



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE - PPGEA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR E
DA TEMPERATURA NA CIDADE DE SÃO LUÍS/MA**

São Luís - MA
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE - PPGEA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR E
DA TEMPERATURA NA CIDADE DE SÃO LUÍS/MA**

Trabalho de conclusão final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão.

Discente: Maxwell Ferraz dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Jaiver Efen Jaimes Figueroa

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Alexander Vargas Bazán

São Luís - MA
2023

MAXWELL FERRAZ DOS SANTOS

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA SÉRIE HISTÓRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR E
DA TEMPERATURA NA CIDADE DE SÃO LUÍS/MA**

Trabalho de conclusão final apresentado ao Programa
de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da
Universidade Federal do Maranhão.

Discente: Maxwell Ferraz dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Alexander Vargas Bazán

São Luís - MA, 16 de novembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Leite Coelho (Prof. Interno)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof. Dr. Iván Darío Gómez Araújo (Prof. Externo)
Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Santos, Maxwell Ferraz dos.

Análise probabilística da série histórica da irradiação solar e da temperatura na cidade de São Luís/MA / Maxwell Ferraz dos Santos. - 2023.

67 f.

Coorientador(a): Felipe Alexander Vargas Bazán.

Orientador(a): Jaiver Efren Jaimes Figueroa.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2023.

1. Análise Probabilística. 2. Confiabilidade. 3. Energia Solar. 4. Irradiação Solar. 5. Temperatura. I. Bazán, Felipe Alexander Vargas. II. Figueroa, Jaiver Efren Jaimes. III. Título.

RESUMO

Conhecer as variáveis de uma região permite a realização de análises através de sua utilização, como, por exemplo, no setor de energia solar. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre as distribuições de probabilidades da irradiação solar e da temperatura, tendo como base a série histórica da cidade de São Luís - MA, a fim de ter informações suficientes para aplicações que contenham essas variáveis. A metodologia adotada foi a coleta de dados do período de 2018 a 2022 no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o tratamento desses dados em planilhas, seguido de um procedimento para determinação do modelo teórico de distribuição de probabilidades que se ajuste aos dados coletados, isto é, uma distribuição teórica que represente de maneira adequada as variáveis observadas: irradiação solar e temperatura. Em seguida, após a definição do modelo probabilístico para cada variável, foram contemplados casos de aplicação envolvendo energia fotovoltaica, como um caso de perda de produção por temperatura e, o outro caso, uma análise da potência fotovoltaica, sendo está resolvida por meio dos métodos de confiabilidade FORM e Simulação de Monte Carlo. O procedimento de ajuste de modelos teóricos levou à conclusão de que a irradiação solar e a temperatura, referentes à cidade de São Luís - MA, podem ser satisfatoriamente representadas, respectivamente, pelas distribuições normal e uniforme. Nas análises dos casos estudados foi obtido um resultado satisfatório para a aplicação da perda de produção por temperatura e insatisfatório para o caso da análise da potência fotovoltaica, ou seja, as características de temperatura e irradiação solar da cidade de São Luís tiveram importante influência na análise. Além disso, mostrou-se a importância do uso de procedimentos computacionais para a realização desses procedimentos envolvendo variáveis aleatórias, considerando a quantidade de dados a serem manuseados e a quantidade de simulações necessárias para a realização da análise de confiabilidade.

Palavras-Chave: Energia Solar. Irradiação Solar. Temperatura. Distribuições de Probabilidades. Análise Probabilística. Confiabilidade.

ABSTRACT

Understanding the variables of a region allows for the performance of analyses through their utilization, as seen, for example, in the solar energy sector. This paper aims to present a study on the probability distributions of solar irradiation and temperature, based on the historical series of the city of São Luís - MA. The objective is to gather sufficient information for applications involving these variables. The adopted methodology involved data collection from the period 2018 to 2022 on the website of the National Institute of Meteorology (INMET) and the processing of this data in spreadsheets. This was followed by a procedure to determine the theoretical probability distribution model that fits the collected data – a theoretical distribution that adequately represents the observed variables: solar irradiation and temperature.

After defining the probabilistic model for each variable, application cases related to photovoltaic energy were considered. One case involved production loss due to temperature, while the other was an analysis of photovoltaic power. The latter was resolved using the reliability methods FORM and Monte Carlo Simulation. The process of fitting theoretical models led to the conclusion that solar irradiation and temperature for the city of São Luís - MA can be satisfactorily represented by the normal and uniform distributions, respectively.

