesta pesquisa é iniciada neste capítulo. Os tamanhos de janelas (n) utilizadas nos cálculos do DFA foi realizado no mínimo igual a 4 e no máximo de $N/4$, com dados de 3 em 3 horas diárias com 2920 amostras, onde as simulações foram realizadas no Matlab e os gráficos plotados no software Origin Pro8. Na primeira parte são mostrados os resultados para os fenômenos meteorológicos El Niño muito forte e La Niña forte para as 25 cidades que compoem o cinturão solarimetrico brasileiro e 6 cidades do Chile, assim como, para o período neutro. Na segunda parte os resultados mostrados se referem a El Niño e La Niña fracos e moderados somente para as algumas cidades.

7.1 El Niño e La Niña Muito Forte

Aplicando as etapas definidas na metodologia descritas na figura ??, foram obtidos os resultados para as 31 cidades objetos de estudo do trabalho. Cada gráfico, da cidade, obtido através da metodologia DFA, foi dividido em três partes após uma análise inicial. Na primeira parte, foi calculado α para curto alcance, período de cerca de trinta horas, conforme mostrado na tabela 6.

Observa-se que o coeficiente de DFA, para o Brasil e o Chile, apresenta comportamento persistente para os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña, e para o período de neutro, com exceção da cidade de Capim ($0,49 \pm 0,01$) no ano neutro e da cidade de Jardim ($0,49 \pm 0,01$) no fenômenos meteorológicos La Niña, ambos de comportamento anti-persistente, mas muito próximo do intervalo do comportamento persistente.

Tabela 6: Coeficiente de DFA (α) da irradiação solar em menos de trinta horas

Cidade	El Niño	Erro	La Niña	Erro	Neutro	Erro
Canindé	0.74	0.06	0.77	0.06	0.77	0.06
Quixeramobim	0.79	0.07	0.78	0.06	0.71	0.06
Capim	0.56	0.01	0.79	0.07	0.49	0.01
São Desidério	0.80	0.07	0.79	0.07	0.79	0.07
Irecê	0.80	0.07	0.78	0.07	0.79	0.07
Piatã	0.80	0.07	0.78	0.07	0.77	0.07
Montes Claros	0.78	0.07	0.77	0.06	0.78	0.07
Santa Vitória	0.62	0.04	0.78	0.07	0.70	0.05
Santa Fé	0.79	0.07	0.79	0.07	0.79	0.07
Belo Horizonte	0.79	0.07	0.79	0.07	0.78	0.07
Campo Grande	0.79	0.06	0.79	0.07	0.80	0.07
Corumbá	0.79	0.07	0.79	0.07	0.79	0.07
Coxim	0.51	0.01	0.78	0.06	0.59	0.00
Jardim	0.62	0.00	0.49	0.01	0.61	0.00
Arcoverde	0.74	0.05	0.75	0.06	0.76	0.06
Belém S. Francisco	0.77	0.06	0.80	0.07	0.79	0.07
Petrolina	0.81	0.07	0.80	0.07	0.80	0.07
São José Egito	0.80	0.07	0.77	0.07	0.77	0.07
Açailândia	0.77	0.06	0.76	0.06	0.76	0.06
Coroatá	0.80	0.07	0.79	0.07	0.77	0.07
Riachão	0.79	0.07	0.50	0.00	0.78	0.07
Santa Inês	0.78	0.07	0.77	0.06	0.79	0.07
Urbano Santos	0.66	0.00	0.78	0.07	0.78	0.07
Chapada da Natividade	0.72	0.01	0.85	0.08	0.80	0.07
Anápolis	0.78	0.06	0.77	0.06	0.77	0.06
Lluta Bajo, Arica	0.78	0.07	0.79	0.07	0.79	0.07
Botalcura, Penciahue	0.84	0.08	0.83	0.07	0.81	0.07
El Tambo	0.83	0.08	0.57	0.06	0.78	0.07
Las Rojas, La Serena	0.81	0.07	0.80	0.07	0.81	0.07
Los Despachos, Cauquenes	0.84	0.08	0.84	0.08	0.84	0.08
Coronel de Maule	0.84	0.08	0.84	0.08	0.85	0.08

Considerando o segundo período entre trinta horas e treze dias, para os coeficiente α DFA de irradiação solar, os resultados são mostrados na tabela 7. Observa-se na tabela que o coeficiente α do DFA para cada cidade é essencialmente anti-persistente para os dois fenômenos meteorológicos, inclusive para as cidades avaliadas do Chile.

A cidade de Jardim apresentou comportamento persistentes para ambos os fenômenos meteorológicos e para o período neutro. Três cidades, Urbano Santos (0.56 ± 0.01), Santa Vitoria (0.57 ± 0.03) e Chapada da Natividade (0.79 ± 0.00), apresentaram comportamento persistentes para o fenômeno meteorológico El Niño e a cidade de Belém de São Francisco (0.64 ± 0.02) para o fenômeno meteorológico La Niña. As cidades de Capim (0.58 ± 0.01) e de Coxim (0.54 ± 0.01) apresentaram comportamento persistentes no período neutro.

Tabela 7: Coeficiente DFA (α) de irradiação solar entre trinta horas e treze dias

Cidade	El Niño	Erro	La Niña	Erro	Neutro	Erro
Canindé	0.24	0.01	0.20	0.01	0.24	0.01
Quixeramobim	0.16	0.01	0.22	0.01	0.36	0.02
Capim	0.47	0.01	0.22	0.02	0.58	0.02
São Desidério	0.25	0.02	0.15	0.01	0.27	0.03
Irecê	0.20	0.01	0.24	0.02	0.22	0.01
Piatã	0.22	0.02	0.24	0.02	0.24	0.02
Montes Claros	0.20	0.02	0.21	0.02	0.26	0.02
Santa Vitória	0.57	0.03	0.24	0.02	0.38	0.03
Santa fé	0.18	0.02	0.21	0.02	0.24	0.02
Belo Horizonte	0.27	0.02	0.26	0.02	0.32	0.02
Campo Grande	0.32	0.02	0.28	0.02	0.27	0.02
Corumbá	0.26	0.02	0.28	0.02	0.28	0.02
Coxim	0.48	0.01	0.23	0.01	0.54	0.00
Jardim	0.55	0.01	0.58	0.00	0.50	0.01
Arcoverde	0.24	0.01	0.24	0.01	0.21	0.01
Belém S. Francisco	0.24	0.01	0.64	0.02	0.16	0.01
Petrolina	0.11	0.01	0.24	0.01	0.18	0.02
São José do Egito	0.15	0.01	0.22	0.01	0.22	0.02
Açailândia	0.22	0.01	0.28	0.01	0.24	0.01
Coroatá	0.14	0.01	0.18	0.01	0.25	0.02
Riachão	0.20	0.02	0.49	0.00	0.24	0.02
Santa Inês	0.17	0.01	0.19	0.01	0.19	0.01
Urbano Sales	0.56	0.01	0.20	0.01	0.21	0.01
Chapada da Natividade	0.79	0.00	0.30	0.02	0.45	0.03
Anápolis	0.21	0.02	0.21	0.02	0.24	0.02
Lluta Bajo, Arica	0.12	0.01	0.09	0.01	0.08	0.01
Botalcura, Pencahue	0.35	0.02	0.41	0.02	0.38	0.02
El Tambo	0.26	0.02	0.33	0.02	0.24	0.02
Las Rojas, La Serena	0.18	0.01	0.18	0.01	0.17	0.01
Los Despachos. Cauquena	0.22	0.02	0.24	0.02	0.17	0.02
Coronel Maule	0.20	0.02	0.22	0.02	0.15	0.02

Para analisar o terceiro período dos coeficientes α de DFA, a condição de longo alcance, calculado para representar, mais de treze dias, fez-se o uso da tabela 8. Observa-se na tabela, que no período neutro todas as cidades apresentaram comportamento consistentemente persistentes, com exceção de Campo Grande ($0,47 \pm 0,02$) que apresentou comportamento meramente anti-persistente. Algumas cidades apresentaram comportamento subdifusivos; Canindé ($1,03 \pm 0,05$), São Desidério ($1,13 \pm 0,03$), Santa Vitória ($1,18 \pm 0,02$) para o fenômeno meteorológico El Niño e a cidade de Coxim ($1,03 \pm 0,03$) para o fenômeno meteorológico de La Niña.

