

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

GUILHERME FERNANDES GONÇALVES

**ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE APLICADA EM SISTEMAS DE
ENERGIAS RENOVÁVEIS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

GUILHERME FERNANDES GONÇALVES

**ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE APLICADA EM SISTEMAS DE
ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

GUILHERME FERNANDES GONÇALVES

ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE APLICADA EM SISTEMAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 06 de novembro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Me. Romildo Alves dos Prazeres

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Rodrigues
Orientador - UTFPR

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
UTFPR

Prof. Esp. Carlos Henrique Karam Salata
UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do

RESUMO

GONÇALVES, Guilherme Fernandes. **Engenharia de Confiabilidade Aplicada em Sistemas de Energias Renováveis**. 80p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2018.

Devido ao aumento da demanda por energia elétrica, tanto no Brasil como no mundo, se faz necessário explorar diferentes fontes de combustíveis, especialmente as que sejam renováveis e de baixo impacto ambiental. Desta forma, entram em cena as fontes compostas principalmente por solar, eólica e biomassa, que também auxiliam na diversificação da matriz elétrica brasileira, que era predominantemente composta por usinas hidroelétricas e térmicas. Ao se inserir novas fontes de energia, incertezas são criadas, sendo necessário avaliar a confiabilidade de cada uma delas e do sistema como um todo. Perante este caso, o foco deste trabalho consistiu em analisar e quantificar as publicações científicas dos últimos 5 anos que relacionem a engenharia de confiabilidade com sistemas de energias renováveis. Para realizar este estudo, foi utilizado o Portal de Periódicos da CAPES, onde definiu-se o portfólio bibliográfico de artigos. Os periódicos que mais se destacaram no estudo foram *Renewable Energy* e *Wind Energy*. Com relação aos tipos de estudo, os de cunho teórico constam em 51% dos artigos, enquanto que a parte prática está presente em 49% do total. Por meio do estudo realizado, verificou-se que a análise de confiabilidade é de extrema importância, seja em usinas de geração de energia ou em sistemas de menor escala. Esses estudos ainda são pouco explorados na parte de energias renováveis. Portanto, enfatiza-se a necessidade de se aprofundar nestes estudos tanto para os projetos novos na parte de geração como em já existentes focando em operação e manutenção.

Palavras-chave: Energia Solar. Energia Eólica. Energia da Biomassa. Engenharia de Confiabilidade. Distribuições Estatísticas.

ABSTRACT

GONÇALVES, Guilherme Fernandes. **Reliability Engineering Applied in Renewable Energy Systems**. 80p. Monograph (Specialization in Renewable Energies), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2018.

Due to the increased demand for electricity, both in Brazil and in the world, it is necessary to explore different fuel sources, especially those that are renewable and of low environmental impact. In this way, the sources composed mainly of solar, wind and biomass appear on the scene, which also aid in the diversification of the Brazilian electrical matrix, which was predominantly composed of hydroelectric and thermal power plants. When entering new sources of energy, uncertainties are created, being necessary to evaluate the reliability of each one of them and of the whole system. In this case, the focus of this work was to analyze and quantify the scientific publications of the last 5 years that relate reliability engineering to renewable energy systems. To carry out this study, the Portal of Periodicals of CAPES was used, where the bibliographic portfolio of articles was defined. The journals that stood out most in the study were Renewable Energy and Wind Energy. Regarding the types of study, the theoretical ones are found in 51% of the articles, while the practical part is present in 49% of the total. Through the study, it was verified that the reliability analysis is extremely important, either in power plants or in smaller scale systems. These studies are still little explored with renewable energy. Therefore, it is emphasized the need to deepen these studies for both new generation projects and existing ones, focusing on operation and maintenance.

Keywords: Solar Energy. Wind Energy. Biomass Energy. Reliability Engineering. Statistical Distributions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação de renováveis na matriz elétrica	10
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira em 2016	11
Figura 3 - Horizonte do sistema de transmissão em 2017	15
Figura 4 - Componentes da radiação solar	17
Figura 5 - Tipos de sistemas fotovoltaicos	19
Figura 6 - Curva característica I-V.....	21
Figura 7 - Tubo de Betz.....	24
Figura 8 - Relação da velocidade do vento em função da altura.....	28
Figura 9 - Turbina (a) Darrieus e (b) Savonius	29
Figura 10 - Turbinas <i>upwind</i> e <i>downwind</i>	29
Figura 11 - Componentes básicos de uma turbina de eixo horizontal.....	30
Figura 12 - Rotas de conversão energética da biomassa	33
Figura 13 - Fatores que influenciam em uma análise de confiabilidade	36
Figura 14 - Curva da banheira.....	38
Figura 15 - Relação do fator de forma e a curva da banheira	41
Figura 16 - Passos para elaboração de uma FTA.....	43
Figura 17 – Processo de análise por elementos finitos	46
Figura 18 – Classificação de algoritmos de meta-heurística	48
Figura 19 - Fluxograma do processo de revisão da literatura	51
Figura 20 - Quantidade de publicações por periódico	54
Figura 21 - Distribuição dos periódicos por períodos	55
Figura 22 - Quantidade de publicações por ano.....	56
Figura 23 - Quantidade de publicações em energia solar por ano	57
Figura 24 - Quantidade de publicações em energia eólica por ano	57
Figura 25 - Quantidade de publicações em energia da biomassa por ano	58
Figura 26 - Quantidade de publicações por local	59
Figura 27 - Tipos de estudo conduzido pelos autores.....	60
Figura 28 - Métodos ou técnicas mais utilizadas nos artigos	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos processos metodológicos	13
Tabela 2 – Rugosidade superficial	27
Tabela 3 – Palavras-chave de busca	50
Tabela 4 – Resultado da busca no Portal da CAPES	52
Tabela 5 – Periódicos presentes no portfólio bibliográfico	53
Tabela 6 – Local de publicação dos artigos do portfólio.....	59
Tabela 7 – Métodos/técnicas utilizados nos artigos	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA.....	11
1.1.1	Delimitação do Tema.....	12
1.2	PROBLEMA E PREMISSE.....	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral.....	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.4	JUSTIFICATIVA.....	13
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	13
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	15
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	17
2.2.1	Radiação Solar	17
2.2.2	Sistemas Fotovoltaicos.....	19
2.2.3	Módulos Fotovoltaicos	20
2.2.4	Baterias	22
2.2.5	Controladores de Carga	22
2.2.6	Inversores.....	22
2.3	ENERGIA EÓLICA	23
2.3.1	Potência do Vento	23
2.3.2	Potência Máxima de Extração (Limite de Betz)	25
2.3.3	Camada Limite e Variação da Velocidade do Vento.....	27
2.3.4	Aerogeradores.....	28
2.3.4.1	Turbinas de eixo vertical.....	28
2.3.4.2	Turbinas de eixo horizontal.....	29
2.3.4.3	Componentes	30
2.4	ENERGIA DA BIOMASSA.....	31
2.4.1	Conversão Termoquímica	32
2.4.1.1	Combustão	33
2.4.1.2	Gaseificação.....	34
2.4.1.3	Pirólise.....	34

2.4.2	Conversão Bioquímica.....	35
2.4.2.1	Fermentação	35
2.4.2.2	Digestão anaeróbica.....	35
2.5	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	36
2.5.1	Modelos Estatísticos.....	39
2.5.1.1	Distribuição exponencial.....	39
2.5.1.2	Distribuição de Weibull	39
2.5.2	Análise de Falhas	41
2.5.2.1	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	41
2.5.2.2	Análise da Árvore de Falhas (FTA).....	42
2.5.3	Simulação de Monte Carlo	44
2.5.4	Séries Temporais.....	45
2.5.5	Método dos Elementos Finitos	45
2.5.6	Otimização Meta-Heurística	47
2.5.7	Cadeia de Markov.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE 1 – PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	75

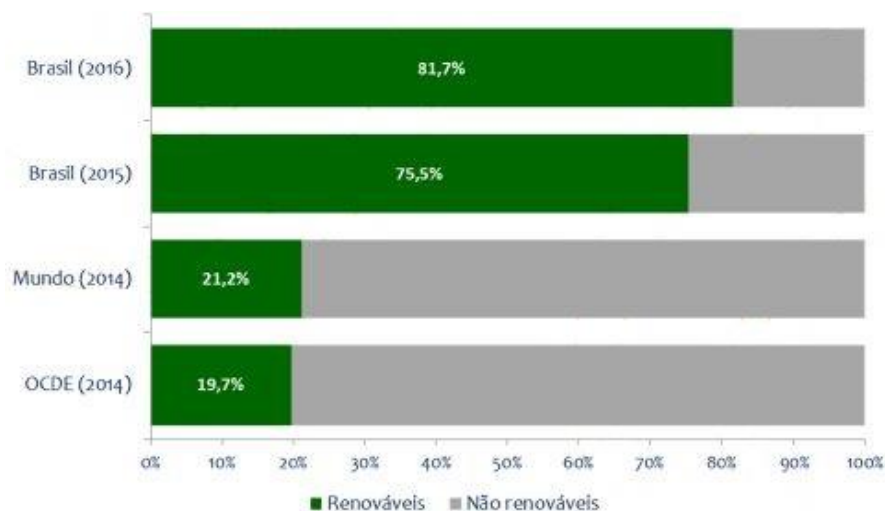
1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de energia elétrica impõe uma necessidade de expansão da geração de energia do país. De acordo com o relatório “Projeção de demanda de energia elétrica”, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo total de eletricidade na rede brasileira era de 459 terawatt-hora (TWh) para o ano de 2016. Já a previsão para o ano de 2026 é de 653 TWh, o que resulta em um aumento de, aproximadamente, 3,6% no consumo total por ano (MME, 2017a).

A expansão da geração de energia implica em uma escassez de combustíveis fósseis, tradicionalmente utilizados para gerar energia, principalmente a queima de carvão mineral por usinas termelétricas. Como estes recursos são poluentes e emissores de Gases de Efeito Estufa (GEE), ou seja, ameaças de mudança de clima, acordos governamentais são aprovados entre os países com maiores emissões para mitigar esses efeitos, sendo um dos mais recentes o Acordo de Paris, firmado em 2015 e aprovado por 195 países (MMA, 2015).

Para alcançar uma forma de geração mais limpa, é necessário, com auxílio do governo e empresas privadas, criar políticas, legislações, financiamentos para fomentar pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira aumentou de 75,5% no ano de 2015 para 81,7% em 2016, conforme mostrado na Figura 1.

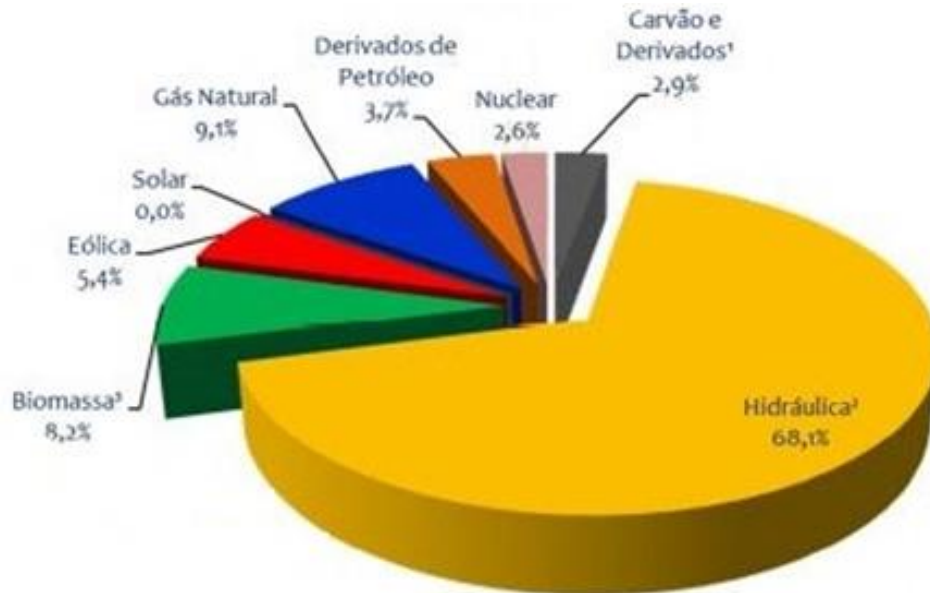
Figura 1 - Participação de renováveis na matriz elétrica



Fonte: MME (2017b).

Estes 81,7% consistem de: 68,1% de hidráulica, 8,2% de biomassa e 5,4% de eólica, evidenciados na Figura 2 (MME, 2017b).

Figura 2 - Matriz elétrica brasileira em 2016



Fonte: MME (2017b).

Os componentes de um sistema de geração, transmissão ou distribuição estão sujeitos a falhas que podem afetar o desempenho dos mesmos, inclusive causando interrupções no fornecimento de energia elétrica. Para tanto são necessários investimentos para diminuir a probabilidade falha de algum componente do sistema, ou seja, aumentar sua confiabilidade.

Por outro lado, existem restrições econômicas que devem ser respeitadas para que o sistema não venha se tornar demasiadamente caro, ou até inviável. Estas restrições nos investimentos fazem com que os sistemas operem ainda mais perto dos seus limites, demandando análises mais precisas dos riscos de interrupção ou degradação da qualidade do suprimento de energia elétrica.

1.1 TEMA

Engenharia de confiabilidade aplicada em sistemas de energias renováveis.

1.1.1 Delimitação do Tema

Neste trabalho serão analisadas e classificadas as publicações dos últimos 5 anos que relacionem aplicações da engenharia de confiabilidade com sistemas de energias renováveis, nas áreas de solar, eólica e biomassa.

1.2 PROBLEMA E PREMISSA

Com a inserção de diferentes fontes renováveis de energia na matriz energética mundial, novas incertezas também são introduzidas. Para lidar com estes novos problemas, é necessário avaliar a confiabilidade de cada uma dessas fontes.

Para isso podem ser usados diferentes estratégias da engenharia de confiabilidade incluindo modelos e distribuições estatísticas, tanto para modelar fenômenos de vento ou irradiância quanto a operação de um sistema renovável. Isso levanta a seguinte pergunta de pesquisa: As publicações científicas dos últimos 5 anos têm abordado quais aspectos da aplicação da engenharia de confiabilidade em sistemas de energias renováveis?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar as publicações científicas dos últimos 5 anos que relacionem a engenharia de confiabilidade com as fontes de energia renováveis.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral é necessário:

- definir uma base de dados;
- definir palavras-chave e suas combinações;
- realizar as buscas com os filtros necessários;
- quantificar os resultados obtidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

A partir do momento em que modelos e distribuições estatísticas são aplicadas na modelagem de fenômenos ou na operação e manutenção de sistemas de energias renováveis, estruturam-se metodologias de estudos que podem ser replicadas em diferentes sistemas.

Este trabalho pode auxiliar na compilação do que vem sendo feito nos últimos anos, bem como apontar cenários ou oportunidades ainda não exploradas dentro da aplicação da engenharia de confiabilidade em sistemas de energias renováveis.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

De forma a resumir os procedimentos metodológicos, a Tabela 1 apresenta a classificação deste trabalho.

Tabela 1 – Classificação dos processos metodológicos

GRUPO	CLASSIFICAÇÃO
Objetivo Geral	Pesquisa Exploratória
Procedimentos Técnicos	Pesquisa Bibliográfica
Abordagem	Pesquisa Quantitativa

Fonte: O autor (2018).

Ao se classificar uma pesquisa, quando baseadas nos seus objetivos gerais, existem três grandes grupos: pesquisa exploratória, descritiva e explicativa. O primeiro grupo possui como objetivo geral aprimorar ideias, tornando o problema mais explícito, ou a construção de hipóteses. O grupo de pesquisa descritiva baseia-se na descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. E o terceiro grupo, da pesquisa explicativa, possui como objetivo identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos (GIL, 2008). Este trabalho situa-se no grupo de pesquisa exploratória.

Existe também um método de classificar a pesquisa com base nos procedimentos técnicos utilizados, também chamado de delineamento. Assim, podem ser definidos dois grandes grupos: os advindos de fontes teóricas e aqueles cujos dados são fornecidos por pessoas. No primeiro grupo, estão a pesquisa bibliográfica

e a pesquisa documental. No segundo, estão a pesquisa experimental, a pesquisa *ex-post facto*, o levantamento e o estudo de caso (GIL, 2008). Este trabalho situa-se no grupo de pesquisa bibliográfica.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado com a seguinte estrutura:

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, bem como os objetivos e a justificativa.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre a teoria utilizada neste trabalho, sobre energias renováveis e confiabilidade de sistemas.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada no trabalho para a definição do portfólio de artigos.

No Capítulo 4 são apresentados os artigos que compõem o portfólio bibliográfico da pesquisa, bem como a discussão sobre os mesmos.

No Capítulo 5, por fim, são apresentadas as considerações finais e conclusões, e sugestões de trabalhos futuros.

Historicamente este sistema é composto principalmente de usinas hidrelétricas e termelétricas. As primeiras devido ao grande potencial hídrico do país, com várias bacias hidrográficas, e as segundas geralmente perto de grandes centros urbanos que auxiliam na gestão de água em reservatórios. Nos últimos anos as usinas eólicas entraram em maior quantidade e as usinas solares também começam a se destacar (ONS, 2018a).

Em 2016, o SIN possuía, aproximadamente, 142 GW de capacidade instalada, dividida por fontes (ONS, 2017):

- 101,6 GW de hidrelétrica;
- 12,4 GW de termelétrica a gás;
- 9,6 GW de eólica;
- 4,7 GW de termelétrica a óleo;
- 3,1 GW de termelétrica a carvão;
- 7,6 GW de biomassa;
- 16 MW de solar;
- 1,9 GW de nuclear e;
- 867 MW de outras.

A previsão para a capacidade instalada do sistema em 2021 é de 166,5 GW, sendo (ONS, 2017):

- 113,8 GW de hidrelétrica;
- 14,5 GW de termelétrica a gás;
- 16,2 GW de eólica;
- 4,7 GW de termelétrica a óleo;
- 3,4 GW de termelétrica a carvão;
- 8,3 GW de biomassa;
- 2,2 GW de solar;
- 1,9 GW de nuclear e;
- 1,3 GW de outras.

A partir destes valores, é possível perceber que a inserção de energias renováveis no sistema está aumentando em uma quantidade significativa – em 5 anos a solar deve aumentar de 16 MW para 2,2 GW, enquanto que a eólica de 9,6 para 16,2 GW. Este incentivo começou quando foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa) pelo Governo Federal, através da lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002, que conta com o apoio do Bando Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) no financiamento de projetos provenientes de fontes eólica, solar, biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (ANEEL, 2017).

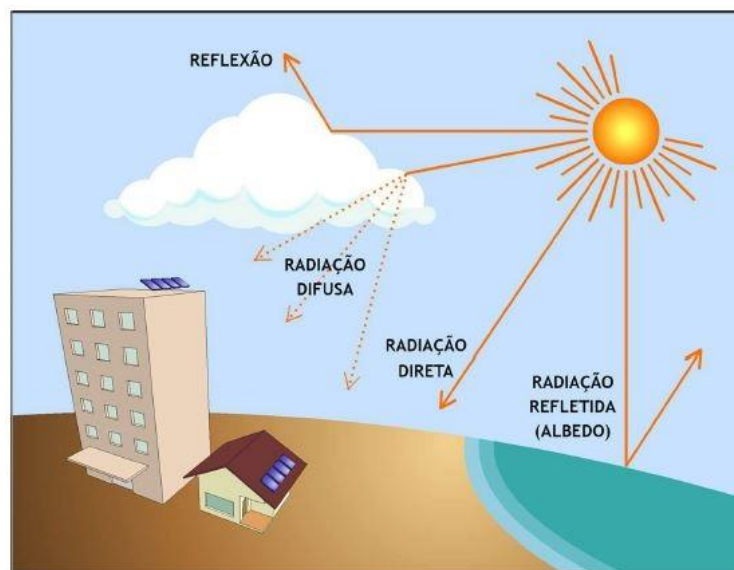
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.2.1 Radiação Solar

A norma ABNT NBR 10899 – Energia solar fotovoltaica – Terminologia, com revisão feita em 2013, define radiação solar como “forma de transferência de energia advinda do sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (ou fótons)” (ABNT, 2013).