In the analyses of the studied cases, a satisfactory result was obtained for the application of production loss due to temperature, while the analysis of photovoltaic power was unsatisfactory. This indicates that the temperature and solar irradiation characteristics of São Luís had a significant influence on the analysis. Furthermore, the importance of using computational procedures for performing these tasks involving random variables was demonstrated, considering the amount of data to be handled and the number of simulations necessary for reliability analysis

Keywords: Solar Energy. Solar Irradiation. Temperature. Probability Distributions. Probabilistic Analysis. Reliability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. JUSTIFICATIVA.....	13
3. OBJETIVOS.....	13
3.1 Geral.....	13
3.2 Específicos.....	13
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
4.1 Fontes de Energias Não Renováveis.....	14
4.1.1 Carvão Mineral.....	14
4.1.2 Gás Natural.....	15
4.1.3 Petróleo.....	15
4.2 Fontes de Energias Renováveis Alternativas.....	16
4.2.1 Energia Solar.....	17
4.2.2 Energia Eólica.....	19
4.2.3 Biomassa.....	19
4.2.4 Energia Hídrica.....	19
4.3 Tecnologia Fotovoltaica	20
4.3.1 Sistemas On-grid e Off-grid.....	20
4.3.2 Componentes Fotovoltaicos.....	20
4.3.2.1 Baterias.....	20
4.3.2.2 Controlador de Carga.....	20
4.3.2.3 Inversor.....	21
4.3.2.4 Conversores CC - CC.....	21
4.3.2.5 Painéis Fotovoltaicos.....	21
4.4 Conceitos Fundamentais de Confiabilidade e Probabilidade.....	21
4.4.1 Confiabilidade e Probabilidade de Falha.....	21

4.4.2	Variáveis Aleatórias.....	25
4.4.3	Função de Distribuição Cumulativa de Probabilidades (CDF).....	26
4.4.4	Função Densidade de Probabilidades (PDF).....	27
4.4.5	Momentos e Valores Característicos de uma Variável Aleatória.....	28
4.4.6	Modelos Analíticos de Fenômenos Aleatórios.....	29
4.4.6.1	Distribuição Uniforme.....	30
4.4.6.2	Distribuição Normal.....	30
4.4.6.3	Distribuição GEV.....	31
4.4.6.4	Distribuição Lognormal.....	32
4.4.6.5	Distribuição Exponencial.....	33
4.4.6.6	Distribuição Weibull ou Tipo III.....	33
4.4.6.7	Distribuição Frechet ou Tipo II.....	34
4.4.6.8	Distribuição Gumbel ou Tipo I.....	35
4.4.6.9	Distribuição de Rayleigh Deslocada.....	35
4.4.7	Método da Secante.....	36
4.4.8	Ajuste de distribuição de probabilidades a dados observados.....	37
4.5	Métodos de Confiabilidade.....	39
4.5.1	Método FOSM.....	39
4.5.2	Método FORM.....	40
4.5.3	Simulação de Monte Carlo.....	41
4.6	Aplicação das Variáveis na Energia Solar.....	42
4.7	Bases de Dados.....	45
5.	METODOLOGIA.....	45
5.1	Obtenção dos Dados de Irradiação e de Temperatura.....	46
5.2	Tratamento de Dados em planilha eletrônica de cálculo.....	47

5.3	Análise Visual das Distribuições de Probabilidades.....	48
5.4	Análise de Distribuições de Probabilidades com o Software EasyFit ...	48
5.5	Seleção de Módulo Fotovoltaico.....	49
5.6	Implementação dos Métodos de Confiabilidade.....	50
5.7	Probabilidade de um evento com uma variável aleatória.....	51
5.8	Métodos de confiabilidade aplicados a evento com duas variáveis aleatórias.....	52
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
6.1	Ajuste de Distribuição de Probabilidades por Comparação Visual.....	53
6.2	Análise EasyFit.....	56
6.3	Probabilidade de evento de uma variável aleatória.....	58
6.4	Análise de confiabilidade aplicada à Aplicação 2.....	59
6.5	Distribuição de probabilidades da potência de saída.....	60
6.6	Análise de resultados.....	61
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -	Previsão de empregos nas áreas de energias renováveis em 2050.....	17
Figura 2 -	Conjunto de painéis fotovoltaicos.....	18
Figura 3 -	Transformação das variáveis R e S para o espaço normal padrão.....	24
Figura 4 -	Função de distribuição cumulativa de probabilidades.....	27
Figura 5 -	Função densidade de probabilidades.....	28
Figura 6 -	Site do INMET.....	46
Figura 7 -	Processo de obtenção de dados no site do INMET.....	47
Figura 8 -	Convergência	51
Figura 9 -	Função densidade de probabilidades da irradiação solar.....	54
Figura 10 -	Distribuição cumulativa de probabilidades da irradiação solar...	54
Figura 11 -	Função densidade de probabilidades da temperatura.....	55
Figura 12 -	Distribuição cumulativa de probabilidades da temperatura.....	55
Figura 13 -	Histograma e Função densidade de probabilidades da Distribuição Normal.....	57
Figura 14 -	Histograma e Função densidade de probabilidades da Distribuição Uniforme.....	58
Figura 15 -	Histograma das Potências.....	60
Figura 16 -	Distribuição cumulativa de probabilidades das Potências.....	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de variáveis aleatórias discretas.....	25
Tabela 2 - Exemplos de variáveis aleatórias contínuas.....	26
Tabela 3 - Informações sobre o painel.....	49
Tabela 4 - Momentos das variáveis aleatórias.....	53
Tabela 5 - Ranking de distribuições de probabilidades da irradiação solar...	56
Tabela 6 - Ranking de distribuições de probabilidades da temperatura.....	57
Tabela 7 - Resultado da Aplicação 1.....	58
Tabela 8 - Resultados da Simulação de Monte Carlo da Aplicação 2.....	59
Tabela 9 - Resultados do método FORM da Aplicação 2.....	59