

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTACATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANA LUIZA KOERICH MEURER

**UMA PROPOSTA DE MODELO MULTICRITERIAL PARA AUXÍLIO DO
PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO EM AEROGERADORES: UM
ESTUDO COM FOCO NA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS
ELETROMECAÑICOS**

FLORIANÓPOLIS, 2021.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTACATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANA LUIZA KOERICH MEURER

**UMA PROPOSTA DE MODELO MULTICRITERIAL PARA AUXÍLIO DO
PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO EM AEROGERADORES: UM
ESTUDO COM FOCO NA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS
ELETROMECHANICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro(a)
Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2021.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Koerich Meurer, Ana Luiza

Uma proposta de modelo multicriterial para auxílio
do planejamento da manutenção em aerogeradores : um estudo
com foco na confiabilidade de sistemas eletromecânicos
/ Ana Luiza Koerich Meurer ; orientação de Everthon
Taghori Sica. - Florianópolis, SC, 2021.

132 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Aerogerador. 2. Confiabilidade. 3. Manutenção.
4. Multicritério. 5. Risco. I. Taghori Sica, Everthon.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento
Acadêmico de Eletrotécnica. III. Título.

UMA PROPOSTA DE MODELO DE PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO EM AEROGERADORES: UM ESTUDO COM FOCO NA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELETROMECAÂNICOS

ANA LUIZA KOERICH MEURER

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de abril, 2021.

Banca Examinadora:



Assinado de forma digital por
Everthon Taghori Sica
Dados: 2021.04.26 15:06:46
-03'00'

Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

Orientador

**Antonio
Augusto Morini**



Assinado digitalmente por Antonio Augusto Morini
DN: OU=IFSC - Florianópolis, O=Instituto Federal
de Santa Catarina, CN=Antonio Augusto Morini,
E=antonio.morini@ifsc.edu.br
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: IFSC - Instituto Federal de Santa
Catarina
Data: 2021.04.19 21:30:33-03'00'
Foxit PhantomPDF Versão: 10.1.1

Antônio Augusto Morini, Dr. Eng.



Assinado de forma digital por
EDISON ANTONIO CARDOSO
ARANHA NETO:00583546978
Dados: 2021.04.26 15:12:20
-03'00'

Edison Antônio Cardoso Aranha Neto, Dr. Eng.

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Aparecida e Luiz, que são meus exemplos de vida e que me motivam a evoluir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a meus pais Maria Aparecida e Luiz e a meu irmão André, pelo apoio e carinho em toda a minha trajetória, por confiarem em mim, por sempre me proporcionarem suporte financeiro e emocional e por nunca me deixarem desistir, mesmo em momentos desafiadores e incertos, mas, sobretudo, por serem as pessoas com quem posso contar para qualquer situação.

Agradeço a meus amigos e demais pessoas que estiveram comigo neste período, por me motivarem, apoiarem e me ouvirem de maneira empática em momentos difíceis.

Agradeço aos professores do IFSC por, incansavelmente, se mostrarem dispostos a nos ensinar e incentivar a sempre nos desenvolvermos como pessoas e profissionais.

Agradeço em especial ao meu orientador, Prof. Sica, por acreditar em minha capacidade e por me apoiar no desenvolvimento deste trabalho. Por sempre estar disponível a me ajudar e tranquilizar em momentos complicados.

Por fim, agradeço ao IFSC pela oportunidade de ensino público de excelência, o qual me proporcionou diversas experiências de estágios e trabalho que me trouxeram grandes aprendizados profissionais e pessoais.

RESUMO

Devido às mudanças climáticas que causaram fortes períodos de estiagem e mudança na distribuição espacial das chuvas em muitas regiões brasileiras, a dependência da energia proveniente de usinas hidrelétricas tem exposto o país a níveis de risco considerados temerários. Nesse sentido, considerando a geração de energia elétrica e a sua crescente demanda, a matriz energética brasileira se encontra em transformação, atualmente considerada hidro-termo-eólica. A busca por inovações e soluções, no âmbito da produção de energia, mais sustentáveis para o meio ambiente e que reduzam os índices de degradação ambiental têm crescido cada vez mais, sendo assim, uma alternativa às fontes tradicionais de geração de energia elétrica que tem se mostrado eficaz é a geração eólica. No entanto, as unidades eólicas necessitam de constantes manutenções, sendo este um fator que acarreta dois grandes desafios: o tempo de indisponibilidade e os custos de manutenção. Neste sentido este trabalho tem como objetivo central propor um modelo multicriterial de análise de criticidade de equipamentos de um aerogerador com o intuito de auxiliar na tomada de decisão em relação ao planejamento da manutenção. Para atingir o objetivo central e demais objetivos propostos pelo trabalho, foram realizados estudos e análises a respeito dos equipamentos que compõem uma unidade eólica a fim de conhecer o funcionamento de cada componente e, além disso, seus respectivos modos de falha. Ao conhecer tais modos de falha, torna-se possível realizar a aplicação das metodologias de manutenção baseada em confiabilidade e analisar como determinadas técnicas se comportam ao serem aplicadas em unidades eólicas e atrelado a isto desenvolver um modelo de apoio à tomada de decisão através da análise de criticidade dos equipamentos de uma unidade eólica. Por fim, são apresentadas as funções de valor econômico dos níveis de impacto estabelecidos para cada critério utilizado no modelo e, além disso, são dispostos os *trade-off* dos Pontos de Vista Fundamentais do modelo e de seus respectivos critérios.

Palavras-chave: Aerogerador. Confiabilidade. Manutenção. Multicritério. Risco.

ABSTRACT

Due to the climatic changes that caused strong periods of drought and changes in the spatial distribution of rainfall in many Brazilian regions, the dependence on energy from hydroelectric plants has exposed the country to risk levels considered reckless. In this sense, considering the generation of electric energy and its growing demand, the Brazilian energy matrix is in transformation, currently considered hydro-thermo-wind. The search for innovations and solutions, within the scope of energy production, which are more sustainable for the environment and which reduce the rates of environmental degradation have grown more and more, being, therefore, an alternative to the traditional sources of electric power generation that has been shown to be effective is wind generation. However, wind farms require constant maintenance, which is a factor that poses two major challenges: downtime and maintenance costs. In this sense, this work has as main objective to propose a multicriterial model for the analysis of the criticality of equipment of a wind turbine in order to assist in decision making in relation to maintenance planning. In order to achieve the central objective and other objectives proposed by the work, studies and analyzes were carried out regarding the equipment that make up a wind unit in order to understand the functioning of each component and, in addition, their respective failure modes. By knowing such failure modes, it becomes possible to apply the maintenance methodologies based on reliability and analyze how certain techniques behave when applied to wind units and, in connection with this, develop a model to support decision making through analysis criticality of the equipment of a wind farm. Finally, the economic value functions of the established impact levels are presented for each criterion used in the model and, in addition, the trade-offs of the Fundamental Points of View of the model and their respective criteria are provided.

Keywords: Wind turbine. Reliability. Maintenance. Multicriteria. Risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada (MW)	21
Figura 2 - Fluxo de ar através de uma área transversal A.....	22
Figura 3 - Aerogerador de eixo horizontal	26
Figura 4 - Aerogerador de eixo vertical	27
Figura 5 - Esquema de funcionamento de um aerogerador	28
Figura 6 - Componentes de um aerogerador	30
Figura 7 - Distribuição da ocorrência de falhas	33
Figura 8 - Função de densidade de falha	34
Figura 9 - Curva da banheira típica de eletrônicos	35
Figura 10 - Classificação dos tipos de manutenção	36
Figura 11 - Etapas do RCM.....	43
Figura 12 - Diagrama de Ishikawa.....	45
Figura 13 - Função da taxa de falha a partir da Distribuição Normal	51
Figura 14 - Função de taxa de falha da Distribuição Lognormal	53
Figura 15 - Função taxa de falha da Distribuição Exponencial.....	54
Figura 16 - Taxa de falha através da Distribuição de Weibull com β variando de 1 a 3,5.....	57
Figura 17 – Equipamento não reparável	58
Figura 18 - Equipamento reparável com tempo de reparo não significativo.....	59
Figura 19 - Equipamento reparável com tempo de reparo significativo.....	59
Figura 20 – Estados de operação e reparo de equipamentos.....	61
Figura 21 - Processo de análise de risco	64
Figura 22 - Simbologia Booleana utilizada na árvore de falhas.....	68
Figura 23 - Elaboração da árvore de falhas	69
Figura 24 - Exemplo da estrutura de árvore de falhas	70
Figura 25 - Processo decisório sob a perspectiva da MCDM.....	78
Figura 26 - Estrutura arborescente de pontos de vista.....	80
Figura 27 - Pontos positivos e negativos de modelos	82
Figura 28 - Escala fundamental de Saaty.....	84
Figura 29 - Estrutura arborescente de critérios para análise da criticidade dos equipamentos de um aerogerador.....	91
Figura 30 - Comportamento econômico do critério: equipamentos sobressalentes ..	94
Figura 31 - Comportamento econômico do critério: efeito da falha na operação	97

Figura 32 - Frequência média de falhas e tempo de inatividade por subsistema e ano em turbinas eólicas na Suécia no período 1997-2005.....	98
Figura 33 - Comportamento econômico do critério: frequência cumulativa de falha.....	100
Figura 34 - Comportamento econômico do critério: MTTF	102
Figura 35 - Comportamento econômico do critério: MTTR.....	104
Figura 36 - Comportamento econômico do critério: custo de manutenção preventiva	107
Figura 37- Comportamento econômico do critério: custo de manutenção corretiva.....	110
Figura 38 - Tipos de acidentes em parques eólicos entre 2008 e 2017	111
Figura 39 - Comportamento econômico do critério: segurança.....	114
Figura 40 - Comportamento econômico do critério: socioambiental.....	116
Figura 41 - <i>Trade-off</i> PVF: técnico	118
Figura 42 - <i>Trade-off</i> PVF: econômico	119
Figura 43 - <i>Trade-off</i> PVF: gestão	120
Figura 44 - Trade-off para análise de criticidade dos equipamentos de um aerogerador	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplificação da matriz de decisão AHP	85
Tabela 2 - Índice de consistência aleatória	86
Tabela 3 – Critérios aplicados em problemáticas de manutenção	89
Tabela 4 - Critério: Equipamentos sobressalentes	93
Tabela 5 - Matriz de comparação par a par - método AHP	93
Tabela 6 - Comportamento econômico do critério: equipamentos sobressalentes ...	94
Tabela 7 - Critério: Efeito da falha na operação	95
Tabela 8 - Matriz de comparação par a par - método AHP	96
Tabela 9 - Comportamento econômico do critério: efeito da falha na operação	96
Tabela 10 - Critério: Frequência cumulativa de falha	99
Tabela 11 - Matriz de comparação par a par - método AHP	99
Tabela 12 - Comportamento econômico do critério: frequência cumulativa de falha.....	99
Tabela 13 - Critério: MTTF	101
Tabela 14 - Matriz de comparação par a par - método AHP	101
Tabela 15 - Comportamento econômico do critério: MTTF	101
Tabela 16 - Critério: MTTR.....	103
Tabela 17 - Matriz de comparação par a par - método AHP	103
Tabela 18 - Comportamento econômico do critério: MTTR.....	103
Tabela 19 - Critério: custo de manutenção preventiva e preditiva.....	105
Tabela 20 - Matriz de comparação par a par - método AHP	106
Tabela 21 - Comportamento econômico do critério: custo de manutenção preventiva e preditiva.....	106
Tabela 22 - Critério: custo de manutenção corretiva.....	108
Tabela 23 - Matriz de comparação par a par - método AHP	109
Tabela 24 - Comportamento econômico do critério: custo de manutenção corretiva.....	109
Tabela 25 - Critério: segurança.....	113
Tabela 26 - Matriz de comparação par a par - método AHP	113
Tabela 27 - Comportamento econômico do critério: segurança.....	113
Tabela 28 - Critério: socioambiental	115
Tabela 29 - Matriz de comparação par a par - método AHP	116
Tabela 30 - Comportamento econômico do critério: socioambiental	116
Tabela 31 - Matriz de comparação par a par - método AHP	117

Tabela 32 - Matriz de comparação par a par - método AHP	118
Tabela 33 - Matriz de comparação par a par - método AHP	119
Tabela 34 - Matriz de comparação par a par - método AHP	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

AHP – *Analytic Hierarchy Process* (Processo de Hierarquia Analítica)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CF – Causa de Falha

CWFI – *Caithness Windfarm Information Forum*

FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis* (Análise de Modos e Efeitos de Falha)

FTA – *Fault Tree Analysis* (Análise de Árvore de Falhas)

HAZOP – *Hazard and Operability Study* (Estudo de Perigo e Operabilidade)

MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory* (Teoria da Utilidade Multi-Atributo)

MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade

MCDM – *Multiple Criteria Decision Making* (Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios)

MF – Modo de Falha

MTBF – *Mean Time Between Failures* (Tempo Médio Entre Falhas)

MTTF – *Mean Time To Failure* (Tempo Médio para Falha)

MTTR – *Mean time To Repair* (Tempo Médio para Reparo)

PIR – Planejamento Integrado de Recursos Energéticos

PRA – *Probabilistic Risk Assessment* (Análise Probabilística de Risco)

PVE – Ponto de Vista Elementar

PVF – Ponto de Vista Fundamental

RBA – *Risk Based Maintenance* (Manutenção Baseada em Risco)

RCA – *Root Cause Analysis* (Análise de Causa Raiz)

RCM – *Reliability Centered Maintenance* (Manutenção Centrada em Confiabilidade)

RPN – *Risk Priority Number* (Número de Prioridade de Risco)

SNPTEE – Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Eólica

TSRA – *Tip Speed Ratio* (Taxa de Velocidade da Ponta)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Definição do Problema	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos.....	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	Estrutura do trabalho.....	18
2	FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA	20
2.1	Energia eólica no Brasil.....	20
2.2	Aspectos gerais sobre a fonte primária de energia	22
2.3	Aerogeradores.....	25
2.3.1	Princípio de funcionamento	25
2.3.2	Principais componentes	29
2.4	Aspectos gerais de manutenção	32
2.4.1	Abordagens de manutenção	35
2.4.2	Manutenção preventiva e preditiva aplicada a aerogeradores	37
2.4.3	Manutenção corretiva aplicada a aerogeradores	38
3	METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO	40
3.1	Método da Manutenção Centrada em Confiabilidade	41
3.1.1	Diagrama de Ishikawa.....	44
3.1.2	Análise de modo e efeitos de falha	45
3.2	Métodos da Taxa de Falha.....	46
3.2.1	Distribuição Normal.....	49
3.2.2	Distribuição Lognormal.....	51
3.2.3	Distribuição Exponencial	53
3.2.4	Distribuição de Weibull.....	54
3.3	Método de indicadores de desempenho e disponibilidade	57
3.4	Método de manutenção baseada em riscos	62
3.4.1	Métodos de natureza qualitativa para identificação de riscos	65
3.4.1.1	<i>Análise “What if...?”</i>	<i>65</i>
3.4.1.2	<i>Estudos de perigos da operação (HAZOP - Hazard and Operability Study)</i>	<i>66</i>
3.4.2	Métodos de natureza quantitativa para identificação de riscos	67
3.4.2.1	<i>Análise de árvore de falhas.....</i>	<i>67</i>
3.5	Método multicriteriais	71
3.5.1	Processo de tomada de decisão	71
3.5.2	Análise de criticidade	72
4	METODOLOGIAS MULTICRITERIAIS DE APOIO À DECISÃO	73
4.1.1	Desenvolvimento de modelos	77
4.1.1.1	<i>Fase de estruturação de um modelo multicritério</i>	<i>78</i>
4.1.1.2	<i>Fase de avaliação</i>	<i>80</i>
4.1.1.3	<i>Fase de elaboração de recomendações</i>	<i>81</i>
4.1.2	Métodos multicriteriais fundamentais	81
4.1.2.1	<i>AHP – Analytic Hierarchy Process</i>	<i>82</i>
4.1.2.2	<i>MAUT– Multi-Attribute Utility Theory</i>	<i>86</i>

5	PROPOSTA DE MODELO MULTICRITERIAL PARA PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO	89
5.1	Ponto de vista fundamental - Técnico.....	92
5.1.1	Equipamentos sobressalentes	92
5.1.2	Efeito da falha na operação	94
5.1.3	Frequência cumulativa de falha	97
5.1.4	MTTF.....	100
5.1.5	MTTR	102
5.2	Ponto de vista fundamental - Econômico	104
5.2.1	Custo de manutenção preventiva e preditiva	104
5.2.2	Custo de manutenção corretiva	107
5.3	Ponto de vista fundamental – Gestão	110
5.3.1	Segurança.....	110
5.3.2	Socioambiental.....	114
5.4	<i>Trade-offs</i> dos pontos de vista fundamentais e dos descritores	117
6	CONCLUSÃO	122
6.1	Trabalhos futuros.....	123
	REFERÊNCIAS.....	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Problema

Por conta das características ambientais, inicialmente, a matriz brasileira foi desenvolvida com enfoque na geração de energia elétrica por meio de fontes hídricas. Historicamente, o país investiu massivamente nesta forma de geração de energia, devido à abundância de recursos hídricos existente. No entanto, a dependência da energia proveniente de usinas hidrelétricas tem exposto o país a níveis de risco considerados temerários, devido às mudanças climáticas que causaram fortes períodos de estiagem e mudança na distribuição espacial das chuvas em muitas regiões brasileiras.

Nesse sentido, considerando a geração de energia elétrica e a sua crescente demanda, a matriz energética brasileira se encontra em transformação, atualmente considerada hidro-termo-eólica. A busca por inovações e soluções, no âmbito da produção de energia, mais sustentáveis para o meio ambiente e que reduzam os índices de degradação ambiental têm crescido cada vez mais, sendo assim, uma alternativa às fontes tradicionais de geração de energia elétrica que tem se mostrado eficaz é a geração eólica.

De acordo com Chan e Mo (2016), a energia eólica é uma forma de geração de energia limpa e renovável, a qual não consome combustível ou emite carbono durante a operação e com competitividade crescente. A geração de energia elétrica por meio de fontes eólicas é realizada, basicamente, através da conversão da energia cinética da rotação das pás de um aerogerador em energia elétrica.

Os aerogeradores são equipamentos expostos a diferentes condições climáticas e alterações frequentes nas cargas de vento, deste modo possuem elevada necessidade de adaptação às condições adversas e imprevisíveis. Por conta disso, é muito comum que a frequência de manutenções em aerogeradores seja relativamente elevada.

O fato de unidades eólicas necessitarem de constantes manutenções acarreta dois grandes desafios para o setor elétrico: o tempo de indisponibilidade de unidades eólicas e os custos de manutenção.

Uma maneira de reduzir a indisponibilidade de unidades eólicas e o custo de manutenção é efetuar um planejamento da manutenção baseado na relação custo/confiabilidade. Através desta técnica é possível encontrar a forma mais eficaz de realizar a manutenção e qual o melhor momento para isso.

A partir disso, este trabalho visa estudar as técnicas baseadas em confiabilidade e custos existentes para manutenções em aerogeradores que tragam os melhores resultados em termos de redução do tempo de indisponibilidade e redução dos custos demandados para as manutenções. Para isto, foi elaborada uma proposta de modelo multicritério de apoio à tomada de decisão com o intuito de analisar a criticidade dos equipamentos que compõem um aerogerador, a fim de que este modelo possa auxiliar o planejamento da manutenção de forma estratégica.

1.2 Justificativa

Segundo Florian e Sørensen (2017), as práticas atuais do setor de energia eólica dependem fortemente de uma combinação de manutenção corretiva e manutenção preventiva, caracterizada por inspeções baseadas no tempo, ou seja, manutenções em que é estabelecida uma periodicidade para realizar determinada manutenção. Visto que estes métodos de manutenção podem não ser adequados para determinado equipamento, pode haver mais chances do equipamento falhar antes do previsto, segundo seu ciclo de vida. Outra situação possível é a realização da manutenção apenas quando houver a falha, neste caso, a falha poderá ser irreversível para o equipamento. Sendo assim, isto leva a um número relativamente alto de avarias nos aerogeradores que exigem operações caras de substituição ou reparo, impactando significativamente o custo da geração de energia. Em várias situações, a degradação de um componente pode ser detectada com o monitoramento de condições *on-line* ou com inspeções *off-line* de desgaste, através da manutenção preditiva, evitando-se um reparo precoce. O resultado é a mitigação no custo e no tempo de inatividade.

No entanto, a quantidade de esforço despendido na prevenção de falhas também precisa ser limitada, pois um alto número de reparos e inspeções preventivas leva a grandes despesas e tempo de inatividade desnecessários. As inspeções com base no tempo são comumente realizadas em intervalos regulares e as decisões de reparo são tomadas apenas dependendo do tamanho do dano observado (FLORIAN; SØRENSEN, 2017).

O estudo de abordagens técnicas de manutenção em unidades eólicas torna-se extremamente relevante não apenas pela redução de custos na sua manutenção e tempo de indisponibilidades propriamente ditos, mas, também na redução do custo da energia e maior suprimento da demanda por energia de forma menos restrita e mais sustentável. Desta forma, há menos dependência da geração de energia através de outras fontes que podem ser prejudiciais ao meio ambiente como um todo ou de fontes que estão em escassez.

Este trabalho foi fundamentado em princípios de manutenção baseados em confiabilidade e análise de risco, em fatores econômicos e planejamento integrado de recursos com base em metodologias de multicritério.

O estudo de metodologias de manutenção poderá contribuir para a aplicação em unidades eólicas existentes, visando encontrar a forma mais eficaz de se realizar a manutenção, reduzindo custos, aumentando a disponibilidade do aerogerador e, possivelmente, aumentando seu ciclo de vida.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar uma proposta de modelo multicriterial para o planejamento da manutenção de aerogerador fundamentado em confiabilidade e análise de criticidade de equipamentos eletromecânicos de uma unidade eólica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar os métodos existentes de manutenção baseada em confiabilidade e análise de risco;
- b) Analisar as metodologias de planejamento integrado com base em multicritério visando à aplicabilidade em manutenção de aerogeradores;
- c) Analisar a estrutura de um aerogerador, sobretudo, seus equipamentos eletromecânicos, a fim de ter conhecimento sobre seus respectivos funcionamentos; e
- d) Elaborar um modelo pautado em metodologia multicritério estruturando uma árvore de decisão em que podem ser classificados os equipamentos eletromecânicos de um aerogerador de acordo com o respectivo grau de criticidade, a fim de auxiliar à tomada de decisão acerca do planejamento da manutenção em unidades eólicas.

1.4 Estrutura do trabalho

A fim de auxiliar a leitura e compreensão deste trabalho, o mesmo está dividido em 6 capítulos. Neste primeiro capítulo, há a contextualização, definição do problema, justificativa e os objetivos.

No capítulo 2 são apresentados fundamentos da energia eólica, contendo conceitos, formulações matemáticas e dados atrelados aos princípios da geração de energia por fontes eólicas. Além disso, também trata sobre os aspectos gerais de manutenção, apresentando conceitos básicos sobre o tema.

O capítulo 3 apresenta algumas das metodologias de planejamento da manutenção, modelos matemáticos utilizados em estudos já realizados por outros autores e suas aplicabilidades.

Já o capítulo 4 apresenta metodologias de multicritério de apoio à tomada de decisão.

O capítulo 5 trata da proposta do modelo multicriterial, dispondo os pontos analisados e as metodologias aplicadas para seu desenvolvimento.

O capítulo 6 apresenta as conclusões atreladas ao modelo proposto de análise de criticidade de equipamentos de um aerogerador, incluindo sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

2.1 Energia eólica no Brasil

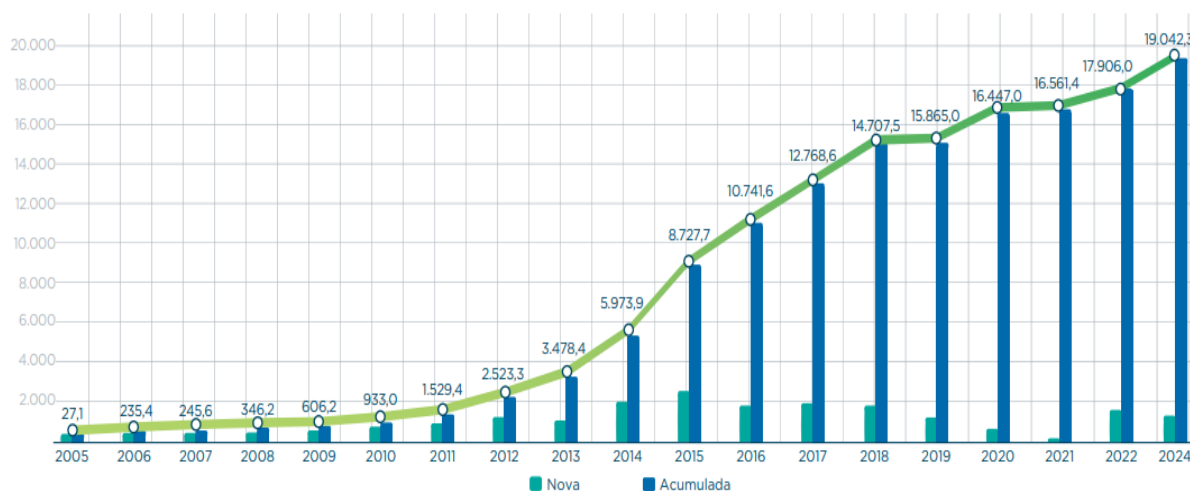
A matriz energética brasileira tem como principal fonte de geração de energia as usinas hidrelétricas. No entanto, a escassez hídrica compromete a geração de energia através dessa fonte e, assim, a busca pela ampliação da produção de energia elétrica por meio de outras fontes de geração se torna relevante.

Nesse âmbito, as energias alternativas ganham cada vez mais espaço, visto que, além de promover o aumento de oferta de energia, possibilitam a diversificação da matriz energética e contribuem para reduzir os impactos ambientais. Dentre essas fontes, no Brasil, a energia eólica está apresentando um crescimento expressivo em sua capacidade instalada nos últimos anos.

Segundo dados apresentados pela ABEEólica (2019), os ventos passaram a ser a segunda fonte de geração de energia mais utilizada no Brasil. A capacidade instalada contabilizada encontra-se em 15GW, sendo mais de 7 mil aerogeradores, em 601 parques eólicos, em 12 estados. Na Figura 1 é possível verificar a evolução da capacidade instalada e o crescimento da fonte eólica em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e no mercado livre.

De acordo com a Figura 1, houve um crescimento expressivo na capacidade instalada de usinas eólicas no Brasil a partir de 2014 até 2019. Além disso, é notório que a projeção de crescimento até 2024 segue crescente, visando alcançar números ainda mais significantes para o país.

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada (MW)



Fonte: ANEEL/ABEEólica (2018).

Ainda sobre a Figura 1 e conforme mencionado anteriormente, a geração de energia através da fonte eólica a partir de 2014 encontra-se em crescimento, apesar de sofrer decaimentos em seu coeficiente de inclinação, este crescimento segue em escalas consideráveis pelos anos seguintes. No entanto, apesar do forte crescimento da energia eólica no Brasil, esta forma de geração de energia enfrenta diversos desafios, dentre eles está a capacidade de manter a disponibilidade dos parques eólicos.

A disponibilidade, de acordo com a norma brasileira, é a capacidade de um item estar em condições de executar uma função em determinado instante ou intervalo de tempo, considerando os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. Uma das formas de mensurar a disponibilidade é avaliando a probabilidade de um item estar apto para desempenhar uma função requerida sob dadas condições (ABNT, 1994).

A disponibilidade de parques eólicos é um indicador de extrema importância por ser um elemento contratual, cujo descumprimento traz penalidades financeiras às partes envolvidas (ROMIO, 2016). Por conta disto, as estratégias de manutenção devem ser planejadas e executadas de forma a maximizar o tempo de disponibilidade de um aerogerador. Além disso, o planejamento da manutenção busca reduzir os custos empregados à manutenção, aumentar a eficiência e

eficácia dos equipamentos e maximizar o ciclo de vida e o desempenho operacional.