Esta energia que chega na superfície terrestre possui três principais componentes: radiação direta, radiação difusa e radiação devido ao albedo (VIANA, 2010). A Figura 4 mostra os três componentes da radiação solar.

Figura 4 - Componentes da radiação solar



Fonte: VIANA (2010).

A radiação direta é a parcela que não sofre variações ao longo do caminho, com intensidade variável e dependente da posição do Sol em sua trajetória. A difusa consiste em parcelas que foram refletidas pelas nuvens ou por gases atmosféricos, e a devido ao albedo é proveniente da reflexão em superfícies ao entorno ou pelo solo (VIANA, 2010).

A radiação, ao ser medida de forma instantânea - em forma de potência em uma superfície - recebe o nome de irradiância solar (simbolizada por G) e é normalmente expressa em watts por metro quadrado (W/m^2) (ABNT, 2013).

A ABNT NBR 10899 possui algumas definições relacionadas à irradiância, listadas a seguir (ABNT, 2013):

- Irradiância direta (G_{DIR}): irradiância solar incidente em uma superfície, proveniente diretamente do disco solar e da região circunsolar, podendo ser normal ou horizontal;
- Irradiância difusa (G_{DIF}): potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta;
- Irradiância global (G_{HOR}): potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, sendo igual à irradiância direta no plano horizontal mais a irradiância difusa;
- Irradiância total (G_{TOT}): potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer.

Se, além disto, se essa medida ainda for integrada em um intervalo de tempo – normalmente por hora ou por dia – então passará a ser chamada de irradiação solar, sendo expressa por watts-hora por metro quadrado (Wh/m^2) ou joules por metro quadrado (J/m^2). É simbolizada por I , quando integrada no tempo de 1h, ou por H , quando integrada no tempo de um dia (ABNT, 2013).

A ABNT NBR 10899 possui algumas definições relacionadas à irradiação, listadas a seguir (ABNT, 2013):

- Irradiação direta (I_{DIR} ou H_{DIR}): irradiância direta, integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente 1h ou um dia;
- Irradiação difusa (I_{DIF} ou H_{DIF}): irradiância difusa, integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente 1h ou um dia;
- Irradiação global (I_{HOR} ou H_{HOR}): irradiância global, integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente 1h ou um dia;

- Irradiação total (I_{TOT} ou H_{TOT}): irradiância total, integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente 1h ou um dia.

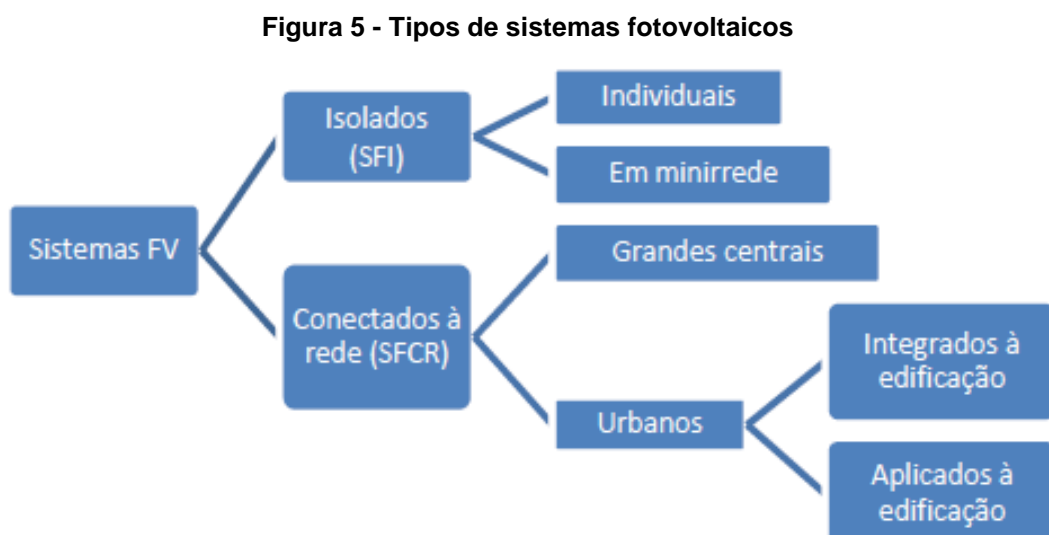
De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição, a Terra dista do Sol de 147 a 152 milhões de quilômetros e isso implica em uma irradiância solar variando entre 1.325 e 1.412 W/m² (PEREIRA, 2017). O valor médio, definido como constante solar (G_0), é de 1.366 W/m² (NREL, 2018).

2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos

A norma ABNT NBR 11704 – Sistemas fotovoltaicos – Classificação define dois tipos de sistemas, baseados na interligação ou não com o sistema público de fornecimento de energia elétrica (ABNT, 2008):

- Sistemas Isolados: são aqueles que não possuem qualquer conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica;
- Sistemas conectados à rede elétrica: são aqueles efetivamente conectados ao sistema público de fornecimento de energia elétrica.

A Figura 5 representa os tipos de sistemas fotovoltaicos.



Fonte: URBANETZ (2010).

Os sistemas fotovoltaicos isolados são normalmente instalados em locais sem acesso à rede elétrica, e necessitam de um elemento armazenador de energia, como

por exemplo baterias. Já os conectados à rede são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar a energia próximo ao ponto de consumo (URBANETZ, 2010).

Um sistema fotovoltaico geralmente é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e um bloco de armazenamento de energia. O primeiro contém os módulos fotovoltaicos, o cabeamento elétrico e a estrutura de suporte. O segundo pode conter conversores, inversores de frequência, controladores de carga e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. O último bloco consiste basicamente em baterias (PINHO; GALDINO, 2014).

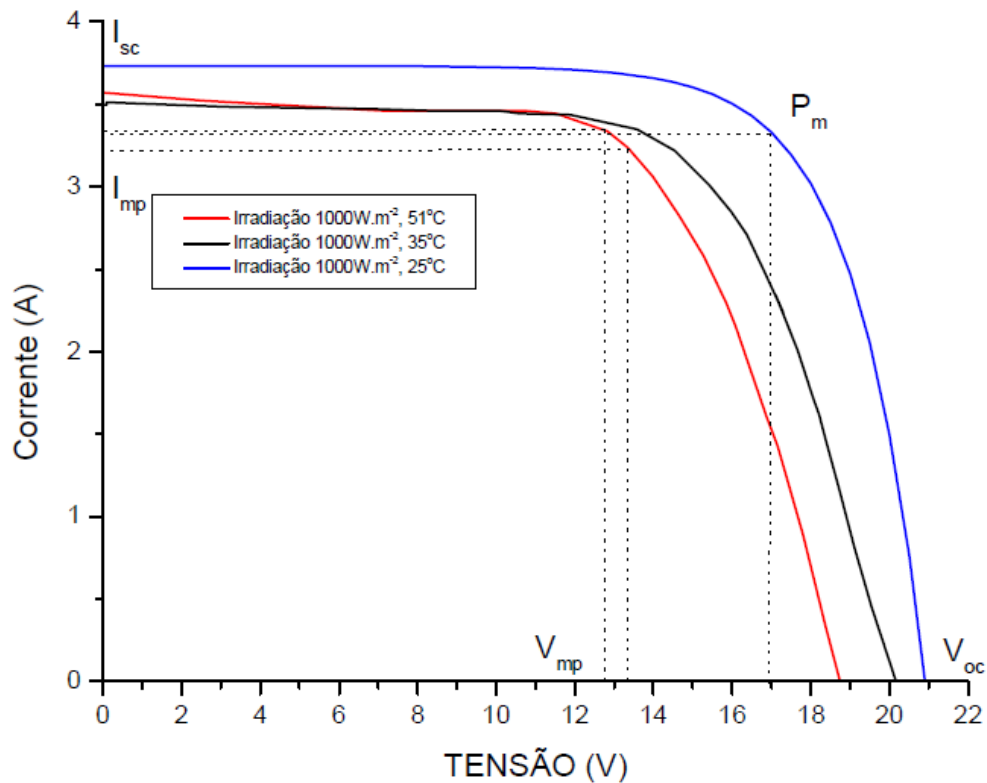
2.2.3 Módulos Fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico, componente unitário do bloco gerador, é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos para produzir tensão e corrente suficiente para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo em que promove a proteção das células. As células individualmente possuem tensões baixas, na casa de 0,5 a 0,8 V para os materiais mais utilizados, que são a base de Silício. Então, para atingir os valores de tensão e corrente desejados, elas são conectadas em série para se obter uma tensão igual à soma de cada célula, ou em paralelo para se obter uma corrente elétrica maior (PINHO; GALDINO, 2014).

Para identificar um módulo geralmente é utilizada a sua potência elétrica de pico (Wp). Este valor é feito em condições-padrão de ensaio (STC, do inglês *Standard Test Conditions*), que considera irradiância solar de 1.000 W/m², massa de ar de 1,5 e temperatura do módulo de 25 °C (PINHO; GALDINO, 2014).

Um dos ensaios mais completos para determinar as características de um módulo fotovoltaico é o traçado da sua curva característica I-V. O módulo é submetido às condições-padrão de ensaio e uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa de poucos volts até ultrapassar a tensão de circuito aberto (PINHO; GALDINO, 2014). Durante esta varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica como a apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Curva característica I-V



Fonte: GNOATTO (2005).

Na Figura 6, a curva azul representa a condição STC. Para cada ponto na curva I-V, o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. A linha tracejada representa o produto da tensão de máxima potência (V_{MP}) pela corrente de máxima potência (I_{MP}), que é conhecido como o ponto de máxima potência (P_{MP}).

Para se obter a eficiência de um módulo fotovoltaico, é necessário calcular a relação entre a potência máxima gerada e a irradiância solar. Se for utilizada a condição-padrão de ensaio, a irradiância é de $G = 1.000 \text{ W/m}^2$ e a potência luminosa incidente no módulo pode ser calculada multiplicando-se este valor pela área do módulo (A_M), considerando a moldura metálica e qualquer parte construtiva. O cálculo da eficiência de um módulo é apresentado em (1):

$$\eta = \frac{P_{MP}}{G \cdot A_M} \cdot 100\% \quad (1)$$

2.2.4 Baterias

Em dias que a geração de energia é insuficiente para atender a demanda, ou mesmo nula (períodos de noite, dias chuvosos, muito nublados) é necessário ter um dispositivo de armazenamento de energia conectado em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica. Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em outro momento necessário (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.5 Controladores de Carga

Controladores de carga são incluídos na maioria dos sistemas fotovoltaicos isolados com o objetivo de proteger a bateria (ou banco de baterias) contra cargas e descargas excessivas, aumentando sua vida útil. Devem ser projetados considerando-se as especificidades dos diversos tipos de baterias, uma vez que controladores para um tipo de bateria pode não ser eficiente para outro (PINHO; GALDINO, 2014).

Os controladores devem desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria atingir carga plena e interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria atingir um nível mínimo de segurança. Alguns controladores também monitoram o desempenho do sistema e acionam alarmes na ocorrência de algum problema (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.6 Inversores

Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que transforma corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). A fonte do inversor pode ser um banco de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos e a sua saída deverá ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas (PINHO; GALDINO, 2014). Para sistemas isolados, a saída do inversor será uma onda senoidal padrão, mas para sistemas conectados à rede, a onda senoidal deve se adequar à rede, estando na mesma fase e possuindo características semelhantes (URBANETZ, 2010).

Como definido no item 2.2.3, os módulos possuem o ponto de máxima potência (P_{MP} , ou MPP, do inglês *Maximum Power Point*) em que a potência gerada apresenta seu valor mais elevado possível. Este valor varia como função da irradiância e da temperatura do módulo. Em sistemas conectados à rede, o inversor possui a função de procurar este ponto, melhorando o desempenho do sistema fotovoltaico. Já em sistemas isolados, o controlador de carga pode desempenhar esta função (URBANETZ, 2010).

Um inversor para sistemas fotovoltaicos deve possuir as seguintes características (PINHO; GALDINO, 2014):

- Alta eficiência de conversão;
- Alta confiabilidade e baixa manutenção;
- Operação em uma faixa ampla de tensão de entrada;
- Boa regulação na tensão na saída;
- Forma de onda senoidal com baixo conteúdo harmônico;
- Baixa emissão de ruído audível;
- Baixa emissão de interferência eletromagnética;
- Tolerância aos surtos de partida das cargas a serem alimentadas;
- Segurança tanto para as pessoas quando para a instalação;
- Grau de proteção IP adequado ao tipo de instalação;
- Garantia de fábrica de pelo menos 2 anos.

2.3 ENERGIA EÓLICA

2.3.1 Potência do Vento

A energia cinética de uma massa de ar que se movimenta (vento) é conhecida como energia eólica, e sua equação é descrita em (2) (MELO, 2012):

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Onde:

E_k = Energia cinética [J]

m = Massa de ar [kg]

v = velocidade do vento [m/s]

A potência contida neste vento é a derivada da energia em função do tempo, conforme observa-se em (3):

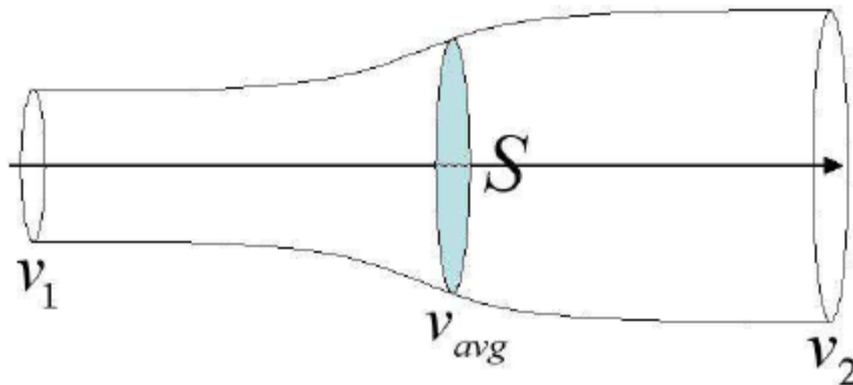
$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) v^2 \quad (3)$$

Onde:

P = Potência do vento [W]

O fluxo de massa de ar que atravessa perpendicularmente uma seção transversal de área S (BETZ, 1966), conforme pode ser observado na Figura 7, é descrito em (4).

Figura 7 - Tubo de Betz



Fonte: BETZ (1966).

$$\frac{dm}{dt} = \rho S v \quad (4)$$

Onde:

ρ = Massa específica do ar [kg/m³]

S = Área da seção transversal [m²]

Substituindo (4) em (3), temos:

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (5)$$

Portanto, através de (5) percebe-se que a potência varia com o cubo da velocidade do vento, com a massa específica do ar e com a área S varrida pelas pás do aerogerador e cortada por este fluxo de massa de ar (vento), área esta que tem uma relação quadrática com o diâmetro do rotor, conforme pode ser observado em (6) (FADIGAS, 2011), para o caso de hélice de eixo horizontal:

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (6)$$

Onde:

π = Constante adimensional

D = Diâmetro do rotor [m]

Finalmente, substituindo (6) em (5), obtém-se a seguinte expressão para a potência disponível no vento:

$$P = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 \quad (7)$$

A energia gerada é altamente sensível (relação cúbica) à velocidade do vento que atravessará as pás do aerogerador, assim como existe uma alta sensibilidade (relação quadrática) em relação ao diâmetro do rotor (MELO, 2012).

2.3.2 Potência Máxima de Extração (Limite de Betz)

A potência que a turbina poderá extrair do vento dependerá da velocidade que o vento exerce dentro do mecanismo, v_{avg} , da Figura 7. Esta velocidade é menor que a incidente nas pás, v_2 , pois a turbina interfere no fluxo de ar e atua como bloqueio. Após passar pelo rotor, o vento é turbulento e com velocidade reduzida v_1 . Assumindo que a velocidade que atravessa as pás é (MELO, 2012):

$$v = v_{avg} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (8)$$

A potência mecânica que é extraída (P_{ext}) do fluxo de ar que atravessa o rotor é a diferença entre esta potência na entrada ($P_{entrada}$) e na saída ($P_{saída}$) deste rotor, conforme mostra (9):

$$P_{ext} = P_{entrada} - P_{saída} \quad (9)$$

Então a potência extraída pode ser reescrita conforme (5):

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho S v_{avg} (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

E substituindo (8) em (10):

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \rho S \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \left\{ \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right]}{2} \right\} \quad (11)$$

Dessa forma, pode ser definido o coeficiente de potência do rotor (C_p), que pode ser entendido como a potência que será extraída do vento em relação à potência contida neste vento (MELO, 2012).

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right]}{2} \quad (12)$$

Ao se maximizar a função do coeficiente de potência do rotor (C_p), a relação entre as velocidades na entrada e na saída do rotor deve ser um terço (1/3), e assim, conclui-se que o valor máximo teórico de C_p é de 59,3%, além de limitações tecnológicas (MELO, 2012).

$$C_{p_{MÁXIMO}} = \frac{16}{27} = 59,3\% \quad (13)$$

2.3.3 Camada Limite e Variação da Velocidade do Vento

A Camada Limite Planetária (CLP) é a camada da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície da terra, sendo que nela ocorrem diretamente trocas de energia e massa com a superfície diretamente. A porção inferior da CLP é denominada de Camada Limite Superficial (CLS), estende-se por não mais que 100 a 150 metros acima da superfície. A CLS se caracteriza pela turbulência induzida que determinará a existência de gradientes verticais de temperatura, umidade e velocidade do vento, entre outras grandezas físicas (STULL, 1988).

Nas altitudes mais baixas os ventos são extremamente influenciados pela superfície. Os ventos na CLS são defletidos por obstáculos e retardados pelas rugosidades da topografia (GISLER, 2009).

Essas características, chamadas de rugosidade superficial, devem ser levadas em consideração ao se utilizar os métodos de correção da velocidade do vento. Para isso, no estudo do perfil de velocidades do local, são usados valores de referência, conforme valores encontrados na Tabela 1 (DALMAZ, 2007).

Tabela 2 – Rugosidade superficial

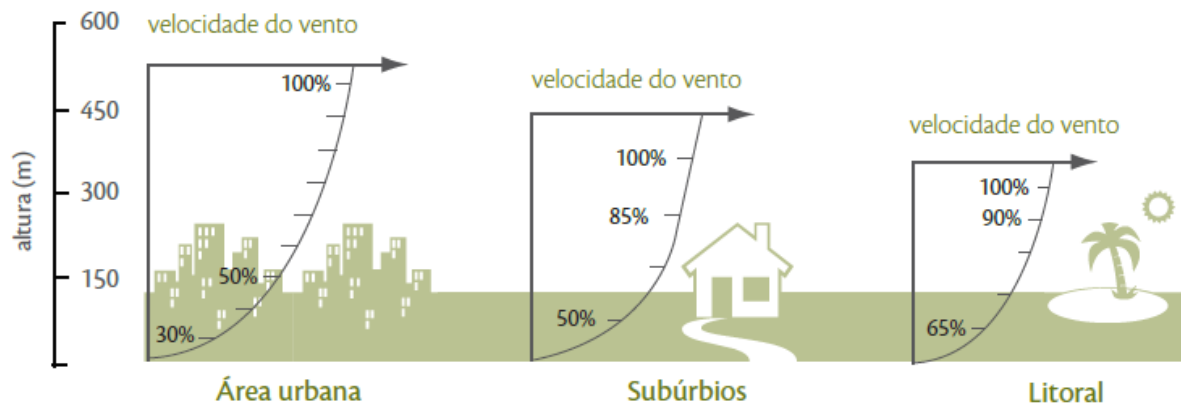
TIPO DE TERRENO	RUGOSIDADE (mm)
Gelo	0,01
Mar calmo	0,2
Mar agitado	0,5
Neve	3
Gramma baixa	8
Pasto	10
Campo	30
Plantações	50
Poucas árvores	100
Muitas árvores ou algumas construções	250
Florestas	500
Subúrbios	1500
Cidades	3000

Fonte: MANWELL (2002).