A partir dos resultados mostrados na figura 38, verifica-se que qualquer das seis cidades avaliadas do Chile tem comportamento persistente ou subdifusivo para a condição de longo alcance. O menor valor é ($0,73 \pm 0,04$), em Lluta Bajo. El Tambo, Los Despachos e Coronel de Maule apresentaram coeficientes subdifusivos para o fenômeno meteorológico El Niño. Além disso, El Tambo mudou de persistente no período neutro para subdifusivo durante os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña.

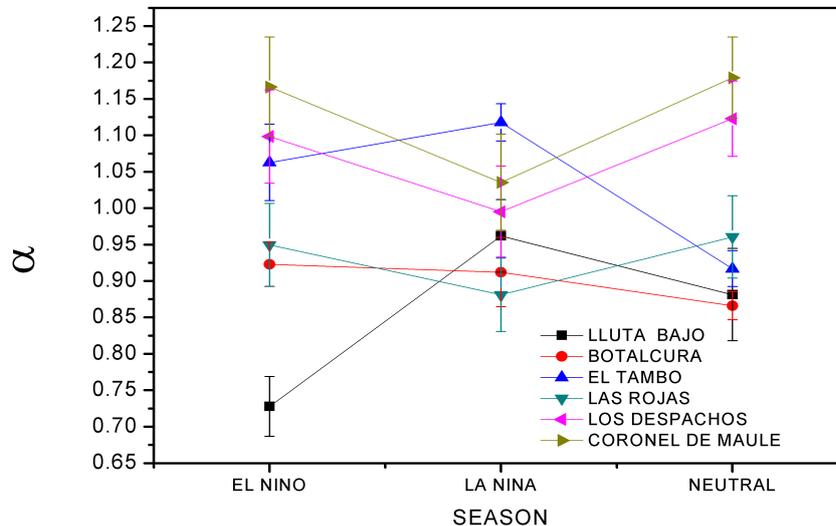


Figura 38: Variação de irradiação solar chilena para uma janela de escala de tempo superior a treze dias.

Analisando a tabela 8 para os coeficientes α de DFA para mais de treze dias, notou-se que algumas cidades apresentaram uma enorme variação do coeficiente α de DFA para a irradiação solar. A figura 39 mostra as variações do coeficiente α para seis cidades.

Tabela 8: Coeficiente de DFA (α) de irradiação solar por mais de treze dias

Cidade	El Niño	Erro	La Niña	Erro	Neutro	Erro
Canidé	1.03	0.05	0.57	0.01	0.62	0.03
Quixeramobim	0.80	0.03	0.63	0.01	0.61	0.01
Capim	0.88	0.03	0.62	0.02	0.67	0.01
São Desidério	1.13	0.03	0.86	0.04	0.61	0.01
Irecê	0.80	0.03	0.65	0.01	0.74	0.02
Piatã	0.86	0.04	0.67	0.01	0.81	0.01
Montes Claros	0.83	0.02	0.91	0.03	0.80	0.02
Santa Vitória	1.18	0.02	0.69	0.01	0.88	0.01
Santa Fé	0.78	0.01	0.82	0.00	0.68	0.01
Belo Horizonte	0.72	0.01	0.86	0.02	0.78	0.02
Campo Grande	0.62	0.00	0.74	0.01	0.47	0.02
Corumbá	0.67	0.00	0.67	0.02	0.70	0.02
Coxim	0.49	0.01	1.03	0.03	0.55	0.01
Jardim	0.76	0.03	0.55	0.00	0.51	0.02
Arco Verde	0.61	0.03	0.52	0.02	0.55	0.01
Belém São Francisco	0.80	0.04	0.64	0.02	0.62	0.01
Petrolina	0.95	0.04	0.67	0.01	0.69	0.01
São José do Egito	0.75	0.04	0.72	0.03	0.72	0.01
Açailândia	0.61	0.03	0.59	0.01	0.57	0.01
Coroatá	0.73	0.03	0.64	0.04	0.72	0.02
Riachão	0.83	0.03	0.47	0.01	0.59	0.01
Santa Inês	0.64	0.02	0.53	0.02	0.65	0.03
Urbano Santos	0.59	0.02	0.59	0.02	0.54	0.03
Chapada da Natividade	0.93	0.01	0.48	0.01	0.91	0.00
Anápolis	0.76	0.00	0.83	0.02	0.65	0.01
Lluta Bajo, Arica	0.73	0.04	0.96	0.05	0.88	0.06
Botalcura, Penciahue	0.92	0.03	0.91	0.05	0.87	0.02
El Tambo	1.06	0.05	1.12	0.03	0.92	0.02
Las Bojas, La Serena	0.95	0.06	0.88	0.05	0.96	0.06
Los Despachos, Cauquenes	1.10	0.06	1.00	0.06	1.12	0.05
Coronel de Maule	1.17	0.07	1.04	0.07	1.18	0.06

Observa-se na figura, que as cidades de Canindé, São Desidério e Santa Vitória foram impactadas pelo fenômeno meteorológico de El Niño, passando de um comportamento persistente para um subdifusivo. A cidade de Coxim passou de um comportamento anti-persistente para um subdifusivo durante o fenômeno meteorológico de La Niña. A cidade da Chapada da Natividade foi impactada pelo fenômeno meteorológico La Niña e atingiu o valor anti-persistente $\alpha = 0.48 (\pm 0,01)$.

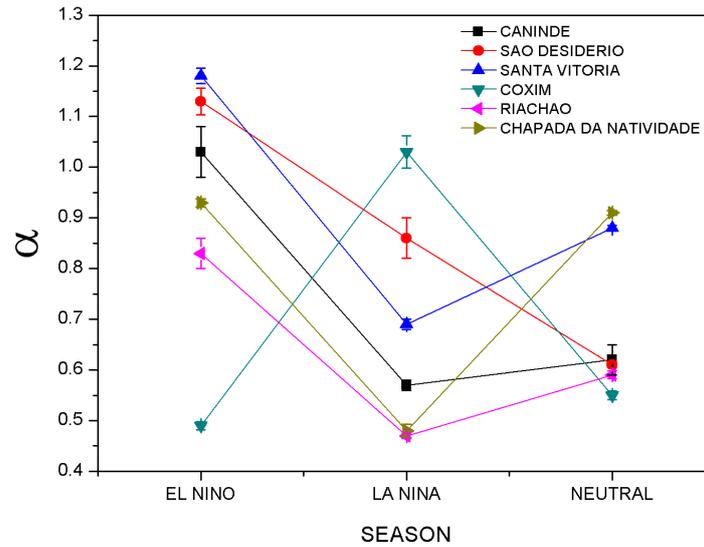


Figura 39: Cidades que apresentaram uma enorme variação do α para irradiação solar em uma janela de escala de tempo maior que treze dias.