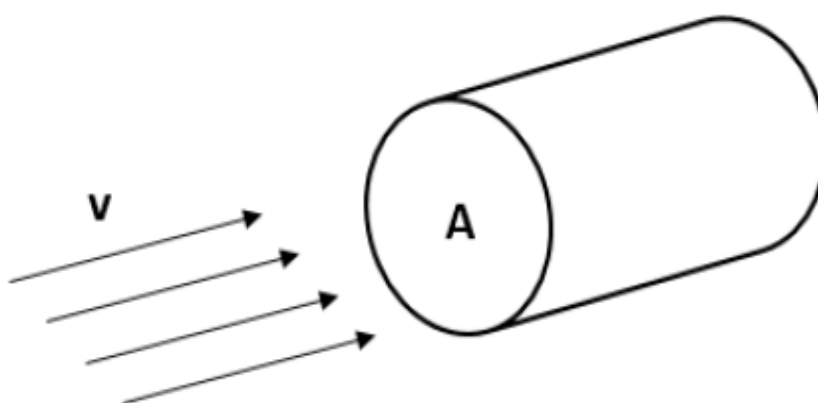
2.2 Aspectos gerais sobre a fonte primária de energia

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento, o vento. Devido a sua variabilidade, em termos de velocidade de escoamento e direção de deslocamento, é necessário que seja estudado o seu comportamento espacial e temporal, a fim de buscar o aproveitamento energético desta fonte primária (CUSTÓDIO, 2009).

Como a origem dos ventos está relacionada com o aquecimento não uniforme da superfície terrestre, a energia eólica pode ser classificada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do sol. A discrepância no aquecimento da atmosfera deve-se, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra (CRESESB, 2014).

Considerando um fluxo de ar, movendo-se à velocidade, v , perpendicular à seção transversal de um cilindro imaginário, como representado na Figura 2, é possível analisar a potência disponível do vento.

Figura 2 - Fluxo de ar através de uma área transversal A



Fonte: Rêgo (2017)

O movimento do fluxo de ar acontece a uma velocidade conhecida, v , esta velocidade percorre a seção transversal do cilindro de forma perpendicular,

como é possível observar de acordo com a apresentação da Figura 2 (RÊGO, 2017).

Deste modo, observa-se que o fluido, ar, é dotado de potência e energia. Assim, antes da etapa do cálculo da potência disponível do vento, é necessário realizar o cálculo da energia cinética, o qual está exposto na Equação 1.

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

Em que:

E: energia cinética [J];

m: massa de ar [kg]; e

v: velocidade da massa de ar [m/s].

Com o equacionamento da energia cinética do vento, ao derivar tal equação no tempo é possível encontrar a potência disponível do vento, conforme a Equação 2.

$$P = \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m}v^2}{2} \quad (2)$$

Em que, P , é a potência disponível no vento [W]; $\dot{E}$, é o fluxo de energia [J/s]; t , o tempo [s]; $\dot{m}$, o fluxo da massa de ar [kg/s]. Utilizando a Equação 3, apresentada a seguir, torna-se possível encontrar o fluxo da massa de ar.

$$\dot{m} = \rho v A \quad (3)$$

Em que, ρ , é massa específica do ar [kg/m³] e, A , é área da seção transversal [m²]

Substituindo a equação 3 na 2, é possível calcular a potência disponível no vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar, conforme apresentado na Equação 4 e Figura 2.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Conforme destacado na Equação 4, há grande importância atrelada à velocidade do vento no cálculo da potência disponível. Por conta disso, o

comportamento dos ventos é uma variável aleatória que aumenta a complexidade de precisão nas previsões de disponibilidade de potência.

As medições de vento em tempo real são feitas através de torres anemométricas e seus dados são registrados em períodos discretos. A análise de tais dados é realizada através de distribuições probabilísticas, sendo a distribuição de Weibull a mais utilizada, visto que ela consegue retratar, de maneira satisfatória, uma grande variedade de padrões de comportamento do vento, além de considerar comportamentos extremos de vento (SANSIGOLO, 2005). Deste modo, a Equação 5 apresenta a função densidade de probabilidade de Weibull.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \begin{cases} k > 0 \\ c > 1 \\ v \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Em que:

$f(v)$: função densidade de probabilidade de Weibull [adimensional];

c : fator de escala [m/s];

k : fator de forma [adimensional]; e

v : variável aleatória de velocidade do vento [m/s].

Através da variável aleatória de velocidade do vento é possível calcular a velocidade média do vento, a qual é um parâmetro necessário para obter o gráfico de Weibull que, em termos estatísticos, é a distribuição de densidade de probabilidade do vento (RIBEIRO, 2017).

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (6)$$

Em que, $\bar{v}$, é a velocidade média [m/s].

Neste sentido, a turbina eólica será a responsável pela transformação parcial da energia disponível do vento em energia mecânica. A transformação da energia é considerada parcial, pois existe um limite para tal conversão. O valor ideal máximo deste limite foi calculado por Albert Betz e é aproximadamente 0,59. (CRESESB, 2018).

A potência mecânica obtida da transformação parcial da energia disponível do vento, portanto, está apresentada na Equação 7.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (7)$$

Em que, P_{mec} , é a potência mecânica extraível do vento [W]; C_p , o coeficiente de potência [adimensional]; λ , é a razão de velocidades tangencial da ponta da pá e do vento incidente (*Tip Speed Ratio* – TSRA) [adimensional]; e, β , é o ângulo de passo (°).

Para a obtenção do valor de, λ , basta seguir a seguinte formulação apresentada na Equação 8.

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (8)$$

Em que, ω_{wt} , é a velocidade angular do aerogerador [rad/s]; R , o raio do aerogerador [m]; e, v_w , a velocidade do vento incidente no aerogerador [m/s].

O conhecimento destes conceitos e equacionamentos é necessário, visto que fundamentam o uso do recurso energético em questão. Além disso, a partir deles é facilitada a compreensão dos fenômenos e desafios originados por esta fonte de energia. A previsão de disponibilidade de potência mecânica destaca-se como um dos desafios típicos da geração de energia através da fonte eólica.

2.3 Aerogeradores

2.3.1 Princípio de funcionamento

Conforme citado anteriormente, a energia eólica é proveniente da energia solar. É uma forma de energia cinética produzida pelo aquecimento diferenciado das camadas de ar, originando uma variação de massa específica e gradientes de pressão. Além disso, também possui influências originadas pelo movimento de rotação da Terra sobre o seu eixo (SEQUEIRA, 2012).

Os aerogeradores são os equipamentos responsáveis por realizar produção de energia elétrica, a partir da absorção e conversão da energia cinética

existente nos ventos. Os principais componentes de um aerogerador são a turbina eólica, caixa multiplicadora (ou *Gearbox*) e o gerador. No entanto, há também outros equipamentos, dispositivos e sistemas que o compõem (CUSTÓDIO, 2009).

As turbinas eólicas podem ser subdividas pela força atuante no seu movimento, as duas subdivisões são: turbinas de arrasto (*drag*) e as turbinas de sustentação (*lift*) (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016).

Além da subdivisão em relação à força atuante no seu movimento, as turbinas eólicas também podem ser divididas pela posição do eixo principal, existem as turbinas de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*) e as turbinas de eixo vertical (*Vertical Axis Wind Turbine*), respectivamente representadas nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Aerogerador de eixo horizontal



Fonte: Enercon (2021).

Na geração comercial de energia elétrica a aplicação de turbinas de eixo horizontal é extensamente utilizada. Devido às suas características de sustentação e o aproveitamento de velocidade de vento mais elevadas, fator que provoca maior eficiência no processo de conversão de energia (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016).

Figura 4 - Aerogerador de eixo vertical



Fonte: StarCreation (2021).

Os aerogeradores de eixo vertical (Figura 4), quando comparados com os de eixo horizontal, possuem eficiência inferior e também custos mais elevados devido ao material utilizado na fabricação, que usualmente é o alumínio. Estes fatores tornam-se itens de alta relevância e impeditivos para que os aerogeradores de eixo vertical sejam utilizados em larga escala na geração comercial de energia.

Para este trabalho são apresentados conceitos e informações a respeito das turbinas de eixo horizontal, visto que o foco é em geração de energia elétrica comercial.

Dois parâmetros fundamentais que influenciam diretamente na quantidade de energia produzida são a velocidade do vento e o diâmetro do rotor. Entretanto, existem limitações em relação à velocidade do vento, visto que é necessário que a velocidade de vento atinja um valor mínimo para que seja possível a geração de energia elétrica, este valor é aproximadamente de 3,6 m/s. Além disso, existem limites superiores de velocidade do vento que não devem ser ultrapassados por questões de segurança, comumente estes valores são de aproximadamente 25 m/s (SEQUEIRA, 2012).

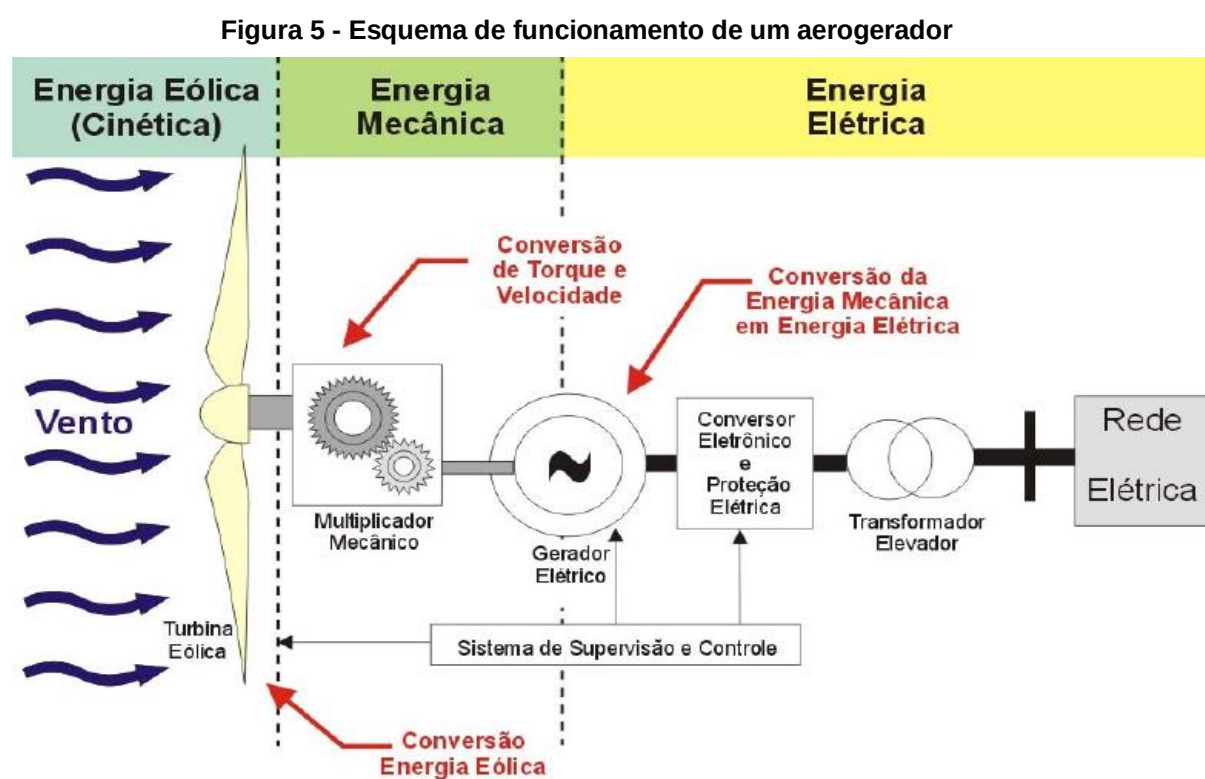
Com relação ao princípio de geração de energia elétrica por um aerogerador, a partir do acionamento da turbina eólica pelo vento, a energia mecânica é produzida no eixo, o qual movimenta o gerador. O gerador elétrico, por

sua vez, converte energia mecânica em energia elétrica por meio de conversão eletromagnética (CUSTÓDIO, 2009).

Na grande maioria dos aerogeradores e conforme apresentado na Figura 5, a turbina eólica opera com baixas rotações, em torno de 36 rpm. Já o gerador elétrico possui faixas de rotações operacionais mais elevadas, aproximadamente, 1800 rpm, por exemplo. A fim de compatibilizar estas rotações, muitos aerogeradores possuem um multiplicador mecânico de rotações, comumente conhecido como caixa multiplicadora (*Gearbox*). Este componente realiza a conversão de torque e velocidades, permitindo que a energia mecânica seja entregue ao gerador na rotação e torques corretos (PAVINATTO, 2005).

Existem, entretanto, alguns casos de acoplamentos diretos, eliminando as caixas multiplicadoras, ou seja, a rotação da turbina eólica e do gerador é a mesma (CUSTÓDIO, 2009).

Neste trabalho, são considerados os casos de aerogeradores que possuem a estrutura com caixa multiplicadora. A Figura 5 apresenta o esquemático eletromecânico de um aerogerador com caixa multiplicadora



Fonte: Adaptado de Pavinatto (2005).

Os aerogeradores existentes no mercado podem ser classificados em dois grupos: de operação em velocidade de rotação aproximadamente constante e de operação em velocidade variável. No primeiro grupo, o gerador é acoplado à rede elétrica utilizando durante a etapa de conexão apenas um *soft-starter* como limitador de corrente. Já o segundo grupo, utiliza conversores eletrônicos de potência para o acoplamento do gerador elétrico com a rede elétrica, isto melhora a conversão da energia cinética dos ventos. No entanto, nos dois grupos, um transformador elevador compatibiliza os níveis de tensão da geração com o nível de tensão da rede de distribuição, que normalmente opera entre 13,8 kV e 34,5 kV (PAVINATTO, 2005).

2.3.2 Principais componentes

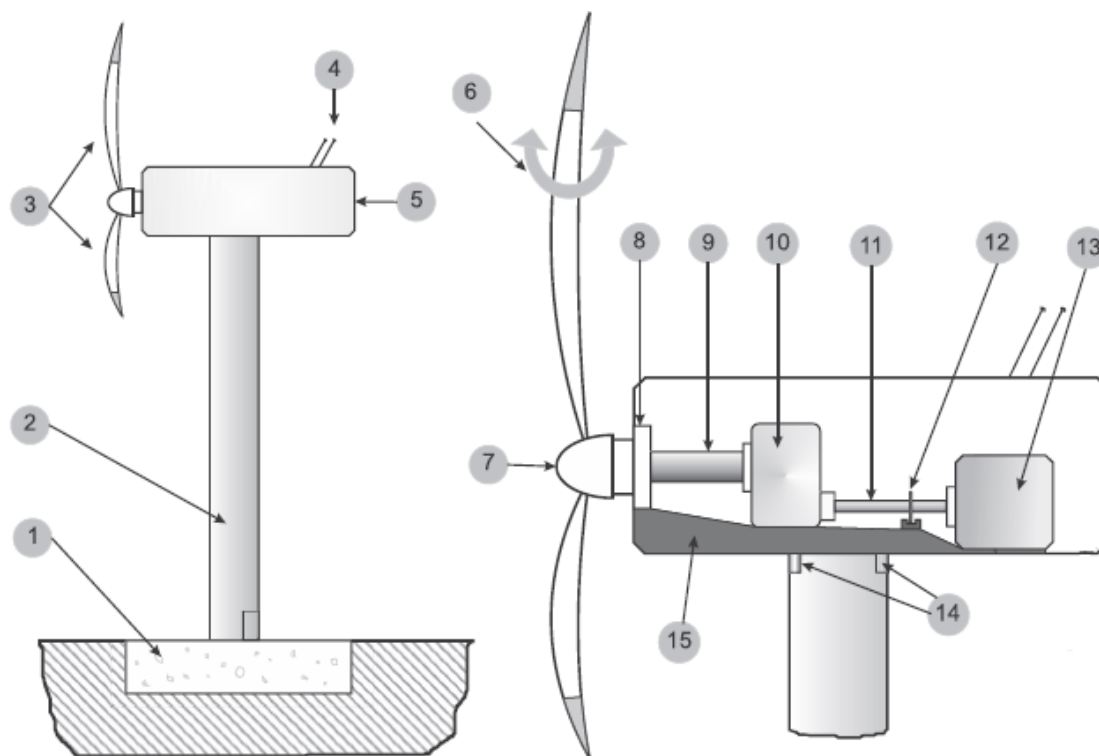
Um aerogerador é formado por diversos componentes e sistemas, como já mencionado anteriormente. Dentre os principais componentes de um aerogerador estão as pás que são conectadas ao rotor através do cubo (*Hub*), as quais são responsáveis pelo aproveitamento e absorção da energia cinética dos ventos. O rotor transmite a energia mecânica através do eixo de baixa velocidade por meio da caixa de engrenagens (*Gearbox*) para o eixo de alta velocidade, chegando ao gerador (MÁRQUEZ *et al.*, 2016).

O alinhamento com a direção do vento é controlado por um sistema de guinada, o qual gira a nacele para esse fim. A nacele é montada no topo de uma torre, que está sob uma base ou fundação. Cada pá possui um sistema de passo que é o mecanismo responsável por girar a pá para controlar a energia eólica absorvida. Isto pode ser empregado como um freio aerodinâmico, bem como para aumentar a eficiência da produção de energia. Além disso, o aerogerador também possui um freio hidráulico para pará-lo. A estação meteorológica fornece para o sistema de controle os dados meteorológicos de velocidade e direção do vento. Os dados da estação meteorológica fornecem as informações necessárias para controlar efetivamente o sistema de inclinação, freio, guinada, etc. (MÁRQUEZ *et al.*, 2016).

Na Figura 6 são apresentados alguns dos principais componentes de um aerogerador e sua respectiva localização no equipamento. Essa localização e

arquitetura desses componentes podem variar de um fabricante para outro, mas a Figura 6 traz um exemplo genérico dessas estruturas.

Figura 6 - Componentes de um aerogerador



Fonte: Adaptado de Márquez *et al.* (2016).

De acordo com Custódio (2009), algumas das estruturas apontadas na Figura 6 podem ser definidas da seguinte maneira:

- a) Base/fundação da torre (1): responsável pela sustentação do aerogerador, geralmente possui uma estrutura de aço e concreto;
- b) Torre (2): possui a função de elevar a turbina do solo até uma altura conveniente, onde o vento tem velocidades adequadas para a geração de energia elétrica e, assim, há o aumento do desempenho do aerogerador. Existem dois tipos possíveis: tubular cônica ou treliça;
- c) Pás (3): perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, absorvendo e convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Comumente são fabricadas em fibra de vidro e reforçadas com epóxi e/ou madeira. A fixação no cubo (*Hub*) é feita pela inserção de raiz em aço inoxidável. Para os casos em que a

turbina possui controle de velocidade por passo, há rolamentos na base da pá, os quais possibilitam o giro para alterar o ângulo de ataque;

- d) Estação Meteorológica (anemômetros) (4): responsáveis por medir a velocidade e direção do vento. A velocidade é medida por anemômetro do tipo concha, já a direção por biruta ou *WindVane*. Essas medições alimentam o sistema de controle e também auxiliam para a monitoração do desempenho do aerogerador;
- e) Nacele (5): carcaça montada sobre a torre, onde estão localizados o gerador, a caixa de acoplamento e os demais dispositivos do aerogerador;
- f) Sistema de *Pitch* (6): controle do ângulo de ataque das pás;
- g) Cubo (*Hub*) (7): ponta do eixo da turbina, em forma de cubo, onde são fixadas as pás, por meio de flanges;
- h) Rolamento principal (8): reduz a resistência ao atrito entre as pás, o eixo de baixa velocidade e a caixa de engrenagens enquanto está em movimento relativo. Geralmente são do tipo de rolo autocompensador esférico projetado especificamente para turbinas eólicas (ANDRAWUS, 2008);
- i) Eixo de baixa velocidade (9): tem a função de absorver as rotações transmitidas pelas pás e entregá-las à caixa multiplicadora;
- j) Caixa de engrenagens (*Gearbox*) (10): realiza a adequação entre as diferenças das baixas velocidades vindas da turbina com as altas velocidades de giro do gerador;
- k) Eixo de alta velocidade (11): tem a função de absorver as rotações transmitidas pela caixa multiplicadora e entregá-las ao gerador;
- l) Sistema de freio (12): geralmente constituído por aço e em forma de disco. É comumente utilizado em paradas emergenciais ou tempestades;
- m) Gerador (13): responsável pela produção de energia elétrica. Podem ser síncronos ou assíncronos;
- n) Sistema *Yaw* (14): realiza a orientação em que a nacele deve permanecer apontada com relação ao vento; e

- o) Trem de força (*Drive train*) (15): composto pelo eixo de baixa velocidade, a caixa de engrenagens e o eixo de alta velocidade.

Os componentes apresentados anteriormente são integrantes principais da estrutura de uma aerogerador. Esta estrutura pode possuir diferenciações dependendo de seu fabricante e ajustes de desempenho que podem existir.

A partir da fundamentação teórica abordada anteriormente, é possível iniciar a correlação da importância da manutenção para o bom desempenho de um aerogerador e, por conseguinte, de um sistema eólico. Neste sentido, no capítulo a seguir são abordados conceitos e técnicas de manutenção usualmente empregados tanto em setores industriais como também no setor de geração de energia.

2.4 Aspectos gerais de manutenção

A falha pode ser conceituada como o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida (ABNT, 1994). Além disso, também é possível aplicar a definição de falha como sendo a situação em que o sistema ou subsistema deixa de cumprir seu requisito funcional, o qual foi projetado para desempenhar (DIAS *et al.*, 2013).

Ao longo de um ciclo de vida, todo equipamento, componente ou pessoa, envolvidos em um processo, estão sujeitos a falha. Isto é justificado devido ao fato de a falha ser inerente a qualquer sistema técnico. No entanto, embora haja probabilidade de ocorrer uma falha, a forma como a falha se manifestará pode ser estudada, prevista e, até mesmo, controlada (BELLINI, 2008). É de suma importância que após a ocorrência de uma falha, sejam avaliadas as implicações na segurança humana e ambiental ou na continuidade da função principal do sistema técnico (DIAS *et al.*, 2013).

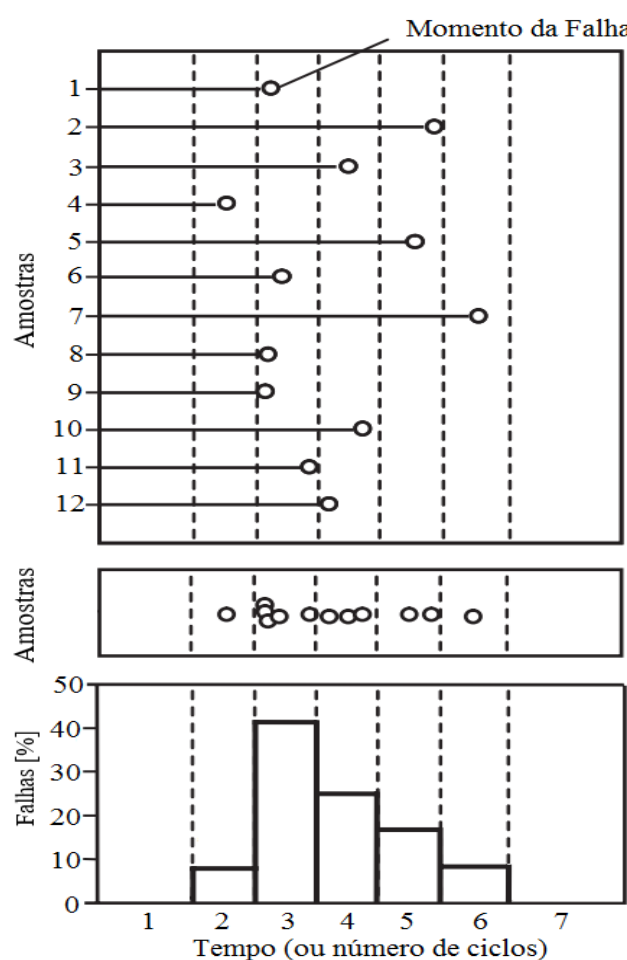
Como a análise de uma falha pode ser algo de grande extensão, é comum que sejam feitas análises estratificadas. Para isso analisam-se inicialmente os possíveis Modos de Falha, os quais representam a maneira que um sistema, processo ou equipamento pode falhar em desempenhar a sua função originalmente requerida. Ainda neste sentido, para cada Modo de Falha é necessário que outro

ponto seja analisado, sendo este a Causa de Falha. Por Causa de Falha entendem-se como a razão para que a falha ocorra em um sistema, processo ou equipamento.

A ocorrência de uma falha costuma estar associada a uma probabilidade, visto que sempre existe a probabilidade de um item falhar, no entanto este é um fator que pode variar dependendo da fase do ciclo de vida em que se encontra determinado item.

Para aplicar a teoria das probabilidades é preciso definir um parâmetro que represente o evento medido, conforme a Figura 7. Uma das formas mais tradicionais é avaliando o número de falhas que ocorrem por unidade de tempo (ROMIO, 2016).

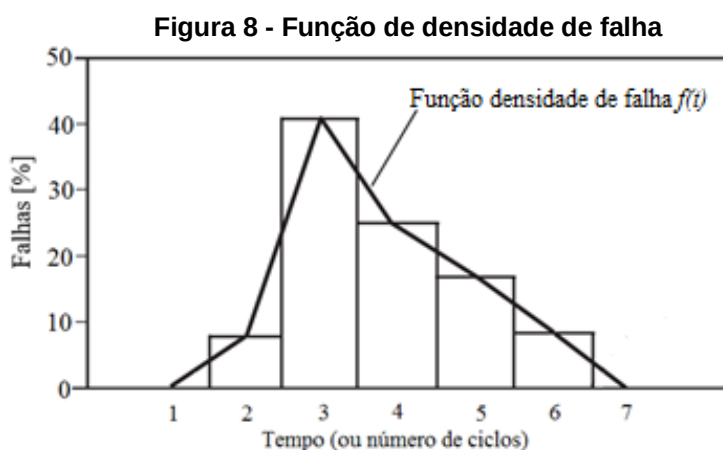
Figura 7 - Distribuição da ocorrência de falhas



Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

No gráfico apresentado pela Figura 7, a porcentagem de falhas foi obtida pela razão entre o número de falhas para aquele período e o número de falhas total. Neste sentido, é possível definir uma função de densidade, $f(t)$, a qual descreve a porcentagem de falhas e esta exemplificada na Figura 8. Com esta função torna-se viável extrair a Probabilidade de Falha, $F(t)$, que é equivalente a integral apresentada na Equação 9 (ROMIO, 2016).

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (9)$$



Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

A partir deste equacionamento, é possível estabelecer a taxa de falha, λ , a qual permite modelar a ocorrência da falha relacionada com um conjunto de componentes idênticos, que operam sob condições idênticas.