Há dois modelos de análise do comportamento da camada limite atmosférica: Lei Logarítmica e Lei de Potência (MANWELL, 2002). Porém, não faz parte do escopo deste trabalho a apresentação destes dois modelos.

Então, de forma ilustrativa, a relação da velocidade do vento variando com a altura, em diferentes áreas (urbana, subúrbio ou no nível do mar) é mostrada na Figura 8.

Figura 8 - Relação da velocidade do vento em função da altura



Fonte: RODRIGUES (2011).

2.3.4 Aerogeradores

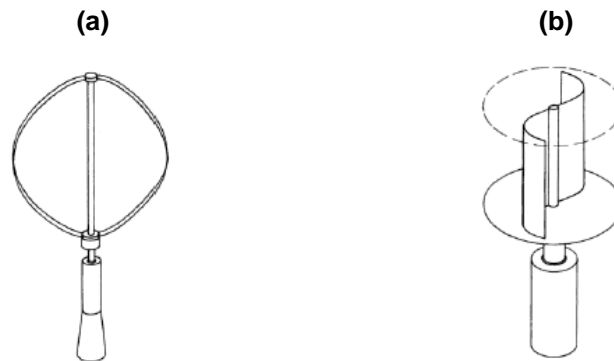
2.3.4.1 Turbinas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical possuem a vantagem de não depender da direção do vento para extrair energia. Quanto à sua estrutura podem ser Darrieus ou Savonius (FERREIRA, 2011).

As turbinas Darrieus, são montadas num eixo vertical, têm a vantagem de se localizarem ao nível do solo, facilitando a sua manutenção. São utilizadas locais com velocidades de vento elevadas e, em alguns casos, é necessário um acionamento adicional. Relativamente às turbinas Savonius, as turbinas Darrieus são mais eficientes (FERREIRA, 2011).

Já as turbinas Savonius são usadas quando se pretende gerar pouca energia, com custo reduzido. Porém, são empregues em locais com velocidades de vento reduzidas. Suas aplicações limitam-se ao bombeamento de água (DALMAZ, 2007). A Figura 9 em (a) apresenta a turbina Darrieus e em (b) a Savonius.

Figura 9 - Turbina (a) Darrieus e (b) Savonius



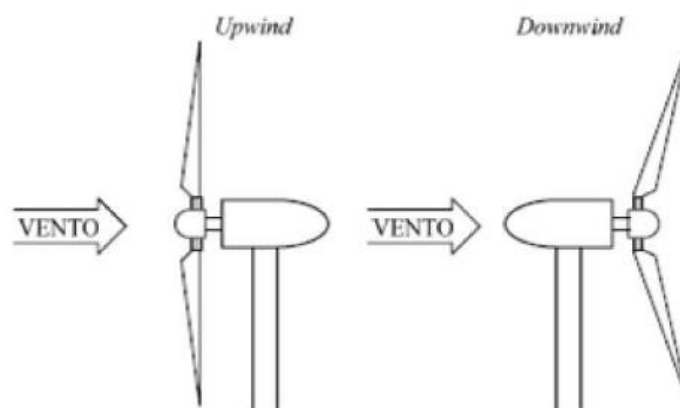
Fonte: FERREIRA (2011).

2.3.4.2 Turbinas de eixo horizontal

As turbinas de eixo horizontal podem possuir números diferentes de pás. As modernas turbinas eólicas com rotores de três pás são as mais comuns em todo o mundo. Devido à configuração dos esforços mais vantajosa esse tipo de turbina não necessita de componentes caros adicionais como juntas e amortecedores de movimento no eixo. O nível de ruído é relativamente baixo e o rotor desenvolve um movimento de rotação suave, aspectos positivos para a aceitação pública da energia eólica tecnológicas (MELO, 2012).

As turbinas eólicas de eixo horizontal ainda podem ser classificadas pela posição que o rotor recebe o vento, se é de frente – *upwind* – ou de trás – *downwind*. A Figura 10 mostra os tipos de turbinas.

Figura 10 - Turbinas *upwind* e *downwind*



Fonte: LOPES (2009).

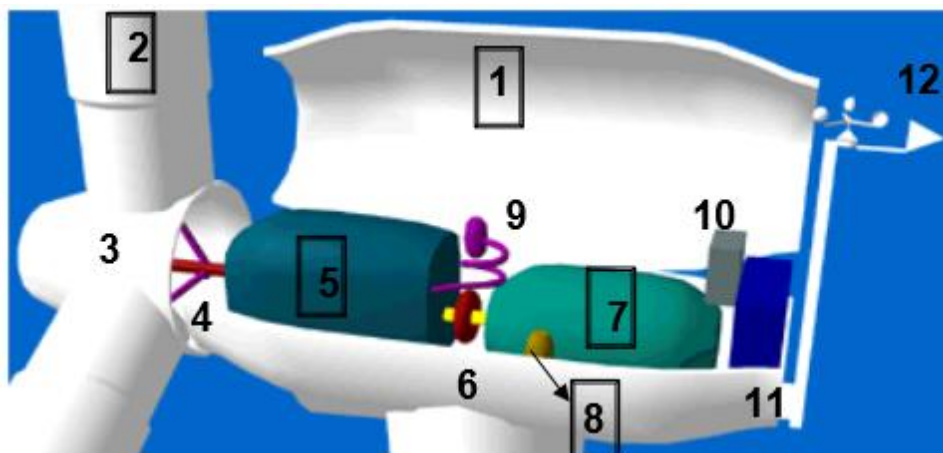
As turbinas *downwind* possuem a vantagem de não necessitarem de um mecanismo para direcionamento da turbina em relação à direção do vento. Entretanto, esta vantagem é utilizada apenas para turbinas de pequeno porte uma vez que para turbinas de portes maiores, para altas velocidades de vento, existe o risco de colisão das pás com a torre (MELO, 2012).

Nas turbinas *upwind* o vento incide na área de varredura do rotor pela parte frontal da turbina, provocando esforços vibratórios na torre. A sua principal vantagem consiste em evitar o distúrbio causado pela torre no vento. Devido a este fato, a maior parte das turbinas eólicas utilizadas atualmente são *upwind* (LOPES, 2009).

2.3.4.3 Componentes

Os componentes básicos de uma turbina de eixo horizontal são mostrados na Figura 11 a seguir e detalhados na sequência (ALVIM FILHO, 2009):

Figura 11 - Componentes básicos de uma turbina de eixo horizontal



Fonte: ALVIM FILHO (2009).

- 1) Nacele: é a carcaça, acima da torre, onde se instala o gerador, os sistemas de controle e o sistema de transmissão de potência (eixos, sistemas hidráulicos, etc);
- 2) Pás: são as responsáveis pela captura da energia eólica, convertendo-a em energia mecânica e transmitindo-a, através do cubo onde são fixadas, para um eixo que, ou está acoplado a um gerador elétrico. O principal material utilizado é fibra de vidro com reforço de epóxi;

- 3) Cubo: componente que recebe as pás, e junto com estas formam o rotor. Transmitem a energia captada pelas pás para o eixo;
- 4) Eixo de baixa velocidade: transfere a energia rotacional para uma caixa multiplicadora, no caso de geradores convencionais, ou então diretamente para o gerador, no caso de geradores multipolos;
- 5) Caixa de transmissão: sistema de engrenagens que aumenta a velocidade de rotação do rotor para adequá-la à velocidade de rotação do gerador elétrico;
- 6) Eixo de alta velocidade com freio mecânico;
- 7) Gerador elétrico: converte a energia mecânica absorvida pelo rotor do vento incidente em energia elétrica;
- 8) Sistema de controle de orientação: o rotor é orientado por um sistema motorizado que gira a nacela de forma a posicionar o rotor de frente para o vento;
- 9) Sistema hidráulico;
- 10) Controle eletrônico: monitora o sistema, desliga a turbina em caso de mau funcionamento e controla o mecanismo de ajuste para alinhamento da turbina com o vento;
- 11) Resfriamento;
- 12) Unidade de medição de velocidade e direção do vento.

2.4 ENERGIA DA BIOMASSA

Biomassa é todo material orgânico provenientes das plantas. Ao realizar a fotossíntese, convertendo a luz do sol em material vegetal, estas plantas geram a biomassa necessária para recursos energéticos. A energia acumulada em ligações químicas é proveniente do sol e, ao quebrá-las, a energia química é liberada. Os processos que realizam a quebra das ligações entre moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio são: digestão, combustão ou decomposição (MCKENDRY, 2002a).

Como a biomassa é renovável, abundante e tem uso doméstico, as fontes de biomassa podem ajudar o mundo a reduzir sua dependência de produtos de petróleo e gás natural. A biomassa absorve dióxido de carbono durante o crescimento e emite-o durante a combustão. Portanto, a biomassa ajuda na reciclagem de dióxido de carbono atmosférico e não contribui com o efeito estufa (AÇMA, 2003).

As biomassas com maiores potenciais de energia podem ser de resíduos florestais e de resíduos agrícolas. Os resíduos florestais representam cerca de 65% do potencial energético da biomassa e abrangem lascas de madeira, serragem e casca. Já os agrícolas correspondem à 33% do potencial energético e os principais componentes são: palha, bagaço de cana, casca de arroz, casca de café (WERTHER, 2000).

Baseando-se principalmente no teor de umidade da biomassa, o tipo de biomassa selecionada dita a forma mais provável de conversão de energia. Para altos teores de umidade, como a cana-de-açúcar, é necessário um processo que envolva reações como a fermentação. Agora para teores menores de umidade, como lascas de madeira, é mais adequado processos como pirólise ou combustão (MCKENDRY, 2002a).

No entanto, existem outros fatores que devem ser levados em consideração na determinação da seleção do processo de conversão, principalmente para as formas de biomassa que ficam entre os extremos úmido e seco. Fatores estes que impactam negativamente nos processos de conversão térmica e no teor de celulose, o que influencia os processos de fermentação bioquímica (MCKENDRY, 2002a).

A biomassa pode ser convertida em três produtos principais: dois relacionados à energia - geração de energia / calor e combustíveis para transporte - e um como matéria-prima química (MCKENDRY, 2002b).

A conversão de biomassa em energia é realizada usando duas tecnologias de processo principais: termoquímica e bioquímica (ou biológica). Dentro da conversão termoquímica, encontra-se principalmente: combustão, pirólise, gaseificação. A conversão bioquímica possui duas opções de processo: a digestão e a fermentação (MCKENDRY, 2002b).

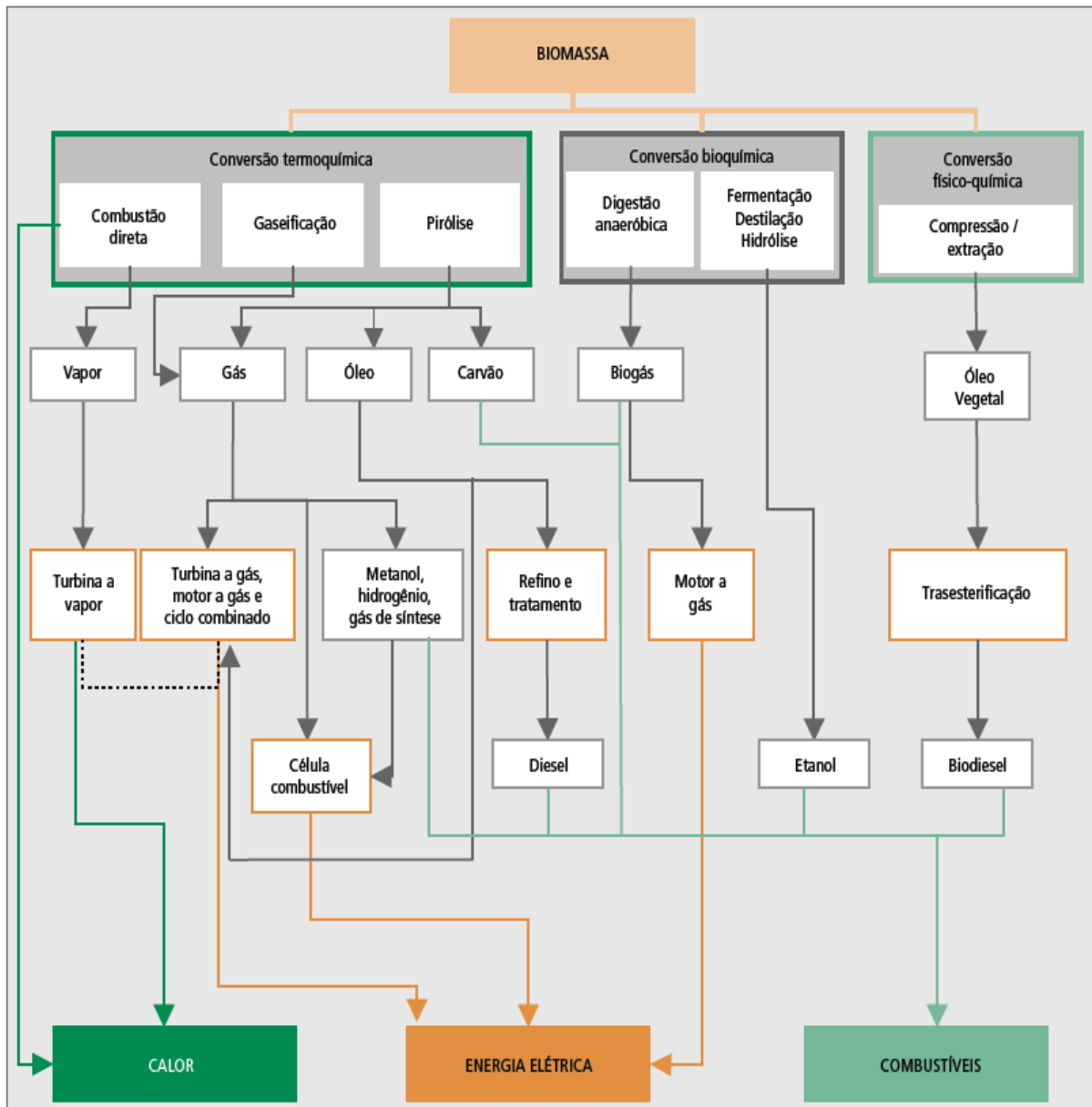
A Figura 12 apresenta as rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa. Estes processos de conversão são brevemente detalhados na sequência.

2.4.1 Conversão Termoquímica

Quando a biomassa é usada para fins energéticos, a energia “quimicamente armazenada” é convertida em calor por meio da combustão, que configura a conversão termoquímica. Uma variedade larga de tecnologias capazes de converter a biomassa em energia está disponível através da via termoquímica, e sua

diferenciação está associada à quantidade de oxigênio que é fornecido ao processo, tendo como referência o valor do coeficiente estequiométrico, resultando nas vias de combustão direta, pirólise e gaseificação (DINKELBACH, 2000).

Figura 12 - Rotas de conversão energética da biomassa



Fonte: MME (2007).

2.4.1.1 Combustão

A queima da biomassa na presença de ar converte a energia química armazenada em calor, energia mecânica ou elétrica, através de vários equipamentos, como fogões, fornos, caldeiras, turbinas a vapor, etc. Quase todo tipo de biomassa

pode ser queimado, mas na prática a combustão é viável apenas para tipos com teor de umidade menor que 50% e os gases produzidos variam na faixa de 800 até 1.000 °C (MCKENDRY, 2002b).

A escala da usina de combustão varia de escala muito pequena (por exemplo, para aquecimento doméstico) até plantas industriais de grande porte na faixa de 100-3000 MW (MCKENDRY, 2002b).

2.4.1.2 Gaseificação

A conversão de biomassa em uma mistura de gás combustível pela oxidação parcial em altas temperaturas – na faixa de 800 a 900 °C – é conhecida como gaseificação. O baixo valor calorífico do gás produzido pode ser queimado diretamente ou usado como combustível para motores e turbinas a gás. O produto gasoso pode ser usado como matéria-prima na produção de produtos químicos como, por exemplo, o metanol (MCKENDRY, 2002b).

O processo de gaseificação é realizado através da injeção controlada de ar, oxigênio puro ou uma mistura destes com vapor de água. Esta escolha é baseada no uso final do gás obtido, sendo o gás gerado através da gaseificação com ar de baixo poder calorífico e o gás gerado através da injeção de oxigênio puro ou, a partir de uma mistura de gases, de médio ou alto poder calorífico (CORTEZ, 2008).

2.4.1.3 Pirólise

A pirólise é a conversão de biomassa em líquido (denominado bio-óleo), frações sólidas e gasosas, aquecendo a biomassa na ausência de ar até cerca de 500 °C (MCKENDRY, 2002b).

Pirólise é o processo em que muito pouco ou nenhum oxigênio é fornecido para a combustão da carga combustível. Através do seu aquecimento a, relativamente, baixas temperaturas (500 a 1.000 °C), ocorre a degradação térmica do combustível, resultando em produtos combustíveis sólidos, como o carvão vegetal, líquidos (óleo pirolítico) e gasosos (gás pirolítico) (MME, 2007).

2.4.2 Conversão Bioquímica

A via bioquímica de conversão energética da biomassa é aquela que utiliza processos biológicos e bioquímicos, que inclui a digestão anaeróbica e a fermentação. O etanol, combustível líquido resultante do processo de fermentação, tem uma aplicação predominante como combustível para o transporte, embora seja aplicável em máquinas térmicas de ciclos termelétricos (MME, 2007).

2.4.2.1 Fermentação

A fermentação é utilizada comercialmente em larga escala em vários países para produzir etanol a partir de culturas de açúcar (por exemplo, cana-de-açúcar, beterraba sacarina) e culturas de amido (por exemplo, milho, trigo). A biomassa é moída e o amido convertido por enzimas em açúcares, com a levedura então convertendo os açúcares em etanol. A purificação do etanol por destilação é um passo intensivo em energia, com cerca de 450 litros de etanol sendo produzido por tonelada de milho seco (MCKENDRY, 2002b).

A conversão da biomassa lignocelulósica (como madeira e gramíneas) é mais complexa, devido à presença de moléculas polissacarídicas de cadeia longa e requer hidrólise ácida ou enzimática antes que os açúcares resultantes possam ser fermentados em etanol (MCKENDRY, 2002b).

2.4.2.2 Digestão anaeróbica

Digestão anaeróbica é a conversão de material orgânico diretamente em um gás denominado biogás, uma mistura de principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo que a concentração volumétrica de metano varia entre 40-75%, em função do tipo de matéria orgânica processada (MME, 2007).

A biomassa é convertida em biodigestores por bactérias num ambiente anaeróbico, produzindo um gás com um teor energético de cerca de 20-40% do valor de aquecimento da matéria-prima. A digestão anaeróbica é uma tecnologia comercialmente comprovada e é amplamente utilizada no tratamento de resíduos

orgânicos com alto teor de umidade, ou seja, entre 80 e 90% de umidade (MCKENDRY, 2002b).