A figura 40 apresenta a maior variação do coeficiente α de DFA para a irradiação solar de uma cidade. Na figura observa-se que a cidade de Coxim, apresenta uma grande variação do coeficiente α de DFA, passando de um comportamento anti-persistente no fenômeno meteorológico El Niño (a) para um comportamento subdifusivo durante o fenômeno meteorológico La Niña (b), e se tornou persistente (c) no período neutro para uma janela de escala de tempo de longo alcance.

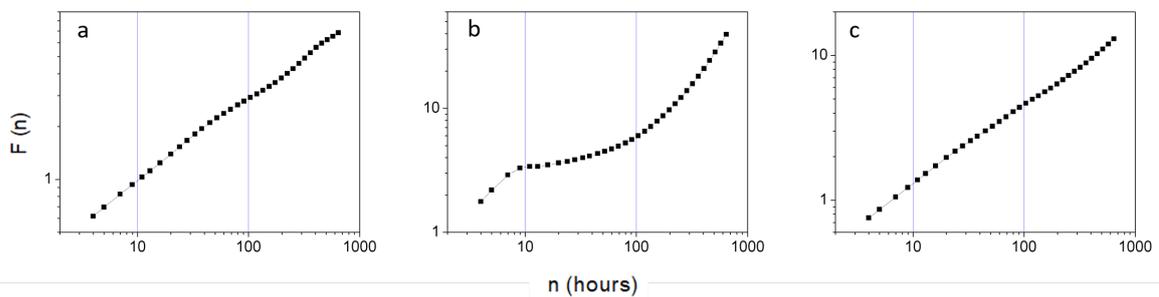


Figura 40: Coxim (MS) é a cidade que apresentou a maior variação do coeficiente α de DFA para a irradiação solar.

Os gráficos plotados para todas as 31 cidades, indicam através do coeficiente α de DFA, a presença de crossover. A figura 40 mostra os crossover para a cidade de Coxim no

período acima de treze dias. Crossover é um ponto de mudança em uma lei de escala, em que um expoente de escala aplica-se a parâmetros de pequena escala e outro expoente de escala aplica-se a parâmetros de grande escala [103].

O gráfico boxplot, apresentado na Figura 41, mostra a distribuição do período dos dados para Coxim. O terceiro quartil e a caixa máxima, em La Niña, são visualmente diferentes de qualquer outro período estudado. O número de outliers também aumentou em comparação com o Neutro e o El Niño. Outliers é, geralmente, uma observação que está muito além da norma em uma amostra aleatória de uma população [104], ou contaminantes [105]. Os outliers podem aumentar a variação do erro e reduzir o poder do teste estatístico, ou diminuir normalidade se não distribuída aleatoriamente. Além disso, pode influenciar estimativas que podem ser de interesse substantivo [106–108]. Outliers também pode indicar a necessidade de mais pesquisas [109].

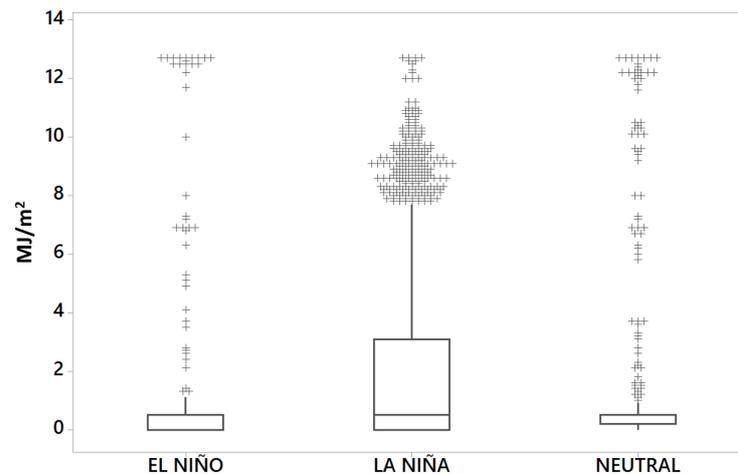


Figura 41: Boxplot de Coxim (MS). A distribuição de La Niña é visualmente diferente, comparada com os períodos de El Niño e Neutro. O número de outliers (+) também aumentou durante o La Niña

Os resultados da avaliação de auto afinidade indicaram, através do expoente de correlação α , a presença de crossover, como visto na figura 40.

O processo subdifusivo, para escala acima de 13 dias, indica uma série dinâmica, como um estado de transição ou condição transitória da irradiação solar. Pode ser comparado a um estado de transição ou condições transitórias, semelhante ao observado [97,98]. Essa característica dificulta a previsibilidade na avaliação de longo prazo da irradiação solar, bem como toma decisões com base nesses conjuntos de dados. Pode ter impacto no Ano

Meteorológico Típico, usado no cálculo da produção anual de energia certificada (CPEC).

Por outro lado, neste mesmo período, algumas cidades apresentaram pequena variação do coeficiente α de DFA, como mostra a figura 42. As cidades de Corumbá, São José do Egito, Acailândia e Urbano Santos apresentaram um comportamento persistente. O intervalo do coeficiente α de DFA em todas as escala de tempo estudadas, não excedeu 0,05. Isso significa alguma estabilidade do conjunto de dados avaliado.

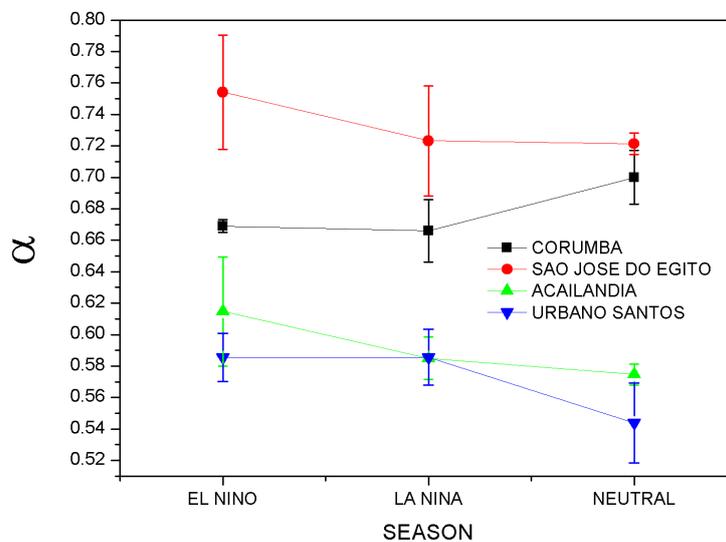


Figura 42: Cidades que apresentaram pequena variação do coeficiente α de DFA de irradiação solar para janela de escala maior que treze dias.

Observa-s na figura 43 que Corumbá é a cidade mais estável entre as trinta e uma cidades avaliadas. A figura mostra que a cidade apresentou a menor variação do coeficiente α de DFA para irradiação solar durante os fenômenos meteorológicos a) El Niño, b) La Niña e c) Neutro, para qualquer janela de escala temporal.