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas por unidade de tempo}}{\text{número de componentes expostos à falha}} \quad (10)$$

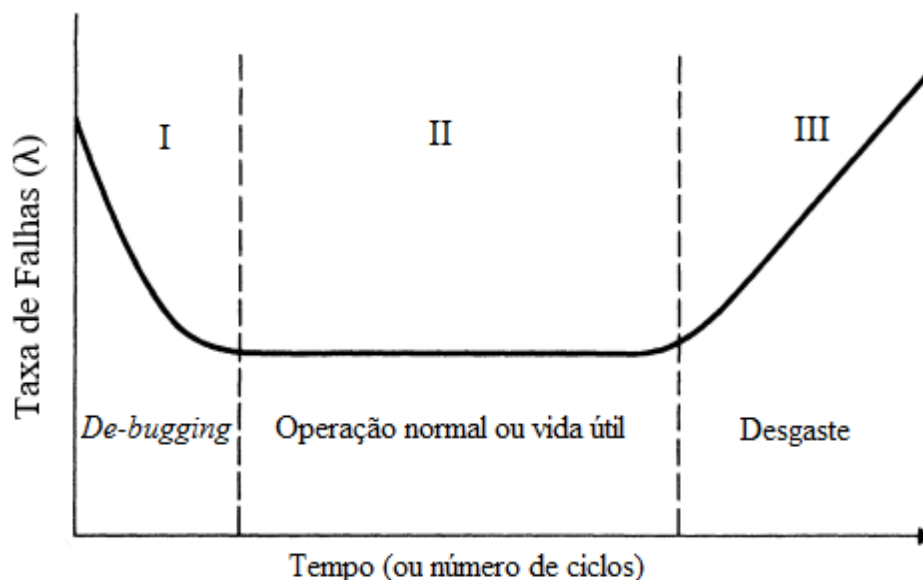
Como a taxa de falha é função do tempo, são traçadas diferentes curvas de λ contra o tempo. A curva mais conhecida é a chamada Curva da Banheira, representada na Figura 9 para o exemplo de equipamentos eletrônicos. Esta curva está dividida em três regiões, sendo elas (BILLINTON, 1992):

- a) Região I: *de-bugging* ou mortalidade infantil, a qual está relacionada às falhas em virtude de erros de projeto, fabricação ou montagem;
- b) Região II: operação normal ou vida útil, caracterizada pela taxa de falha constante. Neste caso, as falhas ocorrem meramente pelo

acaso; e

- c) Região III: fase de desgaste ou fadiga, em que a taxa de falha aumenta rapidamente com o tempo.

Figura 9 - Curva da banheira típica de eletrônicos



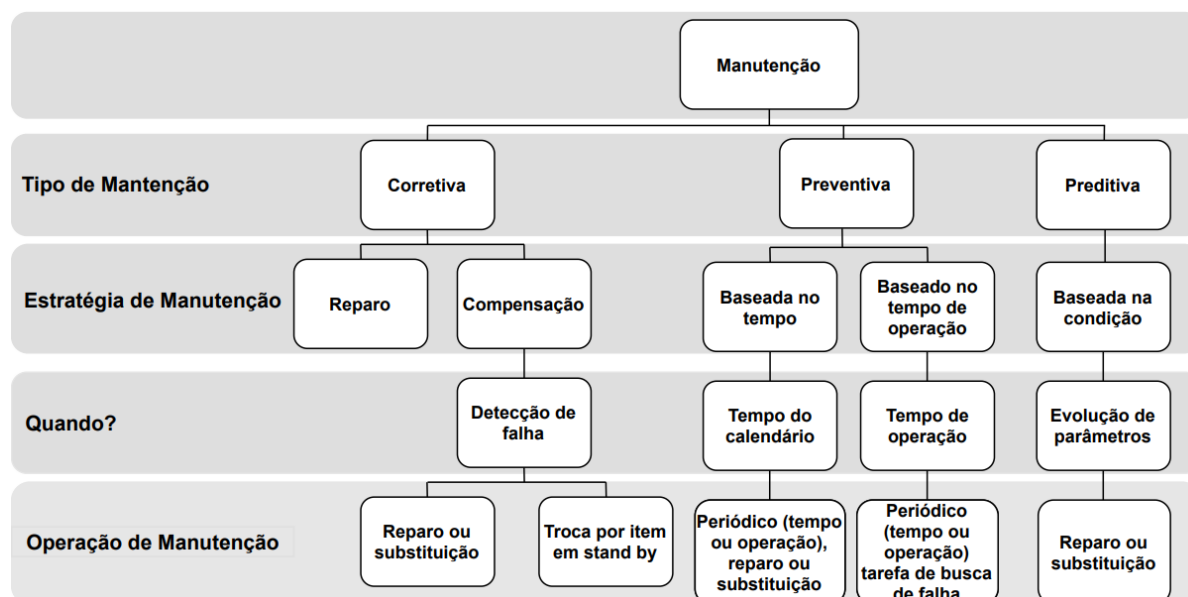
Fonte: Adaptado de Billinton (1992).

O exemplo apresentado na Figura 9 expressa a curva da banheira referente à taxa de falhas para equipamentos e sistemas eletrônicos, porém este comportamento pode assumir diferentes formatos e variações de acordo com o tipo de sistema.

2.4.1 Abordagens de manutenção

Segundo o dicionário de padrões IEEE (2000), a manutenção é definida como a combinação de todas as ações técnicas e ações administrativas correspondentes destinadas a reter um item ou restaurá-lo em um estado no qual ele pode executar sua função necessária. Existem algumas técnicas de manutenções que são empregadas tradicionalmente em diversos âmbitos, estas técnicas são divididas em manutenção corretiva e manutenção preventiva, sendo esta última subdividida em três estratégias: a manutenção baseada no tempo; no tempo de operação; e em condições. Estes dois pilares (corretiva e preventiva) e suas diversas estratégias de manutenção estão apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Classificação dos tipos de manutenção



Fonte: Adaptado de Rausand e Høyland (2004).

Como é possível observar, a Figura 10 expõe de forma abrangente os tipos de manutenção e suas respectivas estratégias, trazendo também o momento em que determinadas estratégias são aplicadas e ainda qual a operação de manutenção propriamente dita que deve ser realizada.

Quanto ao tipo de manutenção conhecido como manutenção corretiva, esta pode ser resumida como a manutenção que é realizada após a ocorrência de uma falha e destina-se a restaurar um item para um estado em que ele possa executar sua função necessária. Besnard *et al.* (2010) explica que este método normalmente é realizado quando não há meios econômicos para detectar ou prevenir uma falha.

Já a manutenção preventiva é realizada em intervalos pré-determinados ou correspondentes aos critérios prescritos e visa reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do desempenho de um item. A abordagem da manutenção baseada no tempo pode ser descrita como uma manutenção preventiva realizada de acordo com intervalos de tempo ou número de unidades de uso estabelecido, mas sem investigação prévia da condição. Besnard *et al.* (2010) afirma que esta técnica é adequada para falhas relacionadas à idade e para as quais a distribuição de probabilidade de falha pode ser estabelecida.

Já a estratégia de manutenção baseada no tempo de operação leva em consideração o tempo de operação dos equipamentos. O controle do tempo pode ser observado por uma unidade de medida que demonstre o quanto determinado equipamento operou (CANDIOTTO, 2016). A manutenção baseada no tempo de operação é configurada como uma estratégia de manutenção mais complexa de ser gerenciada em relação à manutenção baseada no tempo, haja vista que a esta última exige menos controles (RAUSAND; HOYLAND, 2004).

A manutenção preditiva, a qual é baseada em condições é uma manutenção preventiva baseada no desempenho e/ou monitoramento de parâmetros. Segundo Besnard *et al.* (2010), esta abordagem consiste em todas as estratégias de manutenções que envolvem inspeções ou sistemas de monitoramento de condições permanentemente isolados para decidir sobre as ações de manutenção. A inspeção pode envolver o uso de sentidos humanos, técnicas de monitoramento ou testes de função. A manutenção preditiva pode ser usada para falhas não relacionadas à idade se a atividade tem a capacidade de diagnosticar a degradação no tempo de maneira econômica.

2.4.2 Manutenção preventiva e preditiva aplicada a aerogeradores

Um das abordagens de manutenção comumente aplicadas em aerogeradores são as manutenções preventivas e preditivas. As tarefas atreladas a estes tipos de manutenções têm o intuito de reduzir a um nível mínimo a taxa de manutenções corretivas. Nestas tarefas estão inclusas listas de verificações de rotina, testes e pequenos reparos necessários.

As listas de verificação são específicas para cada modelo de aerogerador. Dentre as atividades sugeridas pelo *checklist*, Andrawus (2008) aponta algumas tarefas que são frequentemente aplicadas em manutenções de aerogeradores, sendo elas a verificação dos níveis de óleo da caixa de engrenagens e do sistema hidráulico, inspeção de vazamentos de óleo, inspeção dos cabos que correm pela torre e seus sistemas de suporte, observação da máquina durante o funcionamento para verificar se há qualquer acionamento incomum, vibrações do *drivetrain*, inspeção do disco de freio e inspeção do equipamento de fuga de emergência. Outras atividades incluem a verificação da

segurança das fixações (por exemplo, fixação da lâmina, retenção da caixa de engrenagens, parafuso da base da torre), o alinhamento do eixo de alta velocidade, o ajuste do freio e o desgaste da pastilha do freio, o desempenho do mecanismo de guinada e freio, rolamento lubrificação, a segurança das terminações dos cabos e a calibração do *pitch* (para máquinas reguladas pelo *pitch*).

2.4.3 Manutenção corretiva aplicada a aerogeradores

Ainda que sejam realizados programas de manutenções preventivas, as manutenções corretivas são necessárias e inevitáveis, visto que as manutenções preventivas não eliminam por completo situações como, por exemplo, desgaste dos componentes, erros humanos, falhas de projeto e fatores operacionais, como excesso de velocidade, vibração excessiva, baixa pressão do óleo da caixa de engrenagens, erro de guinada, erro de inclinação, ativação prematura dos freios, falha de sincronização e perda de conexão à rede (ANDRAWUS, 2008). Neste sentido, a manutenção corretiva tem como objetivo corrigir falhas como as apresentadas anteriormente, quando necessário.

A identificação de que há necessidade da aplicação de manutenção corretiva ocorre quando os operadores tomam conhecimento de falhas durante inspeções de rotina ou quando o sistema de proteção desliga os aerogeradores em resposta a uma falha incipiente. É neste momento que a manutenção corretiva precisa ser realizada a fim de normalizar a situação do equipamento que estiver em falha (ANDRAWUS, 2008).

Neste sentido, as técnicas tradicionais de manutenção se mostram eficazes de forma isolada, visto que cada uma delas tem uma maneira específica de mitigar as falhas e são adequadas para determinados comportamentos de falha. Como é o exemplo da manutenção preventiva, a qual é adequada para falhas relacionadas à idade e para as quais a distribuição de probabilidade de falha pode ser estabelecida. Por outro lado, a manutenção corretiva é aplicada para casos em que não há meios para prevenção ou detecção da falha.

Como individualmente as técnicas tradicionais de manutenção buscam sanar diferentes comportamentos de falha, a organização e o planejamento da integração dessas técnicas são uma solução que visa reduzir ainda mais as taxas

de falhas existentes nos equipamentos, isso se justifica com o fato de que são realizados estudos para encontrar o melhor tipo de manutenção para cada comportamento de falha e equipamento, além disso, são feitos também estudos para que o melhor momento da manutenção seja encontrado.

Algumas das técnicas e de planejamento da manutenção e suas respectivas aplicabilidades serão apresentadas no capítulo seguinte.

3 METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO

As técnicas tradicionais de manutenção que foram apresentadas anteriormente, quando aplicadas individualmente podem não ser as melhores opções para o ativo que passará pela manutenção. No caso da manutenção de unidades eólicas, Chan e Mo (2016) explicam que manutenção é realizada duas vezes por ano, em intervalos de 6 meses. Uma manutenção típica envolveria inspeção completa de todo o sistema, substituição de fluidos, lubrificação e manutenção de peças mecânicas. Reparos e substituições seriam realizados, se necessário, pelo técnico. Essas inspeções com base no tempo e atividades de manutenção costumam ser caras e exigem tempo de inatividade indesejado.

De acordo com a visão apresentada por Kardec *et al.* (2002), a manutenção precisa estar direcionada para os resultados empresariais da organização, tornando-se um fator estratégico e de diferencial. Neste sentido, a manutenção não se limita ao fato de consertar um equipamento e/ou mantê-lo em sua plena função, a manutenção abrange funções mais amplas de gestão, garantindo disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e contribuindo com a redução de custos de processos e do programa de manutenção propriamente dito da organização. Centralizando este ponto de vista na geração de energia através de fontes eólicas, a gestão da manutenção realiza a interligação e afinidade com todo o processo produtivo da geração de energia, impactando também em outras etapas do processo.

Partindo do princípio de que a manutenção busca garantir a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos, o planejamento e controle da manutenção estão difundidos como uma ferramenta fundamental no processo de tomada de decisão (VIANA, 2002).

Neste sentido, foram criadas metodologias para o desenvolvimento do planejamento e controle da manutenção. Dentre as diversas metodologias já criadas, existem bases conceituais diferentes para cada uma delas. Sendo uma delas a manutenção centrada em confiabilidade e há também a metodologia de planejamento da manutenção baseada em risco, por exemplo. Estas e outras metodologias de planejamento da manutenção serão apresentadas e descritas a seguir.

3.1 Método da Manutenção Centrada em Confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) também conhecida do termo em inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM) foi originada na indústria aeronáutica americana na década de 1960, a fim de aumentar a confiabilidade e segurança das aeronaves. Já na década de 1970, vários setores da indústria iniciaram a utilização das técnicas de manutenção centrada na confiabilidade para determinar as melhores práticas, com o intuito de gerenciar as funções dos itens físicos e para gerenciar também as consequências de suas falhas. ORCM passou a ser empregada para garantir a confiabilidade dos itens físicos e também como metodologia essencial no planejamento da manutenção (ZAIONS, 2003).

A confiabilidade pode ser definida como a capacidade de um componente ou sistema de executar as funções necessárias sob condições determinadas por um período específico (IEEE, 2000). Segundo Besnard *et al.* (2010), pode ser descrito por meio da frequência anual de falhas e do tempo de inatividade médio associado por falha de componente ou subsistema.

Neste sentido, de acordo com Wireman (1998), a Manutenção Centrada em Confiabilidade representa uma evolução da manutenção tradicional, e tem como objetivo primordial reduzir os custos da manutenção, focando nas funções mais importantes do sistema, buscando remover ou alterar periodicidades de tarefas de manutenção que não são estritamente necessárias. A fim de atingir tal objetivo, o RCM identifica os modos de falha que afetam as funções, determina a importância de cada falha funcional a partir de seus modos de falha e seleciona tarefas aplicáveis e efetivas na prevenção de falhas funcionais (ZAIONS, 2003).

O RCM é uma abordagem que emprega práticas e estratégias de manutenção corretiva e preventiva de maneira integrada para aumentar a probabilidade de que uma máquina ou componente funcione da maneira necessária ao longo de seu ciclo de vida de projeto com manutenção mínima (IGBA *et al.*, 2013). Ademais, tem como objetivo principal preservar a função mais importante do equipamento ou sistema com a confiabilidade e disponibilidade necessárias, buscando o menor custo de manutenção. Os autores Selvik e Aven (2011), concordam que, além de reduzir os custos de manutenção, o RCM também possui o potencial de aumentar a segurança e a confiabilidade.

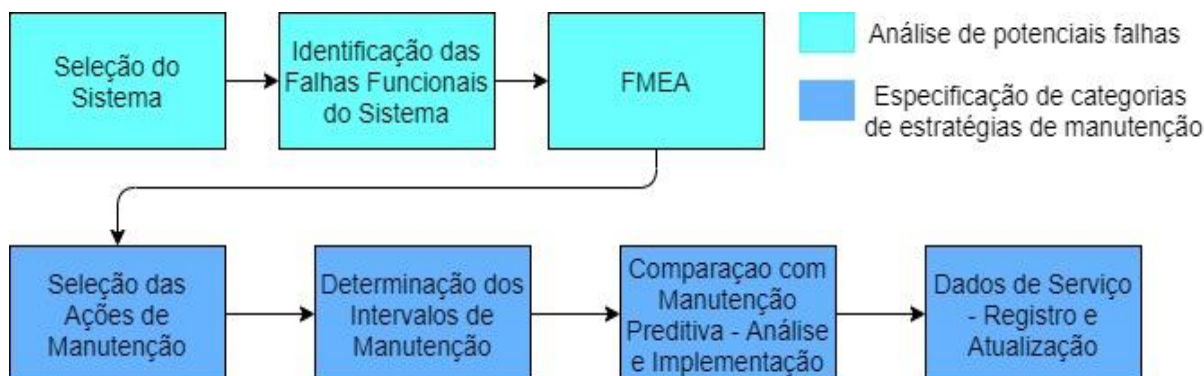
Segundo Igbaet *al.* (2013), os dados necessários para a análise do RCM se estendem por todo o ciclo de vida. Portanto, é necessário mapear e identificar claramente as fontes potenciais de dados e alinhá-las ao RCM para que a análise correta possa ser realizada. Por outro lado, devido à necessidade de identificar possíveis lacunas em alguns processos a montante, por exemplo: problema com o processo de fabricação devido a erro em uma produção em lote, a técnica de Análise de Modo e Efeitos de Falha, do tempo em inglês *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), é utilizada com o intuito de mapear os potenciais modos de falha do sistema, abrangendo desde o processo de fabricação até a funcionalidade do sistema. Isso pode ser realizado através de uma boa correlação de falhas de campo com dados de operação para fazer julgamentos precisos sobre as falhas funcionais por meio de uma Análise de Causa Raiz (RCA).

Em essência, a manutenção centrada na confiabilidade pode ser apresentada de forma geral com seus pontos centrais que a distinguem da prática de metodologias tradicionais de manutenção, de acordo com Fuentes (2006). Estes quatro pontos centrais são:

- a) Preservação da função do sistema;
- b) Identificação das falhas funcionais e dos modos de falhas dominantes;
- c) Priorização das falhas funcionais de acordo com as suas consequências; e
- d) Seleção das tarefas de manutenção aplicáveis e de custo-eficiente favoráveis, por meio de um diagrama de decisão.

Na Figura 11 há um resumo das principais etapas para a aplicação da metodologia de RCM.

Figura 11 - Etapas do RCM



Fonte: Adaptado de Igbaet *al.* (2013).

Em contraposição ao planejamento tradicional, conforme mencionado anteriormente, o paradigma central do RCM é a preservação da função do sistema, fornecendo respostas aos seguintes questionamentos (FUENTES, 2006):

- Quais são as funções e os níveis normais de eficiência dos equipamentos em seu atual contexto operacional?
- Qual é o estágio da falha para haver perda da sua função?
- Qual é a causa da falha funcional?
- O que sucede quando cada falha ocorrer?
- De que forma cada falha se manifesta?
- O que se pode fazer para prevenir cada falha?
- O que se deveria fazer se uma tarefa preventiva adequada não pode ser executada?

No planejamento da manutenção baseado na metodologia RCM, após as indicações das tarefas e periodicidades de manutenções, é realizada uma análise para avaliar se a tarefa está alinhada a dois pilares principais, sendo eles (FUENTES, 2006):

- Ser essencial do ponto de visto de segurança e do meio ambiente; e
- Ser desejável do ponto de vista de custo-benefício (perda da capacidade operacional e indisponibilidade são consideradas custos).

Neste sentido, é possível observar que o RCM, além de manter um dos principais objetivos do planejamento da manutenção (independente da metodologia

aplicada), que é maximizar a disponibilidade dos equipamentos, também busca alinhar as tarefas de manutenção com princípios de segurança e de meio ambiente.

Para a implantação da metodologia RCM algumas ferramentas de análise podem ser utilizadas, dentre elas serão destacadas a seguir o Diagrama de Ishikawa e o FMEA.

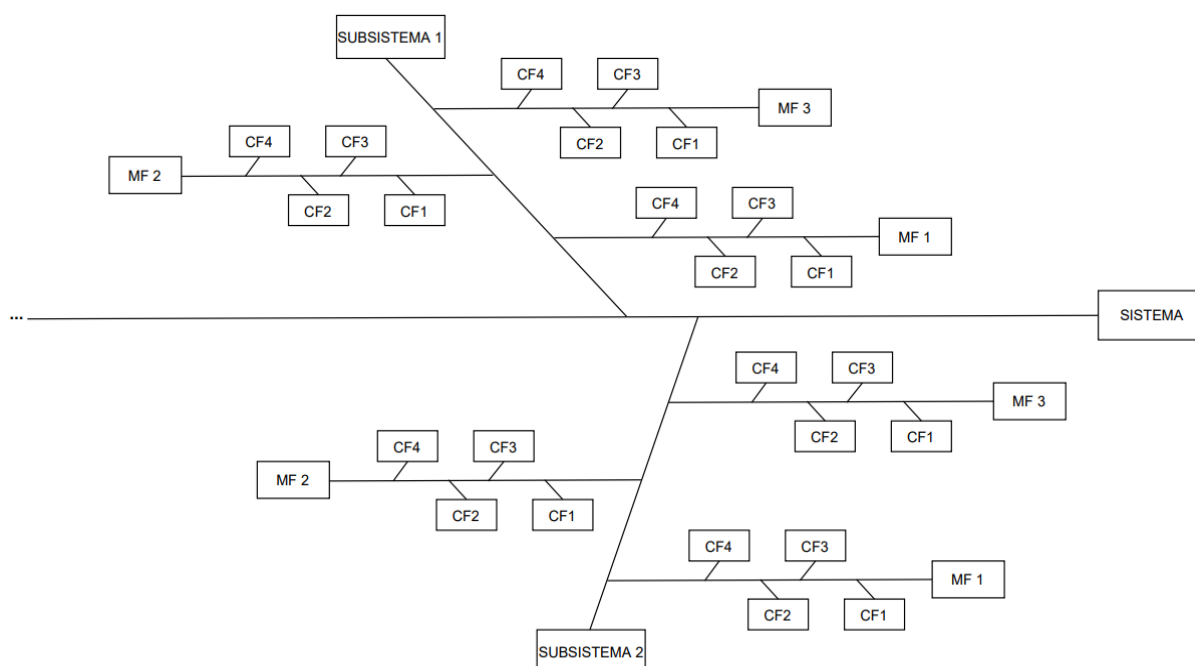
3.1.1 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, conhecido também como Diagrama de Causa e Efeito, ou Espinha de Peixe, é uma ferramenta que auxilia na identificação dos fatores que podem contribuir para um problema/falha ou que auxiliam no cumprimento de um objetivo (ROBITAILLE, 2004).

Esta ferramenta é muito utilizada em processos de análise de causas, o qual consiste no mapeamento das conexões entre causa e efeito. Neste sentido, o Diagrama de Ishikawa também pode ser aplicado no processo de RCM, mais precisamente na estruturação e mapeamento dos Modos e Causas de Falha de um determinado sistema e seus respectivos subsistemas.

Na Figura 12, é apresentado um exemplo genérico da estrutura de um Diagrama de Ishikawa quando aplicado ao RCM. Neste diagrama são representados os Modos de Falha (MF) e suas respectivas Causas de Falha (CF) para cada Subsistema existente no Sistema principal. Elucidando o Diagrama de Ishikawa no contexto de um aerogerador, o Sistema pode ser o próprio aerogerador, já o Subsistema as pás, tendo como Modo de Falha trincas e sua respectiva Causa de Falha sendo fadiga. Este é apenas um exemplo reduzido, pois esta análise pode ser bastante extensa, visto que o intuito é mapear o Sistema como um todo, ou seja, abrangendo seus Subsistemas e os respectivos Modos e Causas de Falha.

Figura 12 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: Elaboração própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 12, o Diagrama de Ishikawa tem significativa importância no processo de análise de RCM, visto que auxilia no mapeamento de todos os Modos e Causas de Falha que serão analisados posteriormente na etapa seguinte, a qual é a análise através de FMEA.

3.1.2 Análise de modo e efeitos de falha

A Análise de Modos e Efeitos de Falha, também conhecido do inglês *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), é definida como uma técnica que identifica potenciais modos de falha de um processo ou equipamento, os efeitos das falhas, e avalia a criticidade desses efeitos sobre a funcionalidade do equipamento ou processo (TEOH, 2004).

De acordo com Puente *et al.* (2002), o FMEA consiste em dois estágios, basicamente. O primeiro estágio é referente à identificação de possíveis modos de falha e seus efeitos de um equipamento ou processo. Já o segundo estágio consiste em determinar o nível crítico (pontuação de risco) destas falhas e colocá-las em ordem de prioridade. A falha com maior criticidade será a primeira do *ranking* e será considerada prioritária para a aplicação das ações de melhoria. A

definição das prioridades de falhas é auxiliada por três fatores: ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D) (PALAFY, 2004).

Esses três fatores servem de orientação para que determinados parâmetros sejam analisados. A ocorrência define a frequência da falha, já a severidade corresponde à gravidade do efeito de falha. Por fim, a detecção é a habilidade para descobrir a falha antes que ela afete o sistema de forma mais grave. Para o processo decisório de priorização dos modos de falha de maior potencial, o FMEA utiliza RPN que significa Graus de Prioridade de Risco traduzido do inglês *Risk Priority Number*. O RPN consiste no produto dos três fatores do FMEA (O, S e D). A partir disto, as causas de falhas são priorizadas, direcionando a atuação do planejamento (SCHMITT, 2013).

3.2 Métodos da Taxa de Falha

Uma função adicional e de muita importância é a taxa de transição (denominação geral), que dependendo das circunstâncias pode ser referida como taxa de risco, $h(t)$, taxa de falha, $\lambda(t)$, taxa de reparo, $\mu(t)$. Como a taxa de falha, $\lambda(t)$, é dependente do número de falhas e do número de componentes expostos à falha há duas interpretações. A primeira quando está relacionada com um conjunto de componentes idênticos, que operam sob condições idênticas:

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas por unidade de tempo}}{\text{número de componentes expostos à falha}} \quad (11)$$

A segunda quando a taxa de falha está relacionada a um único componente:

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas da unidade}}{\text{tempo em que a unidade está em operação}} \quad (12)$$

A análise de taxa de falha pode ser aplicada como auxílio ao planejamento da manutenção em conjunto com o método de manutenção centrada em confiabilidade, pois tem o objetivo de analisar indicadores de falhas, a fim de

modelar o comportamento dos equipamentos. Neste sentido, torna-se possível avaliar as melhores práticas de manutenção a serem aplicadas, sendo assim, um dado de entrada importante para o planejamento da manutenção.

De acordo com Lewis (1987 *apud* BARBOSA, 2008), o tempo de falha de um sistema pode ser expresso em termos de uma variável aleatória, t . Já a probabilidade de que a falha venha a acontecer em um intervalo entre t_1 , e $t_1 + \Delta t$ é descrita por:

$$f(t) \cdot \Delta t = P(t_1 \leq t \leq t_1 + \Delta t) \quad (13)$$

Já a probabilidade de que a falha ocorra em um tempo menor do que t_1 é expressa da seguinte forma:

$$F(t) = P(t \leq t_1) \quad (14)$$

Para a análise da probabilidade de que um sistema opere sem falhas por um período de tempo t_1 é realizada por:

$$R(t) = P(t > t_1) \quad (15)$$

Considerando que o sistema não falhará para a condição de $t < t_1$, o mesmo deve falhar para algum $t > t_1$, desta forma, a função da confiabilidade pode ser expressa da seguinte forma:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (16)$$

Desse modo, a probabilidade de falha pode ser definida por:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (17)$$

A partir disso, tem-se que:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (18)$$

Ao observar a Equação 17, é possível observar duas propriedades, sendo elas:

$$R(0) = 1 \text{ e } R(\infty) = 0 \quad (19)$$

Com a derivação da equação de confiabilidade e probabilidade de falha, é obtida a função densidade de probabilidade de falha, a qual está apresentada na Equação 20.

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} \quad (20)$$

As equações em função da taxa de falha podem ser apresentadas como uma relação condicional entre $f(t)$ e $R(t)$, significando a propensão da unidade falhar no próximo curto intervalo de tempo dado que o equipamento tenha sobrevivido no tempo t ,

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\text{probabilidade da falha entre } t \text{ e } t + 1}{\text{probabilidade de sobrevivência entre } 0 \text{ e } t} \quad (21)$$

Ou seja, a taxa condicional de falha conhecida, também, como taxa de risco (*hazard function*):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (22)$$

A partir destas equações é possível realizar a combinação de algumas delas, sendo um exemplo disto a confiabilidade em função da taxa de risco (taxa de falha condicional), podendo ser obtida através da integração da Equação 23.