2.5 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

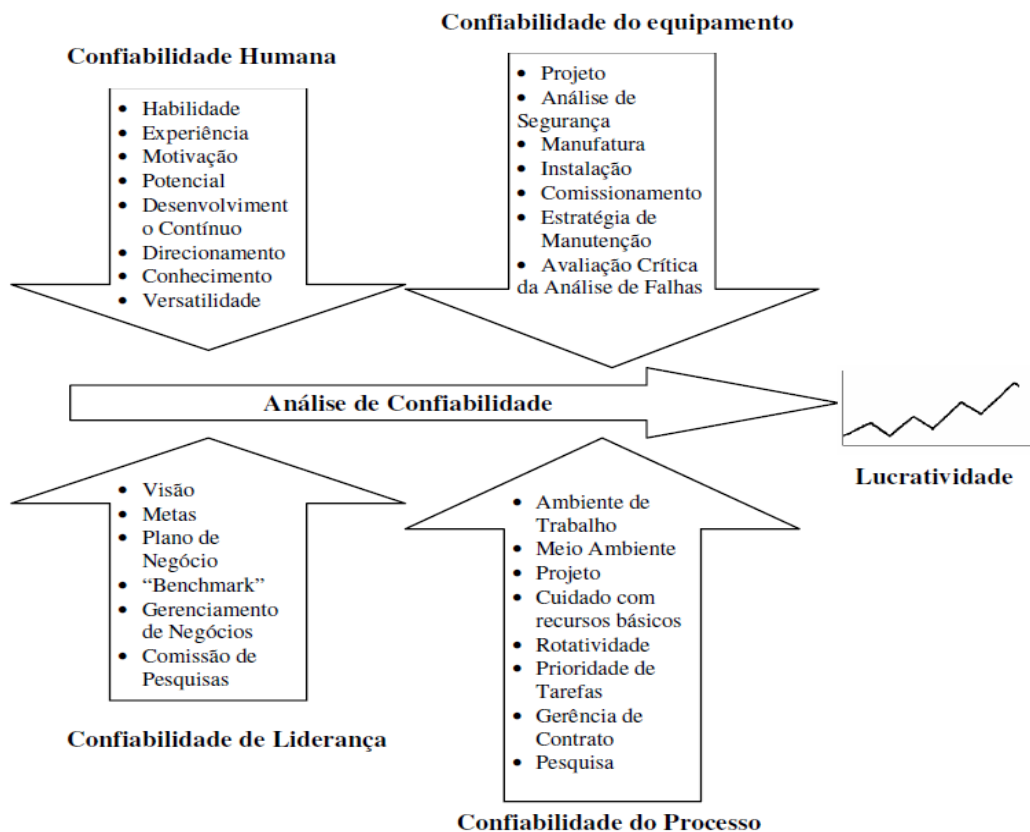
Confiabilidade é a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.” (NBR 5462:1994).

A análise de confiabilidade deve definir os seguintes pontos (LEMES, 2011):

- Principais modos de falha associados aos componentes do sistema;
- Comportamento estatístico destes modos de falha;
- Progressão da falha de um componente ao longo do sistema e as suas consequências sobre a operacionalidade do mesmo.

A Figura 13 ilustra fatores que influenciam uma análise de confiabilidade.

Figura 13 - Fatores que influenciam em uma análise de confiabilidade



Fonte: KHAN (2001).

Uma análise de confiabilidade é uma composição de fatores humanos, dos equipamentos, da liderança dos recursos humanos e dos processos adotados na priorização de tarefas, sendo necessária em todas as etapas de um projeto (KHAN, 2001).

Vale ressaltar que a confiabilidade é um estudo baseado em dados probabilísticos da ocorrência de uma falha. Falha é o fenômeno que compromete o desempenho ou impossibilita a operação de um item (LEMES, 2011).

A probabilidade de falha é o complementar da confiabilidade. Portanto, é definida como sendo a probabilidade de que um dispositivo, ou sistema, falhe, ou deixe de desempenhar suas funções de projeto, por um período definido, sob certas condições operacionais (CASTRO, 2003). Sendo confiabilidade uma função do tempo t , expressa por $R(t)$, então a probabilidade de falha $F(t)$ se dá por:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (14)$$

A taxa de falha λ é uma importante função da confiabilidade e é definida como sendo o número de ocorrências de falha em um período de tempo. Sua expressão matemática pode ser da seguinte forma:

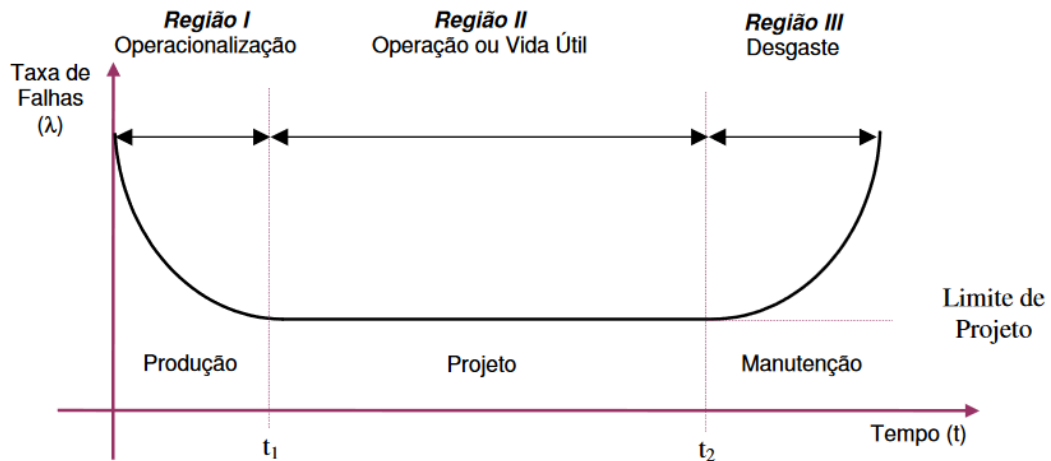
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (15)$$

Onde:

$f(t)$ = Função densidade de probabilidade de falha

A análise do comportamento da taxa de falha de um equipamento por um longo período pode ser representada por uma curva que possui a forma de uma banheira. Por isto, conhecida como Curva da Banheira (CASTRO, 2003). A Figura 14 ilustra essa curva.

Figura 14 - Curva da banheira



Fonte: Adaptado de CASTRO (2003).

Existem três tipos básicos de falha, separados pelas regiões destacadas na Figura 14 (CASTRO, 2003):

1. Falhas de juventude – Infância: problemas no uso inicial do sistema. Podem ser totalmente depuradas através de um rigoroso controle na fabricação e mediante testes antes do envio do produto ao consumidor. A classificação da taxa de falha é decrescente;
2. Falhas casuais – Vida útil: são falhas que ocorrem ao acaso, em intervalos de tempo inesperados. Pico de concentrações de tensões aleatórias que atuam sobre algum ponto fraco e produzem a quebra. A classificação da taxa de falha é constante;
3. Falhas por desgaste – Velhice: Acontecem devido ao envelhecimento do equipamento ou desgaste real (pela perda ou degeneração de características importantes). A classificação da taxa de falha é crescente.

Devido aos desgastes ocorridos na Região III, são necessárias intervenções de manutenção que podem ser corretivas, quando envolve uma ação no sentido de restaurar um item logo após uma falha, para uma condição especificada, ou preventivas, quando envolve uma ação periódica no sentido de manter um item operando em uma determinada condição (CASTRO, 2003).

2.5.1 Modelos Estatísticos

Existe uma gama de modelos de distribuições estatísticas que podem ser utilizados para modelar matematicamente o comportamento da função de probabilidade. Porém, este trabalho apenas descreve as distribuições exponencial e de Weibull.

2.5.1.1 Distribuição exponencial

A distribuição exponencial caracteriza-se por uma taxa de falha constante. É uma distribuição uni paramétrica, onde o parâmetro principal é a própria taxa de falha λ . Sua aplicação se dá no período de vida útil do item analisado. Ela se mostra muito eficiente na análise de componentes eletrônicos, que em condições e ambientes normais de operação, praticamente, não sofrem processos de degradação e possuem longa vida útil (CASTRO, 2003).

A função taxa de falhas neste caso é dada por:

$$\lambda(t) = \lambda \quad (16)$$

Isso resulta em uma função densidade de probabilidade (17), confiabilidade (18) e probabilidade de falha (19):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (17)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (18)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (19)$$

2.5.1.2 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull, criada por Ernst Hjalmar Waloddi Weibull e publicada em 1951, é muito flexível e pode representar todas as regiões da curva da

banheira, apresentada na Figura14, sendo amplamente utilizada em estudos de confiabilidade (LEMES, 2011).

A função taxa de falhas neste caso é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (20)$$

Onde:

β = Constante de forma ou inclinação da distribuição

η = Constante de escala ou vida característica do equipamento ou sistema

t = Período de vida transcorrido

γ = Vida mínima ou parâmetro de localização

Isso resulta em uma função densidade de probabilidade (21), confiabilidade (22) e probabilidade de falha (23):

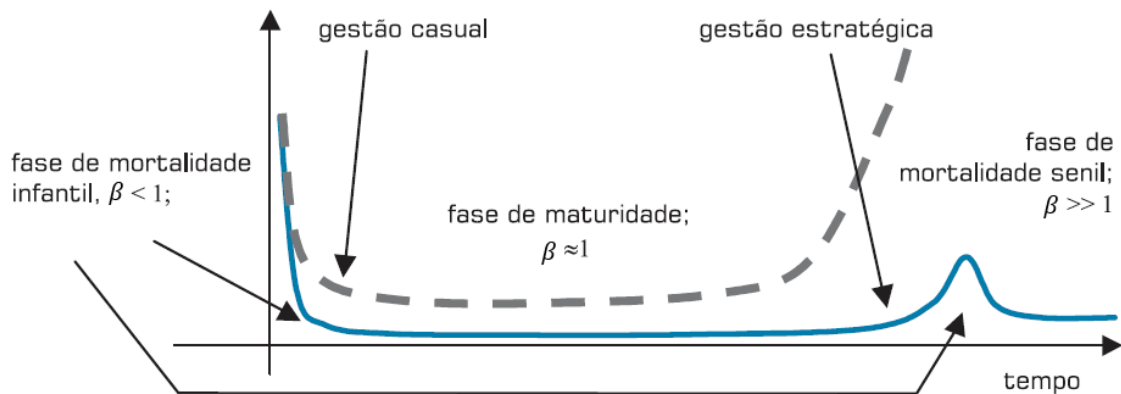
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}} \quad (21)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}} \quad (22)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}} \quad (23)$$

Pelo valor do fator de forma é possível identificar em qual fase da curva da banheira o produto se encontra. Para $\beta = 1$, a distribuição refere-se à fase de vida útil, ou maturidade. Enquanto que para $\beta < 1$, representa-se a fase de juventude, ou mortalidade infantil e para $\beta > 1$, trata-se da fase de velhice, ou mortalidade senil (LEMES, 2011). A Figura 15 demonstra graficamente a variação do β e a posição na curva da banheira.

Figura 15 - Relação do fator de forma e a curva da banheira



Fonte: Adaptado de SELBITTO (2005).

2.5.2 Análise de Falhas

O estudo sobre a análise de falhas aborda a falha dos componentes, os efeitos sobre o sistema e as origens destas falhas, na tentativa de propor ações de mitigação do efeito ou falha (RELIASOFT, 2005). A seguir serão abordados dois métodos sucintamente: a análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA) e a análise da árvore de falhas (FTA).

2.5.2.1 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

O FMEA (do inglês, *Failure Mode and Effect Analysis*) é um método de engenharia usado para definir, identificar, e eliminar falhas conhecidas e/ou potenciais de um projeto de um produto e/ou de seu processo de fabricação antes que elas cheguem ao cliente (STAMATIS, 1995).

A execução de uma análise do tipo FMEA se inicia com a definição dos possíveis modos de falha dos componentes de um sistema. Os componentes considerados na análise são os listados no final dos diversos ramos das árvores funcionais dos sistemas que o compõe. A cada modo de falha estão relacionadas possíveis causas, que se relacionam com fenômenos físicos que ocorrem durante a operação, fabricação ou montagem de componentes. Também são levadas em conta possíveis ações recomendadas (LEMES, 2006).

Os resultados obtidos são compilados em formulários, devendo ser contínuos e acompanhando o ciclo de desenvolvimento dos produtos (BERTSCHE, 2008).

Existem quatro tipos principais de FMEA (STAMATIS, 1995):

- a) FMEA de sistema: usado para analisar sistemas e subsistemas no início do desenvolvimento do conceito e do projeto. Foca nos modos de falha potenciais, causados por deficiências do sistema;
- b) FMEA de produto: usado para analisar produtos antes de sua liberação para a fabricação. Foca nos modos de falha causados por deficiências de projeto de produtos;
- c) FMEA de processos: usado para analisar processos de fabricação e montagem. Foca nos modos de falha causadas por deficiências de processo de fabricação ou montagem;
- d) FMEA de serviço: usado para analisar serviços antes de eles chegarem ao consumidor. Foca nos modos de falha causados por deficiências do sistema ou do processo.

Os tipos de FMEA mais empregados nas indústrias são o de sistema, de produto e de processo. Para outras aplicações, dependem do tipo e complexidade técnica analisada (BERTSCHE, 2008).

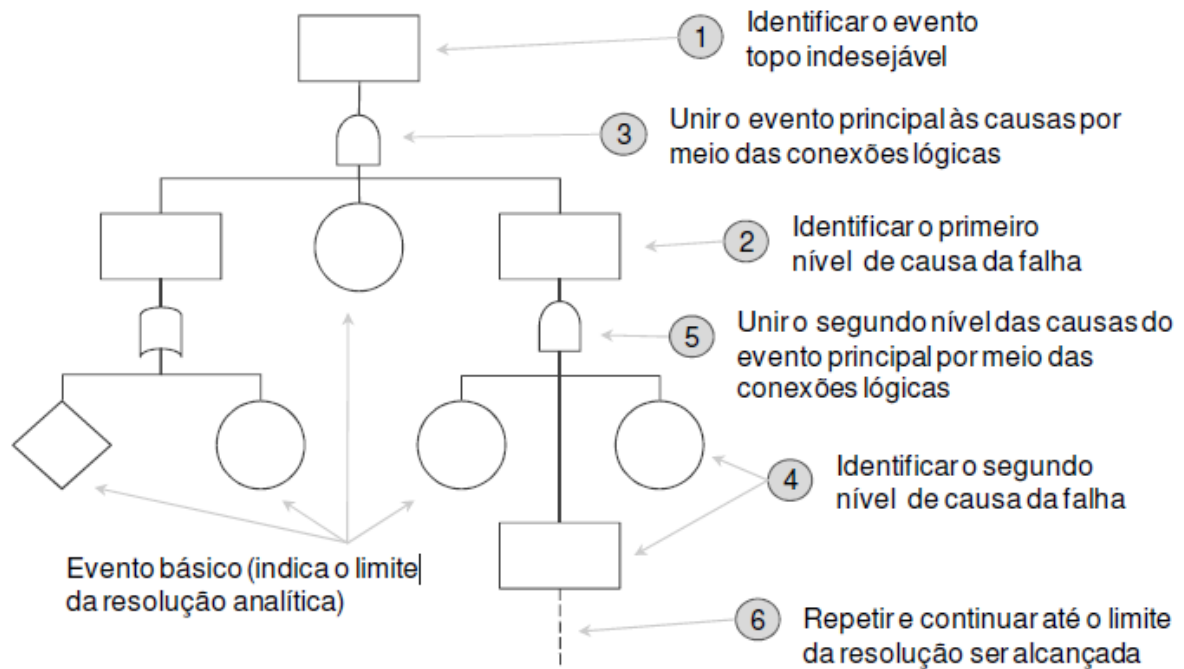
Após os formulários serem preenchidos, o próximo passo é determinar os efeitos e causas e avaliar os riscos. É avaliada a severidade do efeito de falha (índice S), a probabilidade de ocorrência da causa de falha (índice O) e a probabilidade de detecção da causa de falha (índice D). Então, têm-se o índice de risco (RPN, do inglês *Risk Priority Number*), que é a multiplicação dos três índices anteriores. Este índice de risco indica a ordem dos problemas que devem ser atacados (AIAG, 2008).

2.5.2.2 Análise da Árvore de Falhas (FTA)

A análise da árvore de falhas (FTA) é um método sistemático e padronizado capaz de fornecer bases objetivas para análise de modos de falhas em sistemas ou subsistemas (MORELLO, 2005).

A Figura 16 apresenta os passos para a elaboração de uma árvore de falhas.

Figura 16 - Passos para elaboração de uma FTA



Fonte: Adaptado de CLEMENS (2002).

A análise se inicia com um evento topo (TOP) e procede por todas as causas conhecidas e possíveis que podem conduzir à ocorrência do evento topo. Devido à natureza de sua abordagem *top-down*, a FTA tem sido amplamente usada na determinação de causas de modos de falhas (YANG, 2007). O nível mais baixo (DOWN) corresponde aos possíveis modos de falha.

As falhas em FTA podem ser classificadas como (MORELLO, 2005):

- Falhas Primárias: falhas funcionais claramente identificáveis, para equipamento funcionando dentro dos parâmetros de projeto como, por exemplo, falta de energia, queima de fusíveis, falha de conexão, ou quebra de válvulas. Um evento resultante de uma combinação lógica é representado por um retângulo;
- Falhas Secundárias: são falhas devido ao excessivo stress ambiental ou operacional sobre o componente;
- Falhas de Comando: são falhas decorrentes da própria operação do componente, porém em lugar e momento inadequados.

Para construir uma FTA, podem ser usados como objetivos (RAMAKUMAR, 1993):

- Estabelecimento de um método padronizado de análise de falhas, verificando como ocorrem em um produto ou processo;

- Análise da confiabilidade de um produto ou processo;
- Estudo dos modos de falhas de um sistema, de maneira dedutiva;
- Priorização das ações corretivas a serem tomadas;
- Análise e projeto de sistemas de segurança com maior confiança;
- Facilidade para o entendimento de informações das falhas do sistema;
- Indicação clara do caminho crítico do sistema;
- Simplificação e otimização de equipamentos.

2.5.3 Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é usada em casos em que não se podem obter expressões de forma analítica utilizando um número finito de funções conhecidas. A saída da simulação – soluções numéricas – é obtida através de parâmetros de entrada gerados aleatoriamente a partir de um algoritmo ou sistema. As variáveis são geradas a partir de uma distribuição de probabilidades para simular o processo de obtenção de dados de uma população ou amostra real (CARMO, 2014).

O sistema é simulado várias vezes, sendo que cada simulação pode ser considerada como um ciclo. Em cada ciclo, a entrada, que consiste num valor de cada parâmetro, pertencente a uma distribuição aleatória especificada, é usado para obter um resultado. A saída consiste, assim, num conjunto elevado de resultados que representam respostas separadas e independentes. O conjunto destes resultados consiste numa distribuição de probabilidades de possíveis cenários. Quanto maior for o número de ciclos, mais precisa é a série de probabilidades gerada pela simulação (CARMO, 2014).

É possível listar algumas vantagens de usar Monte Carlo, como: capacidade de permitir variações em simultâneo das variáveis de entrada, possibilitando a correlação entre as variáveis e fornece probabilidades de ocorrência dos resultados, bem como os seus intervalos de confiança e desvios padrões. Assim como algumas desvantagens: difícil definir quais as distribuições de probabilidade das variáveis mais apropriadas e necessita de softwares caros para realizar uma simulação (CARMO, 2014).

2.5.4 Séries Temporais

As séries temporais são conjuntos de observações sobre uma variável, ordenados no tempo, e registrado em períodos regulares que exerceram influência sobre os dados no passado e podem continuar a fazê-lo no futuro. O objetivo da análise de séries temporais é identificar padrões não aleatórios na série temporal de uma variável de interesse, e a observação deste comportamento passado pode permitir fazer previsões sobre o futuro, orientando a tomada de decisões. Como exemplo de séries, pode ser citado: temperaturas máximas e mínimas diárias em uma cidade, vendas mensais de uma empresa, entre outros (REIS, 2018).

De acordo com modelos clássicos de séries temporais, são compostas por quatro padrões: tendências – esta geralmente obtida por mínimos quadrados ou médias móveis -, variações cíclicas ou ciclos, variações sazonais ou sazonalidade e variações irregulares. Há também outras abordagens diferentes do modelo clássico, como por exemplo: modelos Auto Regressivos (AR), modelos Auto Regressivos de Médias Móveis (ARMA) e os modelos Auto Regressivos Integrados de Médias Móveis (ARIMA) (REIS, 2018).

2.5.5 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é “uma técnica de análise numérica para se obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas de engenharia” (HUEBNER; THORNTON, 1982). O processo de análise por elementos finitos é mostrado na Figura 17.