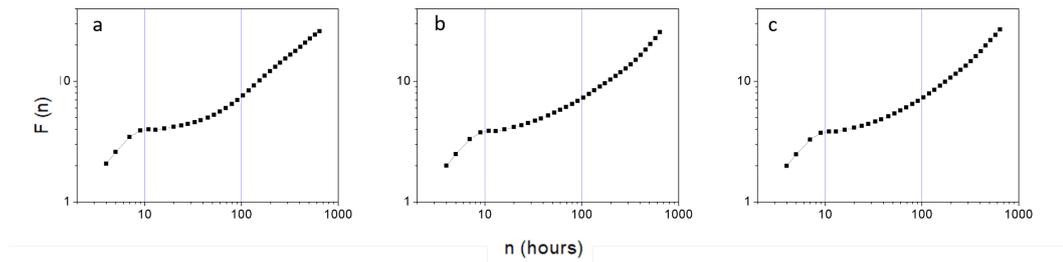


Figura 43: Corumbá (MS) é a cidade mais estável entre as avaliadas.

7.2 El Niño e La Niña Fracos e Moderados

Nesta seção são mostrados os resultados de DFA para os fenômenos climáticos El Niño e La Niña para eventos fracos e moderados, somente para as cidades que apresentaram uma enorme variação do coeficiente α de DFA para irradiação solar em eventos de El Niño muito forte e La Niña forte, conforme mostrado na figura 39. Os dados das séries temporais foram coletados nos períodos de:

- La Niña (Moderado) - 01 de Junho de 2011 à 01 de Junho de 2012 ;
- La Niña (Fraco) - 01 de Junho de 2016 à 01 de Junho de 2017 ;
- El Niño (Moderado) - 01 de Junho de 2009 à 01 de Junho de 2010;
- El Niño (Fraco) - 01 de Junho de 2014 à 01 de Junho de 2015;

A tabela 9 apresenta os resultados da aplicação da metodologia considerando os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña para eventos moderados com os respectivos coeficientes α de DFA . Observa-se na tabela que quatro cidades (Canindé, São Desidério, Santa Vitória e Coxim) apresentaram comportamento persistentes para os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña e Chapada da Natividade para o fenômeno meteorológico de La Niña . As cidades de Riachão e Chapada da Natividade apresentaram comportamentos anti-persistentes para o fenômeno meteorológico de El Niño, enquanto que a cidade de Riachão apresentou comportamento anti-persistente para o fenômeno meteorológico de La Niña. Todas as cidades apresentaram um comportamento persistente no período neutro.

Tabela 9: Coeficiente de DFA (α) da irradiação solar por mais de treze dias, evento moderado

Cidade	El Niño	Erro	La Niña	Erro	Neutro	Erro
Canindé	0,560	0,012	0,760	0,016	0,62	0,03
São Desidério	0,630	0,007	0,750	0,020	0,61	0,01
Santa Vitória	0,610	0,008	0,670	0,030	0,88	0,01
Coxim	0,550	0,004	0,510	0,001	0,55	0,01
Riachão	0,500	0,013	0,440	0,005	0,59	0,01
Chapada da Natividade	0,490	0,030	0,690	0,017	0,91	0,07

Considerando os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña para eventos fracos, têm-se os resultados apresentados na tabela 10. Observa-se que, diferente do observado na tabela 8, nos eventos fracos todas as cidades tiveram comportamento persistentes para os dois fenômenos meteorológicos e para o período neutro.

Tabela 10: Coeficiente de DFA (α) da irradiação solar por mais de treze dias, evento fraco

Cidade	El Niño	Erro	La Niña	Erro	Neutro	Erro
Canindé	0,570	0,012	0,860	0,025	0,62	0,03
São Desidério	0,980	0,030	0,980	0,030	0,61	0,01
Santa Vitória	0,810	0,030	0,840	0,030	0,88	0,01
Coxim	0,660	0,003	0,630	0,008	0,55	0,01
Riachão	0,680	0,020	0,530	0,007	0,59	0,01
Chapada da Natividade	0,880	0,003	0,880	0,024	0,91	0,07

A figura 44 mostra a variação do fenômeno meteorológico El Niño para os eventos classificados como muito forte, moderado e fraco, em seis cidades com maiores variações do coeficiente α . Observa-se que, o fenômeno meteorológico El Niño, nas cidades São Desidério, Santa Vitória e Canindé passaram de subdifusivo no evento muito forte para um comportamento persistente nos eventos moderado e fraco. Enquanto que a cidade de Riachão permaneceu com o comportamento persistente para os três eventos (muito forte, moderado e fraco). A cidade de Coxim passou de um comportamento anti-persistente no evento muito forte para um comportamento persistente nos dois outros eventos (moderado e fraco) e a cidade de Chapada da Natividade permaneceu com um comportamento

persistente para os eventos muito forte e fraco, com um comportamento anti-persistente no evento moderado, mas muito próximo do intervalo do comportamento persistente.

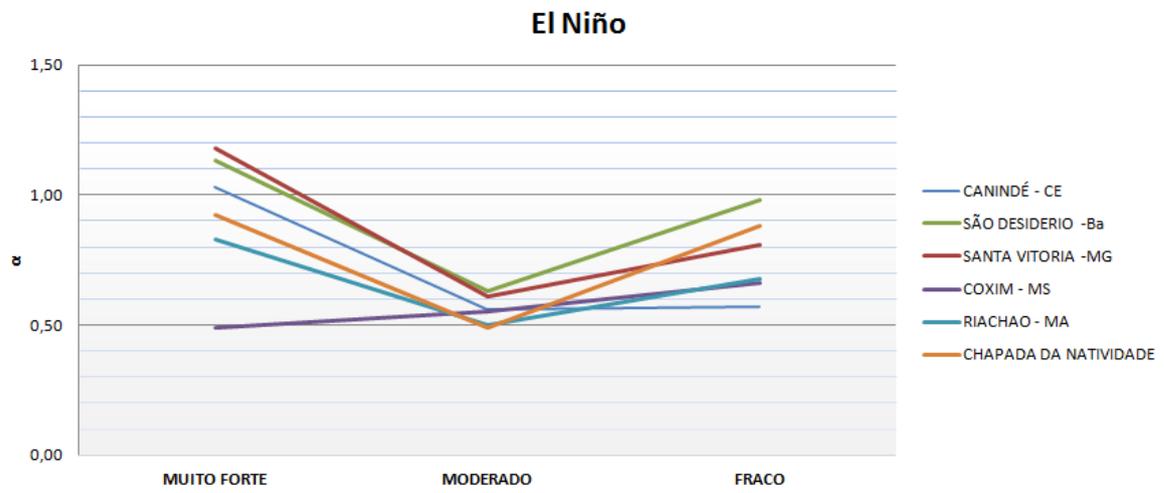


Figura 44: Variação de El Niño para eventos Muito forte, Moderado e Fraco.

Para analisar as variações do fenômeno meteorológico La Niña nos eventos classificados como forte, moderado e fraco, fez-se uso da figura 45. Observa-se que, as cidades de Canindé, São Desidério, Santa Vitória permaneceram com um comportamento persistente para os três eventos (forte, moderado e fraco). A cidade de Coxim passou de um comportamento subdifusivo no evento forte para um comportamento persistente nos eventos moderado e fraco. Enquanto Riachão permaneceu com um comportamento anti-persistente nos eventos forte e moderado, passando para um comportamento persistente no evento fraco.