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t)dt} \quad (23)$$

Já para obter a probabilidade de falha em função da taxa de risco, são combinadas as Equações 22 e 23.

$$f(t) = h(t)e^{-\int_0^t h(t)dt} \quad (24)$$

De outra forma, a confiabilidade, $R(t)$, em função da taxa de falha, λ , é determinada por:

$$R(T) = e^{-\int_0^T \lambda(t)dt} \quad (25)$$

em que T é o tempo acumulado do período avaliado.

Contudo, supondo situações em que a taxa de falha, λ , seja constante (independente do tempo), como é o caso da distribuição exponencial, tem-se:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (26)$$

Esta talvez seja a expressão de confiabilidade mais conhecida, que demonstra a confiabilidade de um equipamento no início de sua vida ($t = 0$) equivalente a um e quando ($t \rightarrow \infty$) equivale à zero.

Para auxiliar nesta análise de confiabilidade e taxa de falha as distribuições de probabilidade são amplamente utilizadas, sendo possível aplicá-las com o intuito de avaliar equipamentos em relação aos seus comportamentos acerca do tempo até que atinjam a falha e do tempo de falha. Ao avaliar estes parâmetros atrelados a confiabilidade e taxa de falha algumas distribuições de probabilidade são mais adequadas e serão apresentadas nas seções seguintes, sendo elas: Distribuição Normal, Distribuição Lognormal, Distribuição Exponencial e Distribuição de Weibull.

3.2.1 Distribuição Normal

A Distribuição Normal para (1987 *apud* BARBOSA, 2008) é adequada para situações em que o equipamento analisado tem um comportamento de desgaste crescente, ou seja, a taxa de falha pode ser representada por uma curva crescente em função do tempo. Neste sentido, diversos equipamentos de um aerogerador possuem comportamento de taxa de falha crescente, é notório que com o passar do tempo suas falhas se tornam mais recorrentes.

Inicialmente, o desenvolvimento da Distribuição Normal é em função da variável aleatória x e a média, μ , neste caso, sendo interpretado como tempo, t , conforme apresentado a seguir na Equação 27.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}, \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (27)$$

Ao realizar a integração da Equação 27, a qual não possui solução analítica exata, obtém-se a seguinte equação:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (28)$$

Por fim, a formulação da taxa de falha é apresentada a seguir na Equação 29.

$$h(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2}\frac{(t-\mu)^2}{\sigma^2}\right]} \left[1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1} \quad (29)$$

De acordo com Barbosa (2008), na Distribuição Normal é válido realizar uma mudança de variável a fim de expressar $F(x)$ de forma padronizada. Por conseguinte, a variável aleatória, u , será definida em termos de x .

$$u = -\frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (30)$$

A partir desta mudança de variável, a seguinte equação é produzida:

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{1}{2}u^2\right)} \quad (31)$$

Consequentemente, $\mu_u = 0$ e $\sigma_u^2 = 1$.

Após as mudanças de variáveis, obtém-se a forma padronizada.

$$F(x) = \Phi\left[\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right] = \Phi(u) \quad (32)$$

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{\left(-\frac{1}{2}u^2\right)} du \quad (33)$$

Após a demonstração do equacionamento da Distribuição Normal, o gráfico do comportamento da Taxa de Falha descrito por esta distribuição pode ser construído, conforme consta na Figura 13.

Figura 13 - Função da taxa de falha a partir da Distribuição Normal



Fonte: Adaptado de Barbosa (2008).

Ao analisar a Figura 13, torna-se evidente o comportamento crescente da taxa de falhas descrita pela Distribuição Normal, sendo este comportamento frequentemente encontrado em equipamentos que compõem a estrutura de um aerogerador.

3.2.2 Distribuição Lognormal

Outro método utilizado para o cálculo de taxa de falha é a Distribuição Lognormal, esta é frequentemente utilizada para descrever o comportamento de falhas em equipamentos que estão sujeitos a significativos processos da ação de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos e, principalmente, processos de fadiga (BARBOSA, 2008).

Nesta perspectiva, alguns equipamentos que compõe um aerogerador podem se enquadrar no processo de avaliação de taxa de falhas através da Distribuição Lognormal como as pás, engrenagens do *gearbox*, rolamento principal e o sistema de *yaw*, por exemplo.

Barbosa (2008) explica que com o equacionamento da Distribuição Lognormal pode haver a situação em que uma variável aleatória y é o produto de variáveis aleatórias y_i , conforme é apresentado na Equação 34.

$$y = y_1 \cdot y_2 \cdots y_n \quad (34)$$

Com esta situação o desgaste de um equipamento pode ser proporcional ao produto dos esforços que têm sido feitos sobre ele, por conta disso, a partir da Equação 34, é possível obter o seguinte equacionamento.

$$\ln y = \ln y_1 + \ln y_2 + \cdots + \ln y_n \quad (35)$$

Definindo $x = \ln y$, e x sendo definido por uma Distribuição Normal, então y será distribuído lognormalmente. A partir de uma analogia à Distribuição Normal, tem-se que:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi y} e^{\left[-\frac{1}{2\xi^2} \left(\ln \frac{y}{y_0}\right)^2\right]} \quad (36)$$

$$F(y) = \Phi \left[\frac{1}{\xi} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \right] = \Phi(u) \quad (37)$$

Em que u pode ser definido como:

$$u = \frac{1}{\xi} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (38)$$

E a média define-se conforme apresentado na Equação 39:

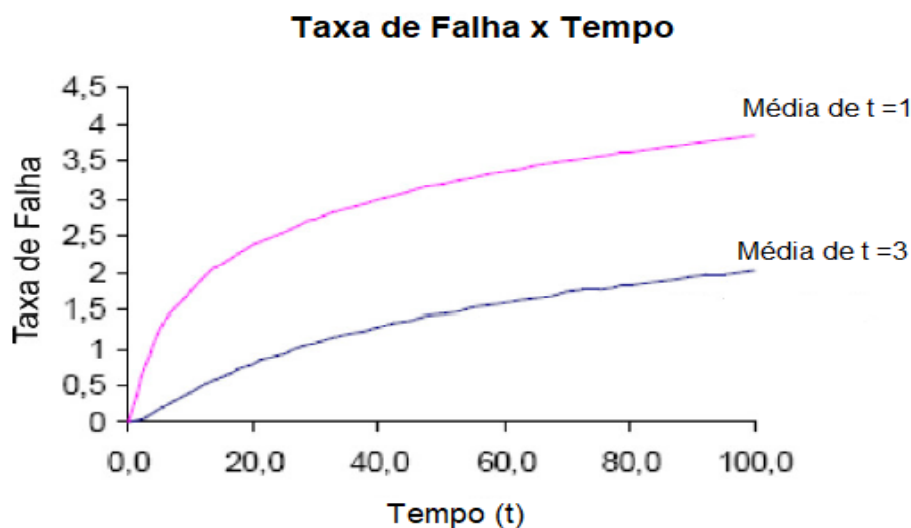
$$\mu = y_0 e^{\left(\frac{\xi^2}{2}\right)} \quad (39)$$

Já a variância pode ser definida como:

$$\sigma^2 = \mu^2 [\exp(\xi^2) - 1] \quad (40)$$

Após este equacionamento, é possível desenvolver o gráfico (Figura 14) que representa a curva da taxa de falha descrita pela Distribuição Lognormal.

Figura 14 - Função de taxa de falha da Distribuição Lognormal



Fonte: Adaptado de Barbosa (2008).

Como é possível observar na Figura 14, os comportamentos de falhas de equipamentos que se adequam nos padrões da Distribuição Lognormal apresentam elevado crescimento das falhas nos primeiros instantes, aproximadamente até $t = 40$, demonstrando sua característica de crescimento exponencial. Já para $t > 50$ o crescimento de falhas sofre uma leve estabilização no crescimento, quando comparado aos primeiros instantes de t .

3.2.3 Distribuição Exponencial

Um comportamento de taxa de falhas que pode ser avaliado é o caso dos equipamentos que operam continuamente, o qual possui taxa de falha constante ($\lambda(t) = \lambda = \text{constante}$), para descrever este caso a Distribuição Exponencial é que melhor se adequa (BARBOSA, 2008).

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (41)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (42)$$

A média da vida útil define-se conforme apresentado na Equação 43:

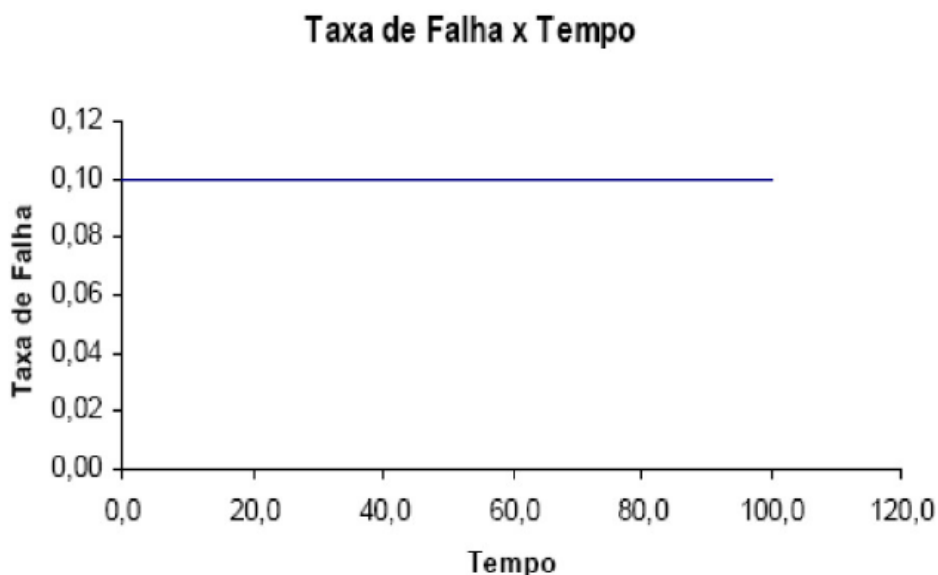
$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad (43)$$

Já a variância pode ser definida como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (44)$$

Este comportamento constante de taxa de falha está representado na curva da banheira pelas falhas caracterizadas como aleatórias. A seguir a Figura 15 expressa o comportamento constante para esses casos em específico.

Figura 15 - Função taxa de falha da Distribuição Exponencial



Fonte: Adaptado de Barbosa (2008).

Como é possível observar na Figura 15, o comportamento deste caso de taxa falha é representado por uma reta constante em função do tempo.

3.2.4 Distribuição de Weibull

Divergindo das demais distribuições apresentadas anteriormente, a Distribuição de Weibull tem a capacidade de descrever adequadamente o tempo de vida de equipamentos formados por várias partes, o qual entra em estado de falha quando a primeira falha iniciar. Além disso, a Distribuição de Weibull possui uma característica muito particular e que pode ser considerada como uma vantagem em

relação a outras distribuições. Esta característica é o fato de apresentar uma grande variedade de formas, as quais possuem a mesma propriedade básica: a função taxa de falha é monotônica. Isto implica que a taxa de falha pode ser crescente, decrescente ou constante (BARBOSA, 2008).

A Distribuição de Weibull para ser descrita precisa de dois ou três parâmetros, sendo eles:

- a) α - parâmetro de escala ou vida característica. É equivalente ao valor de t , no qual existe cerca de 63,2% de probabilidade de que o componente falhe;
- b) β : parâmetro de forma, responsável por indicar o comportamento da função taxa de falha. Este parâmetro possui algumas propriedades, as quais estão listadas a seguir:
 - a) $\beta = 1$, taxa de falha constante;
 - b) $\beta > 1$, taxa de falha é crescente; e
 - c) $\beta < 1$, taxa de falha decrescente.
- c) t_0 : tempo livre de falhas, parâmetro de localização ou vida mínima, responsável por indicar a data de início das falhas. No entanto, este não será considerado na formulação a seguir.

Após a apresentação dos principais parâmetros da Distribuição de Weibull, sua dedução com a utilização de, α , e, β , é apresentada a partir da Equação 45.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (45)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta}} \quad (46)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (47)$$

Sendo a média definida conforme apresentado na Equação 48:

$$\mu = \alpha \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (48)$$

Já a variância pode ser definida como:

$$\sigma^2 = \alpha^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} \quad (49)$$

A função gama completa que compõe as equações anteriores é representada pelo seguinte equacionamento:

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (50)$$

A fim de obter o parâmetro de forma (β) é necessário substituir a Equação 48 na 49, assim é possível eliminar o parâmetro de escala (α).

$$f(\beta) = (\sigma^2 + \mu^2)g_1(\beta) - \mu^2g_2(\beta) = 0 \quad (51)$$

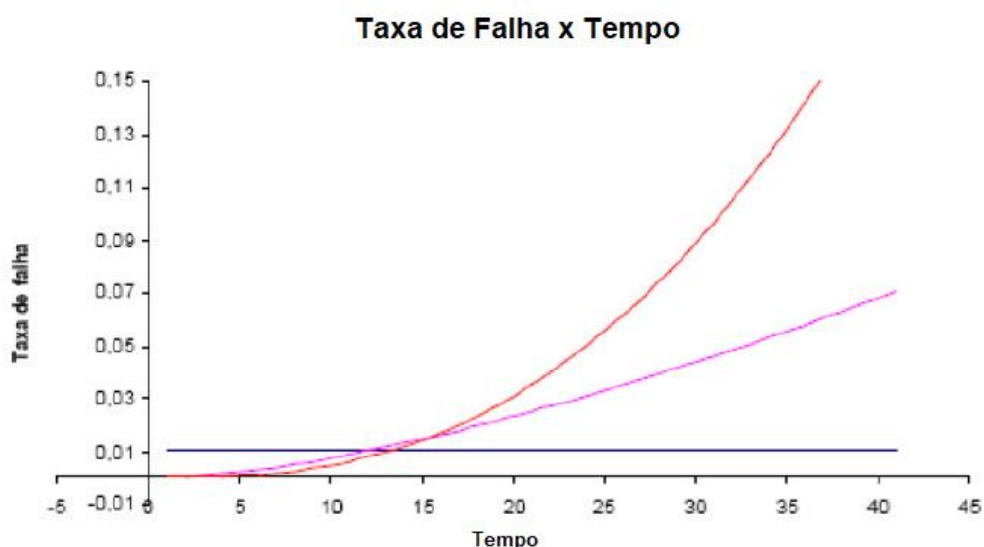
Em que g_1 e g_2 são definidos da seguinte maneira:

$$g_1(\beta) = \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \quad (52)$$

$$g_2(\beta) = \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \quad (53)$$

Para que seja possível encontrar os valores exatos que são necessários para o processo, são determinados os zeros da função apresentada na Equação 51. Na Figura 16 é demonstrado o comportamento da taxa de falha através da Distribuição de Weibull.

Figura 16 - Taxa de falha através da Distribuição de Weibull com β variando de 1 a 3,5



Fonte: Adaptado de Barbosa (2008).

Através da Figura 16 é possível notar nitidamente os comportamentos de taxa de falha que a Distribuição de Weibull é capaz de descrever, sendo este um artifício de grande valia quando se trata de análise de falhas, visto que uma única distribuição pode representar variados comportamentos. Por conta deste fator, a Distribuição de Weibull é responsável por originar outras distribuições como a Distribuição Exponencial, por exemplo.

3.3 Método de indicadores de desempenho e disponibilidade

O tempo médio entre falha, MTBF (*Mean Time Between Failure*), o tempo médio para falha, MTTF (*Mean Time To Failure*), e o tempo médio para reparo, MTTR (*Mean Time To Repair*), são classificados como indicadores de desempenho. Portanto, não são necessariamente de confiabilidade, $R(t)$.

Esses indicadores de desempenho possuem aplicabilidades distintas e adaptáveis conforme o sistema a ser avaliado, por exemplo, para o planejamento da manutenção em sistemas produtivos ou em sistemas elétricos de potencia. Todavia, um aspecto crucial para análise desses indicadores é como se obtém o tempo de sobrevivência, ou seja, o tempo que o equipamento está em operação, para equipamentos reparáveis e não reparáveis. Para o caso de equipamento que

não pode ser reparado, o termo correto é MTTF para o tempo de sobrevivência, e para equipamento que pode ser reparado o termo é MTBF.

Entretanto, caso o tempo médio para reparo (MTTR) seja uma fração significativa do tempo médio entre falhas, de uma falha para outra, ou seja, o tempo de sobrevivência de um equipamento, tem-se a seguinte consideração: o tempo médio entre falhas (MTBF), para sistemas reparáveis, indica o ciclo entre falhas (período entre duas falhas imediatamente subsequentes), assim este valor excede o MTTF por uma margem associada ao tempo médio para reparo (MTTR).

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (54)$$

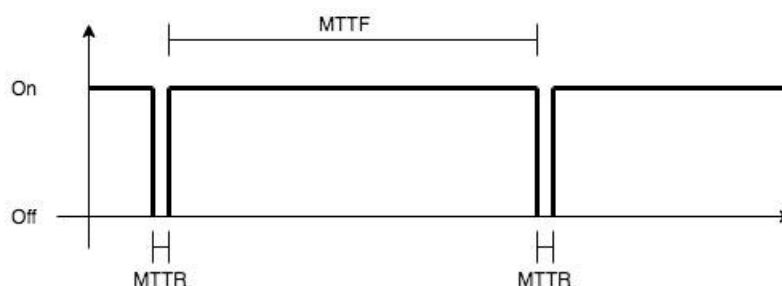
Portanto, no caso de um sistema reparável sob uma taxa de falha constante, em que o tempo de sobrevivência equivale ao tempo do equipamento em operação e com um tempo para reparo significativo, o inverso da taxa de falha corresponde à média de vida útil, MTTF, considerando o equacionamento como $MTBF = MTTF + MTTR$.

Diante disso, é possível determinar outro indicador de desempenho importante, a disponibilidade, A (*Availability*), como:

$$A = \frac{\text{tempo de sobrevivência}}{\text{tempo de sobrevivência} + \text{tempo de reparo}} \quad (55)$$

Assim, considerando a situação de um equipamento não reparável, tem-se:

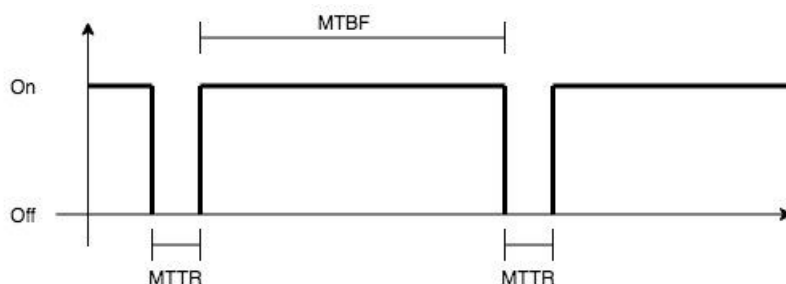
Figura 17 – Equipamento não reparável



Fonte: Elaboração própria (2021).

Considerando a situação de um equipamento reparável com um tempo de reparo não significativo, tem-se:

Figura 18 - Equipamento reparável com tempo de reparo não significativo



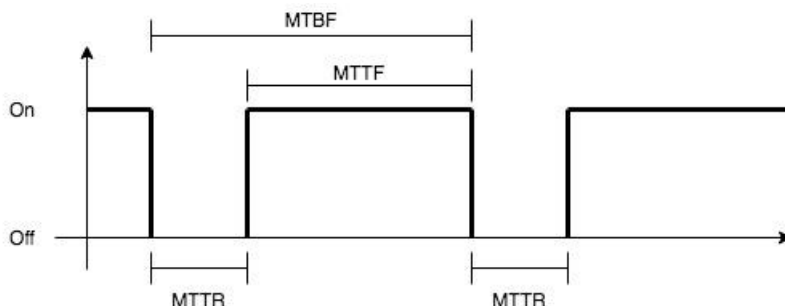
Fonte: Elaboração própria (2021).

A disponibilidade é determinada da seguinte forma:

$$A = \frac{\text{tempo de sobrevivência}}{\text{tempo de sobrevivência} + \text{tempo de reparo}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (56)$$

Considerando a situação de um equipamento reparável com um tempo de reparo significativo, tem-se:

Figura 19 - Equipamento reparável com tempo de reparo significativo



Fonte: Elaboração própria (2021).

A disponibilidade é determinada da seguinte forma:

$$A = \frac{\text{tempo de sobrevivência}}{\text{tempo de sobrevivência} + \text{tempo de reparo}} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (57)$$

Por exemplo, considerando uma lâmpada que não é reparável, com uma vida útil (tempo de sobrevivência, de 10.000 horas, o MTTF é o termo apropriado, pois após a falha a lâmpada será substituída, sendo o MTTF é igual a 10.000 horas. De outra forma, supondo que um motor a combustão interna possa falhar após 150 horas de funcionamento sem troca de óleo lubrificante, o tempo de

sobrevivência é 150 horas; considerando que a troca de óleo dura cerca de 6 horas e seja um tempo significativo, ou seja MTTR é 6 horas, pode-se considerar o tempo médio entre falhas será 156 horas. Neste último exemplo, sendo um equipamento reparável com um tempo significativo de reparo, tem-se que a disponibilidade é determinada por:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{150}{150 + 6} = 96,2\% \quad (58)$$

Em termos de confiabilidade acoplada no tempo para um equipamento reparável com um tempo de reparo significativo, a função sobrevivência e função taxa de falha são relacionadas como o inverso do tempo médio de sobrevivência, isto é, o tempo médio de sobrevivência é dado por $1/\lambda$. Portanto, o tempo médio para falha (MTTF) será o valor esperado do tempo decorrido até ocorrer a falha, o mesmo que a expectativa de vida, $E(T)$, durante um período de tempo, T .

$$MTTF = E(t) = \int_0^t t f(t) dt \quad (59)$$

ou para o caso exponencial com λ constante:

$$MTTF = E(t) = \int_0^t t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (60)$$

ou seja, o tempo médio para falha é o inverso da taxa de falha.

Outra maneira de expressar o MTTF é através da confiabilidade, para isto é necessário substituir a Equação 20 na Equação 59. Ao realizar a integração por partes, tem-se:

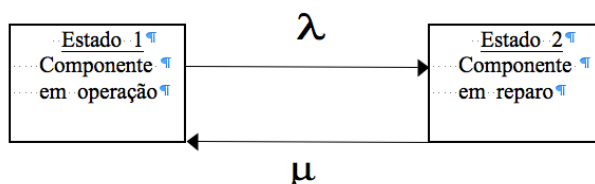
$$MTTF = - \int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt} dt = -tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (61)$$

Partindo do pressuposto de que $tR(t)$ tenderá a zero quando, t , tende para zero ou infinito, a Equação 61 pode ser expressa da seguinte maneira:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (62)$$

A interpretação do tempo que um equipamento permanece em falha ou em operação é muito importante, visto que as taxas de falha e de reparo são algumas vezes incorretamente avaliadas, quando se contabiliza o número de falhas ou reparos em um dado período de tempo e se divide pelo tempo total de análise. O valor correto do tempo a ser usado no denominador é a parcela do tempo em que o componente permaneceu no estado considerado.

Figura 20 – Estados de operação e reparo de equipamentos



Fonte: Elaboração própria (2021).

Este valor é menor do que o período total de análise, a não ser que nenhuma transição ocorra:

$$\text{Taxa de transição} = \frac{n. \text{vezes que uma transição de um dado}}{\text{tempo gasto neste estado}} \quad (63)$$

Deste modo, tem-se a taxa de falha como:

$$\lambda = \frac{n. \text{de falhas de um componente no período de tempo considerado}}{\text{período de tempo total em que o componente permaneceu em operação}} \quad (64)$$

e a taxa de reparo como:

$$\mu = \frac{n. \text{de reparos de um componente no período de tempo considerado}}{\text{período de tempo total em que o componente permaneceu em reparo}} \quad (65)$$

Nesse sentido, ao analisar o MTTF e o MTTR para um caso de teste de vida realizado em uma população de N equipamentos com tempos para falha (em operação - on): $t(1), t(2), \dots, t(n)$, define-se o tempo médio de sobrevivência como:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^{on} \quad (66)$$

O tempo médio para reparo (MTTR) pode ser obtido em função da taxa de reparo, μ , representando o tempo decorrido para que o equipamento retorne à condição de operação, considerando a notificação inicial da falha, o tempo de deslocamento para reparos, de diagnóstico, de montagem, de calibração, de teste e o tempo de deslocamento de retorno à unidade de produção. Deste modo, o tempo médio para reparo realizado em uma população de N elementos com tempos (fora de operação - *off*): $t(1)$, $t(2)$, ..., $t(n)$, define-se o tempo médio para reparo como:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^{off} \quad (67)$$

3.4 Método de manutenção baseada em riscos

O risco é um conceito multidimensional, que abrange quatro pontos: risco de mercado, risco de operação, risco de crédito e risco legal. Os quatro pontos estão relacionados à elevada preocupação de perdas econômicas derivadas de resultados de procedimentos incorretos no momento da tomada de decisão, no caso de mercado, seria um investimento inadequado (DUARTE, 2003).

No setor elétrico a situação converge para o mesmo caminho, visto que existe correlação entre a confiabilidade e a ausência de falhas, que é um indicador de elevada significância para determinar o desempenho de disponibilidade, eficiência e lucratividade de um ativo. Entretanto, quando se trata de um ativo do setor elétrico como é o caso das unidades eólicas, por exemplo, existem algumas divergências. Além das perdas econômicas em casos de falhas, equipamentos que entram em estado de falha podem causar danos às pessoas que estão envolvidas na operação direta e também ao meio ambiente.

Após o reconhecimento e conscientização de que a forma mais eficaz de manter a operação dos ativos com segurança, qualidade, confiabilidade e baixo risco é investindo na manutenção, houve o surgimento de estudos atrelados à

manutenção baseada em risco, também conhecida pelo termo em inglês *Risk Based Maintenance* (RBM). Dentre os estudos de aplicação do conceito de risco como base para o planejamento da manutenção está o método de Avaliação Probabilística do Risco (PRA, do termo em inglês *Probabilistic Risk Assessment*), este estudo visa à priorização dos componentes mais críticos para que seja o objeto de maior dedicação na aplicação da manutenção (CARAZAS, 2011). Apesar de estes estudos terem iniciado com maior vigor no setor industrial, atualmente são aplicados e disseminados com alta intensidade no setor elétrico.

O método PRA busca, através de um procedimento, a determinação de parâmetros de corte ou de aceitação de risco. Assim, a análise PRA, permite identificar os componentes que possuem maior frequência de falhas. Por conseguinte, as atividades de manutenção são direcionadas com maior intensidade para os equipamentos que possuem maior incidência de falhas, com isso é almejado o ponto de corte mínimo de risco, o qual é equivalente a 10% de probabilidade de falha (VESELY, 1994).

A análise de risco é composta por diversas etapas, o dimensionamento destas etapas depende da natureza da análise. Para o caso de uma análise no setor produtivo, seja industrial ou de energia, a análise deve obter as respostas para as seguintes perguntas a fim de cumprir a necessidade básica de quantificar um potencial modo de falha (WANG; ROUSH, 2000).