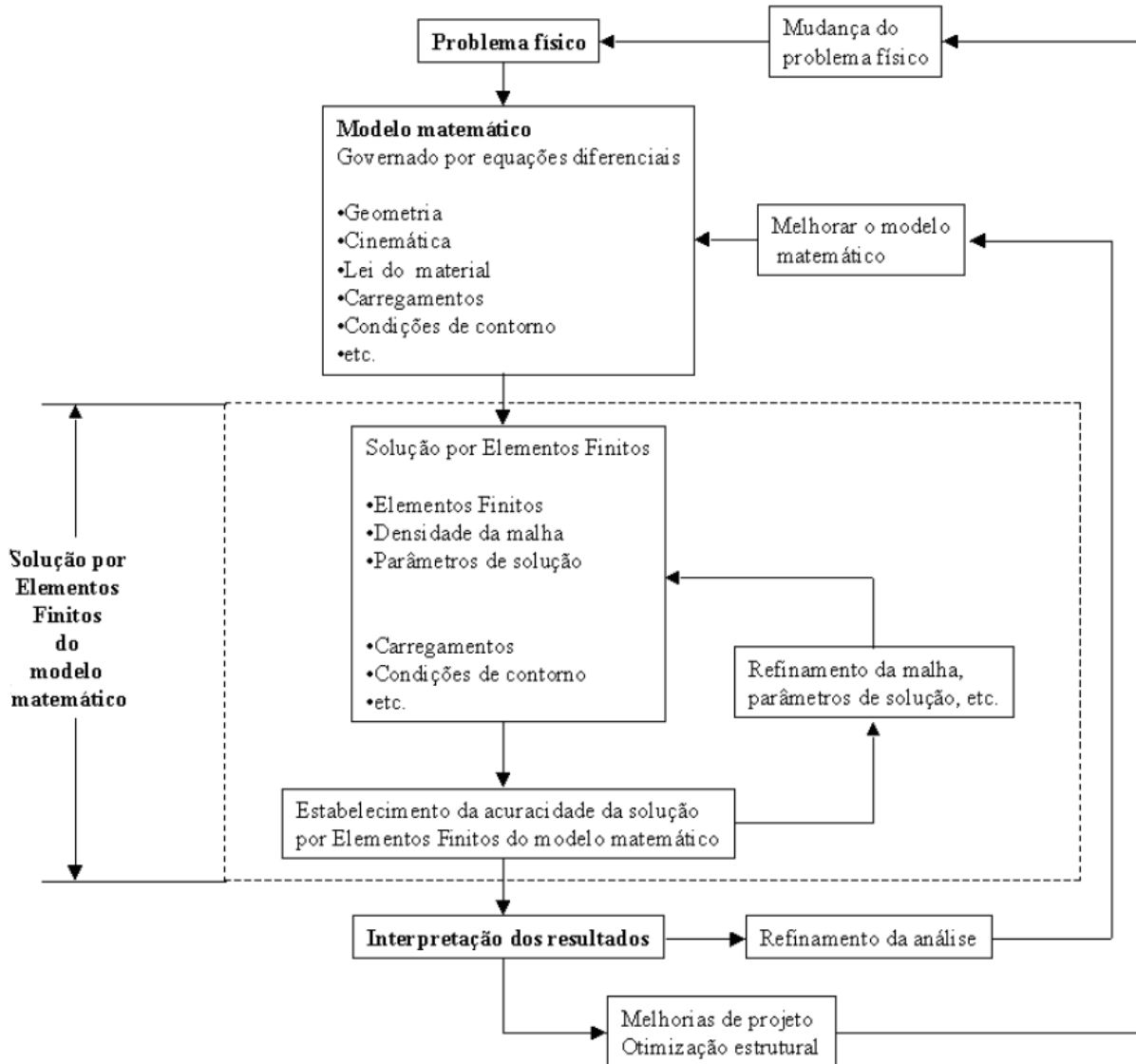
Ainda de acordo com Huebner e Thornton (1982), o método pode ser resumido em três etapas, sendo: pré-processamento, solução e pós-processamento.

Pré-processamento é a etapa onde se prepara o problema, introduzindo-se as condições iniciais e de contorno, carregamentos, escolhe-se os elementos, propriedades dos materiais e onde são feitas simplificações para facilitar a análise. Pode ser dividida em mais duas etapas (SANTOS, 2013):

- Discretização do modelo: o modelo contínuo é subdividido em um número equivalente de elementos finitos, os quais possuem nós, que podem ser internos ou externos, e estão interligados. O deslocamento desses nós são as incógnitas básicas do problema;

- Função de interpolação: De acordo com o tipo de elemento escolhido, existem funções de interpolação ou deslocamento associadas.

Figura 17 – Processo de análise por elementos finitos



Fonte: BATHE (1996).

A etapa de solução se refere ao algoritmo a ser utilizado para resolver as equações diferenciais com as restrições impostas na etapa anterior. Pode ser dividida em mais três etapas (SANTOS, 2013):

- Matriz de rigidez elementar: relaciona o deslocamento de um nó às forças aplicadas nele mesmo. Depende da função de interpolação escolhida e das propriedades dos elementos;

- Matriz de rigidez global: a partir de interconexões nodais, a matriz global para todo o modelo a partir das matrizes elementares é montada, o que permite calcular deslocamentos desconhecidos;
- Cálculos: tensão e deformação são proporcionais às derivadas dos deslocamentos, de forma geral.

Pós-processamento é a etapa final e depende de quem está modelando o problema, podendo fornecer informações sobre deslocamentos, deformações, gradientes, etc. (SANTOS, 2013).

2.5.6 Otimização Meta-Heurística

A ideia fundamental das técnicas de otimização é encontrar o melhor desempenho de uma função, seja ela maximizada ou minimizada, ou uma solução próxima da melhor, não sendo necessário testar todas as configurações possíveis (SOUZA, 2014).

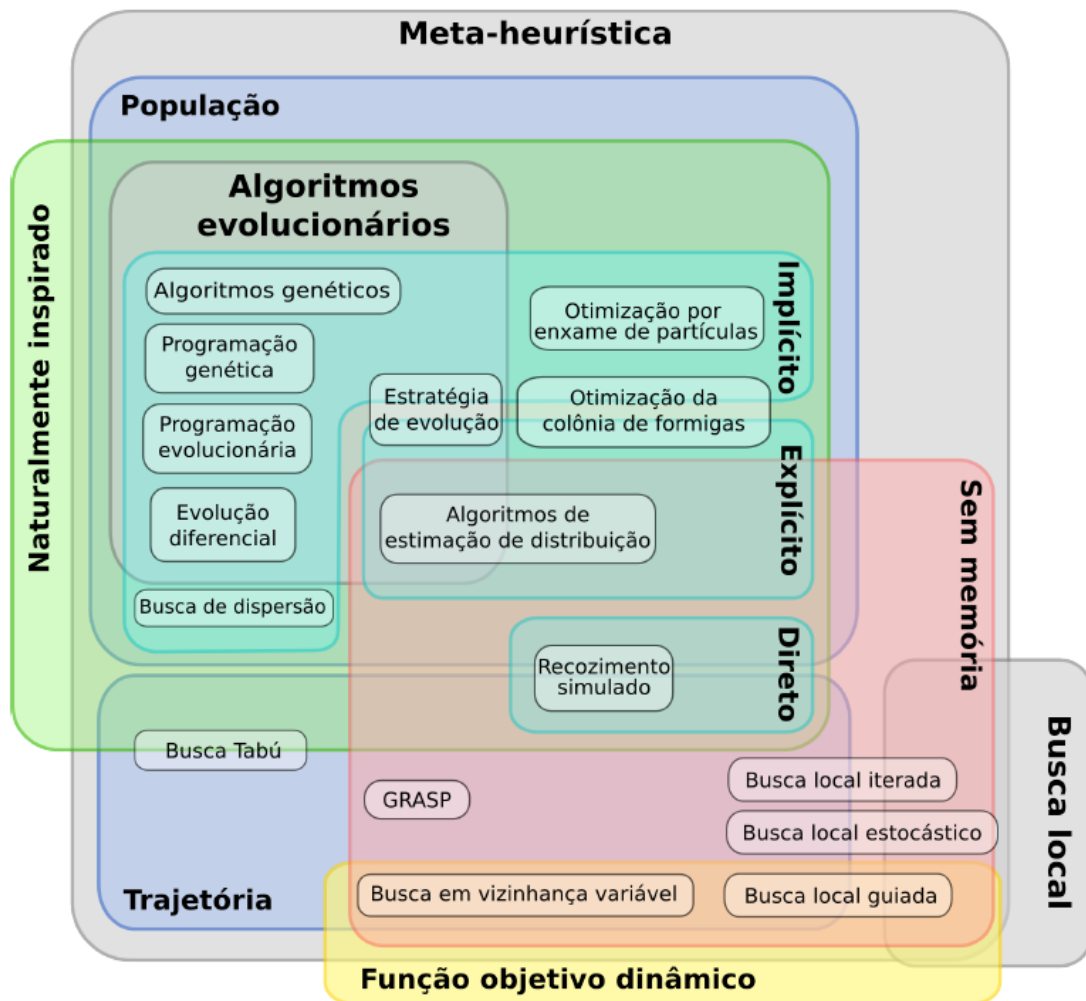
Quando não se conhece uma técnica ou algoritmo para se resolver problemas mais complexos de otimização, são usadas as meta-heurísticas. Ou seja, é a aplicação de métodos heurísticos para resolver um problema de forma genérica, que usam a aleatoriedade e conhecimento histórico dos resultados anteriores para se guiarem pelo espaço de busca (SOUZA, 2014).

Também pode ser definido como:

Um processo de geração iterativo que guia uma heurística subordinada por combinação de forma inteligente de diferentes conceitos para explorar e explorar o espaço de busca, aprendendo estratégias que são usadas para estrutura da informação na ordem de encontrar eficientemente uma solução próxima da ótima. (BEHESHTI; SHAMSUDDIN, 2013).

A Figura 18 ilustra uma forma de classificar os algoritmos de meta-heurística. Neste caso é possível comparar algoritmos naturalmente inspirados, ou seja, cuja origem é inspirada na natureza, como a otimização da colônia de formigas, ou por enxame de partículas, e algoritmos genéticos, com algoritmos não inspirados pela natureza, como a busca local iterada e a busca tabu (BEHESHTI; SHAMSUDDIN, 2013).

Figura 18 – Classificação de algoritmos de meta-heurística



Fonte: BEHESHTI; SHAMSUDDIN (2013).

Também podem ser comparados algoritmos baseados em população, em que as buscas são realizadas com vários pontos iniciais paralelamente, com buscas por trajetória, em que trabalham com uma única solução a qualquer momento, como a busca em vizinhança variável (BEHESHTI; SHAMSUDDIN, 2013).

2.5.7 Cadeia de Markov

Um Processo Estocástico é dito ser um Processo Markoviano se a probabilidade de qualquer evento futuro, dado qualquer evento passado e o estado presente, é independente do evento passado e depende apenas do estado presente (CASTRO, 2015).

Dessa forma, este é um processo sem memória, pois o futuro da evolução do processo depende apenas do momento em que ela está e não do que aconteceu anteriormente – uma vez que o passado é desprezado, o que os torna mais práticos a serem trabalhados, pois é possível computar todas as probabilidades que neles existam. Se a probabilidade de transição entre os estados não variarem ao longo do tempo, a Cadeia de Markov é dita como homogênea (CASTRO, 2015).

É possível agrupar todas as probabilidades de um estado ir para outro em uma única matriz, denominada de Matriz de Transição. Esta matriz é quadrada e cada elemento deve satisfazer duas condições (CASTRO, 2015):

- Cada probabilidade individual deve ser maior ou igual à zero;
- A soma de todas as probabilidades deve ser igual à um.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão da literatura presente neste trabalho tem o intuito de identificar artigos e pesquisas disponíveis e relevantes para a área de pesquisa específica, neste caso a aplicação da teoria da confiabilidade em sistemas de energias renováveis. Como o tema escolhido é abrangente, foi delimitado nas três principais vertentes: energia solar, eólica e da biomassa. A Figura 19 apresenta o fluxograma do processo realizado, que é explicado em mais detalhes a seguir.

Para iniciar a busca no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), primeiramente é necessário definir as palavras-chave da busca. Estas são dispostas na forma de dois eixos que correspondem a uma composição em que estão unidas por operadores booleanos E/OU, por exemplo, compondo uma *string* de busca.

Em função da área delimitada, definiu-se três palavras chaves, para o primeiro eixo: *Solar*, *Wind* e *Biomass*. Para compor o segundo eixo, que define a área de aplicação dos assuntos do primeiro eixo, foi definida a palavra *Reliability*.

As palavras-chave de busca, portanto, foram definidas conforme a Tabela 3:

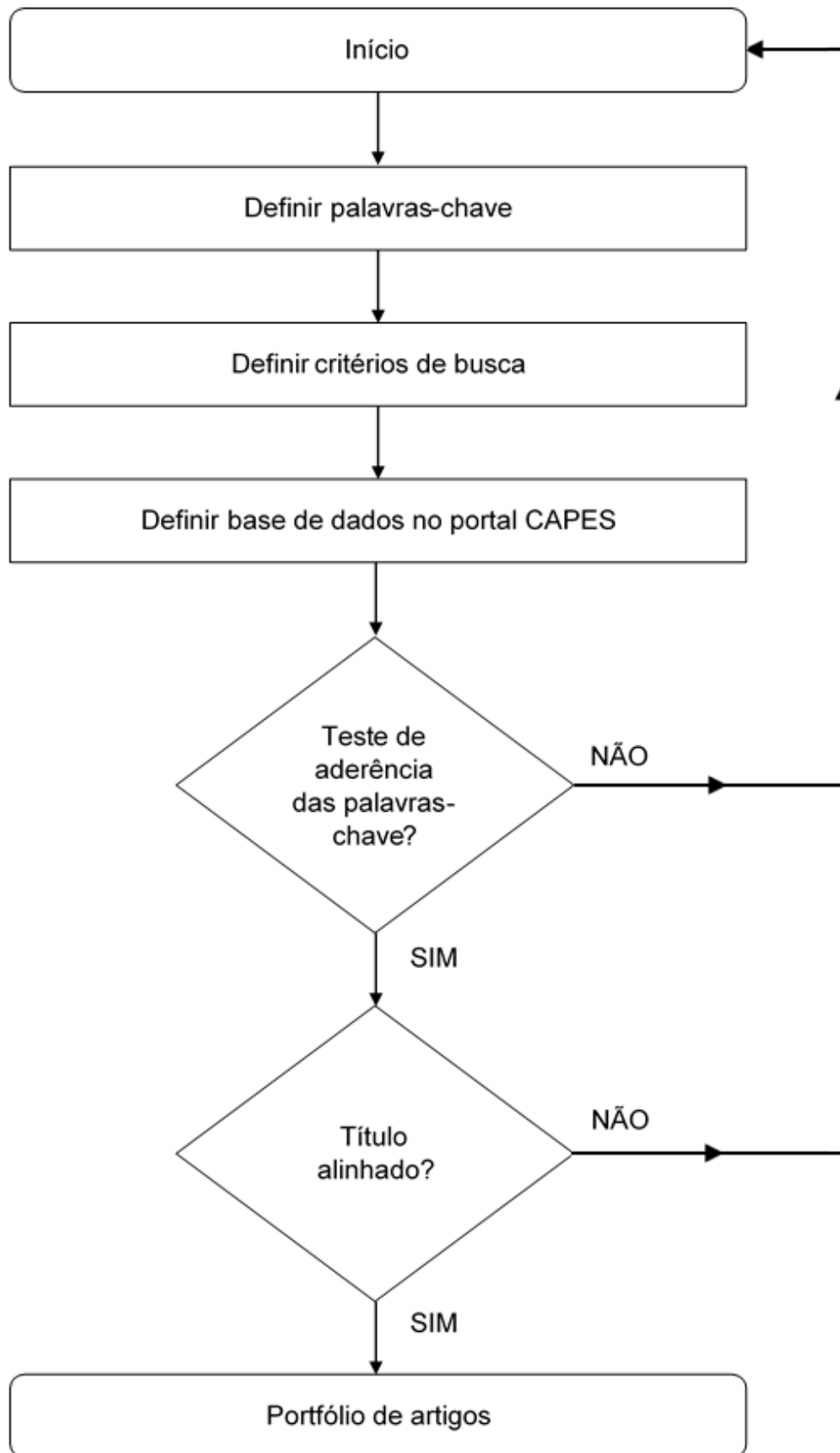
Tabela 3 – Palavras-chave de busca

EIXO 1	OPERADOR BOOLEANO	EIXO 2
<i>Solar</i>	E	<i>Reliability</i>
<i>Wind</i>	E	<i>Reliability</i>
<i>Biomass</i>	E	<i>Reliability</i>

Fonte: O autor (2018).

Uma vez reconhecidas as palavras-chave de busca, foram definidos os seguintes critérios de busca dentro do Portal de Periódicos da CAPES: busca avançada - no assunto, período dentro dos últimos 5 anos, artigos com texto integral disponível, idioma Inglês e periódicos revisados por pares. O resultado da busca é mostrado na Tabela 4.

Figura 19 - Fluxograma do processo de revisão da literatura



Fonte: O autor (2018).

Tabela 4 – Resultado da busca no Portal da CAPES

PALAVRAS-CHAVE	NÚMERO DE ARTIGOS
<i>Solar E Reliability</i>	38
<i>Wind E Reliability</i>	67
<i>Biomass E Reliability</i>	8
TOTAL	113

Fonte: O autor (2018).

Por meio do Portal foi possível obter 113 artigos. Para a avaliação das buscas fez-se um teste de aderência: aleatoriamente são escolhidos artigos e nesses artigos devem ser encontradas as palavras-chaves. A partir da resposta positiva obtida os artigos encontrados passaram pelo processo de filtragem.

A filtragem inicia com a exclusão dos artigos duplicados, ou seja, artigos de mesma referência em duas ou mais bases de dados diferentes. Os restantes tiveram seus títulos lidos em busca de alinhamento ao tema da pesquisa. A quantidade de artigos resultante é de 49, formando o portfólio final de artigos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e a discussão sobre o portfólio dos 49 artigos. A tabela contendo autores, ano de publicação, tipo de estudo, entre outras informações, encontra-se no Apêndice 1.

A primeira análise será referente aos periódicos presentes no portfólio bibliográfico, sendo todos internacionais. A Tabela 5 apresenta quais periódicos e em qual quantidade aparecem dentro do portfólio, bem como as respectivas porcentagens.

Tabela 5 – Periódicos presentes no portfólio bibliográfico

(continua)		
PERIÓDICO	QUANTIDADE	%
Renewable Energy	7	14,3%
Wind Energy	7	14,3%
Solar Energy	5	10,2%
Applied Energy	3	6,1%
Renewable and Sustainable Energy Reviews	3	6,1%
Electrical Power and Energy Systems	2	4,1%
Energy	2	4,1%
21st Iranian Conference on Electrical Engineering	1	2,0%
Applied Solar Energy	1	2,0%
Biomass and Bioenergy	1	2,0%
Energy Conversion and Management	1	2,0%
Environmental Progress & Sustainable Energy	1	2,0%
Frontiers in Energy	1	2,0%
IEEE Transactions on Energy Conversion	1	2,0%
IIE Transactions	1	2,0%
International Journal of Energy Research	1	2,0%
International Journal of Energy Sector Management	1	2,0%
International Journal of Hydrogen Energy	1	2,0%
International Journal of Renewable Energy Development	1	2,0%
International Journal of Sustainable Energy	1	2,0%
International Journal of Systems Assurance Engineering and Management	1	2,0%
International Transactions on Electrical Energy Systems	1	2,0%
Journal of Energy Engineering	1	2,0%
Journal of Modern Power Systems and Clean Energy	1	2,0%
Journal of Renewable and Sustainable Energy	1	2,0%

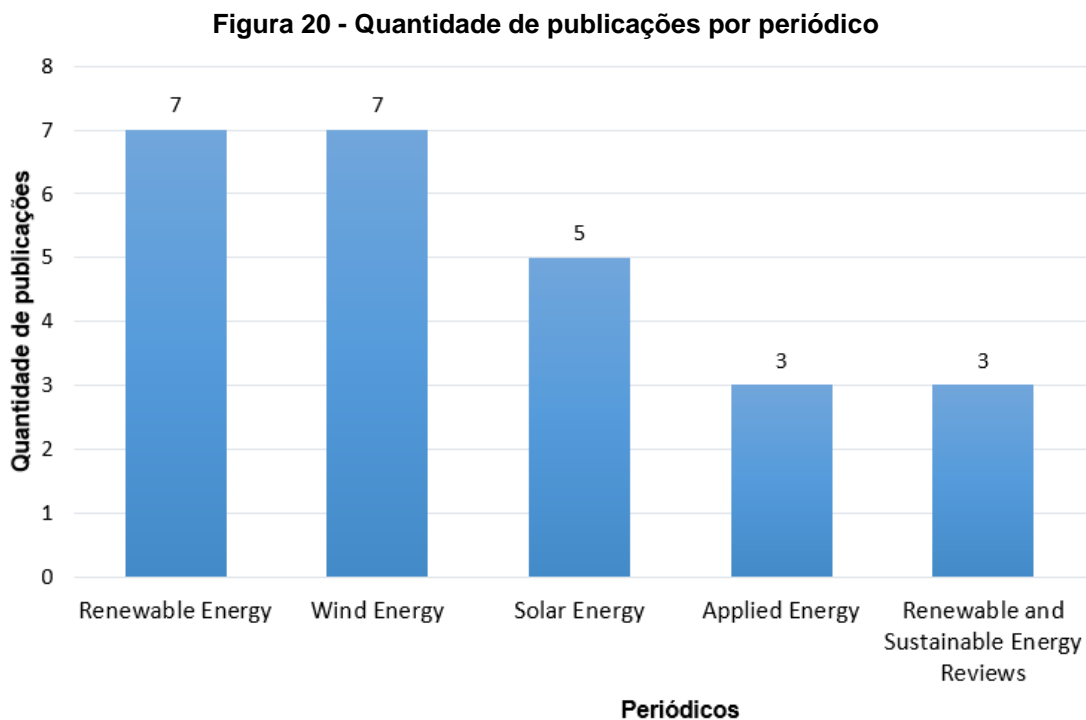
Tabela 5 – Periódicos presentes no portfólio bibliográfico

(conclusão)		
PERIÓDICO	QUANTIDADE	%
Journal of Renewable Energy	1	2,0%
Reliability Engineering and System Safety	1	2,0%
TOTAL	49	100%

Fonte: O autor (2018).