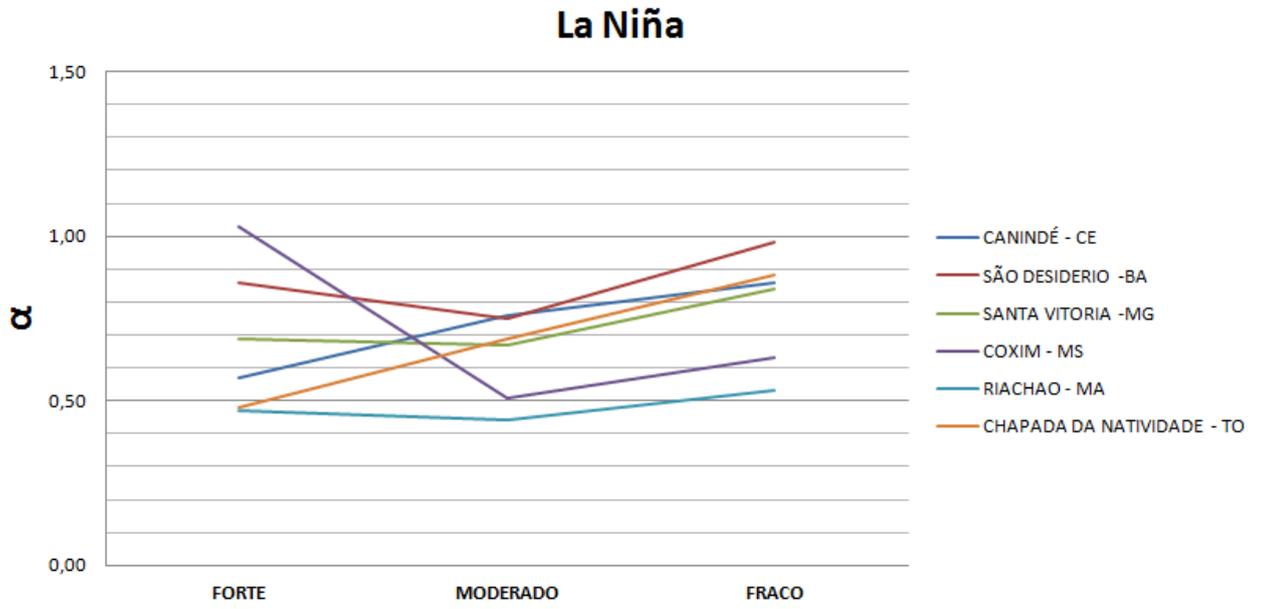


Figura 45: Variação de La Niña para eventos Forte, Moderado e Fraco.

8 CONCLUSÕES

Nesta tese, foi analisada a auto afinidade das séries temporais da variável meteorológica irradiação solar, coletadas em cidades do Brasil e Chile. O trabalho apresentado mostrou o desenvolvimento de uma metodologia para verificar os impactos dos fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña na geração de energia solar fotovoltaica.

O período neutro de tempo é caracterizado principalmente pelo comportamento persistente, determinado como um estado desejado. Os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña mostraram algumas variações no coeficiente α de DFA, às vezes passando de persistente para anti-persistente ou subdifusivo na mesma cidade. Isso significa que os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña afetam o comportamento das séries temporais de irradiação solar na América do Sul. Esse impacto não é homogêneo na região, nem é um comportamento uniforme para todas as cidades estudadas.

Os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña não apresentaram um padrão geral em relação à irradiação solar, diferentemente das chuvas no Brasil, onde o Norte-Nordeste do Brasil experimenta um aumento na precipitação e o Sul fica seco durante o La Niña, enquanto o El Niño ocorre ao contrário.

O processo subdifusivo indica uma série dinâmica, como um estado de transição ou condição transitória. Nessa condição, se as medições, para o CPEC fossem coletadas durante os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña, poderia afetar a avaliação da eficiência da usina solar prevista naquela região.

Os diferentes comportamentos encontrados, para o mesmo local, podem levar a uma avaliação que não representa o potencial de geração de energia fotovoltaica a longo prazo, estimado em um período de dez anos. É uma nova implicação para a previsão de geração de energia elétrica a partir da fonte solar em larga escala.

Essa avaliação usando o DFA pode ser complementar aos outros métodos já em uso, para validar os dados coletados. Inicialmente, também pode ser sugerido evitar o período ENSO para coletar os dados locais para o CPEC. Por outro lado, estudos futuros devem

focar no uso de métodos complexos e no desenvolvimento de modelos computacionais para melhorar o CPEC, tentando correlacionar períodos neutros com o comportamento modificado pelos fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña.

Os governos podem atualizar suas políticas de energia para projetos de usinas solares, com base nesse comportamento climático. O Chile, por exemplo, obriga novos projetos de usinas solares a serem competitivos em um mercado livre [63], mas uma previsão baseada em um comportamento subdifusivo pode levar a uma decisão errada.

Até onde sabe-se, é a primeira vez que avalia-se a auto-afinidade da irradiação solar, em uma grande área da América do Sul, para revelar as mudanças na flutuação das séries temporais, afetando o comportamento climático da região, devido aos fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña. Essa avaliação é um ponto de partida para entender os efeitos dos fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña no projeto de usina solar, comparando essas séries temporais no mesmo local.

Finalmente, como proposta para trabalhos futuros diretamente relacionados ao tema abordado, tem-se:

- Avaliar as auto afinidades das outras variáveis meteorológicas;
- Realizar estudos de viabilidade econômica com base nos fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña;
- Avaliar as correlações cruzadas $DCCA$ entre séries temporais de irradiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento, durante os fenômenos meteorológicos El Niño, La Niña e períodos neutros, para cada estação meteorológica;
- Avaliar o coeficiente de correlação cruzada $\rho DCCA$ entre séries temporais de irradiação solar e temperatura durante os fenômenos meteorológicos El Niño, La Niña e períodos neutros.

REFERÊNCIAS

- [1] H.Voltolini. *Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com Aplicação em Sistemas Eólicos*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2007.
- [2] Luis Claudio de Matos Lima Junior. Avaliação experimental das perturbações causadas por diferentes tipos de sistemas de controle em usinas eólicas. Master's thesis, Universidade de São Paulo (USP), 2013.
- [3] Janet L Sawin, Freyr Sverrisson, Kanika Chawla, Christine Lins, Rana Adib, Martin Hullin, Sarah Leitner, Stefano Mazzaccaro, Hannah Murdock, Laura E Williamson, et al. Renewables 2018. global status report 2018. 2018.
- [4] Newmark Heiner da Cunha Carvalho. Modelagem de processo de negócio de geração solar fotovoltaica ou eólica de pequeno porte no contexto da resolução normativa aneel n 482/2012. Master's thesis, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos (ITA), 2014.
- [5] Bruno Burger. Power generation in germany – assessment of 2018. Technical report, FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE, 2018.
- [6] Cesar Endrigo Alves Bardelin. Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica. Master's thesis, Escola Politécnica, University of São Paulo, 2004.
- [7] Mauricio Tolmasquim. As origens da crise energética brasileira. *Revista Ambiente e Sociedade*, 2000.
- [8] Marcio Tancredi and Omar Alves Abbud. Por que o brasil está trocando as hidrelétricas e seus reservatórios por energia mais cara e poluente? Technical report, Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado Federal, 2013.
- [9] Jucilene Galvão and Célio Bermann. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. *Revista Ambiente e Sociedade*, 2015.
- [10] Oliver L. Phillips, Luiz E. O. C. Aragão, Simon L. Lewis, Joshua B. Fisher, Jon Lloyd, Gabriela López-González, Yadvinder Malhi, Abel Monteagudo, Julie Peacock, Carlos A. Quesada, Geertje van der Heijden, Samuel Almeida, Iêda Amaral, Luzmila Arroyo, Gerardo Aymard, Tim R. Baker, Olaf Bánki, Lilian Blanc, Damien Bonal, Paulo Brando, Jerome Chave, Átila Cristina Alves de Oliveira, Nallarret Dávila Cardozo, Claudia I. Czimczik, Ted R. Feldpausch, Maria Aparecida Freitas, Emanuel Gloor, Niro Higuchi, Eliana Jiménez, Gareth Lloyd, Patrick Meir, Casimiro Mendoza, Alexandra Morel, David A. Neill, Daniel Nepstad, Sandra Patiño, Maria Cristina Peñuela, Adriana Prieto, Fredy Ramírez, Michael Schwarz, Javier