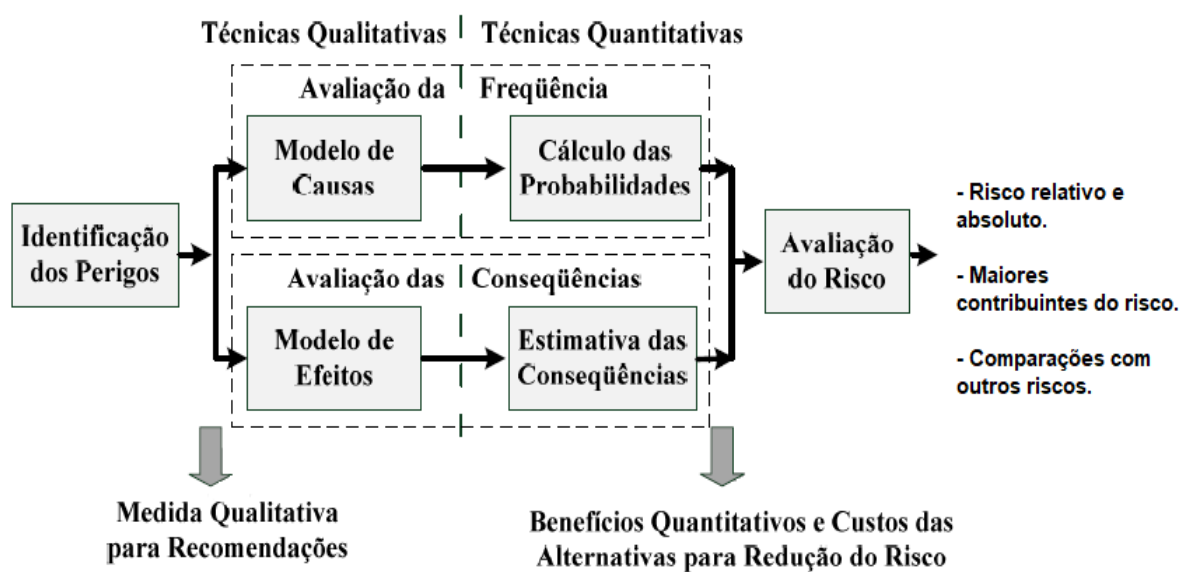
- a) O que pode ocorrer de erro na operação do sistema?
- b) Qual a probabilidade da ocorrência da falha?
- c) O que será causado como consequência da ocorrência da falha?

A partir das respostas para os questionamentos acima, é possível obter um panorama do sistema que está sob avaliação. No entanto, para que sejam obtidas respostas coerentes, a análise de risco utiliza ferramentas de análise quantitativas e qualitativas a fim de que seja viável modelar o cenário da operação (Figura 21).

Os objetivos da análise de risco são a avaliação e quantificação do risco e as consequências referentes à ocorrência de um evento inesperado decorrente da falha do sistema, equipamento ou de processos operacionais e atividades de manutenção. Neste sentido, a análise de risco é uma ferramenta que auxilia à

tomada de decisão perante condições de incerteza. No entanto, a tomada de decisão decorrente da análise está pautada nos custos, tempos de indisponibilidade e desempenho. Para a execução da análise de risco são definidos os níveis de risco toleráveis e enfrentados ou não, considerando os custos decorrentes da perda de capacidade de produção, causados pelo estado de falha de um equipamento (CARAZAS, 2011).

Figura 21 - Processo de análise de risco



Fonte: Adaptado de Arendt (1990).

Na Figura 21 é apresentado o processo de análise de risco em que são combinadas as técnicas quantitativas e qualitativas a fim de haver uma complementaridade entre os métodos. As técnicas quantitativas permitem que sejam calculadas as frequências de ocorrências e suas respectivas consequências em relação a custo. Esta parte da análise só é adequada quando há um robusto histórico de operação e registros de intervenções de manutenção, para que seja possível executar os cálculos necessários. Já a parte qualitativa frequentemente é realizada com base em indicadores descritivos e está sob influência quanto à experiência dos avaliadores (ARENDR, 1990).

3.4.1 Métodos de natureza qualitativa para identificação de riscos

A principal característica da vertente qualitativa de análise de risco é a não utilização de cálculos para a obtenção de seus resultados e conclusões. As ferramentas atreladas a esta técnica fazem uso de comparações e análises generalizadas.

Para a utilização das comparações é utilizada a experiência obtida com a operação e também documentações técnicas como manuais, projetos, *checklists* de manutenção, análises históricas de acidentes, por exemplo.

Já os métodos generalizados fazem uso de procedimentos lógicos de desenvolvimento de conseqüências de falhas em equipamentos ou processos, sendo os principais métodos (CARAZAS, 2011):

- a) Análise “e se...?” originada do termo em inglês “*What IF...?*”;
- b) HAZOP (*Hazard and Operability Study*); e
- c) Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*) – Utilizada também no método RCM.

Breves descrições dos métodos qualitativos “*What if...?*” e HAZOP são apresentadas nas seções seguintes, já o método FMEA foi apresentado e descrito na seção 4.1.2 quando foram apresentadas as ferramentas utilizadas pelo método RCM.

3.4.1.1 Análise “*What if...?*”

O método “*What if...?*” qualitativo que funciona através de investigação e indagação a respeito do que poderia haver como consequência caso um evento indesejado ocorresse, as consequências analisadas são no cunho de saúde, segurança dos colaboradores, risco ao meio ambiente e de riscos a continuação da operação do equipamento. Para que a análise “*What if...?*” seja realizada de maneira adequada, é necessário que o avaliador possua conhecimento e experiência na operação do sistema e, além disso, seja capaz de correlacionar determinados eventos atrelados a operação. Este método é amplamente utilizado

em sistemas de segurança contra incêndios e sistemas de proteção elétrica, por exemplo (SÁNCHEZ, 2005).

3.4.1.2 Estudos de perigos da operação (HAZOP - Hazard and Operability Study)

O método de HAZOP é baseado em uma análise sistemática do problema através da busca pelas respostas dos seguintes questionamentos: “como?”, “quando?”, “onde?”, “por quê?” e “quem?”, por exemplo. Estes questionamentos são feitos visto que o objetivo desta análise é identificar problemas atrelados a operacionalidade do sistema. Neste método é possível identificar algumas semelhanças na avaliação sistemática que também é realizada em uma Análise de Causa Raiz (RCA), a qual também busca (após um evento) encontrar o que originalmente causou determinado problema.

O princípio de HAZOP é que acidentes acontecem em consequência da perda de controle de algumas das variáveis do processo. De acordo com Carazas (2011), o método de análise pode ser dividido em cinco etapas, sendo elas:

- a) Definição do sistema que será avaliado;
- b) Definição de nós;
- c) Definição dos caminhos alternativos;
- d) Elaboração do HAZOP; e
- e) Redação do informe de resultados.

Diferente do método “*What if...?*” o método HAZOP abrange tanto problemas no âmbito da segurança de colaboradores e equipamentos quanto problemas ligados à operação e que possam levar a perda da continuidade operacional. Entretanto, um ponto em comum com o método “*What if...?*” é que ambos são métodos qualitativos e, por conseguinte, dependem da experiência e conhecimento de seus executores. Carazas (2011) explica que para erros ou equívocos sejam mitigados na análise de HAZOP algumas ferramentas são utilizadas conjuntamente com documentações técnicas já existentes de projetos, a fim de que a avaliação seja capaz de mapear e documentar todos os detalhes do processo. Algumas das documentações e ferramentas essenciais para a execução do HAZOP estão listadas a seguir:

- a) Fluxograma de engenharia;
- b) Memoriais descritivos e de cálculo, incluindo filosofia de projeto;
- c) Fichas técnicas dos equipamentos;
- d) Dados de projetos de equipamentos, válvulas de controle, especificações padrões de tubulações, etc;
- e) Diagrama lógico de intertravamento;
- f) Diagramas elétricos; e
- g) Desenhos de projetos.

Com a utilização destas ferramentas e as documentações existentes do ativo, torna-se viável a execução do método HAZOP de forma a atingir o objetivo da investigação de forma mais precisa.

3.4.2 Métodos de natureza quantitativa para identificação de riscos

Conforme mencionado anteriormente, a análise de risco faz a complementaridade de métodos qualitativos e quantitativos, a fim de mapear possíveis riscos da forma mais abrangente e com o máximo de dados possíveis.

3.4.2.1 *Análise de árvore de falhas*

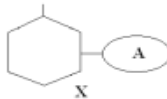
A Análise de Árvore de Falhas conhecida também pelo termo em inglês *Fault Tree Analysis* (FTA) é uma técnica dedutiva centrada no evento de falha, o qual é nomeado de evento topo. O objetivo desta análise é encontrar as causas que proporcionaram o evento topo (falha). Os resultados obtidos pela FTA podem ser de cunho qualitativo na procura de caminhos críticos ou quantitativos, visto que é possível fazer definições em termos de probabilidades de ocorrência do evento topo, calculadas através das probabilidades de falha que estão associadas às falhas dos componentes que têm influência no evento topo (CARAZAS, 2011).

Para a representação das falhas é usado um método gráfico a fim de apresentar diferentes combinações de fatores (falha em componentes e/ou erros humanos) que são possíveis propulsores do evento topo, quando a ocorrência é de forma simultânea. Para a elaboração da árvore de falha são elaboradas três

etapas, sendo elas: Desenvolvimento do diagrama de blocos do sistema, análise qualitativa e análise quantitativa.

De acordo com Carazas (2011), a FTA utiliza lógica Booleana (Figura 22) para representar a combinação das falhas individuais que podem levar ao evento topo, dessa forma é possível apresentar a equação que define a combinação de falhas através de expressões de álgebra Booleana. Além disso, quando há dados para que o cálculo da probabilidade de ocorrência dos eventos bases seja realizado, torna-se possível também calcular a probabilidade de ocorrência do evento topo.

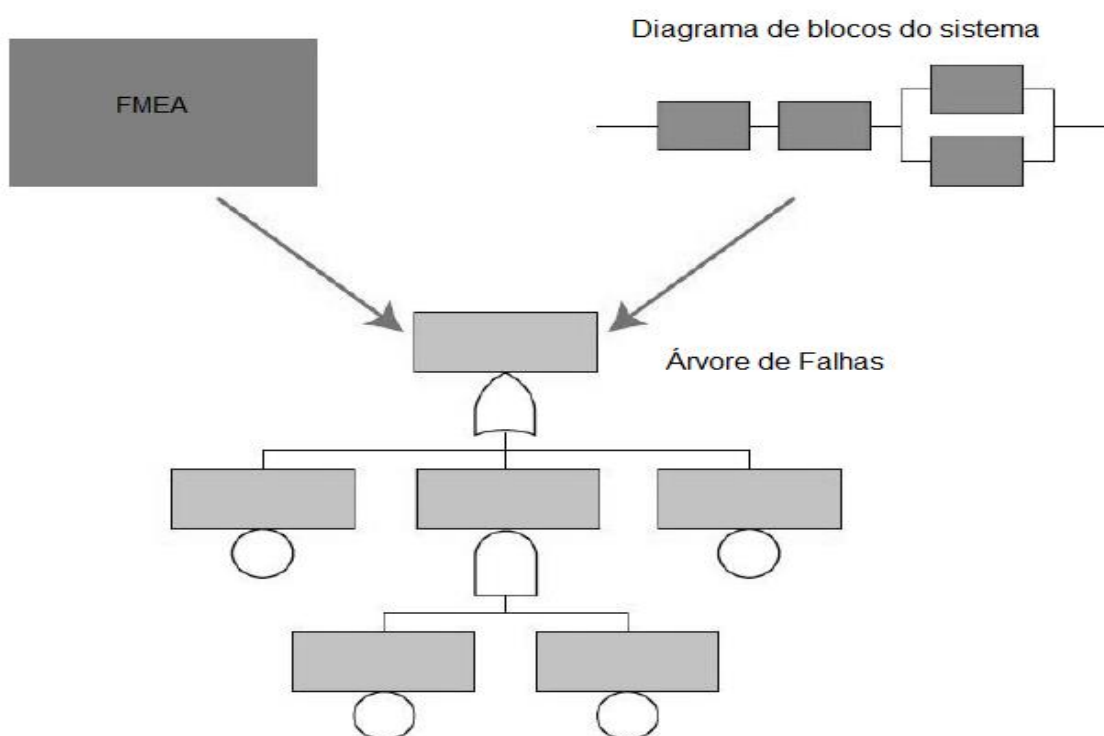
Figura 22 - Simbologia Booleana utilizada na árvore de falhas

Símbolo	Nome	Descrição
Simbologia para evento		
	Retângulo	Simboliza um evento de falha que é analisado e que é usualmente o resultado de uma combinação lógica de outros eventos de falhas permitidos pelas portas lógicas.
	Círculo	Indica um evento de falha básica (primária) de um componente e também o limite de resolução da árvore. Os eventos contidos dentro de um círculo são chamados de eventos básicos.
	Diamante	Simboliza um evento de falha não totalmente desenvolvido em decorrência da falta de informação e é assumido como sendo um evento de falha básica.
	Casa	A casa de eventos simboliza normalmente a ocorrência de um evento terminal especial que de acordo com a análise crítica do especialista o evento pode ocorrer ou não.
	Triângulo de Entrada	O símbolo do Triângulo é utilizado para se evitar a repetição de um determinado desdobramento de uma falha, que poderá ocorrer em diversas portas ou para transferir a construção da árvore de falha para outra folha. O triângulo de entrada aparece no final de um encadeamento e o triângulo de transferência aparece no topo de uma raiz da árvore com a mesma designação.
	Triângulo de Transferência	
Simbologia para Portas Lógicas		
	“OU”	O evento de saída conectado por esta porta somente ocorre se um ou mais eventos de entrada ocorrer.
	“E”	O evento de saída conectando por esta porta ocorre se todos os eventos de entrada correm simultaneamente.
	Inibidor	O evento de saída ocorre quando o evento de entrada “X” existe e a condição “A” está presente. Esta porta lógica é um caso especial de uma porta lógica “E” e é usada para um vento de falha secundário.

Fonte: Adaptado de Rausand e Hoyland (2004).

A Figura 22 traz um breve descritivo a respeito do significado de cada elemento lógico utilizado para a construção de uma árvore de falhas. Além de descrever o significado da lógica Booleana, há também o significado da lógica traduzido para o ambiente de análise de falhas, como exemplificado na Figura 23.

Figura 23 - Elaboração da árvore de falhas



Fonte: Adaptado de Rausand e Hoyland (2004).

A Figura 23 apresenta de forma esquemática alguns itens que são fontes de dados para a árvore de falhas e a árvore de falhas propriamente dita, a qual é representada por elementos de lógica Booleana. O elemento que está no topo da árvore é a representação do evento indesejado ou acidental, já os demais elementos são a representação de forma sistemática de todas as causas imediatas que caracterizam a sua ocorrência. Seguindo o mesmo padrão que os métodos apresentados anteriormente, para que seja possível a elaboração da árvore de falhas, é necessário que toda a documentação de operação e técnica seja analisada (manuais, diagramas elétricos e mecânicos, planos de manutenção e histórico de registros de operação).

A Figura 24 apresenta um breve exemplo da aplicação do método árvore de falhas para uma falha na caldeira de recuperação em uma usina termelétrica. Esta árvore tem o intuito apenas de exemplificar de maneira simples e objetiva

como pode ser estruturada uma árvore de falhas para um evento topo de um sistema.

Figura 24 - Exemplo da estrutura de árvore de falhas



Fonte: Adaptado de Carazas (2011).

A partir de métodos como o da Árvore de Falhas é possível realizar a avaliação sistemática e individualizada de eventos indesejados (falhas) com suas respectivas consequências correlacionadas. Sendo assim, ações de mitigação podem ser elaboradas pontualmente, porém tendo a visão completa do sistema e como as ações influenciarão no evento topo.

Neste sentido, a manutenção centrada em confiabilidade, análise de taxa de falhas e manutenção baseada em riscos são metodologias que podem ser aplicadas de forma individualizada e conforme mencionado anteriormente é possível obter resultados positivos de elevada importância para os ativos. No entanto, essas metodologias de apoio ao planejamento da manutenção podem ser insumo para outra metodologia, a qual é conhecida como metodologia multicriterial de apoio à decisão e com esta é possível unir ferramentas e critérios de maior eficácia já existentes em outros métodos, a fim de construir um modelo robusto e eficiente de apoio a tomada de decisão em relação ao planejamento da manutenção.

3.5 Método multicriteriais

3.5.1 Processo de tomada de decisão

O processo de tomada de decisão é um fator que pode gerar impactos positivos ou negativos em diferentes proporções para um sistema ou uma organização. Por conta das consequências inerentes à decisão, a etapa de análise de alternativas de solução é composta pela avaliação minuciosa de informações obtidas através de experiências prévias, coleta de dados e documentações já existentes. Assim, torna-se possível averiguar os vários critérios e analisar quais os impactos individualizados causados por eles.

Para situações simples o número de critérios a serem avaliados não costuma ser de grandes dimensões. Entretanto, para situações mais complexas a quantidade de critérios a serem avaliados pode ser extremamente elevada, gerando dificuldade de avaliação e correlação entre dados da situação e possíveis soluções eficazes.

Segundo Rivas (2016), para que o processo de tomada de decisão seja eficaz deve seguir algumas etapas básicas, conforme:

- a) Identificar objetivos: as boas decisões exigem objetivos claros, sendo específicos, mensuráveis, realistas e dependentes do tempo;
- b) Identificação de opções para atingir os objetivos: as opções potencialmente viáveis devem ser desenvolvidas em detalhe;
- c) Identificar os critérios que serão utilizados para comparar as opções: a seleção de critérios para refletir o desempenho na persecução dos objetivos;
- d) Análise das opções: a análise tendo em vista os fatores relevantes para a tomada de decisão (custo-benefício, eficiência, etc);
- e) Fazer escolhas: a escolha real da melhor opção; e
- f) Reavaliação: a reavaliação contínua das escolhas feitas anteriormente a fim de aprimorar os processos.

Devido à grande importância, o processo de tomada de decisão é também um fator intrínseco aos diversos ramos existentes de planejamento e isto

não diverge quanto ao planejamento da manutenção. O planejamento da manutenção pode envolver uma série de processos decisivos em diferentes etapas do planejamento, visto que esta é uma situação em que podem existir múltiplos objetivos a serem minimizados ou maximizados.

3.5.2 Análise de criticidade

Conforme apresentado nas seções anteriores, existem inúmeras metodologias que podem orientar o planejamento da manutenção e cada uma delas busca aumentar a disponibilidade dos ativos, através de seus métodos e ajustes em planos de manutenção a fim de identificar a melhor abordagem de manutenção e sua respectiva periodicidade.

Um determinante inicial para a reorganização ou criação de um plano de manutenção é o estudo dos equipamentos, cujo objetivo é obter todas as informações necessárias para justificar e analisar a viabilidade de cada tarefa de manutenção, ou seja, encontrar a melhor estratégia de manutenção para o sistema. Este estudo deve iniciar a partir de um inventário detalhado dos equipamentos e instalações, incluindo suas características e inter-relações funcionais, registros de falhas, custo de aquisição e fornecimento, custo direto e indireto de manutenção (se esta informação estiver disponível), necessidades e fatores operacionais, obrigações legais ou contratuais (inspeções periódicas sujeitas à regulamentação, períodos de garantia, exigências ambientais, etc), os meios disponíveis para manutenção, recursos humanos e qualificação das equipes, tarefas de manutenção que podem ou devem ser contratadas e quaisquer outros aspectos que sejam relevantes para o caso em análise (HIJES; CARTAGENA, 2006).

Portanto, o plano de manutenção projetado deve determinar os recursos que serão destinados a este fim e as estratégias de manutenção que serão abordadas e suas respectivas periodicidades. Considerando que os recursos são limitados e a complexidade dos processos, de acordo com os princípios Paretianos, o qual busca a distribuição de recursos da maneira mais estratégica e eficiente possível, no contexto da manutenção os recursos devem ser atribuídos de forma que os equipamentos mais importantes tenham prioridade (HIJES; CARTAGENA, 2006).

A definição dos graus de prioridade dos equipamentos está diretamente ligada à criticidade dos mesmos. Para Helmann (2008), a criticidade é o atributo que expressa a importância da função de um equipamento ou sistema dentro de um processo, sob aspectos como a segurança, qualidade, meio ambiente ou outros critérios estabelecidos.

De acordo com Ribeiro (2010) e Aven (2009), a criticidade determina o quanto um equipamento pode ser fundamental dentro do contexto operacional de um sistema, sob a ótica do impacto que uma falha ou baixo rendimento podem acarretar graves consequências como acidentes com pessoas, danos ambientais, impactos econômicos e operacionais. Neste sentido, a criticidade é diretamente proporcional ao impacto que pode ser causado no processo quando algum evento indesejado acontecer em um equipamento que está inserido no contexto operacional.

Os autores Higes e Cartagena (2006) ressaltam a importância da manutenção ao devolver o conceito de “confiabilidade perdida em um sistema”. Eles afirmam que quanto mais crítico for o equipamento para um sistema, maior deve ser o foco da manutenção sobre ele. Portanto, a análise de criticidade torna-se um ponto de partida na priorização dos recursos da manutenção a fim de aumentar o nível de manutenção necessário em cada sistema.

4 METODOLOGIAS MULTICRITERIAIS DE APOIO À DECISÃO

Com o desenvolvimento do Planejamento Integrado de Recursos Energéticos (PIR), o processo de tomada de decisão no planejamento energético evoluiu de procedimentos de maximização ou minimização com objetivos únicos, para análises detalhadas com múltiplos objetivos, definições e critérios. Neste sentido, o planejamento energético integrado busca considerar aspectos políticos, sociais, econômicos e ambientais, com o intuito de promover a oferta de energia elétrica para a demanda com viés de desenvolvimento sustentável (KUMAR *et al.*, 2017) .

Desta forma, a Tomada de Decisão por Multicritérios, também conhecida do termo em inglês *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM), é uma metodologia

capaz de unir critérios alinhavados de outras técnicas como análise de risco e confiabilidade com critérios socioambientais e econômicos, por exemplo. Assim, a MCDM é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que proporciona uma visão estratégica e global a fim de analisar diversos critérios e suas respectivas importâncias para o modelo final.

Kumar *et al.* (2017) ressaltam que a principal vantagem da aplicação da metodologia MCDM está na abordagem através de subproblemas, denominados critérios. A avaliação destes critérios é efetuada por especialistas em cada área, sendo que o processo final de decisão avalia as importâncias de cada critério para que seja atingido o objetivo final.

Neste sentido, a análise por metodologias multicritério opera segundo uma estrutura sequencial de fases, não estático e não linear que pressupõe realimentações, revisões e reformulações no decorrer do processo (BAASCH, 1995). Ademais, a análise de multicritérios permite incorporar percepções de cunho qualitativo e quantitativo na tomada de decisão (NOGUEIRA, 2002).

De acordo com Baasch (1995), algumas das etapas para a realização da análise por multicritérios são definidas como a definição das ações potenciais ou desejáveis a serem analisadas, formulação dos critérios de análise, a avaliação das ações com base em cada critério e agregação final, podendo utilizar um dos métodos multicritérios existente. Para situações em que há muitos atributos ou objetivos associados a uma alternativa, a função de utilidade contém múltiplos argumentos. Estas são utilizadas para compreender as preferências de um indivíduo para vários atributos ou objetivos das alternativas. A função de utilidade é uma função matemática, a qual associa uma utilidade a cada alternativa, a fim de ordená-la. Existem duas formas de ordenação, sendo elas a ordinal, a qual ordena as alternativas, porém não indica o grau de preferência de uma sobre a outra. Já a cardinal indica um ordenamento e um nível de preferência.

Estas ferramentas de análise são utilizadas para auxílio no processo de tomada de decisão perante uma situação problema. Segundo Tsoukiàs (2008) e Baran (2015), o processo de tomada de decisão é sintetizado nas seguintes fases:

- a) Situação problema: o foco nesta fase está em identificar o problema e buscar responder os questionamentos sobre: quem possui o

problema? Por que a situação é um problema? Quem são os decisores sobre o problema? Quem está sujeito às consequências?

- b) Formulação do problema: através de estruturação do problema, o processo de decisão é identificado pelos decisores que formalizam o problema existente e, assim, poderão aplicar os métodos existentes em teoria da decisão;
- c) Modelo de avaliação: nesta fase o analista irá organizar as informações por meio de um modelo formal de decisão. No contexto da metodologia multicritério, esta etapa identifica os critérios e parâmetros juntos ao decisor. Os modelos de avaliação devem ser desenvolvidos sob os aspectos de seu conceito, consistência lógica, resultados experimentais e operacionalidade; e
- d) Recomendação final: a linguagem da decisão deverá representar a linguagem corrente do decisor, priorizando os elementos a seguir: certeza da aplicabilidade do modelo por parte do analista, ciência do decisor de que o modelo irá representá-lo e, além disso, que refletirá suas conclusões, a alternativa deve ser legitimada para o processo da tomada de decisão.

Ademais, o processo de tomada de decisão é constituído por alguns atores que, de acordo com Roy e Vanderpooten (1997), Baran (2015) e Campos (2010), podem ser definidos como:

- a) Decisor: são aqueles que têm o poder e a responsabilidade de ratificar a decisão e assumir as consequências da mesma, suas decisões são baseadas em seu juízo de valor ou relação que estabelece, estas relações podem ser modificadas no decorrer do processo de decisão, devido o acréscimo de informações ou devido à influência dos facilitadores;
- b) Facilitador: líder que possui a responsabilidade de focar suas ações no processo de solução do problema, devido a isto é necessário que possua experiência no contexto do referente problema. Durante a etapa de sistematização do processo deve manter-se neutro, separando seu juízo de valor;

- c) Analista: possui a responsabilidade de analisar e auxiliar os facilitadores e decisores na estruturação dos problemas, além disso, busca identificar os fatores externos e do ambiente que têm o potencial de interferir na evolução, estruturação e resolução do problema. De modo geral, contribui para que as áreas de domínio habituais dos atores se intersectem, melhorando a comunicação;
- d) *Stakeholder*: é um grupo de indivíduos que possuem alguma implicação com o problema ou possam ser afetados pelo mesmo, por conta disso, possuem interesse direto na solução do problema, entretanto não fazem parte de forma ativa do processo de tomada de decisão;
- e) Alternativas ou ações potenciais: é o conjunto de opções possíveis que servirão de base para a escolha do decisor; e
- f) Critérios ou atributos: são utilizados visto que muitos problemas de decisão possuem mais do que um objetivo a ser atingido, sendo estes conhecidos como conjunto de critérios ou atributos. Por meio da definição dos critérios do problema, é possível realizar as comparações entre as alternativas dispostas no problema.

Uma ferramenta de relevância utilizada na análise multicritério é a estrutura arborescente de pontos de vista, os quais representam a dimensão da análise. Nesta estrutura são apresentados o objetivo central da análise, os pontos de vista e seus respectivos critérios. A análise dos pontos de vista é uma maneira de representar um critério, por meio de valor, a fim de avaliar as alternativas e ações necessárias para alcançar o objetivo da modelagem (DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT, 2009).

Para a modelagem através da estrutura arborescente se torna aceitável deve refletir de forma clara e lógica os pontos de vista do problema, elencando critérios relevantes para a análise e agrupá-los em grupos coerentes, em que cada um caracteriza um problema diferente perante o objetivo. Neste sentido, a organização hierárquica dos pontos de vista de maneira explícita pode reduzir os conflitos entre os objetivos, representando de modo conciso o objetivo da análise (DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT, 2009).