A partir da tabela é possível notar que as publicações estão dispersas em 27 periódicos distintos. Os com mais destaques são: *Renewable Energy*, com 7 artigos, *Wind Energy*, com 7 artigos e *Solar Energy*, com 5 artigos. Estes três periódicos totalizam, aproximadamente, 39% do total de artigos do portfólio.

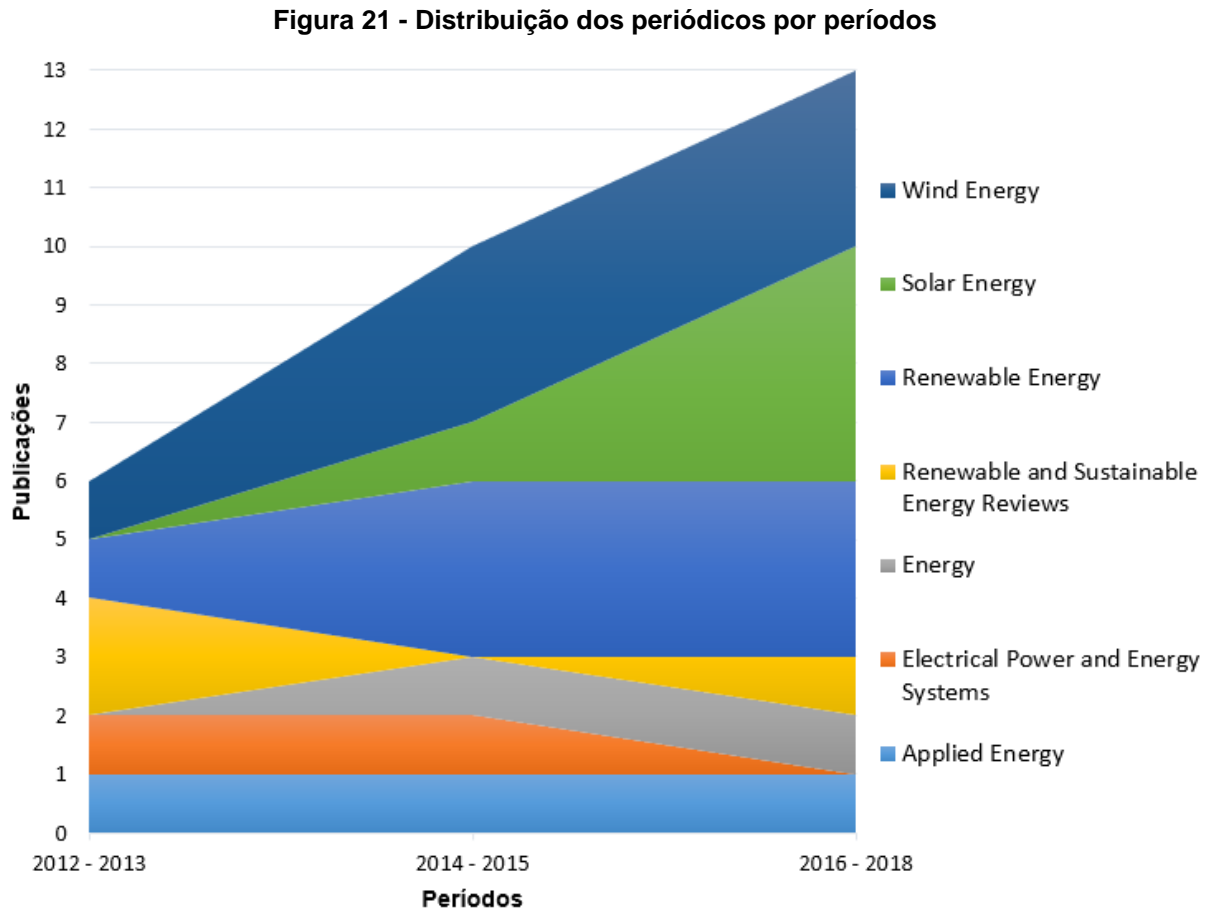
A Figura 20 apresenta, de forma gráfica, todos os periódicos que possuem mais que dois artigos, sendo estes os mais relevantes e recorrentes no estudo dos temas de engenharia de confiabilidade e energias renováveis.



Fonte: O autor (2018).

Então em destaque estão os três mencionados anteriormente, junto com os periódicos *Applied Energy* e *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, com 3 artigos cada.

Os periódicos mais relevantes – com mais de uma publicação no portfólio – também podem ser agrupados por períodos de publicação, conforme mostra a Figura 21.

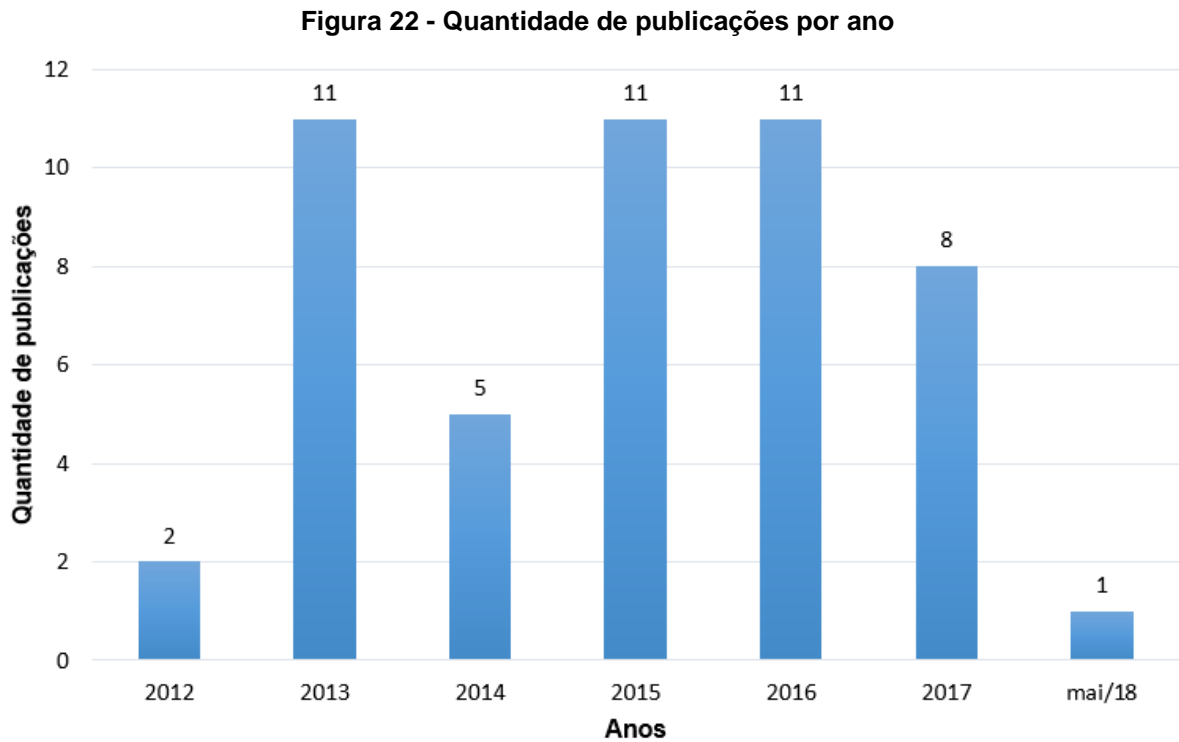


Fonte: O autor (2018).

Assim verifica-se que os periódicos *Wind Energy*, *Renewable Energy* e *Applied Energy* possuem publicações nos três períodos selecionados, sendo que o primeiro abrange os anos de 2012 e 2013, o segundo 2014 e 2015 e o terceiro, e maior deles, consiste nos anos de 2016, 2017 e um pedaço do ano 2018. Os periódicos *Energy* e *Solar Energy* marcam presença a partir de 2014, ou seja, no segundo e terceiro períodos, diferentemente do *Electrical Power and Energy Systems*, que possui publicações no primeiro e segundo períodos. Já o jornal *Renewable and Sustainable Energy Reviews* aparece no primeiro e terceiro períodos, não possuindo nenhum artigo publicado nos anos de 2014 e 2015.

No que se refere ao ano de publicação dos artigos do portfólio, verifica-se que os anos de 2013, 2015 e 2016 foram os mais expressivos, com 11 publicações em

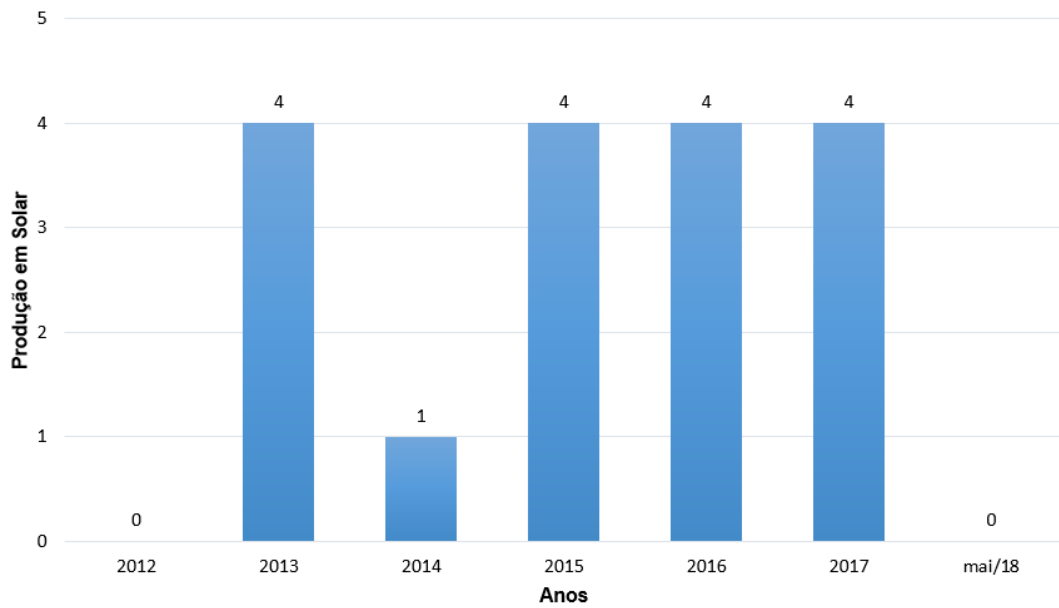
cada, seguido por 2017, com 8 artigos publicados, conforme mostra a Figura 22. O ano de 2018 possui apenas uma publicação, também pelo fato de que a pesquisa da revisão da literatura foi realizada no mês de maio de 2018, tendo ainda mais da metade do ano para aumentar o número de publicações.



Fonte: O autor (2018).

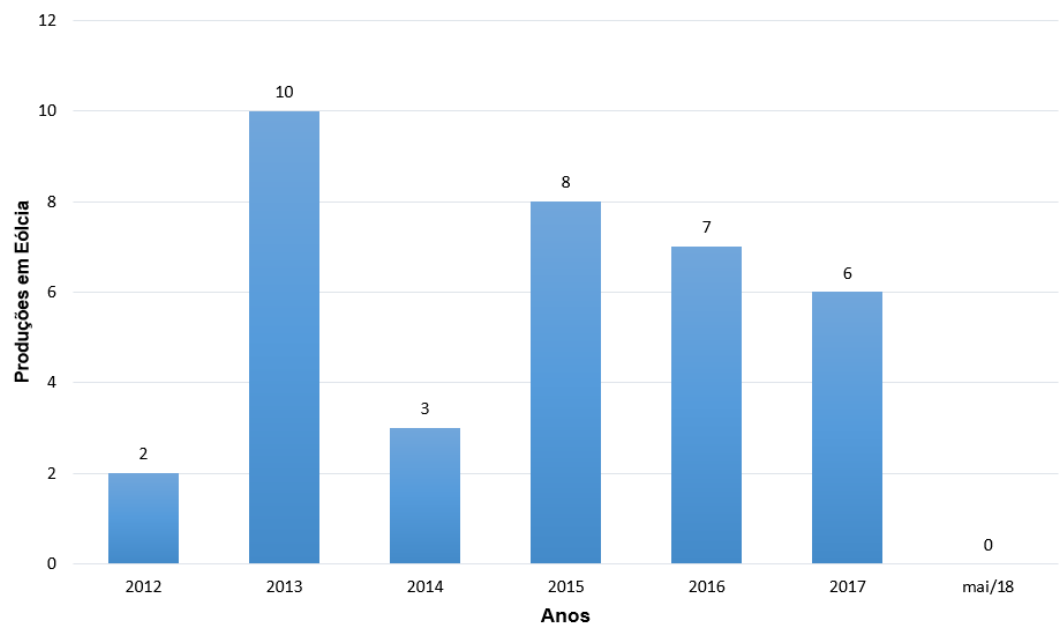
Ainda pode-se desmembrar o gráfico das publicações no decorrer dos anos pesquisados em três distintos, um para solar, um para eólica e outro para biomassa.

A Figura 23 apresenta as publicações na área de energia solar no período entre 2012 e maio de 2018. A partir deste gráfico pode-se perceber que os anos com maior número de publicações em energia solar foram em 2013, 2015, 2016 e 2017, com quatro artigos publicados. Em seguida, com apenas um artigo, o ano de 2014.

Figura 23 - Quantidade de publicações em energia solar por ano

Fonte: O autor (2018).

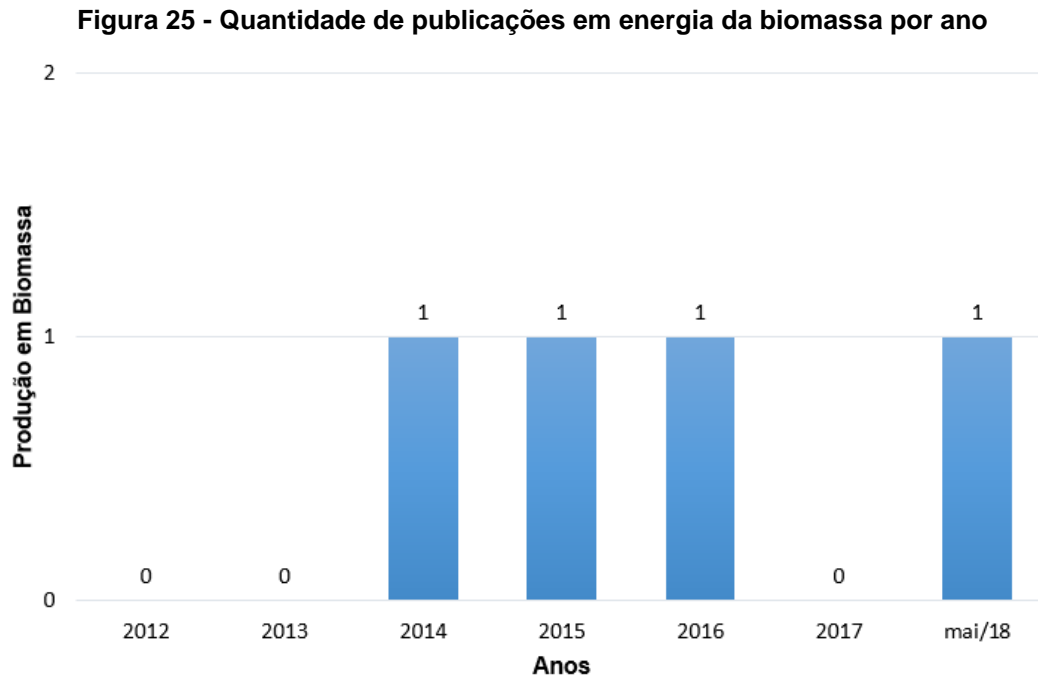
Na Figura 24 é mostrada a quantidade de publicações em energia eólica pelo mesmo período especificado.

Figura 24 - Quantidade de publicações em energia eólica por ano

Fonte: O autor (2018).

O ano de 2013 foi o mais expressivo na área de energia eólica, com 10 artigos publicados. Em seguida os anos de 2015, 2016 e 2017 com 8, 7 e 6 artigos publicados, respectivamente. Já os anos 2014 possui 3 artigos e 2012 apenas dois.

A Figura 25 mostra a relação de publicações na área de biomassa para o mesmo período, de 2012 a maio de 2018.



Fonte: O autor (2018).

Para a área de energia da biomassa, encontra-se um número significativamente menor de artigos publicados, quando relacionada com confiabilidade, sendo que apenas 1 artigo foi encontrado nos anos de 2014, 2015, 2016 e 2018, respectivamente.

Ao somar a quantidade individual dos gráficos de cada área resulta em um número maior que o do portfólio de artigos estabelecido. Isto se deve ao fato de que 8 artigos – 3 em 2013, 2 em 2015, 1 em 2016 e mais 2 em 2017 – contemplam tanto energia solar quanto eólica, sendo contabilizados duas vezes. Ao remover esses duplicados da conta, retorna-se ao número de artigos do portfólio bibliográfico inicialmente estabelecido.

Em relação ao país de origem das publicações, observa-se que da China foi de onde mais saíram artigos, conforme mostra a Tabela 6.