- Silva, Marcos Silveira, Anne Sota Thomas, Hans ter Steege, Juliana Stropp, Rodolfo Vásquez, Przemyslaw Zelazowski, Esteban Alvarez Dávila, Sandy Andelman, Ana Andrade, Kuo-Jung Chao, Terry Erwin, Anthony Di Fiore, Eurídice Honorio C., Helen Keeling, Tim J. Killeen, William F. Laurance, Antonio Peña Cruz, Nigel C. A. Pitman, Percy Núñez Vargas, Hirma Ramírez-Angulo, Agustín Rudas, Rafael Salamão, Natalino Silva, John Terborgh, and Armando Torres-Lezama. Drought sensitivity of the amazon rainforest. *Science*, 323(5919):1344–1347, 2009.
- [11] Simon L. Lewis, Paulo M. Brando, Oliver L. Phillips, Geertje M. F. van der Heijden, and Daniel Nepstad. The 2010 amazon drought. *Science*, 331(6017):554–554, 2011.
- [12] Amir Erfanian, Guiling Wang, and Lori Fomenko. Unprecedented drought over tropical south america in 2016: significantly under-predicted by tropical sst. *Scientific reports*, 7(1):5811, 2017.
- [13] Jose A Marengo, Roger Rodrigues Torres, and Lincoln Muniz Alves. Drought in northeast brazil - past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4):1189–1200, 2017.
- [14] MME. Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro - janeiro/2019. Available in: <https://ww.mme.gov.br>, 2019.
- [15] Joseph L Awange, Freddie Mpelasoka, and Rodrigo M Goncalves. When every drop counts: Analysis of droughts in brazil for the 1901-2013 period. *Science of the Total Environment*, 566:1472–1488, 2016.
- [16] Pieter de Jong, Clemente Augusto Souza Tanajura, Antonio Santos Sánchez, Roger Dargaville, Asher Kiperstok, and Ednildo Andrade Torres. Hydroelectric production from brazil's são francisco river could cease due to climate change and inter-annual variability. *Science of the Total Environment*, 634:1540–1553, 2018.
- [17] Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2016: Ano base 2015. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2016.
- [18] F.R. Martins, E.B. Pereira, and S.L. Abreu. Satellite-derived solar resource maps for brazil under swera project. *Sol. Energy* 81, 2007.
- [19] Instituto nacional de pesquisas espaciais - inpe. <http://bancodedados.cptec.inpe.br/>. Accessed: 2017-04-30.
- [20] David Watts, Pablo Durán, and Yarela Flores. How does el niño southern oscillation impact the wind resource in chile? a techno-economical assessment of the influence of el niño and la niña on the wind power. *Renewable energy*, 103:128–142, 2017.
- [21] Agencia nacional de energia elétrica - aneel. <http://www.aneel.gov.br/>. Accessed: 2018-04-05.
- [22] Roger A.Hinrichs, Merlin Kleinbach, and Lineu Belico dos Reis. *Energia e Meio Ambiente*. Cengage Learning, 2014.
- [23] E. B PEREIRA, F.R. MARTINS, S. L. de ABREU, and R RÜTHER. Atlas brasileiro de energia solar 2017: Ano base 2016. Technical report, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. – São José dos Campos : INPE, 2017.

- [24] Fernando Moreira da Silva, Fernando Moreira da Silva, Marcelo dos Santos Chaves, and Zuleide Maria C. Lima. Variáveis meteorológicas. In *Geografia Física II*. EDUFRRN, 2009.
- [25] A. R. GXASHEKA, E.E. Van Dyk, and E.L. Meyer. Evaluation of performance parameters of pv modules deployed outdoors. *Renewable Energy*, 30:614, 2005.
- [26] Carlos Wilhelm Massen Prieb. Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos. Master's thesis, Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP - Campus de Botucatu, 2002.
- [27] C. Honsberg and S. Bowden. *PVCDrom- Photovoltaics CDrom part1:Photovoltaics devices*. University of new South Wales,Australia, 1999.
- [28] Rogério Tronco Vassoler. Coeficiente dcca de correlação cruzada aplicado a séries de temperatura do ar e umidade relativa do ar. Master's thesis, Senai/Cimatec, 2012.
- [29] A NDIAYE, A Charki, kobi A, C kébé, ndiaye P, and V. sambou. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. *Solar Energy 96*, pages 140–151, 2013.
- [30] Ken Dragoon and Adam Schumaker. Solar pv variability and grid integration. *Renewable Northwest Project Report*, 2010.
- [31] Heitor Scalabrini Costa. Por que a energia solar não deslança no brasil. *Carta Capital*, 2015.
- [32] P. C. PALZ. *Energia solar e fontes alternativas*. Hemus, 1995.
- [33] Associação Brasileira de Normas Técnicas -ABNT, Rio de Janeiro. *NBR 10899 - Energia solar fotovoltaica-Terminologia*, 2013.
- [34] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Technical report, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar - Rio de Janeiro: CRESESB, 1999.
- [35] National laboratory of the U.S. Department of Energy. Nrel international programs. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1997.
- [36] F. J. L. Lima. *Previsão de Irradiação Solar no Nordeste do Brasil Empregando o modelo WRF Ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)*. PhD thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 2015.
- [37] Vasilis Fthenakis, Adam A Atia, Marc Perez, Alejandro Florenzano, Mario Grageda, Marco Lofat, Svetlana Ushak, and Rodrigo Palma. Prospects for photovoltaics in sunny and arid regions: A solar grand plan for chile-part i-investigation of pv and wind penetration. In *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th*, pages 1424–1429. IEEE, 2014.
- [38] U.S. Department of Commerce - International Trade Administration. 2016 top markets report renewable energy. country case study: Chile. Technical report, 2016.