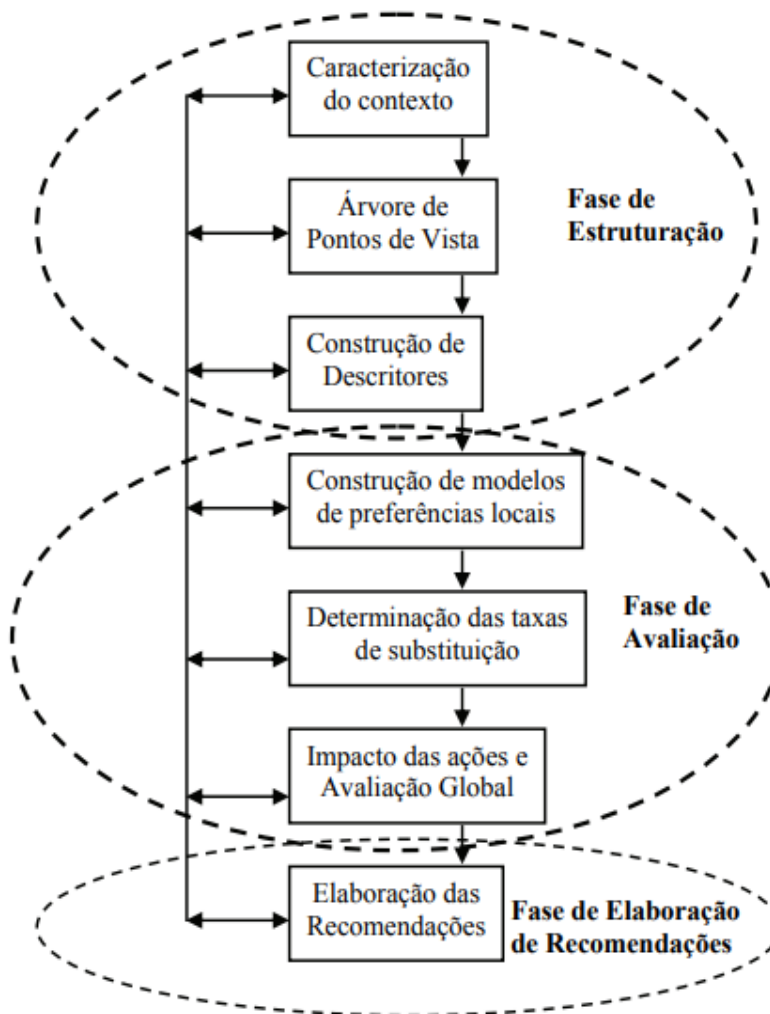
4.1.1 Desenvolvimento de modelos

O processo de análise para a tomada de decisão através de metodologias multicritério, de acordo com Gomes *et al.* (2004), pode ser estratificado nas seguintes fases:

- a) Etapa 1: identificação dos tomadores de decisão;
- b) Etapa 2: definição das alternativas;
- c) Etapa 3: Definição dos critérios relevantes para o problema de decisão;
- d) Etapa 4: avaliação das alternativas em relação aos critérios;
- e) Etapa 5: determinação da importância relativa entre os critérios;
- f) Etapa 6: determinação da avaliação global de cada alternativa;
- g) Etapa 7: análise de sensibilidade;
- h) Etapa 8: recomendação e apresentação de um relatório; e
- i) Etapa 9: implementação.

Em linha com a estratificação em etapas apresentada anteriormente, segundo Dutra (1998), é possível realizar a separação em três fases principais. Iniciando pela primeira fase, a qual abrange as 3 primeiras etapas, esta é a fase de estruturação. A segunda fase engloba da etapa 4 a etapa 7, sendo denominada de fase de avaliação. Já a terceira fase contém as etapas 8 e 9, a qual é a fase de elaboração de recomendações. Na Figura 25 é apresentada a estruturação dessas 3 fases.

Figura 25 - Processo decisório sob a perspectiva da MCDM



Fonte: Adaptado de Dutra (1998).

A partir desta divisão em fases e a apresentação através de um fluxo, conforme a Figura 25, a visualização global do processo torna-se mais fácil para que sejam identificados a necessidade e objetivo de cada etapa e, por conseguinte, de cada fase.

4.1.1.1 Fase de estruturação de um modelo multicritério

Dutra (1998) explica que a fase de estruturação busca o entendimento do problema e de todo o contexto em que está inserido. A busca por esse entendimento se justifica devido à preocupação de que, caso tal entendimento não seja alcançado, a consequência direta seria o comprometimento de todo o processo decisório, impactando na tomada de decisão.

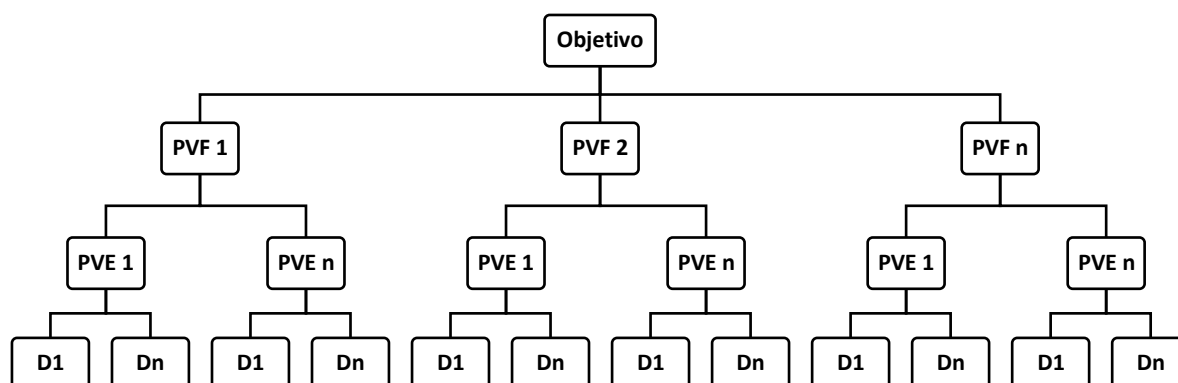
A estrutura do modelo é baseada na lógica de decomposição: um critério (*gi.*) complexo de ser mensurado pode ser decomposto em subcritérios de mais fácil mensuração, ou seja, o critério de nível hierárquico superior é definido pelos subcritérios de nível hierárquico inferior que estão conectados pela árvore. Os critérios de nível hierárquico inferior devem possuir as propriedades de serem mutuamente exclusivos e de definir por completo o nível hierárquico superior, ao qual estão conectados. (SICA *et al.*, 2009, p. 3).

Conforme mencionado anteriormente, a modelagem da análise multicritério pode ser visualizada através de uma estrutura arborescente, a qual contém os pontos de vista fundamentais e os pontos de vista elementares do problema. Um Ponto de Vista Fundamental (PVF) é a dimensão da análise e será avaliado de forma separada, já o Ponto de Vista Elementar (PVE) é a decomposição de um PVF, com esta decomposição é possível identificar de forma clara os descritores e, assim, podem ser mensurados.

De acordo com Elsslin (2001, *apud* SICA *et al.*, 2009), um descritor possui as propriedades de mensurabilidade, sendo esta a agregação de informações adicionais ao ponto de vista e permite quantificar a performance de uma ação; operacionalidade, a qual mede os possíveis estados da ação, hierarquizando o grau de preferência dos atores para aquela dimensão e permitindo, desta forma, mensurar um aspecto independente de qualquer outro aspecto considerado; e compreensibilidade, a fim de possibilitar o entendimento e manter a inexistência de níveis subjetivos, além disso, descrevendo características em condições de mensuração e identificação.

Na Figura 26 é apresentada uma estrutura arborescente genérica contemplando as estruturas do objetivo, pontos de vista fundamentais, pontos de vista específicos e descritores.

Figura 26 - Estrutura arborescente de pontos de vista



Fonte: Elaboração Própria (2021).

Os descritores podem ser de natureza qualitativa (descrevem o PVF apenas com expressões semânticas) ou quantitativa (descrevem o PVF apenas com números), discretos (utilizam escalas numéricas finitas) ou contínuos (utilizam uma expressão matemática contínua), além disso, podem ter origem direta, indireta ou construída. O descritor é formado por um conjunto de níveis de impactos, sendo ordenados e são definidos a partir do pior aceitável até o melhor possível. Para o caso dos descritores diretos existe um conjunto de níveis associados ao respectivo Ponto de Vista Fundamental, já os indiretos não. Quanto aos descritores construídos, estes assim o são dado que não existem descritores naturais para determinados PVFs.

A etapa seguinte à elaboração da estrutura arborescente e seus respectivos PVFs, PVEs e descritores, é a construção de escalas de níveis de impacto para cada descritor, associando a uma escala de preferência local. Ademais, será possível construir indicadores de impacto, os quais permitem a mensuração do impacto de cada ação perante seus respectivos PVFs.

4.1.1.2 Fase de avaliação

Na fase de avaliação é aplicado um dos métodos matemáticos para apoio à tomada de decisão, a fim de modelar a função de valor, a qual representa numericamente o grau de atratividade de cada nível de impacto existente nas

escalas estabelecidas. Além disso, de acordo com Longaray *et al.* (2016), nesta fase são definidas as taxas de compensação entre os critérios, ou seja, suas relações de preferência entre os critérios de um mesmo nível hierárquico. Ademais, são identificados os perfis de desempenho das ações potenciais, agregando todos os níveis dos critérios estabelecidos em um modelo aditivo.

Feito isso, torna-se possível mensurar a performance de uma determinada alternativa local e globalmente, sendo o primeiro a avaliação do desempenho em um critério e o último o desempenho em todos os critérios.

4.1.1.3 Fase de elaboração de recomendações

Após a conclusão das fases de estruturação de um modelo multicritério e avaliação, a terceira e última fase, a qual consiste na avaliação, pode ser iniciada. A atividade de apoio à decisão não é encerrada com a construção de um modelo. O propósito do modelo é oferecer o entendimento que é a ancoragem para a fundamentação das decisões futuras dos decisores/atores (DUTRA, 1998).

A fase de elaboração de recomendações é de suma importância para o processo de apoio à tomada de decisão, visto que busca a identificação das ações de aperfeiçoamento a partir do desempenho obtido para que, através de um processo estruturado, haja um desenvolvimento contínuo de melhora.

4.1.2 Métodos multicriteriais fundamentais

A utilização da metodologia multicritério de apoio à tomada de decisão é fortemente utilizada em áreas da manutenção. Na Figura 27 são apresentados alguns pontos positivos e negativos de modelos multicriteriais que podem auxiliar no processo de tomada de decisão.

Figura 27 - Pontos positivos e negativos de modelos

AHP – Analytic Hierachy Process (Thomas Saaty - 1980) • (+) Processo baseado na hierarquização do problema de decisão em árvore e o formato qualitativo facilita a relação com os participantes do processo. • (-) A conversão da escala verbal para a numérica e a forma de definição dos pesos dos critérios.
ELECTRE – Electre I (Roy 1968) • (+) Utilizam a modelação de preferência baseada nas relações de sobreclassificação entre pares de ações. • (-) Envolve conceitos complexos e um grande número de parâmetros.
PROMÉTHÉE – (Brans e Viincke 1982) • (+) Está ancorada numa modelação matemática robusta e consegue processar problemas de grande complexidade, como aqueles que envolvem elementos estocástico. • (-) O modelo tem dificuldade de trabalhar com premissas subjetivas.
MACBETH – (Carlos Bana e Costa e Jean Claude Vansnick - 1994) • (+) Simplicidade do método, que requer apenas julgamentos qualitativos sobre as diferenças de atratividade entre elementos para gerar pontuações; aplicação qualitativa e grande interatividade. • (-) Subjetividade.

Fonte: Moraes (2017).

O método AHP utiliza a comparação par a par no âmbito do processo de tomada de decisão. Além disso, realiza a divisão do problema de decisão em níveis hierárquicos e determina, através de síntese dos valores dos agentes de decisão, a medida global para cada alternativa, obtendo ao fim do método a priorização ou classificação das respectivas alternativas (GOMES *et al.*, 2004).

Por outro lado, MAUT é baseada na hipótese de que existe uma função de valor econômico, $v(.)$, distinta da função de utilidade econômica, $u(.)$, acerca do conjunto de alternativas, A , que o tomador de decisão deseja analisar, consciente ou inconsciente (GOMES *et al.*, 2004).

4.1.2.1 AHP – Analytic Hierarchy Process

O Processo de Hierarquia Analítica foi desenvolvido por Thomas Saaty entre as décadas de 1970 e 1980. De acordo com Saaty (1990), o AHP está rigorosamente focado no problema de dimensionamento e quais tipos de números usar, além disso, como combinar corretamente as prioridades resultantes deles. Uma escala de medição consiste em três elementos: um conjunto de objetos, um

conjunto de números e um mapeamento dos objetos para os números. Em uma escala padrão, uma unidade é usada para construir o resto dos números da escala.

Após estudos a respeito do método AHP e suas atribuições, foram definidos os seguintes pilares que o definem (SILVA, 2005):

- a) Escalas de razão, proporcionalidade e escalas de razão normalizadas: escalas de razão, proporcionalmente e escalas de razão normalizadas são fundamentais para a geração de síntese de prioridade, no AHP ou em qualquer método multicritério que necessite integrar medidas de comparação com a sua própria escala. Ademais, escalas de razão são a única maneira de generalizar uma teoria de decisão para o caso de dependência e *feedback*, visto que escalas de razão podem ser somadas e multiplicadas quando pertencentes a uma mesma escala;
- b) Comparações recíprocas par a par: comparações par a par são usadas com o intuito de expressar o grau de preferência de uma alternativa sobre outra em um determinado critério, correlacionando essa preferência em uma escala numérica, da qual o principal autovetor de prioridades é derivado;
- c) Sensibilidade do principal autovetor direito: sensibilidade do principal autovetor direito a perturbações em julgamentos causa a limitação do número de elementos em cada conjunto de comparações, por conta disso, requer que os elementos sejam homogêneos. O autovetor esquerdo é significativo e recíproco;
- d) Homogeneidade e clusterização: são usadas para estender a escala fundamental gradualmente, de cluster a cluster, para aumentá-la de 1 - 9 até 1 - ∞ ;
- e) Síntese que pode ser estendida para dependência e *feedback*: aplicada para determinar a escala de razão unidimensional, através das escalas de razão de cada critério, para representar a avaliação global de cada alternativa. A síntese das escalas na estrutura de decisão pode somente ser feita através da adição ponderada do valor de cada escala;

- f) Preservação e reversibilidade de ordem: há a possibilidade de serem mostradas sem adicionar ou remover nenhum critério, apenas introduzindo cópias de uma alternativa. Neste sentido, nota-se que a reversibilidade de ordem é tão intrínseca à tomada de decisão quanto é a preservação de ordem; e
- g) Decisões em grupo: a decisão de cada membro do grupo deve ser integrada uma por vez, de maneira matemática, podendo ser levados em consideração a experiência, o conhecimento e o poder de cada pessoa dentro do grupo, sem que seja necessário um consenso ou a decisão da maioria.

Após a estratificação do problema em níveis hierárquicos, por meio da síntese dos valores dos agentes de decisão, determina-se a medida global para cada alternativa, priorizando-as ou classificando-as ao final do método. Cada decisor deve fazer uma comparação, par a par, de cada elemento em um nível hierárquico dado, criando, assim, uma matriz de decisão quadrada. Nesta matriz, a partir de uma escala predefinida, o decisor representará sua preferência entre os elementos comparados, sob o enfoque do nível imediatamente superior. Dessa forma, será gerada uma matriz quadrada recíproca positiva, conhecida como matriz dominante. (SILVA, 2005).

Para o preenchimento da matriz com a comparação par a par é utilizada a Escala Fundamental de Saaty, a qual varia de 1 a 9, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Escala fundamental de Saaty

1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra, sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Silva (2005).

A matriz dominante será preenchida seguindo a Escala Fundamental de Saaty. Neste sentido, o processo inicia com o preenchimento de uma matriz, $p \times q$, em que, p , é o número de linhas e q , o número de colunas. Ademais, para este caso, p é igual a q . Na diagonal principal da matriz o preenchimento é realizado com número 1, visto que é o momento em que há a comparação de um critério consigo mesmo. O preenchimento da matriz deve seguir a Equação 68.

$$v_{p,q} = \frac{1}{v_{q,p}} \quad (68)$$

Um exemplo do preenchimento da matriz é apresentado, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplificação da matriz de decisão AHP

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério n
Critério 1	1	$V_{1,2}$	$V_{1,3}$	$V_{1,n}$
Critério 2	$1/V_{1,2}$	1	$V_{2,3}$	$V_{2,n}$
Critério 3	$1/V_{1,3}$	$1/V_{2,3}$	1	$V_{3,n}$
Critério n	$1/V_{1,n}$	$1/V_{2,n}$	$1/V_{3,n}$	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

Após o preenchimento da matriz dominante ou de decisão, é necessário normalizar os valores de cada coluna, de maneira que ao somar tais elementos encontre-se um valor igual a 1.

Por fim, é necessário verificar o Coeficiente de Racionalidade, o qual é calculado através da Equação 69.

$$CR = \frac{1}{I_c} \frac{\lambda^{\max} - d_m}{d_m - 1} \quad (69)$$

Em que, $\lambda^{\max}$, é o autovalor máximo da matriz de decisão, d_m , é a ordem da matriz quadrada, e, I_c , é o índice de Inconsistência Aleatória Média, o qual varia de acordo com a dimensão da matriz. Estes índices representam se os julgamentos realizados estão coerentes e satisfatórios, neste sentido, valores de, CR , abaixo de 10% são consistentes, já acima de 10% são inconsistentes e os julgamentos devem ser reavaliados. Estes índices estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Índice de consistência aleatória

dm	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ic	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	

Fonte: Adaptado de Costa (2006).

Em resumo, segundo Silva (2005), os elementos fundamentais do método AHP são os seguintes:

- a) Atributos e propriedades: conjunto de alternativas é comparado em relação a um conjunto de propriedades (critérios);
- b) Correlação Binária: quando dois elementos são comparados baseados em uma propriedade, realiza-se uma comparação binária, na qual um elemento é preferível ou indiferente ao outro;
- c) Escala Fundamental: cada elemento é associado a um valor de prioridade sobre outros elementos em uma escala numérica; e
- d) Hierarquia: conjunto de elementos ordenados por ordem de preferência e homogêneos em seus respectivos níveis hierárquicos.

Portanto, em linha com as metodologias multicritério, o método AHP avalia problemas de maneira *top-down*, buscando estratificar problemas grandiosos em pequenas partes a fim de simplificar e encontrar soluções individualmente para cada subproblema, até que se tenha a resolução por completo do problema macro. Desta forma, é possível proporcionar auxílio no processo de tomada de decisão.

4.1.2.2 MAUT– Multi-Attribute Utility Theory

De acordo com Brito e Almeida (2009), a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) pode ser utilizada para agrupar valores de preferências e consequências em relação às múltiplas dimensões, considerando as preferências do decisor e seu comportamento. Ademais, são também considerados casos de incerteza em uma medida clara de risco.

A MAUT considera as preferências do decisor através da função de utilidade, a qual é definida por meio de um conjunto de atributos. Outrossim, é proporcionado uma forma lógica para ponderar os *trade-offs* (graus de importância relativa) referentes aos objetivos conflitantes (AFGAN *et al.*, 2008).

Neste sentido, o problema definido para a aplicação da MAUT, consiste em uma alternativa viável, a , e um conjunto de todas as alternativas viáveis, A . Para cada alternativa, a , de, A , são relacionados, n , índices de valor $X_1(a)$, $X_2(a)$, ..., $X_n(a)$, os quais correspondem aos n atributos ou critérios estudados na avaliação. Para que isso seja expresso de forma matemática, é necessário obter a função que estabeleça $X_1(a)$, $X_2(a)$, ..., $X_n(a)$ em um índice de preferência ou valor, então, conforme apresentado na Equação 70, uma função de valor escalar, v , sobre o espaço de consequências (GOMES *et al.*, 2004).

$$v(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[v_1(x_1), v_2(x_2), \dots, v_n(x_n)] \quad (70)$$

Em que, v_i , $i=1, 2, \dots, n$, são referentes a função de valor a respeito do critério, X_i .

Gomes *et al.*(2004) explicam que a avaliação deve considerar a combinação dos diferentes critérios. Para que isso seja possível, um método de agregação desses critérios é selecionado para permitir a comparação das alternativas. A função de valor para a avaliação das alternativas é a aditiva, entretanto para utilizá-la os critérios devem ser mutuamente independentes em relação às preferências (MEIRELLES; GOMES, 2009). A função aditiva pode ser disposta, conforme apresentado na Equação 71.

$$v(a) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(a) \quad (71)$$

Em que, $v_j(a)$, é o desempenho da alternativa, a , referente o j -ésimo critério avaliado; e, w_j , representa um coeficiente de ponderação ou *trade-off* do j -ésimo critério.

Após o cálculo através da função de valor, os valores obtidos devem estar na faixa entre 0 e 1 para cada critério avaliado, além disso, a soma de todos os *trade-offs*, w_j , devem totalizar 1. Caso sejam obtidos valores fora dessas faixas, o cálculo deve ser reavaliado, visto que 0 representará a pior alternativa aceitável e 1 a melhor alternativa possível.

Com o intuito de verificar a robustez da solução encontrada, a análise de sensibilidade se faz necessária, a qual pode ser utilizada para qualquer método multicriterial, desde que possua *trade-offs* atribuídos. Para tal, verifica-se em

pontos percentuais o *trade-off* do critério de maior impacto, w^*_i , até o momento que a segundo melhor alternativa, a_{n-1} , torna-se a melhor, a^* . O critério de maior impacto é aquele em que conjugando o *trade-off* do critério, i , w_i , como o desempenho econômico da alternativa, n , do critério i , $v_i(a_n)$, contribui para alteração da solução. Cabe ressaltar, que o critério de maior impacto não necessariamente será o detentor do maior *trade-off*.

A partir do processo de análise de sensibilidade, é possível identificar qual o intervalo de variação de determinados parâmetros mantém a decisão estável.

Após o desenvolvimento conceitual acerca da metodologia multicritérios e alguns de seus métodos fundamentais que foram expostos anteriormente, no Capítulo 5 será apresentada a estrutura do modelo multicriterial deste trabalho e a aplicação das técnicas multicriteriais utilizadas para seu desenvolvimento.

5 PROPOSTA DE MODELO MULTICRITERIAL PARA PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO

A metodologia para esse trabalho consiste em desenvolver uma proposta de modelo multicriterial para classificar os equipamentos de um aerogerador de acordo com suas respectivas criticidades. Para isto, foram definidos os PVFs e critérios que devem ser avaliados a fim de construir tal modelo.

A etapa de escolha de PVFs, PVEs, critérios e descritores que serão avaliados no processo de desenvolvimento de um modelo multicritério exigem uma análise detalhada do objetivo que se almeja modelar e dos demais fatores que estejam atrelados a ele. O conhecimento acerca destes itens é fundamental, visto que cada um deles precisará ser estratificado em níveis de impacto, para alguns será possível quantificar estes níveis, já para outros será necessário qualificar.

Existem diversos estudos de modelagem multicritério voltados para diferentes objetivos vinculados à manutenção, os quais utilizam métodos específicos para resolução destes temas, pois cada método possui uma melhor adequação a determinado objetivo. Baran (2015) mapeou alguns estudos já realizados com abordagens sobre resolução de problemas atrelados à manutenção. Na Tabela 3 são apresentados alguns destes estudos com seus respectivos parâmetros e critérios utilizados para modelagem.

Tabela 3 – Critérios aplicados em problemáticas de manutenção

Parâmetros	Critérios	Autores
Fatores Segurança e meio-ambiente	Segurança pessoal e da instalação; Risco ao meio-ambiente; e Infração de normas e leis ambientais.	JIPM (1995); Moubray (1997); Moss e Woodhouse (1999); Higes e Cartagena (2006); e Ping et al (2007).
Fatores de Produção	Impacto na qualidade do produto; Impacto na linha de produção; Impacto econômico na produção; Sobressalentes; Regime de operação do sistema; e Impacto em outros sistemas.	JIPM (1995); Moubray (1997); Higes e Cartagena (2006); e Ping et. al (2007).
Fatores Econômicos	Custo de manutenção; Custo de produção; Custo da quebra; Custo do equipamento; e Manutenibilidade.	Horenbeek e Pintelon (2010); Ping <i>et al.</i> (2007); e Higes e Cartagena (2006).

Fonte: Adaptado de Baran (2015).

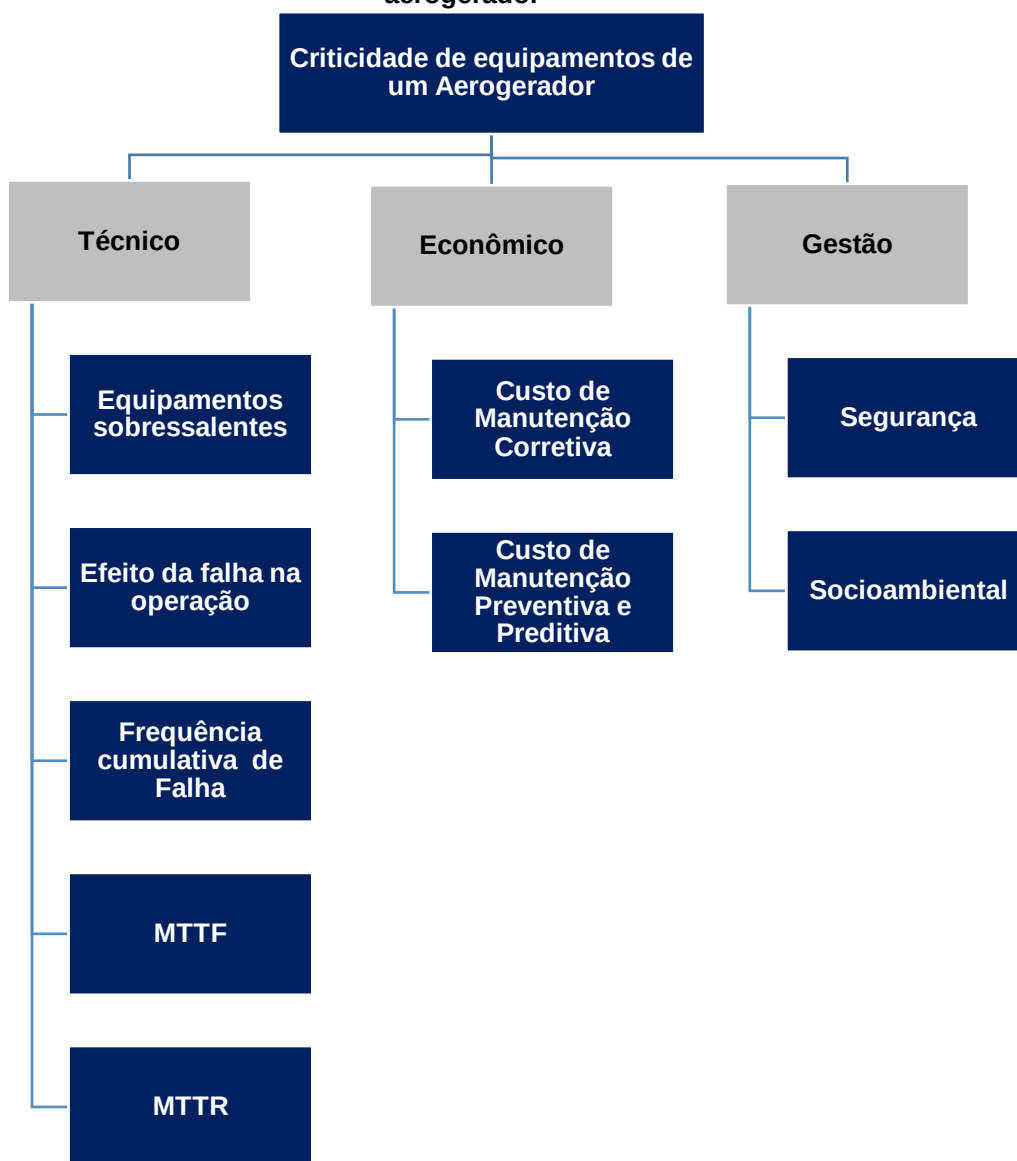
Como é possível observar na Tabela 3, existem três pilares que se sobressaem na modelagem de problemáticas de manutenção: Fatores de segurança e meio ambiente, fatores de produção e fatores econômicos. Isto se justifica devido à harmonia que deve existir entre os objetivos da organização e os objetivos técnicos de manutenção.

Baran (2015) explica que a disponibilidade e eficiência em um sistema estão diretamente ligadas ao nível de manutenção em seus equipamentos. Para que isso seja efetivado, diversas técnicas podem ser utilizadas como, por exemplo, periodicidade de intervenções, qualidade da manutenção e a determinação dos equipamentos e componentes que impactam de maneira significativa nas funções básicas do sistema.