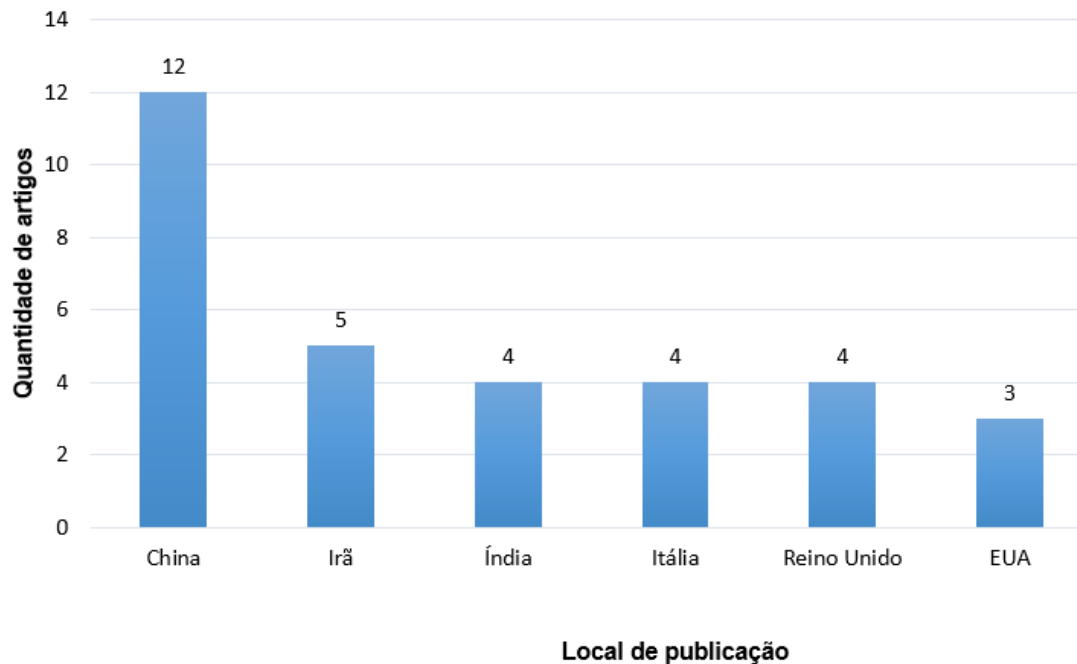
Tabela 6 – Local de publicação dos artigos do portfólio

LOCAL	QUANTIDADE	%
China	12	24,5%
Irã	5	10,2%
Índia	4	8,2%
Itália	4	8,2%
Reino Unido	4	8,2%
EUA	3	6,1%
Espanha	2	4,1%
França	2	4,1%
Jordânia	2	4,1%
República da Coreia	2	4,1%
Argélia	1	2,0%
Brasil	1	2,0%
Canadá	1	2,0%
Colômbia	1	2,0%
Dinamarca	1	2,0%
Etiópia	1	2,0%
Malásia	1	2,0%
Noruega	1	2,0%
Suécia	1	2,0%
TOTAL	49	100%

Fonte: O autor (2018).

Para enfatizar os países mais relevantes, a Figura 26 mostra graficamente todos os que possuem mais que duas participações no portfólio.

Figura 26 - Quantidade de publicações por local

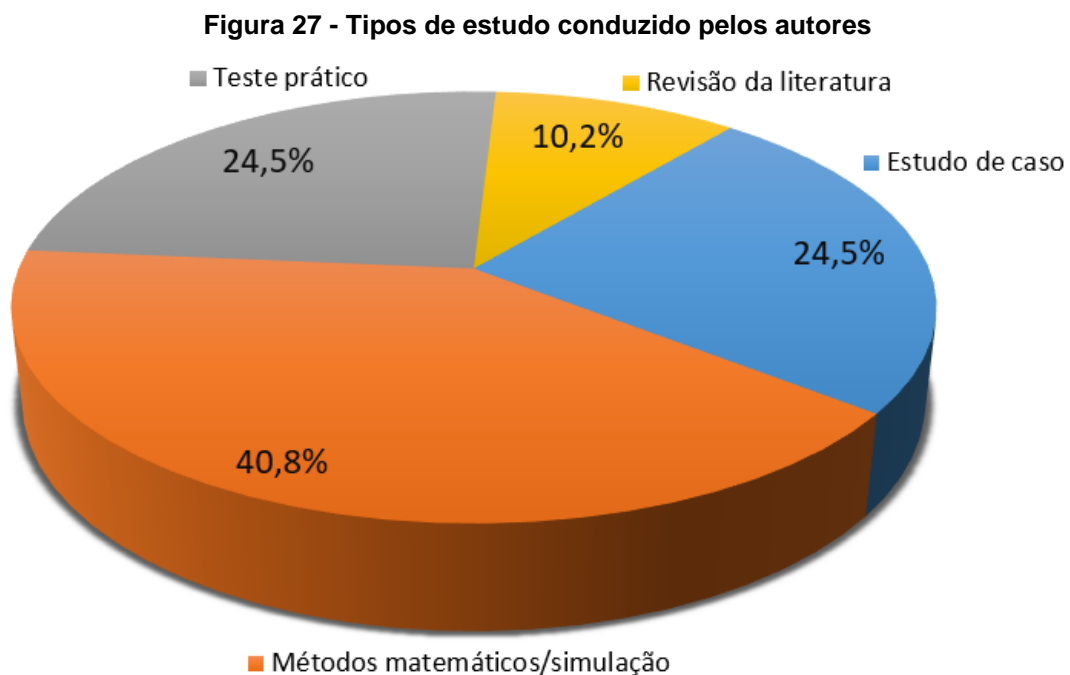


Fonte: O autor (2018).

Dos 19 países que publicaram artigos para esta pesquisa, existem 6 mais relevantes, possuindo mais que duas publicações no período de 2012 até o começo de 2018. Em primeiro lugar tem-se a China, com 12 artigos, aproximadamente 24% do total, seguido do Irã com 5 artigos. Após Índia, Itália e Reino Unido que, somados, possuem também 24% do total e em último lugar os EUA com 3 artigos. Destaque especial para uma publicação do Brasil, na área de energia solar, publicado em 2016 pela Universidade de São Paulo (USP).

Entrando na parte do conteúdo dos artigos, os tipos de estudo conduzido pelos autores foram classificados conforme um dos grupos a seguir: métodos matemáticos/simulação, estudo de caso, teste prático e revisão da literatura. O primeiro grupo consiste nos artigos que apresentam formulações matemáticas e simulações computacionais. O segundo e o terceiro envolvem estudos relacionados a usinas e/ou sistemas que estejam operando na prática, ou em equipamentos isolados ou em laboratórios, respectivamente. Já o último grupo apresenta revisão sobre algum tema relacionado à energia solar, eólica ou da biomassa.

A Figura 27 ilustra os tipos de estudos e suas porcentagens dentro do portfólio bibliográfico estabelecido neste trabalho.



Fonte: O autor (2018).

O grupo de métodos matemáticos/simulação está em 20 dos 49 artigos, resultando em 40,8% do total. Os grupos de estudo de caso e teste prático possuem 12 artigos em cada, o que totaliza 49% do total de artigos com alguma aplicação prática. Por fim, o grupo de revisão da literatura possui 5 artigos, resultando em 10,2% do total. Desta forma, tem-se 51% do portfólio de cunho teórico.

Com relação ao método ou técnica utilizado nos artigos, a Tabela 7 apresenta-os de acordo com o mesmo índice utilizado na tabela do portfólio bibliográfico que consta no Apêndice 1.

Tabela 7 – Métodos/técnicas utilizados nos artigos

(continua)

ÍNDICE	MÉTODO/TÉCNICA UTILIZADO
1	FMEA
2	Simulação de Monte Carlo
3	Empirical-Statistical Downscaling (ESD)
4	Loss of Load Probability (LOLP), Otimização
5	Elementos Finitos
6	Simulação de Monte Carlo
7	Stored Energy to be Transmitted (modelo SET)
8	Circuito By-Pass
9	Séries Temporais
10	Otimização
11	Cadeia de Markov
12	Elementos Finitos
13	RCM, FMEA
14	Cadeia de Markov, Simulação de Monte Carlo
15	Weibull, FMEA
16	Weibull, Distribuição Beta, Estimação de Densidade por Kernel
17	Simulação de Monte Carlo, Otimização
18	Simulação de Monte Carlo
19	Mean Time Between Failures (MTBF)
20	Processos construtivos contra corrosão
21	Lundberg-Palmgren Theory
22	Não especificado
23	Simulação de Monte Carlo, Séries Temporais
24	Weibull, Effective Load Duration Curve (ELDC)
25	Weibull
26	Simulação de Monte Carlo
27	Distribuição Beta
28	Séries Temporais
29	Weibull, Cadeia de Markov
30	Cadeia de Markov, Séries Temporais

Tabela 7 – Métodos/técnicas utilizados nos artigos

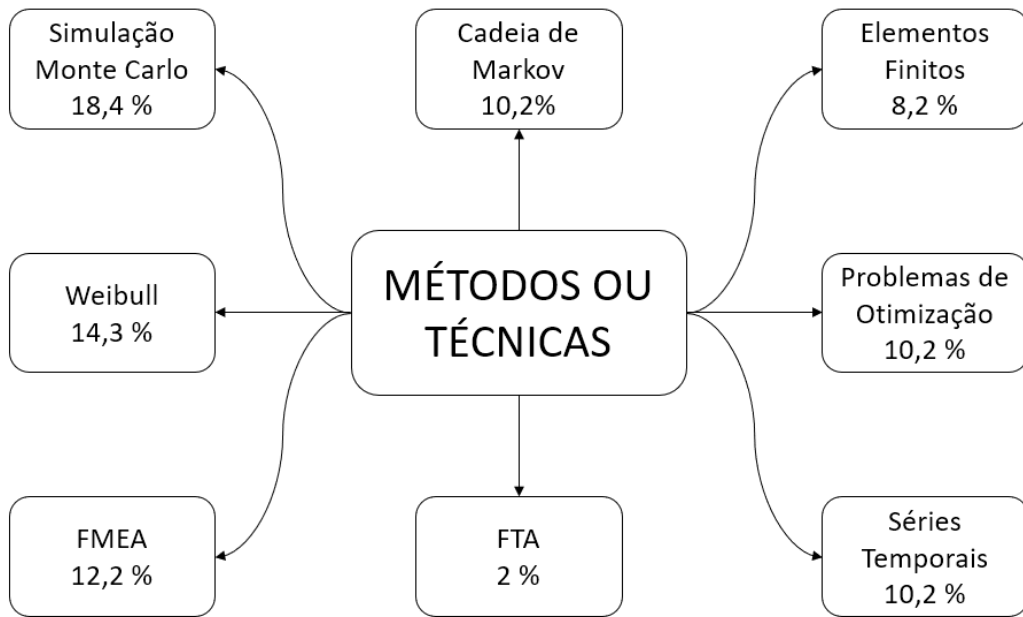
(conclusão)

ÍNDICE	MÉTODO/TÉCNICA UTILIZADO
31	Principal Component Analysis (PCA)
32	Elementos Finitos, Simulação de Monte Carlo
33	Simulação de Monte Carlo, Bayesian Network
34	Poisson
35	Weibull, Bayesian Network
36	Lei de Sturges, Loss of Load Expectation (LOLE), Loss of Energy Expectation (LOEE)
37	FMEA, Elementos Finitos
38	Distribuição Wakeby, Loss of Load Expectation (LOLE), Expected Energy not Supplied (EENS)
39	Poisson
40	FTA, FMEA, Risk Priority Number (RPN)
41	Weibull, FMEA
42	Séries Temporais
43	Mean Time to Failure (MTTF), Mean Time to Repair (MTTR)
44	Loss of Load Probability (LLP), Loss of Power Supply Probability (LPSP), Expected Energy not Supplied (EENS), Level of Autonomy (LA)
45	Poisson
46	Otimização, Fluxo de Carga Probabilístico
47	Sistema k-em-m, Otimização
48	Root Cause Analysis (RCA)
49	Espaço de Estados, Cadeia de Markov

Fonte: O autor (2018).

A partir desses dados, pode-se perceber que alguns métodos ou técnicas podem ser agrupadas de uma forma mais genérica, mostrando os casos mais recorrentes, como é ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Métodos ou técnicas mais utilizadas nos artigos



Fonte: O autor (2018).

Todas as técnicas possuem uma descrição sucinta no capítulo da Fundamentação Teórica. De todos os métodos citados, o mais utilizado é o de Monte Carlo, aparecendo em 18,4% dos casos, o que implica é que é o método de simulação mais utilizado nos últimos 5 anos, que aplique engenharia da confiabilidade em sistemas de energias renováveis. Em segundo lugar está a Distribuição de Weibull, com 14,3% e em terceiro FMEA com 12,2%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

No presente trabalho foram abordados alguns dos conhecimentos existentes sobre energias renováveis e análise de confiabilidade, bem como um panorama geral sobre o Sistema Interligado Nacional.

Na parte de energia solar fotovoltaica, foram apresentados os conceitos físicos, assim como sistemas e alguns de seus componentes. Em energia eólica foram apresentadas a potência do vento, a variação da velocidade do vento e uma descrição dos aerogeradores, bem como seus principais componentes e funções. Na seção de energia da biomassa, foi definido que é biomassa e descritos os processos de conversão termoquímica e bioquímica. A fundamentação sobre análise de confiabilidade consistiu em definir o que é confiabilidade, apresentar modelos estatísticos e outras funções matemáticas utilizadas, além dos métodos de análise de falhas.

A pergunta de pesquisa foi elaborada no sentido de descobrir quais aspectos da engenharia de confiabilidade – principalmente modelos e distribuições estatísticas - estavam sendo abordados em conjunto com sistemas de energias renováveis. Perante este caso, o trabalho teve por objetivo principal analisar as publicações científicas dos últimos 5 anos que relacionem a engenharia de confiabilidade com as fontes de energia renováveis.

Os métodos para a realização deste estudo foram iniciados a partir do Portal de Periódicos da CAPES, onde foi definida a base de dados que seria utilizada para encontrar os artigos que viriam a fazer parte do portfólio bibliográfico e definir as palavras-chave e suas combinações. O resultado da busca após alguns processos de filtragem foi de 49 artigos.

A análise dos resultados pode ser dividida em cinco partes: periódicos, ano de publicação, local de publicação, tipo de estudo e métodos/técnicas utilizados. Os periódicos que mais se destacam entre todos os 27 existentes no portfólio foram *Renewable Energy* e *Wind Energy*, com 7 artigos cada. No que se refere ao ano de publicação dos artigos, verifica-se que os anos de 2013, 2015 e 2016 foram os mais expressivos, com 11 publicações. Dos 19 países que publicaram artigos contemplados por esta pesquisa, o de maior destaque foi a China, com 12 artigos, resultando em aproximadamente 24% do total. O Brasil possui uma publicação na área de energia solar em 2016 pela Universidade de São Paulo (USP).

Com relação aos tipos de estudo, a parte teórica agrupa os métodos matemáticos/simulação e revisão da literatura que, somados, constam em 25 dos 49 artigos, resultando em uma porcentagem de 51% do total. Já a parte prática, que fazem parte os estudos de caso e testes práticos, aparecem em 24 artigos, ou 49% do total. Dentre os métodos/técnicas utilizados nos artigos do portfólio, o mais utilizado foi Monte Carlo, aparecendo em 18,4% dos casos.

Neste trabalho, conclui-se que a análise de confiabilidade é de extrema importância, seja em usinas de geração de energia ou em sistemas de menor escala. Esses estudos ainda são pouco explorados na parte de renováveis, como pode ser visto no portfólio bibliográfico deste trabalho, que contém apenas 4 artigos na área de biomassa contemplando os últimos 5 anos. Mesmo na área de solar, que possui 12 artigos, ainda é um número inexpressivo, possuindo uma média de pouco mais de 2 artigos por ano. Já a energia eólica possui muito mais estudos de confiabilidade quando comparado com as duas outras áreas.

Portanto, enfatiza-se a necessidade de realizar estes estudos sempre quando há projeto de um sistema de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, ou então em projetos já existentes focando em operação e manutenção (O&M) dos mesmos.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma análise mais aprofundada da aplicação da engenharia de confiabilidade em sistemas de energias renováveis, focando em componentes específicos de algum destes sistemas. Outra análise que pode ser realizada é ampliar a busca em outros bancos de dados, como por exemplo do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Além das bases de artigos, podem ser incluídas monografias/dissertações/teses dos repositórios digitais de universidades nacionais consagradas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10899 – Energia solar fotovoltaica - Terminologia**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2013.
- ABNT. **NBR 11704 - Sistemas Fotovoltaicos - Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2008.
- ABNT. **NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 1994.
- AÇMA, H. H. **Combustion characteristics of different biomass materials**. Energy Conversion e Management. Istambul: Pergamon, v. 44, p. 155-162, 2003.
- ACUÑA, L. G.; PADILLA, R. V.; MERCADO, A. S. **Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator**. Renewable Energy, v. 106, p. 68–77, 2017.
- AIAG. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) – Reference Manual**, Fourth Edition, 2008.
- AIEN, M.; BIGLARI, A.; RASHIDINEJAD, M. **Probabilistic reliability evaluation of hybrid wind-photovoltaic power systems**. 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2013, p. 1–6, 2013.
- ALAVI, O. *et al.* **Reliability assessment of a stand-alone wind-hydrogen energy conversion system based on thermal analysis**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 22, p. 14968–14979. Elsevier Ltd, 2017.
- AL-HABAHBEH, O. M.; ALOMOSH, R. A.; ALDEBIE, D. K. **Reliability simulation of solar concentrator receiver**. International Journal of Sustainable Energy, v. 35, n. 8, p. 793–801, 2014.
- ALHMOUD, L.; WANG, B. **A review of the state-of-the-art in wind-energy reliability analysis**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, n. May 2017, p. 1643–1651. Elsevier Ltd, 2017.
- ALVIM FILHO, A. de C. **Aspectos Tecnológicos das Fontes Alternativas de Energia (Energia Eólica)**. 2009. Disponível em <<http://docplayer.com.br/3014195-Aspectos-tecnologicos-das-fontes-de-energia-renovaveis-energia-eolica.html>>. Acesso em junho de 2018.
- ANDIAPPAN, V. *et al.* **Synthesis and optimization of biomass-based tri-generation systems with reliability aspects**. Energy, v. 89, p. 803–818. Elsevier Ltd, 2015.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações Técnicas**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em março de 2018.

ARIFUJJAMAN, M. **Reliability comparison of power electronic converters for grid-connected 1.5kW wind energy conversion system**. *Renewable Energy*, v. 57, p. 348–357. Elsevier Ltd, 2013.

BADOSA, J. *et al.* **Reliability of day-ahead solar irradiance forecasts on Reunion Island depending on synoptic wind and humidity conditions**. *Solar Energy*, v. 115, p. 306–321, 2015.

BATHE, K. J. **Finite Element procedures**. New Jersey, Prentice Hall. 1037p. 1996.

BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability**. Berlin: Springer. 2008.

BEHESHTI, Z.; SHAMSUDDIN, Z. S. **A review of population-based meta-heuristic algorithms**. *Int. J. Advance. Soft Comput. Appl.*, v. 5, n. 1, mar., 2013.

BETZ A. **Introduction to the Theory of Flow Machines**. 1966.

BLAKE, S. *et al.* **Quantifying the contribution of wind farms to distribution network reliability**. *Wind Energy*, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2014.

CARMO, J. P. C. **Aplicação do método Monte Carlo na estimativa das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento de um parque residencial**. 121p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente), Universidade de Lisboa (ULisboa), Lisboa, 2014.

CASTRO, D. M. S. **Cadeias de Markov: Uma Aplicação para o Ensino de Matrizes e Probabilidade**. 59p. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática), Programa de Mestrado Profissional em Matemática em Rede Nacional, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

CASTRO, H. F. **Otimização da Confiabilidade e Disponibilidade em Sistemas Redundantes**. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2003.

CLEMENS, P. L. **Fault Tree Analysis**. 2002. Disponível em <<http://intra.itild-india.com/quality/QulandReITools%5Cfta.pdf>>. Acesso em julho de 2018.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. 1 ed. Campinas, Editora da Unicamp, 2008.

D'AMICO, G.; PETRONI, F.; PRATTICO, F. **Reliability Measures of Second-Order Semi-Markov Chain Applied to Wind Energy Production**. *Journal of Renewable Energy*, v. 2013, p. 1–6, 2012.

DALIENTO, S. *et al.* **A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading**. *Solar Energy*, v. 134, p. 211–218. Elsevier Ltd, 2016.

DALMAZ, A. **Estudo do Potencial Eólico e Previsão de Ventos para Geração de Eletricidade em Santa Catarina**. 174p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2007.

DAMICO, G.; PETRONI, F.; PRATTICO, F. **Reliability measures for indexed semi-Markov chains applied to wind energy production**. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 144, p. 170–177. Elsevier, 2015.

DELAVARIPOUR, H.; DEHKORDI, B. M. **Reliability evaluation of a standalone wind-photovoltaic/battery energy system based on realistic model of battery**. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 7, n. 1, 2015.