- [39] British Chilean Chamber of Commerce. Chilean economic report: second quarter 2016. Technical report, 2016.
- [40] Bloomberg Finance L.P. 2017. Climatescope 2017: Emerging markets clean energy investment. <http://global-climatescope.org/en/insights/emerging-markets-investment/>. Accessed: 2018-10-09.
- [41] Agencia nacional de energia elétrica - aneel. <http://http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/UsinaListaSelecao.asp///>. Accessed: 2018-05-09.
- [42] National oceanic and atmospheric administration - noaa. <https://www.climate.gov//>. Accessed: 2017-12-15.
- [43] Kevin E. Trenberth. The definition of el niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12):2771–2778, 1997.
- [44] Centro de previsão de tempo e estudos climáticos - cptec. <http://enos.cptec.inpe.br///>. Accessed: 2018-01-10.
- [45] Sang-Wook Yeh, Jong-Seong Kug, Boris Dewitte, Min-Ho Kwon, Ben P Kirtman, and Fei-Fei Jin. El nino in a changing climate. 2009.
- [46] Jong-Seong Kug, Fei-Fei Jin, and Soon-Il An. Two Types of El Niño Events: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño. *Journal of Climate*, 22(6):1499–1515, 2009.
- [47] Scott B POWER and Ian N SMITH. Weakening of the walker circulation and apparent dominance of el niño both reach record levels, but has enso really changed? *Geophysical research letters*, 34(18), 2007.
- [48] Mat Collins, Soon-Il An, Wenju Cai, Alexandre Ganachaud, Eric Guilyardi, Fei-Fei Jin, Markus Jochum, Matthieu Lengaigne, Scott Power, Axel Timmermann, et al. The impact of global warming on the tropical pacific ocean and el niño. *Nature Geoscience*, 3(6):391, 2010.
- [49] Eugene M Rasmusson and Thomas H Carpenter. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern oscillation/el niño. *Monthly Weather Review*, 110(5):354–384, 1982.
- [50] Michael J McPhaden, Stephen E Zebiak, and Michael H Glantz. Enso as an integrating concept in earth science. *science*, 314(5806):1740–1745, 2006.
- [51] James R Holton and Renata Dmowska. *El Niño, La Niña, and the southern oscillation*, volume 46. Academic press, 1989.
- [52] NH Saji, BN Goswami, PN Vinayachandran, and T Yamagata. A dipole mode in the tropical indian ocean. *Nature*, 401(6751):360, 1999.
- [53] Paulo Henrique Cirino, José Gustavo Féres, Marcelo José Braga, and Eustáquio Reis. Assessing the impacts of enso-related weather effects on the brazilian agriculture. *Procedia Economics and Finance*, 24:146–155, 2015.

- [54] Alice M Grimm. The el niño impact on the summer monsoon in brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate*, 16(2):263–280, 2003.
- [55] Stefan Hastenrath. Predictability of north-east brazil droughts. *Nature*, 307(5951):531, 1984.
- [56] José A Marengo. Interdecadal variability and trends of rainfall across the amazon basin. *Theoretical and applied climatology*, 78(1-3):79–96, 2004.
- [57] Aldo Montecinos and Patricio Aceituno. Seasonality of the enso-related rainfall variability in central chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate*, 16(2):281–296, 2003.
- [58] Vicente de Paulo da Silva, Roberta Araujo , e Silva, Enilson Palmeira Cavalcanti, Celia Campos Braga, Pedro Vieira de Azevedo, Vijay P. Singh, and Emerson Ricardo Rodrigues Pereira. Trends in solar radiation in ncep/ncar database and measurements in northeastern brazil. *Solar Energy*, 84:1852–1862, 2010.
- [59] R. Bravo1 and D. Friedrich. Two-stage optimisation of hybrid solar power plants. *Solar Energy*, 164:187–199, 2018.
- [60] C. D. Papadimas, A. K. Fotiadi, N. Hatzianastassiou, I. Vardavas, and A. Bartzokas. Regional co-variability and teleconnection patterns in surface solar radiation on a planetary scale. *Int. J. Climatol*, 30:2314–2329, 2010.
- [61] Eduardo Bonnuncielli Marafiga. *Pesquisa sobre o efeito de fenômenos solares no potencial energético solar-eólico*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- [62] P. A. Morettin and C. M. C. Toloí. *Análise de Séries Temporais, ABE - Projeto Fisher*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.
- [63] Aloisio Machado da Silva Filho. Correlação de longo alcance em indicadores de criminalidade de salvador-ba: Dfa e dcca. Master’s thesis, Senai/Cimatec, 2009.
- [64] Basilio de Bragança PEREIRA. Séries temporais multivariadas. *SINAPE-Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística*, 1984.
- [65] P. A. Morettin and C. M. C. Toloí. *Análise de Séries Temporais, 3.ed, ABE - Projeto Fisher*. São Paulo: Edgard Blucher, 2018.
- [66] Celia Anteneodo. Processos estocásticos v - escola do cento brasileiro de pesquisas físicas. CBPF, 2004.
- [67] P. A. Morettin and C. M. C. Toloí. *Previsão de séries temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 1987.
- [68] Aureliano Angel Bressan. Tomada de decisão em futuros agropecuários com modelos de previsão de séries temporais. *Fundação Getulio Vargas – Escola de Administração de Empresas de São Paulo*, 2004.
- [69] Gilnei F. Zebende. Dcca cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A*, 390:614–618, 2011.

- [70] Jens Feder. *Fractals*. Nova York:Plenum Press, 1988.
- [71] H. E Hurst, R. P Black, and Y. M Simaika. *Long-term storage : an experimental study*. London : Constable, 1965.
- [72] J Orlin Grabbe. *International financial markets*. Prentice Hall, 1996.
- [73] Harold Edwin Hurst. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, 116:770–799, 1951.
- [74] C. K PENG, S. V.and HAVLIN S. BULDYREV, M.and STANLEY H. E. SIMONS, and A. L. GOLDBERGER. On the mosaic organization of dna sequences. *Physical Review E*, 49:1685–1689, 1994.
- [75] ANS Filho, GF Zebende, and MA Moret. Self-affinity of vehicle demand on the ferry-boat system. *International Journal of Modern Physics C*, 19(04):665–669, 2008.
- [76] JWG Souza, AAB Santos, LLN Guarieiro, and MA Moret. Fractal aspects in o2 enriched combustion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 434:268–272, 2015.
- [77] PH Figueirêdo, MA Moret, PG Pascutti, E Nogueira, and Sérgio Coutinho. Self-affine analysis of protein energy. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(13):2682–2686, 2010.
- [78] SM Azevedo, H Saba, JGV Miranda, AS Nascimento Filho, and MA Moret. Self-affinity in the dengue fever time series. *International Journal of Modern Physics C*, 27(12):1650143, 2016.
- [79] Marcelo A Moret, GF Zebende, E Nogueira Jr, and MG Pereira. Fluctuation analysis of stellar x-ray binary systems. *Physical Review E*, 68(4):041104, 2003.
- [80] MA Moret. Self-affinity and nonextensivity of sunspots. *Physics Letters A*, 378(5):494–496, 2014.
- [81] K Ivanova and Marcel Ausloos. Application of the detrended fluctuation analysis (dfa) method for describing cloud breaking. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 274(1):349–354, 1999.
- [82] K Ivanova, M Ausloos, EE Clothiaux, and TP Ackerman. Break-up of stratus cloud structure predicted from non-brownian motion liquid water and brightness temperature fluctuations. *EPL (Europhysics Letters)*, 52(1):40, 2000.
- [83] Priscilla Sales dos Anjos, Antonio Samuel Alves da Silva, Borko Stošić, and Tatijana Stošić. Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from fernando de noronha island, brazil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 424:90–96, 2015.
- [84] Maíra de Oliveira Santos, Tatijana Stosic, and Borko D Stosic. Long-term correlations in hourly wind speed records in pernambuco, brazil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4):1546–1552, 2012.