Neste sentido, tomando como base premissas da manutenção de desempenho de equipamentos e objetivos comuns entre organizações, com o intuito de criar uma proposta de modelo expressivo e abrangente para a classificação de equipamentos de um aerogerador conforme suas criticidades, para fins do presente estudo, foram adotados os seguintes Pontos de Vista Fundamentais: técnico, econômico e gestão.

O modelo está disposto em uma estrutura arborescente, a qual é exposta com seus três PVFs e segmentada em seus respectivos critérios. Os critérios utilizados para a construção do modelo multicriterial foram baseados em estudos já existentes acerca de manutenção baseada em confiabilidade, análise de risco e demais fundamentos de manutenção. Além disso, os níveis de impacto de cada critério estão estabelecidos de maneira a compreender quais situações são mais críticas e, por conseguinte, demandariam maiores ações e foco da manutenção. Para melhor visualização, a estrutura arborescente é apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Estrutura arborescente de critérios para análise da criticidade dos equipamentos de um aerogerador



Fonte: Elaboração própria (2021).

Juntamente com os critérios apresentados na estrutura arborescente apresentada na Figura 29, são necessárias definições e justificativas a respeito de cada critério e suas respectivas escaladas que se pretende avaliar. Neste sentido, na seção a seguir é disposta a construção completa dos critérios qualitativos e quantitativos com suas definições e escalas de níveis de impacto. Vale ressaltar que a análise realizada acerca das classificações relativas dos níveis de impacto e dos critérios sofre influência do decisor, ou seja, poderá variar.

5.1 Ponto de vista fundamental - Técnico

Este Ponto de Vista Fundamental tem o objetivo de agrupar os principais aspectos acerca dos princípios de manutenção para avaliar o desempenho de equipamentos de um aerogerador. Este PVF é composto por cinco critérios (descritores), sendo eles: equipamentos sobressalentes, efeito da falha na operação, frequência cumulativa de falha, MTTF e MTTR. Na seção a seguir serão apresentados os conceitos e escalas a respeito de cada um destes critérios desse PVF.

5.1.1 Equipamentos sobressalentes

O estoque de equipamentos sobressalentes é definido como o armazenamento de recursos materiais em um sistema de transformação. Os equipamentos sobressalentes são itens de demanda independente, ou seja, a demanda não possui relação de dependência com a demanda de nenhum outro item ou atividade do ativo. Embora o estoque seja custoso, retenha uma grande quantidade de capital e represente risco de deterioração, é responsável por proporcionar certo nível de segurança em ambientes complexos e incertos. A gestão de estoque de sobressalentes para a manutenção visa definir uma quantidade suficiente de componentes sobressalentes que devem ser mantidos em estoque a fim de garantir o rápido reparo das falhas (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2000).

Os níveis de impacto da escala referente ao critério equipamentos sobressalentes foram adaptados do artigo escrito por Hijes e Cartagena (2006), em que foi realizado um estudo sobre estratégias de manutenção para classificação por níveis de criticidade de equipamentos em uma planta industrial.

Com base nessas informações foram estabelecidos os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser qualitativo, discreto e construído. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Critério: Equipamentos sobressalentes

Nível	Qualitativo	Unidade	Classificação
N1	Não há equipamento redundante, nem equipamento reserva ou inferior em estoque e não há possibilidade de compra de novo equipamento (Casos de obsolescência, por exemplo).		
N2	É possível fornecer equipamento alternativo em breve após a falha, considerando que não há em estoque.		
N3	Há equipamento inferior em estoque que poderá substituir temporariamente.	Adimensional	Discreto Construído
N4	Existe equipamento equivalente em estoque que poderá substituir.		
N5	Existe equipamento redundante disponível que irá substituir imediatamente após a falha.		

Fonte: Adaptado de Higes e Cartagena (2006).

A partir dos níveis de impacto definidos em uma escala ordinal, conforme apresentado na Tabela 4, é aplicado o método AHP a fim de realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 5 é disposta a matriz de comparação para o critério de equipamentos sobressalentes.

Tabela 5 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	7	9
N3	1/5	1/3	1	3	5
N4	1/7	1/7	1/3	1	3
N5	1/9	1/9	1/5	1/3	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 6.

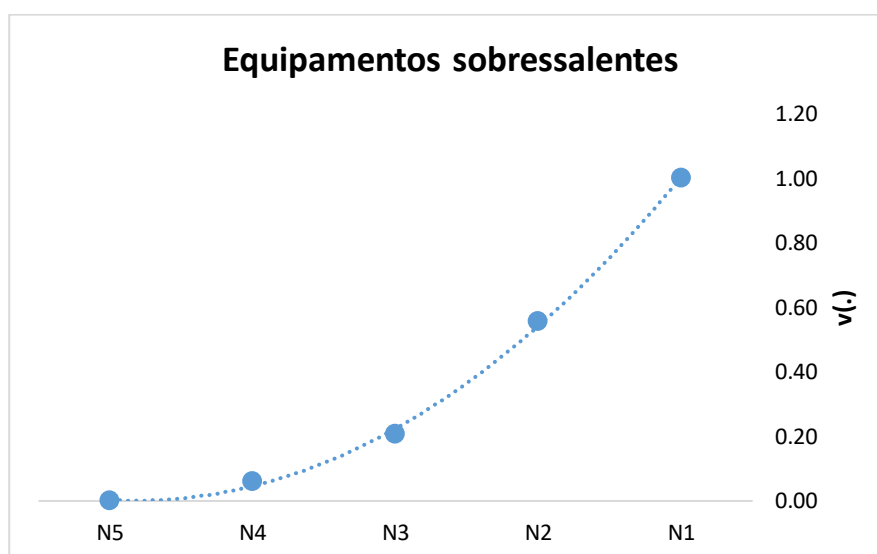
Tabela 6 - Comportamento econômico do critério: equipamentos sobressalentes

Nível de Impacto	$v(.)$
N1	1,00
N2	0,55
N3	0,21
N4	0,06
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Ademais, através da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de equipamentos sobressalentes, conforme apresentado na Figura 30 e na Equação 72.

$$v(.) = 0,076x^2 - 0,685x + 1,612 \quad (72)$$

Figura 30 - Comportamento econômico do critério: equipamentos sobressalentes

Fonte: Elaboração própria (2021).

5.1.2 Efeito da falha na operação

Através do critério efeito da falha na operação, busca-se avaliar os impactos que falhas em determinados equipamentos podem causar diretamente na operação do aerogerador, por exemplo, se sua operação será interrompida imediatamente, o que poder levar o aerogerador a ficar indisponível para a geração de energia por um longo período de tempo. Ou ainda, existe a possibilidade de ser

uma falha simples e de fácil resolução, a qual causaria apenas uma breve limitação de potência, porém em um curto período de tempo a operação normal poderia ser restabelecida.

Os níveis de impacto da escala referente ao critério efeito da falha na operação também foram adaptados do artigo escrito por Hijes e Cartagena (2006). Com base nessas informações foram estabelecidos os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser qualitativo, discreto e construído. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Critério: Efeito da falha na operação

Nível	Qualitativo	Unidade	Classificação
N1	Operação do aerogerador é suspensa imediatamente.	Adimensional	Discreto Construído
N2	Operação do aerogerador suspensa após um curto período de tempo (aproximadamente 1 hora) após a falha.		
N3	Operação correta do aerogerador é reduzida imediatamente.		
N4	Operação correta do aerogerador é reduzida após um curto período de tempo (aproximadamente 1 hora) após a falha.		
N5	A operação não é afetada.		

Fonte: Adaptado de Hijes e Cartagena (2006).

A partir dos níveis de impacto definidos em uma escala ordinal, conforme apresentado na Tabela 7, é aplicado o método AHP a fim de realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 8 é disposta a matriz de comparação para o critério de efeito da falha na operação.

Tabela 8 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	5	7
N3	1/5	1/3	1	3	5
N4	1/7	1/5	1/3	1	5
N5	1/9	1/7	1/5	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Comportamento econômico do critério: efeito da falha na operação

Nível de Impacto	$v(.)$
N1	1,00
N2	0,49
N3	0,21
N4	0,08
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Neste sentido, por meio da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de efeito da falha na operação, conforme apresentado na Figura 31 e na Equação 73.

$$v(.) = -0,016x^3 + 0,218x^2 - 1,057x + 1,855 \quad (73)$$

Figura 31 - Comportamento econômico do critério: efeito da falha na operação



Fonte: Elaboração própria (2021).

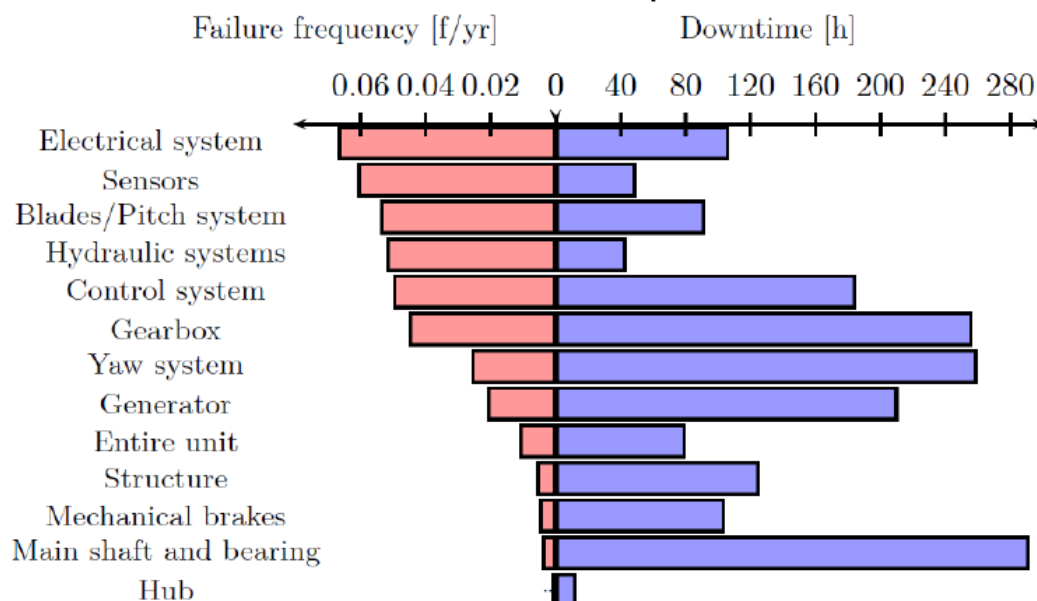
5.1.3 Frequência cumulativa de falha

A frequência de falhas é um dos critérios utilizados para representar a confiabilidade de um equipamento. A ocorrência de uma falha costuma estar associada a uma duração ou a uma probabilidade, visto que sempre existe a probabilidade de um item falhar, no entanto este é um fator que pode variar dependendo da fase do ciclo de vida em que se encontra determinado item.

Os níveis de impacto da escala referente ao critério frequência de falha foi baseado nos conceitos de RCM e FMEA. Portanto, este critério tem como objetivo avaliar o potencial de falha dos equipamentos através de modos e feitos de falha e, além disso, através de análise de dados históricos, sendo estes itens analisados através da aplicação das técnicas RCM e FMEA, as quais foram apresentadas na seção 3.1 do capítulo 3. Ademais, na seção 2.4 as Equações 9 e 10 apresentam o cálculo necessário para se obter a taxa de falha que servirá de insumo para estimar a frequência cumulativa de falha.

Para a análise dos equipamentos de um aerogerador, Besnard *et al.* (2010) coletaram dados do estudo realizado por Ribrant e Bertling (2007) sobre aerogeradores na Suécia no período de 1997 a 2005, o qual correlacionou a frequência de falha com o tempo de indisponibilidade gerado por falhas, os dados objetivos estão apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Frequência média de falhas e tempo de inatividade por subsistema e ano em turbinas eólicas na Suécia no período 1997-2005



Fonte: Besnard *et al.*(2010).

Através deste estudo, é justificada a importância de se analisar a frequência de falhas dos equipamentos de um aerogerador, dado que há evidências de que alguns sistemas apresentam maiores índices de falhas. Por outro lado, existem equipamentos que não possuem os maiores índices de falha, no entanto, possuem elevados períodos de indisponibilidade, o que se torna um cenário crítico para a operação dos aerogeradores.

Considerando a escala ordinal desenvolvida, a qual é constituída por valores de frequência cumulativa durante um período anual, em que há variação em intervalos específicos iniciando em 0% e podendo atingir valores acima de 70%. Com base nessas informações foram estabelecidos os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser quantitativo, discreto e direto. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Critério: Frequência cumulativa de falha

Nível	Quantitativo	Descrição	Unidade	Classificação
N1	]70, 90]	Frequência cumulativa >70%	%	Discreto Direto
N2	]30, 70]	Frequência cumulativa 30-70%		
N3	]10, 30]	Frequência cumulativa 10-30%		
N4	]1, 10]	Frequência cumulativa 1-10%		
N5	[0, 1]	Frequência cumulativa <1%		

Fonte: Elaboração própria (2021).

A partir dos níveis de impacto definidos na escala ordinal, conforme apresentado na Tabela 10, é aplicado o método AHP para que seja possível realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 11 é disposta a matriz de comparação para o critério de frequência cumulativa de falha.

Tabela 11 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	5	7
N3	1/5	1/3	1	3	5
N4	1/7	1/5	1/3	1	3
N5	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Comportamento econômico do critério: frequência cumulativa de falha

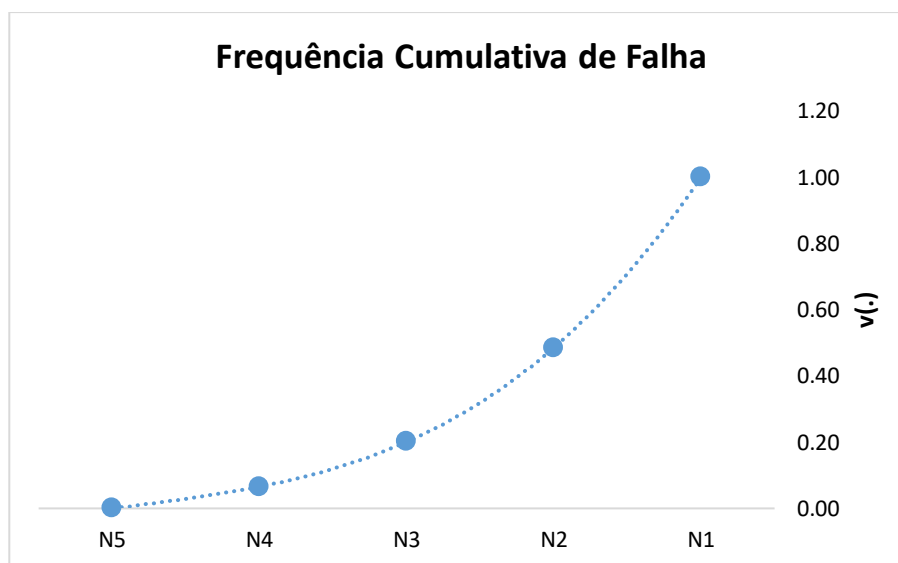
Nível de Impacto	v(.)
N1	1,00
N2	0,48
N3	0,20
N4	0,06
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Neste sentido, por meio da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de frequência cumulativa de falha, conforme apresentado na Figura 33 e na Equação 74.

$$v(.) = -0,013x^3 + 0,195x^2 - 1,006x + 1,824 \quad (74)$$

Figura 33 - Comportamento econômico do critério: frequência cumulativa de falha



Fonte: Elaboração própria (2021).

5.1.4 MTTF

O sistema avaliado é considerado reparável e com um tempo de reparo significativo, deste modo, o tempo médio de sobrevivência, ou expectativa de vida é o MTTF.

A forma de se obter o MTTF é através da razão de horas disponíveis do equipamento para a operação e o número de intervenções que acarretam na retirada de operação do equipamento.

Considerando a escala ordinal desenvolvida, a qual é constituída por valores dispostos em horas, considerando um período de um ano. Com base nessas informações foram estabelecidos os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser quantitativo, discreto e direto. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Critério: MTTF

Nível	Quantitativo	Unidade	Classificação
N1	[0, 186]	Horas	Discreto Direto
N2	]372, 744]		
N3	]744, 2190]		
N4	]2190, 4380]		
N5	]4380, 8760]		

Fonte: Elaboração própria (2021).

A partir dos níveis de impacto definidos na escala ordinal, conforme apresentado na Tabela 13, é aplicado o método AHP para que seja possível realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 14 é disposta a matriz de comparação para o critério de MTTF.

Tabela 14 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	5	7
N3	1/5	1/3	1	3	7
N4	1/7	1/5	1/3	1	5
N5	1/9	1/7	1/7	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Comportamento econômico do critério: MTTF

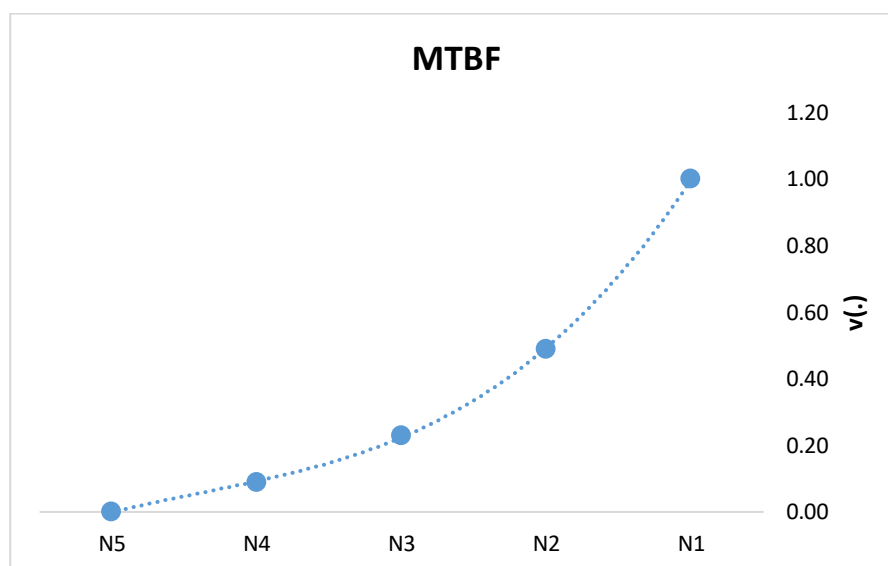
Nível de Impacto	v(.)
N1	1,00
N2	0,49
N3	0,23
N4	0,09
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Neste sentido, por meio da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de MTTF, conforme apresentado na Figura 34 e na Equação 75.

$$v(.) = -0,016x^3 + 0,217x^2 - 1,042x + 1,840 \quad (75)$$

Figura 34 - Comportamento econômico do critério: MTTF



Fonte: Elaboração própria (2021).

5.1.5 MTTR

O Tempo Médio de Reparo, também conhecido do termo em inglês *Mean Time to Repair* (MTTR), como o próprio nome sugere, é definido como o valor de tempo esperado para a recolocação de um equipamento ou sistema em estado operativo e sem restrições. Para este indicador quanto menor o seu valor, melhor para o sistema, visto que o desejável é que o tempo de indisponibilidade de um equipamento seja sempre o menor possível.

Neste sentido, o MTTR representa a média dos tempos de reparos ponderados pela probabilidade de ocorrências, ou seja, o tempo médio necessário para execução de um reparo após a falha do ativo.

Considerando a escala ordinal desenvolvida, a qual é constituída por valores dispostos em horas. Com base nessas informações foram estabelecidos os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser

quantitativo, discreto e direto. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Critério: MTTR

Nível	Quantitativo	Unidade	Classificação
N1	]168, 672]	Horas	Discreto Direto
N2	]72, 168]		
N3	]8, 72]		
N4	]2, 8]		
N5	[0, 2]		

Fonte: Elaboração própria (2021).

A partir dos níveis de impacto definidos na escala ordinal, conforme apresentado na Tabela 16, é aplicado o método AHP para que seja possível realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 17 é disposta a matriz de comparação para o critério de MTTR.

Tabela 17 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	5	7
N3	1/5	1/3	1	3	7
N4	1/7	1/5	1/3	1	5
N5	1/9	1/7	1/7	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Comportamento econômico do critério: MTTR

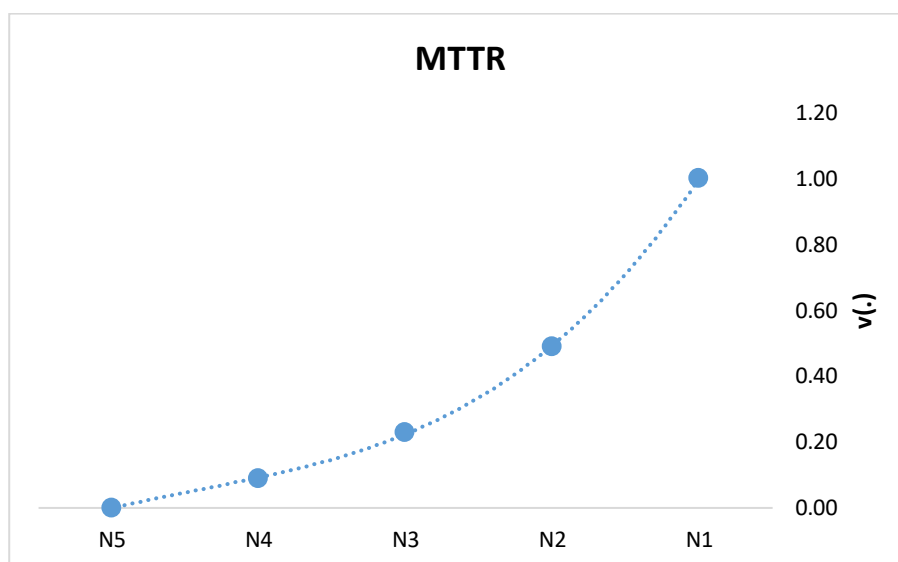
Nível de Impacto	v(.)
N1	1,00
N2	0,49
N3	0,23
N4	0,09
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Neste sentido, através da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de MTTR, conforme apresentado na Figura 35 e na Equação 76.

$$v(.) = -0,016x^3 + 0,217x^2 - 1,042x + 1,840 \quad (76)$$

Figura 35 - Comportamento econômico do critério: MTTR



Fonte: Elaboração própria (2021).

5.2 Ponto de vista fundamental - Econômico

O Ponto de Vista Fundamental econômico tem como intuito englobar os custos atrelados às manutenções dos equipamentos que estão sob análise. Este PVF é, portanto, composto por dois critérios (descritores): custo de manutenção preventiva e custo de manutenção corretiva.

5.2.1 Custo de manutenção preventiva e preditiva

O custo de manutenção preventiva e preditiva é um critério que busca averiguar os custos atrelados às manutenções que precedem à falha, ou seja, parte do pressuposto de que o equipamento está sob sua operação normal, mas que precisa passar por inspeções e correções para que siga neste estado. As tarefas de manutenção preventiva incluem ações como inspeção periódica dos equipamentos, troca de óleo e filtro, calibração e ajuste de sensores e atuadores e

substituição de consumíveis, como pastilhas de freio e vedações. Já as tarefas de manutenção preditiva podem incluir os itens anteriormente citados e também atividades como análise de parâmetros dos equipamentos, a fim de que sejam analisadas as suas condições. Estas atividades específicas e sua frequência geralmente são definidas explicitamente nos manuais de manutenção fornecidos pelo fabricante da turbina. Os custos associados à manutenção preventiva e preditiva podem ser estimados com razoável precisão, entretanto podem variar de acordo com os custos de mão de obra local e a localização e acessibilidade do local. Os custos desses tipos de manutenções também dependem do tipo e custo dos consumíveis usados e também dos sistemas de monitoramento utilizados (WALFORD, 2006).

Desta forma, para este critério foram considerados os custos necessários de manutenção para que o equipamento seja mantido em estado de operação plena. Neste sentido, são considerados os seguintes custos:

- a) Custo do homem-hora da equipe técnica necessária para a realização de ações preventivas de manutenção; e
- b) Custos de componentes, materiais de consumo necessários utilizados durante a manutenção.

Considerando a escala ordinal desenvolvida, a qual é constituída por valores dispostos milhares de reais [kBRL] e que para o estabelecimento dos níveis de impacto do critério foram considerados valores baseados em *benchmarking* e pesquisa de mercado. Com base nessas informações foram estruturados os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser quantitativo, discreto e direto. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Critério: custo de manutenção preventiva e preditiva

Nível	Quantitativo	Unidade	Classificação
N1	]50, 100]	kBRL	Discreto Direto
N2	]20, 50]		
N3	]10, 20]		
N4	]5, 10]		
N5	]1, 5]		

Fonte: Elaboração própria (2021).

A partir dos níveis de impacto definidos na escala ordinal, conforme apresentado na Tabela 19, aplica-se o método AHP para que seja possível realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 20 é disposta a matriz de comparação para o critério de custo de manutenção preventiva.

Tabela 20 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	5	7
N3	1/5	1/3	1	5	7
N4	1/7	1/5	1/5	1	5
N5	1/9	1/7	1/7	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Comportamento econômico do critério: custo de manutenção preventiva e preditiva

Nível de Impacto	v(.)
N1	1,00
N2	0,49
N3	0,26
N4	0,07
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Neste sentido, através da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de custo de manutenção preventiva, conforme apresentado na Figura 36 e na Equação 77.

$$v(.) = -0,014x^3 + 0,192x^2 - 0,967x + 1,784 \quad (77)$$

Figura 36 - Comportamento econômico do critério: custo de manutenção preventiva



Fonte: Elaboração própria (2021).

5.2.2 Custo de manutenção corretiva

O custo de manutenção corretiva é um critério que busca averiguar os custos atrelados ao reparo não programado de equipamentos, ou seja, parte do pressuposto de que o equipamento está sob a condição de falha e avalia os custos necessários de manutenção para que o equipamento volte à operação normal.

De acordo com Walford (2006), os custos de reparo podem ser separados em custos diretos e indiretos. Os custos diretos estão associados à mão-de-obra e ao equipamento necessário para reparar ou substituir, aos próprios custos dos componentes e a quaisquer consumíveis usados no processo. Já os custos indiretos resultam de receitas perdidas devido ao tempo de inatividade do aerogerador.

Os custos de mão de obra são impulsionados pela dificuldade de acesso e trabalho nos componentes. Com exceção de alguns aparelhos de manobra e equipamentos de conversão de energia, a maioria dos equipamentos da turbina é acessada através da torre. Por razões de segurança, geralmente é necessária uma tripulação de duas pessoas para qualquer atividade na torre alta. Em locais remotos, o acesso à própria turbina pode ser difícil e limitado pelo clima. As condições de trabalho podem ser em condições extremas de temperatura e podem

ser restringidas por ventos fortes. Algumas turbinas são equipadas com guinchos e equipamentos de amarração, mas, em geral, todas as ferramentas e equipamentos, além dos sobressalentes, devem ser içados para dentro da nacela. O espaço é limitado neste local e as posições de trabalho podem ser inadequadas. Já o trabalho fora da nacela, incluindo as transições para o *hub* em algumas turbinas, requer o trabalho com um cinto de segurança e talabartes (WALFORD, 2006).

Considerando essas características de manutenção em aerogeradores, são considerados os seguintes custos:

- a) Custo do homem-hora da equipe técnica necessária para a recuperação do equipamento;
- b) Custos de componentes e peças para reparo, materiais de consumo necessários utilizados durante a manutenção;
- c) Para casos em que o equipamento entrou em estado de falha e não pode mais ser reparado, considerar o custo de substituição deste equipamento; e
- d) Para equipamentos que ao falhar gerem indisponibilidade, é considerado o custo atrelado à perda financeira devido ao tempo de indisponibilidade do aerogerador.

Considerando a escala ordinal desenvolvida, a qual é constituída por valores dispostos em milhares de reais [kBRL] e que para o estabelecimento dos níveis de impacto do critério foram considerados valores baseados em *benchmarking* e pesquisa de mercado. Com base nessas informações foram estruturados os níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser quantitativo, discreto e direto. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Critério: custo de manutenção corretiva

Nível	Quantitativo	Unidade	Classificação
N1	]400, 900]	kBRL	Discreto Direto
N2	]100, 400]		
N3	]50, 100]		
N4	]20, 50]		
N5	]5, 20]		

Fonte: Elaboração própria (2021).