DINKELBACH, L. **Thermochemical Conversion of Willow from Short Rotation Forestry**. In: ECNC--00-028 REGROW Guide, Energy research Centre of the Netherlands – ECN, Petten, the Netherlands, 2000.

DONG, Y.; GUO, J.; ZHANG, X. **Development and Performance Analysis of a Small Island Wind Turbine Generator System with High Reliability**. *Journal of Energy Engineering*, v. 139, n. 3, p. 223–229, 2013.

FADIGAS, E., **Energia Eólica**. Editora Manole. São Paulo, 2011.

FANT, C.; GUNTURU, B.; SCHLOSSER, A. **Characterizing wind power resource reliability in southern Africa**. *Applied Energy*, v. 161, p. 565–573. Elsevier Ltd, 2015.

FERREIRA, A. A. **Sistema de Produção de Energia Eólica**. 165p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto (Portugal), 2011.

FISCHER, K.; BESNARD, F.; BERTLING, L. **Reliability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 27, n. 1, p. 184–195, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GISLER, C. A. F. **Análise do Perfil de Vento na Camada Limite Superficial e Sistemas Meteorológicos Atuantes no Centro de Lançamento de Alcântara**. 143p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

GNOATTO, E. *et al.* **Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho**. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 27, n. 2, p. 191-196, dezembro, 2005.

GONZALEZ-SALAZAR, M. A. *et al.* **Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation**. *Biomass and Bioenergy*, v. 88, p. 43–58. Elsevier Ltd, 2016.

HAN, C.; PARK, S.; OH, W. **Reliability-based structural optimization of 300 × 300 mm² dye-sensitized solar cell module**. *Solar Energy*, v. 150, p. 128–135. Elsevier Ltd, 2017.

HEMMATI, R.; HOOSHMAND, R. A.; KHODABAKHSHIAN, A. **Reliability constrained generation expansion planning with consideration of wind farms uncertainties in deregulated electricity market**. *Energy Conversion and Management*, v. 76, p. 517–526. Elsevier Ltd, 2013.

HUEBNER, K. H.; THORNTON, E. A. **The finite element method for engineers**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons. 49 p. 1982.

HULIO, Z. H.; JIANG, W. **Wind climate parameters, performance and reliability assessment of wind energy farm**. *International Journal of Energy Sector Management*, v. 11, n. 3, p. 503–520, 2017.

IGBA, J. *et al.* **Effect of preventive maintenance intervals on reliability and maintenance costs of wind turbine gearboxes**. *Wind Energy*, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2014.

JAMES CARROLL, A. M.; MCDONALD, A.; MCMILLAN, D. **Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines**. *Wind Energy*, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2015.

JIN, T.; YU, Y.; ELSAYED, E. **Reliability and quality control for distributed wind/solar energy integration: A multi-criteria approach**. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, v. 47, n. 10, p. 1122–1138, 2015.

JIN, X. *et al.* **Research on Wind Turbine Safety Analysis: Failure Analysis, Reliability Analysis, and Risk Assessment**. *Environmental Science & Technology*, v. 33, n. 2, p. 482–489, 2016.

KAABECHE, A.; DIAF, S.; IBTIOUEN, R. **Firefly-inspired algorithm for optimal sizing of renewable hybrid system considering reliability criteria**. *Solar Energy*, v. 155, p. 727–738. Elsevier Ltd, 2017.

KHAN, F. **Equipment Reliability: A Life-cycle Approach**. *Engineering Management Journal. American Society of Engineering Management, EUA*, v. 11, p. 127-135, 2001.

KIM, D. H.; LEE, S. G. **Reliability analysis of offshore wind turbine support structures under extreme ocean environmental loads**. *Renewable Energy*, v. 79, n. 1, p. 161–166. Elsevier Ltd, 2014.

LEMES, D. V. **Proposta de Método de Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Empregando Dados de Retorno em Garantia**. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (INPE), São Paulo, 2006.

LI, Y. F.; VALLA, S.; ZIO, E. **Reliability assessment of generic geared wind turbines by GTST-MLD model and Monte Carlo simulation**. *Renewable Energy*, v. 83, p. 222–233, 2015.

LINIGER, J. *et al.* **Reliability based design of fluid power pitch systems for wind turbines**. *Wind Energy*, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2016.

LIU, M.; LI, W.; YU, J.; REN, Z.; XU, R. **Reliability evaluation of tidal and wind power generation system with battery energy storage**. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 4, n. 4, p. 636–647. Springer Berlin Heidelberg, 2016.

LOPES, A. M. **Produção Eólica e Enquadramento Técnico-Econômico em Portugal**. 136p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto (Portugal), 2009.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy: Theory, Design and Application**. Ed. John Wiley & Sons Ltd, 577 p. England, 2002.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass**. *Bioresource Technology*, v. 83, n.1, p. 37-46, maio, 2002a.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 2): conversion technologies**. *Bioresource Technology*, v. 83, n.1, p. 47-54, maio, 2002b.

MELO, M. S. de M. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. 154p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.

MIRYOUSEFI AVAL, S. M.; AHADI, A.; HAYATI, H. **A novel method for reliability and risk evaluation of wind energy conversion systems considering wind speed correlation**. *Frontiers in Energy*, v. 10, n. 1, p. 46–56, 2015.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. 2018. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 15 de março de 2018.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Rio de Janeiro, 2017b.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030 - Geração termelétrica a partir da biomassa**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Rio de Janeiro, 2007.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Nota Técnica DEA 001/17. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Rio de Janeiro, 2017a.

MORELLO, M. G. **Redução da árvore de falhas baseada no grau de criticidade: aplicação em transmissão de veículo comercial**. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2005.

NONHEBEL, S. **Energy from agricultural residues and consequences for land requirements for food production**. *Agricultural Systems*. Holanda: Elsevier, v. 94, p. 586–592, 2007.

NREL. **Glossary of solar radiation resource terms: National Renewable Energy Laboratory**. 2018. Disponível em <http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html>. Acesso em abril de 2018.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapas**. 2018b. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 15 de março de 2018.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O que é o SIN**. 2018a. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 15 de março de 2018.

ONS – Operador Nacional do Sistema. **Plano da Operação Energética 2017 – 2021. PEN 2017 – Sumário Executivo**. Rio de Janeiro, 2017.

PADHEE, M.; KARKI, R. **Reliability/environmental impacts of wind energy curtailment due to ramping constraints**. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, v. 8, n. 4, p. 663–672. Springer India, 2016.

PALIWAL, P.; PATIDAR, N. P.; NEMA, R. K. **A novel method for reliability assessment of autonomous PV-wind-storage system using probabilistic storage model**. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 55, p. 692–703. Elsevier Ltd, 2013.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos, 2017.

PÉREZ, J. M. P. *et al.* **Wind turbine reliability analysis**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 463–472. Elsevier, 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. 2014.

QIN, Z.; LI, W.; XIONG, X. **Incorporating multiple correlations among wind speeds, photovoltaic powers and bus loads in composite system reliability evaluation**. *Applied Energy*, v. 110, p. 285–294. Elsevier Ltd, 2013.

RAJEEVAN, A. K.; SHOURI, P. V; NAIR, U. **A Reliability Based Model for Wind Turbine Selection**. *Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED)*, v. 2, n. July, p. 69–74, 2013.

RAMAKUMAR, R. **Engineering Reliability Fundamentals and Applications**. New Jersey: PrenticeHall International Editions. 482p. 1993.

REIS, M. M. **INE 7001 - Estatística para administradores I – Capítulo 4 Análise de Séries Temporais**. 2018.

Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~marcelo.menezes.reis/Cap4.pdf>>. Acesso em: 30 de julho de 2018.

RELIASOFT. **Engenharia da Confiabilidade – Análise dos Efeitos e Criticidade dos Modos de Falha**. Apostila do Curso. São Paulo, 2005.

RODRIGUES, P. R. **Energia Eólica em Energias Renováveis**. Livro Digital. Editora Unisul, 2011.

RUIZ-RODRIGUEZ, F. J.; GOMEZ-GONZALEZ, M.; JURADO, F. **Reliability optimization of an electric power system by biomass fuelled gas engine**. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v. 61, p. 81–89. Elsevier Ltd, 2014.

SANTOS, L. A. **Aplicação do método dos elementos finitos na análise do comportamento mecânico de instrumentos endodônticos de níquel-titânio**. 116 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.

SELLITTO, M. A. **Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos**. Prod., São Paulo, v. 15, n. 1, p. 44-59, abril, 2005.

SHAOYU, X. **Impacts of different wind speed simulation methods on conditional reliability indices**. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, v. 36, n. 1, p. 51–66, 2013.

SHARMA, V.; CHANDEL, S. S. **Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 27, p. 753–767. Elsevier, 2013.

SHIMURA, S. *et al.* **Production costs estimation in photovoltaic power plants using reliability**. Solar Energy, v. 133, p. 294–304. Elsevier Ltd, 2016.

SIDDIQUI, R.; KUMAR, R.; JHA, G. K. **Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability**. Energy, v. 107, p. 550–561. Elsevier Ltd, 2016.

SLIMACEK, V.; LINDQVIST, B. H. **Reliability of wind turbines modeled by a Poisson process with covariates, unobserved heterogeneity and seasonality**. Wind Energy, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2016.

SOLOMON, A. A.; KAMMEN, D. M.; CALLAWAY, D. **Investigating the impact of wind-solar complementarities on energy storage requirement and the corresponding supply reliability criteria.** *Applied Energy*, v. 168, p. 130–145. Elsevier Ltd, 2016.

SOUZA, G. P. K. **Otimização de funções reais multidimensionais utilizando algoritmo genético contínuo.** 70 p. Monografia (Bacharel em Ciências da Computação), Curso de Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2014.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution.** ASQC Quality Press. 1995.

STULL, R. **An Introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht: Kluwer Academic, p.684, 1988.

SU, C.; HU, Z. **Reliability assessment for Chinese domestic wind turbines based on data mining techniques.** *Wind Energy*, v. 21, n. 3, p. 198–209, 2017.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade.** 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

VIANA, T. de S. **Potencial de Geração de Energia Elétrica com Sistemas Fotovoltaicos com Concentrador no Brasil.** 165p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2010.

WANG, H.; ZHU, N.; BAI, X. **Reliability model assessment of grid-connected solar photovoltaic system based on Monte-Carlo.** *Applied Solar Energy*, v. 51, n. 4, p. 262–266, 2015.

WANG, J. *et al.* **Modified exergoeconomic analysis method based on energy level with reliability consideration: Cost allocations in a biomass trigeneration system.** *Renewable Energy*, v. 123, p. 104–116. Elsevier Ltd, 2018.

WERTHER, J. *et al.* **Combustion of agricultural residues.** *Progress in energy and combustion science.* Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.

WHITTLE, M.; TREVELYAN, J.; TAVNER, P. **Improving wind turbine drivetrain bearing reliability through pre-misalignment.** *Wind Energy*, v. 17, n. April 2013, p. 657–669, 2013.

WU, L.; WEN, C.; REN, H. **Reliability evaluation of the solar power system based on the Markov chain method.** *International Journal of Energy Research*, v. 41, n. 15, p. 2509–2516, 2017.

YANG, G. **Life Cycle Reliability Engineering. Hoboken.** New Jersey: John Wiley & Sons. 2007.

YANG, H. *et al.* **Dynamic reliability-based design optimization of the tripod sub-structure of offshore wind turbines.** *Renewable Energy*, v. 78, p. 16–25. Elsevier Ltd, 2015.

ZHANG, C. *et al.* **Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance.** *Renewable Energy*, v. 103, p. 606–612. Elsevier Ltd, 2016.

APÊNDICE 1 – PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Índice	Autor (Ano)	Título	Área	Periódico	Tipo de estudo (Local)
1	Sharma, V., Chandel, S. S. (2013)	Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review	Solar	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Revisão da literatura
2	Wang, H. et al. (2015)	Reliability Model Assessment of Grid-Connected Solar Photovoltaic System Based on Monte-Carlo	Solar	Applied Solar Energy	Estudo de caso (China)
3	Badosa, J. et al (2015)	Reliability of day-ahead solar irradiance forecasts on Reunion Island depending on synoptic wind and humidity conditions	Solar	Solar Energy	Estudo de caso (França)
4	Jin, T. et al. (2015)	Reliability and quality control for distributed wind/solar energy integration: A multi-criteria approach	Solar e eólica	IIE Transactions	Métodos matemáticos/simulação
5	Al-Habahbeh, O. M. et al. (2014)	Reliability simulation of solar concentrator receiver	Solar	International Journal of Sustainable Energy	Métodos matemáticos/simulação
6	Shimura, S. et al. (2016)	Production costs estimation in photovoltaic power plants using reliability	Solar	Solar Energy	Estudo de caso (Brasil)
7	Solomon, A. A. et al. (2016)	Investigating the impact of wind-solar complementarities on energy storage requirement and the corresponding supply reliability criteria	Solar e eólica	Applied Energy	Estudo de caso (EUA)

8	Daliento, S. et al. (2016)	A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading	Solar	Solar Energy	Teste prático
9	Siddiqui, R. et al. (2016)	Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability	Solar	Energy	Teste prático
10	Kaabeche, A. et al. (2017)	Firefly-inspired algorithm for optimal sizing of renewable hybrid system considering reliability criteria	Solar e eólica	Solar Energy	Métodos matemáticos/simulação
11	Wu, L. et al. (2017)	Reliability evaluation of the solar power system based on the Markov chain method	Solar	International Journal of Energy Research	Métodos matemáticos/simulação
12	Han, C. et al. (2017)	Reliability-based structural optimization of 300 x 300 mm ² dye-sensitized solar cell module	Solar	Solar Energy	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
13	Fischer, K. et al. (2012)	Reliability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience	Eólica	IEEE Transactions on Energy Conversion	Teste prático
14	D'Amico, G. et al. (2012)	Reliability Measures of Second-Order Semi-Markov Chain Applied to Wind Energy Production	Eólica	Journal of Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
15	Rajeevan, A. K. et al. (2013)	A Reliability Based Model for Wind Turbine Selection	Eólica	International Journal of Renewable	Métodos matemáticos/simulação

				Energy Development	
16	Qin, Z. et al. (2013)	Incorporating multiple correlations among wind speeds, photovoltaic powers and bus loads in composite system reliability evaluation	Solar e eólica	Applied Energy	Estudo de caso (China)
17	Hemmati, R. et al. (2013)	Reliability constrained generation expansion planning with consideration of wind farms uncertainties in deregulated electricity market	Eólica	Energy Conversion and Management	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
18	Paliwal, P. et al. (2013)	A novel method for reliability assessment of autonomous PV-wind-storage system using probabilistic storage model	Solar e eólica	Electrical Power and Energy Systems	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
19	Arifujjaman, Md. (2013)	Reliability comparison of power electronic converters for grid-connected 1.5kW wind energy conversion system	Eólica	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação
20	Dong, Y. et al. (2013)	Development and Performance Analysis of a Small Island Wind Turbine Generator System with High Reliability	Eólica	Journal of Energy Engineering	Estudo de caso (China)
21	Whittle, M. et al. (2013)	Improving wind turbine drivetrain bearing reliability through pre-misalignment	Eólica	Wind Energy	Métodos matemáticos/simulação
22	Pérez, J. M. P. et al. (2013)	Wind turbine reliability analysis	Eólica	Renewable and Sustainable	Revisão da literatura

				Energy Reviews	
23	Shaoyu, X. et al. (2013)	Impacts of different wind speed simulation methods on conditional reliability indices	Eólica	International Transactions on Electrical Energy Systems	Métodos matemáticos/simulação
24	Aien, M. et al. (2013)	Probabilistic reliability evaluation of hybrid wind-photovoltaic power systems	Solar e eólica	21st Iranian Conference on Electrical Engineering	Métodos matemáticos/simulação
25	Igba, J. et al. (2014)	Effect of preventive maintenance intervals on reliability and maintenance costs of wind turbine gearboxes	Eólica	Wind Energy	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
26	Blake, S. et al. (2014)	Quantifying the contribution of wind farms to distribution network reliability	Eólica	Wind Energy	Estudo de caso (Inglaterra)
27	Kim, D. H., Lee, S. G. (2014)	Reliability analysis of offshore wind turbine support structures under extreme ocean environmental loads	Eólica	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação
28	Delavaripour, H., Dehkordi, B. M. (2015)	Reliability evaluation of a standalone wind-photovoltaic/battery energy system based on realistic model of battery	Solar e eólica	Journal of Renewable and Sustainable Energy	Métodos matemáticos/simulação
29	Miryousefi Aval, S. M. et al. (2015)	A novel method for reliability and risk evaluation of wind energy conversion systems considering wind speed correlation	Eólica	Frontiers in Energy	Métodos matemáticos/simulação
30	D'Amico, G. et al. (2015)	Reliability measures for indexed semi-Markov	Eólica	Reliability Engineering	Métodos matemáticos/simulação e teste prático

		chains applied to wind energy production		and System Safety	
31	Fant, C. et al. (2015)	Characterizing wind power resource reliability in southern Africa	Eólica	Applied Energy	Métodos matemáticos/simulação
32	Yang, H. et al. (2015)	Dynamic reliability based design optimization of the tripod sub-structure of offshore wind turbines	Eólica	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação
33	Li, Y. F. et al. (2015)	Reliability assessment of generic geared wind turbines by GTST-MLD model and Monte Carlo simulation	Eólica	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação
34	Carroll, J. et al. (2015)	Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines	Eólica	Wind Energy	Revisão da literatura
35	Zhang, C. et al. (2016)	Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance	Eólica	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação
36	Padhee, M., Karki, R. (2016)	Reliability/environmental impacts of wind energy curtailment due to ramping constraints	Eólica	International Journal of Systems Assurance Engineering and Management	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
37	Jin, X. et al. (2016)	Research on Wind Turbine Safety Analysis: Failure Analysis, Reliability Analysis, and Risk Assessment	Eólica	Environmental Progress & Sustainable Energy	Revisão da literatura
38	Liu, M. et al. (2016)	Reliability evaluation of tidal and wind power	Eólica e maré	Journal of Modern Power	Estudo de caso (EUA)

		generation system with battery energy storage		Systems and Clean Energy	
39	Slimacek, V., Lindqvist, B. H. (2016)	Reliability of wind turbines modeled by a Poisson process with covariates, unobserved heterogeneity and seasonality	Eólica	Wind Energy	Métodos matemáticos/simulação
40	Liniger, J. et al. (2016)	Reliability based design of fluid power pitch systems for wind turbines	Eólica	Wind Energy	Métodos matemáticos/simulação
41	Hulio, Z. H., Jiang, W. (2017)	Wind climate parameters, performance and reliability assessment of wind energy farm	Eólica	International Journal of Energy Sector Management	Estudo de caso (Paquistão)
42	Su, C., Hu, Z. (2017)	Reliability assessment for Chinese domestic wind turbines based on data mining techniques	Eólica	Wind Energy	Estudo de caso (China)
43	Alavi, O. et al. (2017)	Reliability assessment of a stand-alone wind-hydrogen energy conversion system based on thermal analysis	Eólica e hidrogênio	International Journal of Hydrogen Energy	Métodos matemáticos/simulação
44	Acuña, L. G. et al. (2017)	Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator	Solar e eólica	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação e estudo de caso (Colômbia)
45	Alhmod, L., Wang, B. (2017)	A review of the state-of-the-art in wind-energy reliability analysis	Eólica	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Revisão da literatura
46	Ruiz-Rodriguez, f. j. et al. (2014)	Reliability optimization of an electric power system by biomass fuelled gas engine	Biomassa	Electrical Power and Energy Systems	Métodos matemáticos/simulação

47	Andiappan, V. et al. (2015)	Synthesis and optimization of biomass-based tri-generation systems with reliability aspects	Biomassa	Energy	Métodos matemáticos/simulação e teste prático
48	Gonzalez-Salazar, M. A. et al. (2016)	Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation	Biomassa	Biomass and Bioenergy	Métodos matemáticos/simulação e estudo de caso (Colômbia)
49	Wang, J. et al. (2018)	Modified exergoeconomic analysis method based on energy level with reliability consideration: Cost allocations in a biomass trigeneration system	Biomassa	Renewable Energy	Métodos matemáticos/simulação e teste prático