- [85] RB Govindan and H Kantz. Long-term correlations and multifractality in surface wind speed. *EPL (Europhysics Letters)*, 68(2):184, 2004.
- [86] Rajesh G Kavasseri and Radhakrishnan Nagarajan. A multifractal description of wind speed records. *Chaos, Solitons & Fractals*, 24(1):165–173, 2005.
- [87] Kasım Koçak. Examination of persistence properties of wind speed records using detrended fluctuation analysis. *Energy*, 34(11):1980–1985, 2009.
- [88] ML Kurnaz. Application of detrended fluctuation analysis to monthly average of the maximum daily temperatures to resolve different climates. *Fractals*, 12(04):365–373, 2004.
- [89] Xi Chen, Guangxing Lin, and Zuntao Fu. Long-range correlations in daily relative humidity fluctuations: A new index to characterize the climate regions over china. *Geophysical research letters*, 34(7), 2007.
- [90] Christos Matsoukas, Shafiqul Islam, and Ignacio Rodriguez-Iturbe. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamflow time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D23):29165–29172, 2000.
- [91] Peter Talkner and Rudolf O Weber. Power spectrum and detrended fluctuation analysis: Application to daily temperatures. *Physical Review E*, 62(1):150, 2000.
- [92] Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, and Jun Meng. Nonlinear characteristics of observed solar radiation data. *Solar Energy*, 87:204–218, 2013.
- [93] Ata Madanchi, M Absalan, G Lohmann, M Anvari, and M Reza Rahimi Tabar. Strong short-term non-linearity of solar irradiance fluctuations. *Solar Energy*, 144:1–9, 2017.
- [94] C-K Peng, Shlomo Havlin, H Eugene Stanley, and Ary L Goldberger. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 5(1):82–87, 1995.
- [95] Bruce D Malamud and Donald L Turcotte. Self-affine time series: measures of weak and strong persistence. *Journal of statistical planning and inference*, 80(1):173–196, 1999.
- [96] CEC Galhardo, TJP Penna, M Argollo de Menezes, and PPS Soares. Detrended fluctuation analysis of a systolic blood pressure control loop. *New Journal of Physics*, 11(10):103005, 2009.
- [97] AS Nascimento Filho, JWG de Souza, ARB Pereira, AAB Santos, IC da Cunha Lima, AT da Cunha Lima, and MA Moret. Comparative analysis on turbulent regime: A self-affinity study in fluid flow by using openfoam cfd. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 474:260–266, 2017.
- [98] AS Nascimento Filho, MLV Araújo, JGV Miranda, TB Murari, H Saba, and MA Moret. Self-affinity and self-organized criticality applied to the relationship between the economic arrangements and the dengue fever spread in bahia. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 502:619–628, 2018.

- [99] Weather underground. <https://www.wunderground.com/>. Accessed: 2017-04-30.
- [100] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Technical report, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar - Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.
- [101] International Organization for Standardizations -ISO, Geneva. *ISO 9060 - Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*, 1990.
- [102] Kipp zonen b.v. instruments =.
- [103] Jan W Kantelhardt. Fractal and multifractal time series. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pages 3754–3779. Springer, 2009.
- [104] James P Stevens. Outliers and influential data points in regression analysis. *Psychological Bulletin*, 95(2):334, 1984.
- [105] Howard Wainer. Robust statistics: A survey and some prescriptions. *Journal of Educational Statistics*, 1(4):285–312, 1976.
- [106] Steven J Schwager, Barry H Margolin, et al. Detection of multivariate normal outliers. *The annals of statistics*, 10(3):943–954, 1982.
- [107] Donald W Zimmerman. A note on the influence of outliers on parametric and nonparametric tests. *The journal of general psychology*, 121(4):391–401, 1994.
- [108] Jeffrey Lee Rasmussen. Evaluating outlier identification tests: Mahalanobis d squared and comrey dk. *Multivariate Behavioral Research*, 23(2):189–202, 1988.
- [109] Jason W Osborne and Amy Overbay. The power of outliers (and why researchers should always check for them). *Practical assessment, research & evaluation*, 9(6):1–12, 2004.

APÊNDICE A – ALGORITMO

```

DFA clear all

clc

close all

m = xlsread('Estacao32493.xls','G3 : G2920');
m1= xlsread('Estacao32493.xls','G3 : G2920');
mm = xlsread('Estacao32493.xls','M3 : M2920');
mm1 = xlsread('Estacao32493.xls','M3 : M2920');
m2= xlsread('Estacao32493.xls','N3 : N2920');
mm2 = xlsread('Estacao32493.xls','N3 : N2920');
y2=[1:1:size(m)]; y4=[1:1:size(m1)]; Y22=[1:1:size(mm)]; Y44=[1:1:size(m2)];
n= [7:7:size(m1)];

N13=length(n); Fn=zeros(N13,1); for i=1:N13 [soma1(i), soma2(i),soma3(i), Yn, Xn,
X, N1, media_Z] = DFAT_Alpha(m, mm, m2, n(i), 1); end

for i=1:N13 Alpha(i) = log (soma1(i))/ log (n(i));Alpha2(i) = log (soma2(i))/ log
(n(i));Alpha3(i) = log (soma3(i))/ log (n(i));end

y3=[1:1:size(Yn)];

Aj1 = [Alpha; Alpha2; Alpha3]'; Aj = [Aj1 Aj1(:,3)]';

pcolor(Aj)

set(gca,'FontSize',15) set(gca,'FontWeight','bold') set(gca,'LineWidth',1)

title(['Evolução Temporal do Expoente']) xlabel('Tempo') set(gca,'FontSize',15) yla-
bel('Variáveis ') set(gca,'FontSize',10) set(gca,'xtick',[1:50:328]) set(gca,'XTickLabel',[0:500:6000])
set(gca,'ytick',[1.5:1:5]) set(gca,'YTickLabel','irradiação Solar (Mj/m²)', 'VelocidadedoVento(m/s)',

```

```

colorbar('fontsize',10)

DCCA

clear all clc close all

m = xlsread('Estacao.xls','C13:C512'); m1 = xlsread('Estacao.xls','D13:D512');
y2=[1:1:size(m)]; n= [20, 25, 50, 100];

N13=length(n); for i=1:N13 [FDCCAA(i)ajuste, soma1, soma2, Yn, XnX] = DCCA(m, m1, n(i))
y3=[1:1:size(Yn)];

hold on plot(y2,m1, 'b',... y3,X, 'r'); plot(y3,Xn, 'g',... 'LineWidth',1.5)

xlabel('n') ylabel('F(n)')

figure

A=polyfit((n(1:end)),(FDCCAA(1 : end)), 1); B = polyval((A), (n(1 : end))); Alpha1 =
abs(A(1));

plot(log10(n),log10((FDCCAA)), 'b*', ...log10(n), log10(B), 'r'); xlabel('n(dias)')ylabel('FDCCAA(n)
, num2str(Alpha1)', 'FontSize', 15)title('FDCCAAApara500dias', 'FontSize', 10)

hold off

RDCCA

clear all clc close all

m = xlsread('Estacao.xls','C13:C512'); m1 = xlsread('Estacao.xls','D13:D512');

y2=[1:1:size(m)];

n= [4,5,7,9,11,13,16,20,24,28,33,38,45,52,60,69,80,91,104,119];

N13=length(n); for i=1:N13 [FDCCAA(i)ajuste, soma1, soma2, Yn, XnX] = DCCA(m, m1, n(i))
DFAT(m, n(i), 1); [Fn1(i), ajuste, Yn, y, nn] = DFAT(m1, n(i), 1); RDCCAA(i) = FDCCAA(i)/(Fn
Fn1(i)); end

A=polyfit(log10(n(1:end)),log10(RDCCAA(1 : end)), 1);

B= polyval ((A),log10((n(1:end)))); Alpha1=abs(A(1));

plot((n),(RDCCAA),'b*');

xlabel('n (dias)') ylabel('CDCCAA(n)')legend('Coeficientesdasjanelas','Coeficientedareta');text
, num2str(Alpha1)', 'FontSize', 15)title('FDCCAAApara500dias', 'FontSize', 10)

```