Por meio dos níveis de impacto definidos na escala ordinal da Tabela 22, aplica-se o método AHP para realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 23 é apresentada a matriz de comparação para o critério de custo de manutenção corretiva.

Tabela 23 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	7	9
N3	1/5	1/3	1	5	7
N4	1/7	1/7	1/5	1	3
N5	1/9	1/9	1/7	1/3	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Comportamento econômico do critério: custo de manutenção corretiva

Nível de Impacto	$v(.)$
N1	1,00
N2	0,56
N3	0,26
N4	0,05
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Através da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de custo de manutenção corretiva, conforme apresentado na Figura 37 e na Equação 78.

$$v(.) = 0,054x^2 - 0,604x + 1,547 \quad (78)$$

Figura 37- Comportamento econômico do critério: custo de manutenção corretiva



Fonte: Elaboração própria (2021).

5.3 Ponto de vista fundamental – Gestão

O Ponto de Vista Fundamental de gestão tem como propósito abordar critérios qualitativos acerca dos impactos que falhas ou manutenções nos equipamentos de um aerogerador podem causar à equipe técnica responsável pela manutenção, ao meio ambiente ou sociedade e, além disso, à organização responsável pelo ativo. Desta forma, o PVF de gestão é composto por dois critérios (descritores): segurança e socioambiental.

5.3.1 Segurança

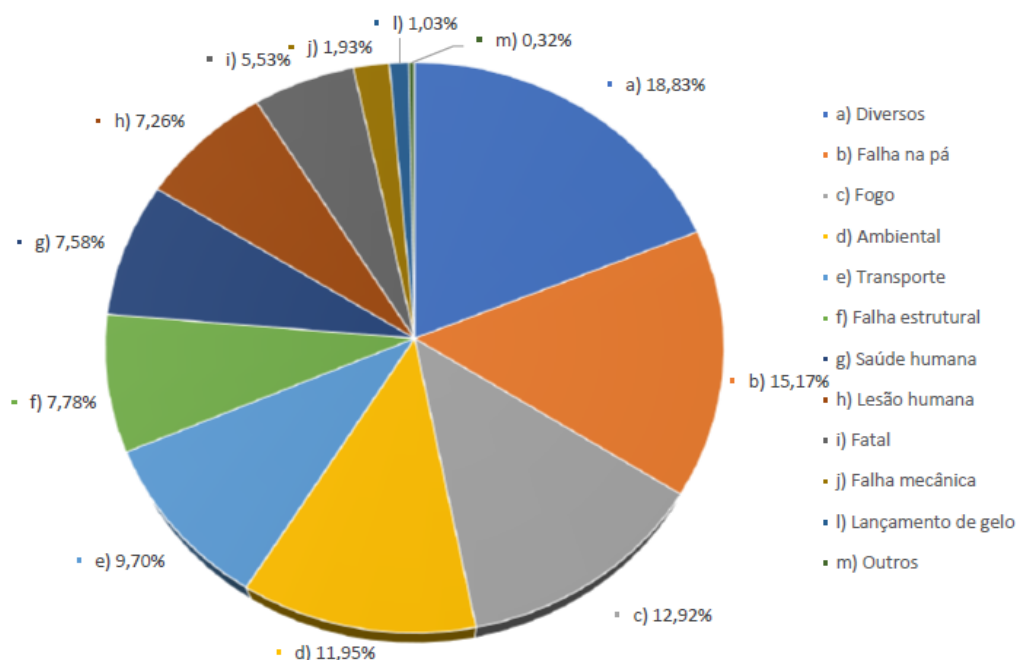
O critério segurança visa avaliar o impacto que falhas ou manutenções dos equipamentos de um aerogerador podem causar à saúde e segurança da equipe técnica, a qual é responsável pela manutenção.

Alinhado ao propósito deste critério, um estudo realizado por *Caithness Windfarm Information Forum* apresenta um vasto material resumando informações existentes desde 1980 até março de 2018, o qual totaliza 2.231 acidentes. Através deste documento é possível notar que os dados presentes expostos pela instituição são equivalentes a apenas 9% dos números reais de

acidentes ocorridos no Reino Unido até o período mencionado (CWFI, 2018; WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Winter e Segalovich (2018) com base no relatório do instituto *Caithness Windfarm Information Forum* realizaram o levantamento dos acidentes mais recorrentes em usinas eólicas entre janeiro de 2008 e dezembro de 2017, totalizando 1.556 acidentes ao redor do mundo. A partir disto, foi desenvolvido o gráfico apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Tipos de acidentes em parques eólicos entre 2008 e 2017



Fonte: Winter e Segalovich (2018)

Através da análise do gráfico também foram obtidas as seguintes conclusões (WINTER; SEGALOVICH, 2018):

- a) 18,23% são acidentes apenas envolvendo componentes ou falhas mecânicas que não implicaram em danos estruturais, falhas devido à falta de manutenção, falhas elétricas que não resultaram em incêndio ou eletrocussão, acidentes de construção e suporte e também acidentes de raios que não resultaram em danos às pás ou incêndio.

- b) Acidentes relacionados à falha nas pás da turbina representam 15,17%;
- c) Em terceiro lugar com 12,92% estão os acidentes que envolvem fogo;
- d) Inseridos na categoria “Outros”, foram incluídos acidentes devido à poeira, explosão, descargas elétricas, curto circuitos e penetração de água;
- e) Outro dado relevante é que em 86 acidentes houve fatalidade, totalizando 5,53% do total; e

Portanto, fica evidente que a avaliação do risco à segurança que a equipe técnica ficará exposta para a realização da manutenção é um fator fundamental para auxílio do planejamento da manutenção, considerando que as atividades devem sempre priorizar pela segurança das pessoas. Neste sentido, realizando a avaliação de riscos potenciais de falhas atreladas aos equipamentos de um aerogerador, é possível tomar as medidas necessárias para mitigar ou anular os respectivos riscos.

Desta forma, a escala de níveis de impacto criada para o critério segurança foi baseada em dados apresentados nos trabalhos de Baran (2015) e também de Winter e Segalovich (2018). Através dessas informações foram estabelecidos quatro níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser qualitativo, discreto e construído. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 25.

Tabela 25 - Critério: segurança

Nível	Qualitativo	Unidade	Classificação
N1	Fatalidade. Possíveis riscos: Risco de queda de altura.	Adimensional	Discreto Construído
N2	Lesão leva a incapacidade permanente. Possíveis riscos: Peças em movimentos (queimaduras, esmagamento ou amputação).		
N3	Lesão/doença com incapacidade temporária estendida. Possíveis riscos: riscos psicossociais, trabalho em espaço confinado, poucos meios de acesso e saída e doenças ocupacionais.		
N4	Lesão/doença sem afastamento, efeito insignificante na saúde. Possíveis riscos: Esforços físicos (lesões musculoesqueléticas e exaustão).		

Fonte: Elaboração própria (2021).

Por meio dos níveis de impacto definidos na escala ordinal da Tabela 25, aplica-se o método AHP para realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 26 é apresentada a matriz de comparação para o critério de segurança.

Tabela 26 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4
N1	1	3	5	7
N2	1/3	1	3	5
N3	1/5	1/3	1	5
N4	1/7	1/5	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Comportamento econômico do critério: segurança

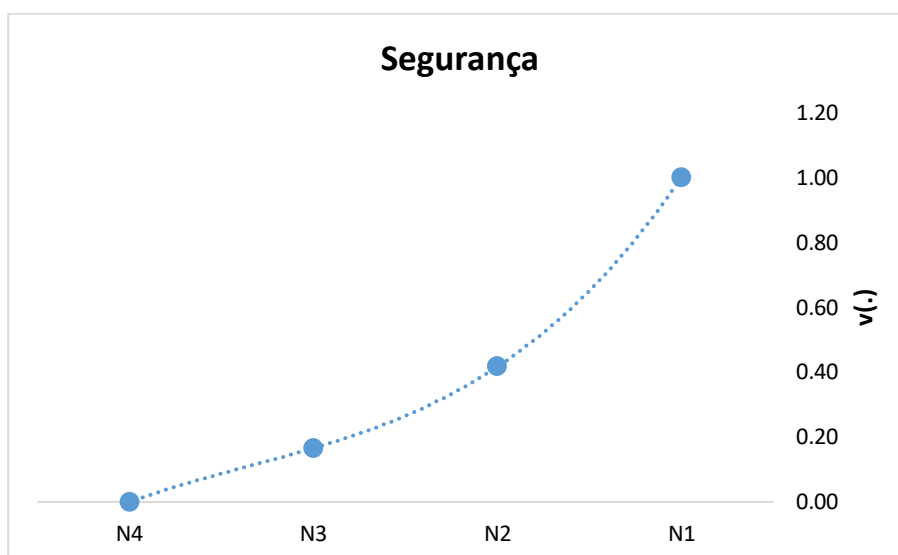
Nível de Impacto	v(.)
N1	1,00
N2	0,42
N3	0,17
N4	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Através da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de segurança, conforme apresentado na Figura 39 e na Equação 79.

$$v(.) = -0,041x^3 + 0,411x^2 - 1,531x + 2,160 \quad (79)$$

Figura 39 - Comportamento econômico do critério: segurança



Fonte: Elaboração própria (2021).

5.3.2 Socioambiental

O critério socioambiental avalia os impactos que possam ser causados ao meio-ambiente e à sociedade devido às possíveis falhas e/ou manutenções nos equipamentos que compõem um aerogerador.

Como exemplificações de possíveis danos socioambientais estão casos de incêndio na nacele, que em situações extremas de queda de componentes pode atingir partes do sistema e gerar focos de incêndios secundários. Por conta das longas distâncias entre as usinas e as estações de combate a incêndio, somado aos fortes ventos presentes nestas regiões, estes focos disseminam-se rapidamente podendo chegar a níveis de incêndios florestais, em muitos casos difíceis de serem combatidos. Portanto, além dos custos atrelados diretamente ao sistema, os danos ambientais são praticamente irrecuperáveis. As causas de incêndios podem ser devido a fatores internos, originados por falhas humanas ou negligências e avarias próprias dos equipamentos como fadigas, reações físico-

químicas, mecânica e elétrica. Além disso, há também a possibilidade de fatores externos como descargas atmosféricas ou ventos fortes (WINTER; SEGALOVICH, 2018).

Devido a situações como a apresentada anteriormente, o critério socioambiental foi integrado ao modelo multicritério para que seja mais uma variável a ser considerada na análise de criticidade dos equipamentos de uma aerogerador. Desta forma, a escala de níveis de impacto criada para o critério socioambiental foi desenvolvida com níveis que possam refletir situações de danos potenciais ao meio ambiente e à sociedade. Através dessas informações foram estabelecidos cinco níveis de impacto para o referido critério, o qual possui como característica ser qualitativo, discreto e construído. A apresentação de seus níveis de impacto encontra-se na Tabela 28.

Tabela 28 - Critério: socioambiental

Nível	Qualitativo	Unidade	Classificação
N1	Impacto ambiental irreversível em áreas de conservação, habitats críticos, espécies em extinção. E/ou impacto social em comunidades locais.	Adimensional	Discreto Construído
N2	Sério dano negativo ambiental, impacto crítico nos recursos ou impacto social. Ações de controle contínuo.		
N3	Efeito negativo moderado ambientalmente, social ou impacto crítico nos recursos. Ações de controle e mitigação são necessários.		
N4	Efeito negativo moderado ambientalmente, socialmente. Medidas de mitigação não são necessários.		
N5	Dano negativo insignificante ambiental, social ou ecológico.		

Fonte: Elaboração própria (2021).

Através dos níveis de impacto definidos na escala ordinal da Tabela 28, aplica-se o método AHP para realizar as comparações par a par entre cada nível de impacto estabelecido. Na Tabela 29 é disposta a matriz de comparação para o critério de socioambiental.

Tabela 29 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	N1	N2	N3	N4	N5
N1	1	3	5	7	9
N2	1/3	1	3	5	7
N3	1/5	1/3	1	3	5
N4	1/7	1/5	1/3	1	3
N5	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

O comportamento econômico resultante da matriz de decisão par a par para cada um dos níveis de impacto é apresentado na Tabela 30.

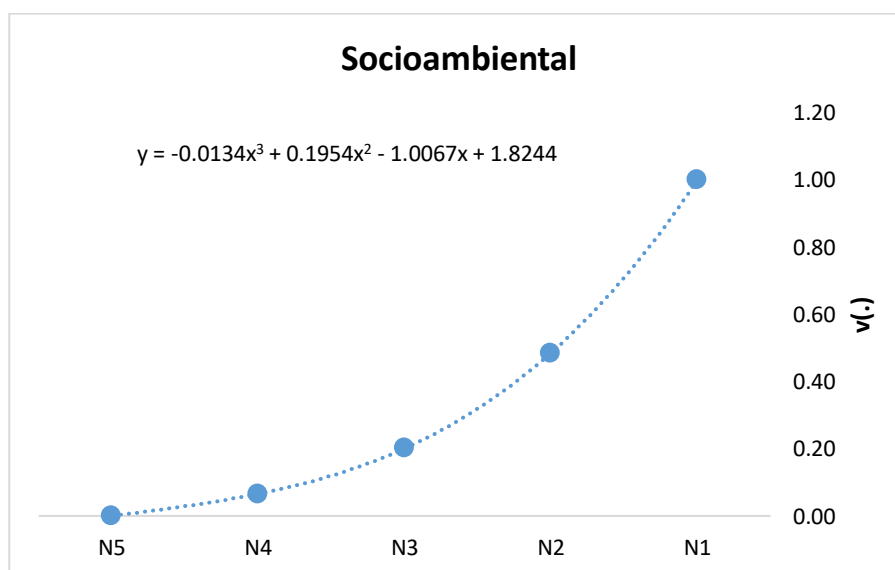
Tabela 30 - Comportamento econômico do critério: socioambiental

Nível de Impacto	v(.)
N1	1,00
N2	0,48
N3	0,20
N4	0,06
N5	0,00

Fonte: Elaboração própria (2021).

Através da equação da reta de tendência do gráfico baseado nos níveis de impacto e pelo, $v(.)$, é possível obter a função de valor final para o critério de segurança, conforme apresentado na Figura 40 e na Equação 80.

$$v(.) = -0,013x^3 + 0,195x^2 - 1,006x + 1,824 \quad (80)$$

Figura 40 - Comportamento econômico do critério: socioambiental

Fonte: Elaboração própria (2021).

5.4 *Trade-offs* dos pontos de vista fundamentais e dos descritores

Conforme mencionado nas seções anteriores, a definição dos *trade-offs* tem o intuito de estabelecer a importância relativa entre os descritores, PVEs e PVFs, após a etapa de descrição da importância entre níveis de impacto, por meio das funções de valor econômico apresentadas para cada critério (descriptor). Para obter os *trade-offs* foi utilizada a matriz de comparação par a par através do método AHP.

Para o PVF técnico, o *trade-off* foi elaborado através da comparação entre cada um dos cinco critérios, conforme apresentado na matriz de comparação para a par da Tabela 31.

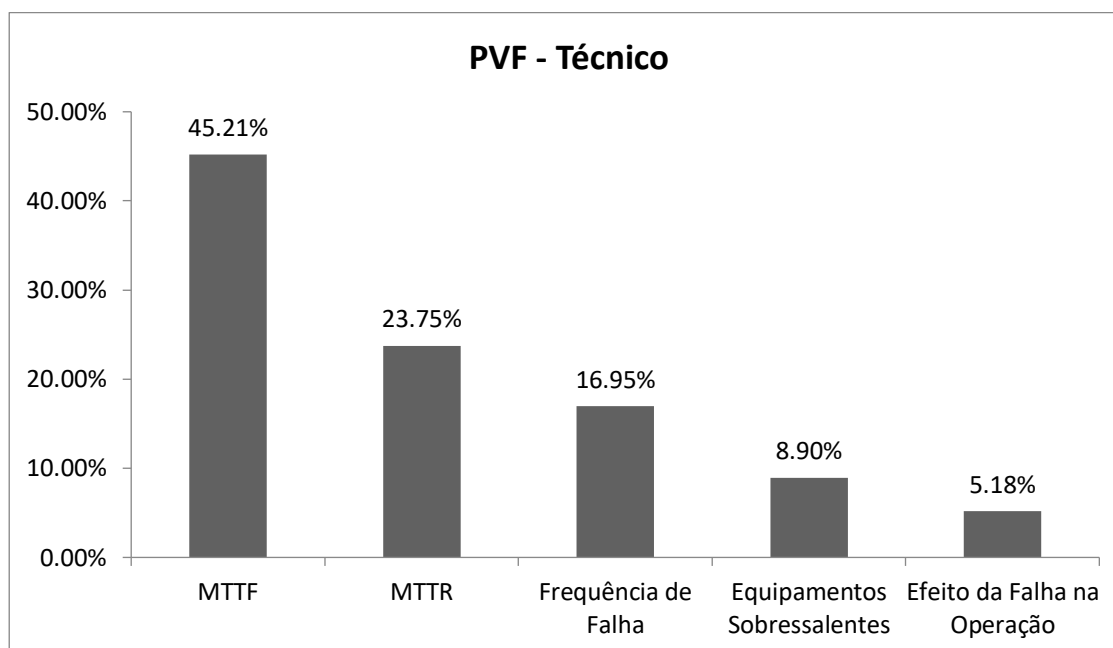
Tabela 31 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	Equipamentos Sobressalentes	Efeito da Falha na Operação	MTTR	Frequência de Falha	MTTF
Equipamentos Sobressalentes	1	3	1/3	1/3	1/5
Efeito da Falha na Operação	1/3	1	1/3	1/5	1/5
MTTR	3	3	1	3	1/3
Frequência de Falha	3	5	1/3	1	1/3
MTTF	5	5	3	3	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

A partir da matriz de comparação par a par do método AHP, foram encontrados os valores de *trade-off* para cada um dos critérios do PVF técnico, os quais estão dispostos na Figura 41.

Figura 41 - Trade-off PVF: técnico



Fonte: Elaboração própria (2021).

Como é possível observar, o critério de maior influência relativa para o decisor é o critério de MTTF, seguido pelos critérios MTTR e frequência de falha, refletindo uma preferência do decisor pela avaliação de indicadores atrelados à indisponibilidade dos equipamentos.

Para o PVF econômico o mesmo processo foi realizado, iniciando pela matriz de comparação par a par do método AHP, de acordo com a Tabela 32.

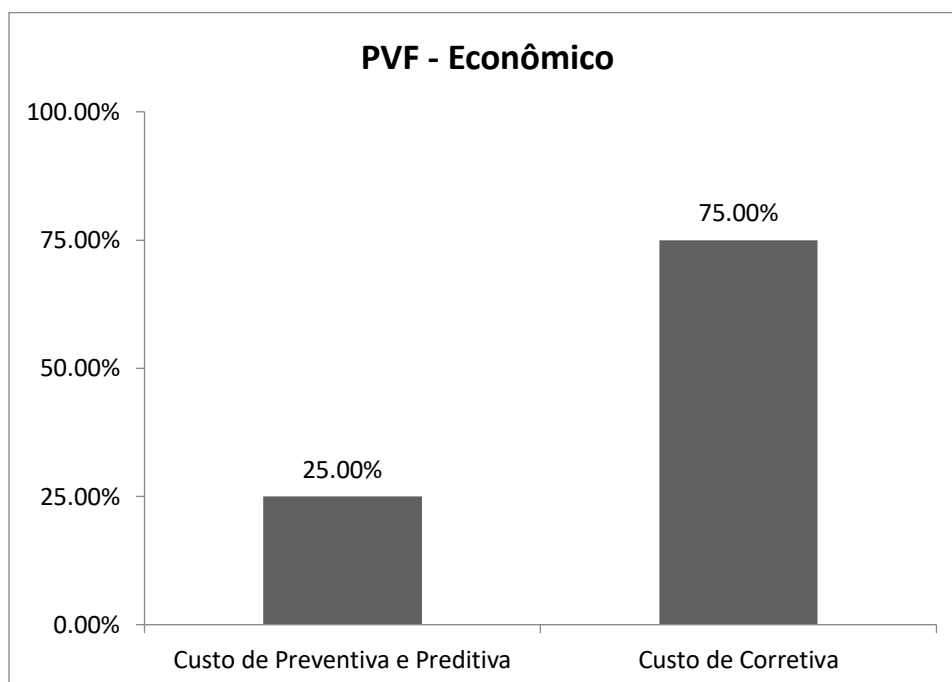
Tabela 32 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	Custo de Preventiva e Preditiva	Custo de Corretiva
Custo de Preventiva e Preditiva	1	1/3
Custo de Corretiva	3	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

Através da matriz de comparação par a par do método AHP, foram encontrados os valores de *trade-off* para os dois critérios do PVF econômico, os quais estão apresentados na Figura 42.

Figura 42 - Trade-off PVF: econômico



Fonte: Elaboração própria (2021).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 42, é observado que o decisor possui inclinação ao critério custo de manutenção corretiva. Ou seja, como o objetivo do modelo proposto é elencar a criticidade dos equipamentos de um aerogerador, com o intuito de facilitar o direcionamento do planejamento da manutenção, a avaliação de equipamentos que possuem custos elevados quando submetidos à manutenção corretiva é fundamental para que estes sejam direcionados a programas de manutenção mais específicos e eficazes.

Também para o PVF de gestão o mesmo processo foi realizado, iniciando pela matriz de comparação par a par do método AHP, de acordo com a Tabela 33.

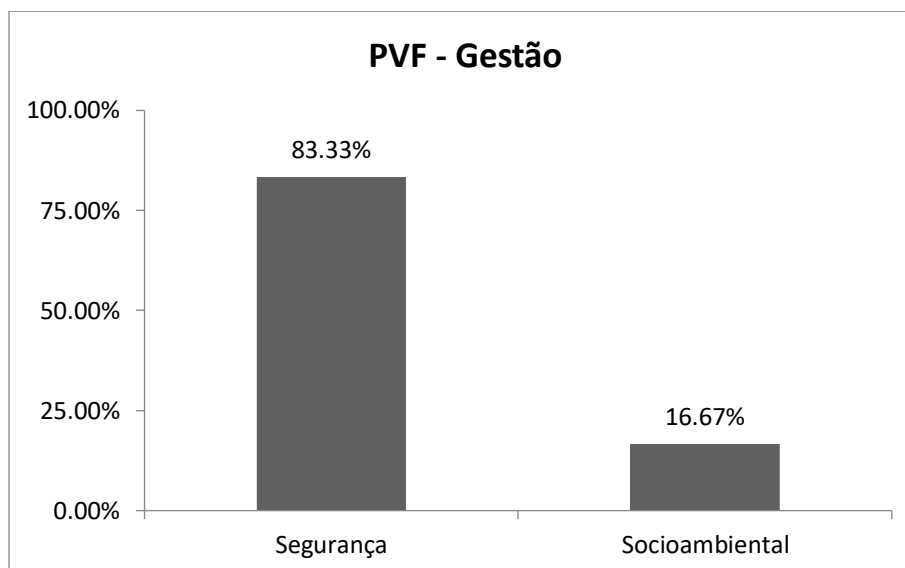
Tabela 33 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	Segurança	Socioambiental
Segurança	1	5
Socioambiental	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

Por meio da matriz de comparação par a par do método AHP, foram encontrados os valores de *trade-off* para os dois critérios do PVF de gestão, os quais estão apresentados na Figura 43.

Figura 43 - Trade-off PVF: gestão



Fonte: Elaboração própria (2021).

O critério gestão foi é apresentado na Figura 43 como o de maior preferência relativa para o decisor, isso ocorre devido aos elevados riscos à segurança da equipe técnica que são atrelados às falhas e manutenções em aerogeradores. Embora medidas de precaução sejam tomadas e, de fato, são eficazes para mitigar esses riscos, a avaliação deste critério é pertinente para que equipamentos que tenham maiores índices de risco, recebam dedicação ainda maior das equipes no momento de prevenir acidentes.

Para todos os critérios analisados anteriormente pela matriz de comparação par a par do método AHP, bem como para a avaliação entre os PVFs que será feita na sequência, o Coeficiente de Racionalidade (CR) foi calculado. Todos os resultados obtidos foram abaixo de 10%, portanto, todos são consistentes. Em casos que o CR ficou acima dos 10%, a análise de julgamentos foi refeita, a fim de encontrar valores consistentes para a comparação par a par.

Por fim, o processo de análise de *trade-off* foi realizado entre os PVFs através dos métodos AHP, conforme demonstrado na Tabela 34.

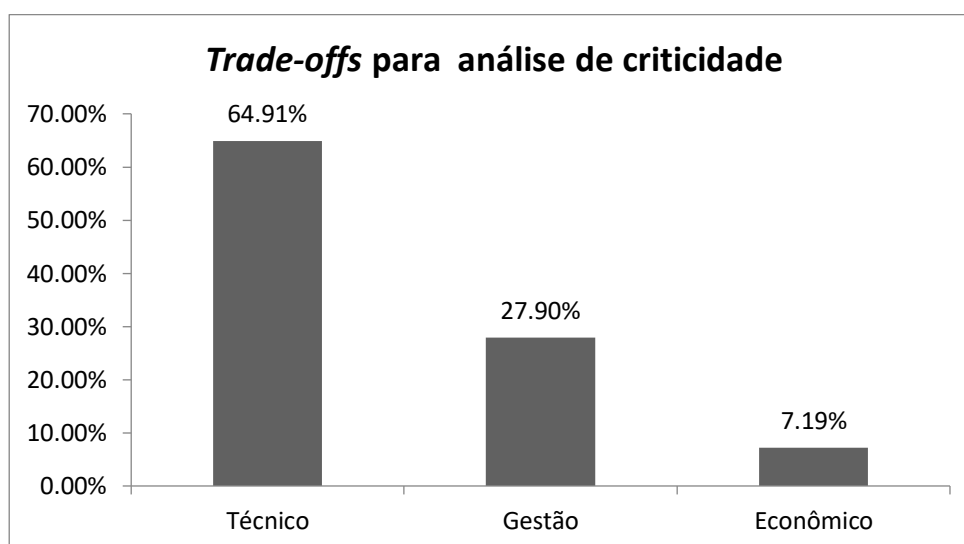
Tabela 34 - Matriz de comparação par a par - método AHP

	Técnico	Gestão	Econômico
Técnico	1	3	7
Gestão	1/3	1	5
Econômico	1/7	1/5	1

Fonte: Elaboração própria (2021).

Por meio da matriz de comparação par a par do método AHP, foram encontrados os valores de *trade-off* para os PVFs técnico, de gestão e econômico, os quais estão apresentados na Figura 44.

Figura 44 - Trade-off para análise de criticidade dos equipamentos de um aerogerador



Fonte: Elaboração própria (2021).

Por meio da avaliação de importância relativa dos critérios e dos PVFs, a construção da proposta de modelo multicriterial torna-se mais robusta, visto que há a hierarquização e desconexão dos elementos que o compõe de forma temporária, a fim de que cada etapa da análise tenha a ponderação da importância relativa para que seja possível obter resultados consistentes.

6 CONCLUSÃO

Com o aumento da presença da geração de energia através de fontes eólicas, a demanda de disponibilidade desta fonte torna-se cada vez mais elevada. Como o bom desempenho dos índices de disponibilidade está diretamente relacionado à qualidade da manutenção executada nas unidades eólicas, o planejamento eficaz da manutenção torna-se essencial para que isso seja possível.

Por muito tempo o foco da manutenção foi atrelado à redução de custos e a correção de falhas que levavam equipamentos à indisponibilidade. Entretanto, existem diversos aspectos que devem ser considerados para que o planejamento da manutenção seja efetivo e adequado aos objetivos e princípios de uma organização detentora de um ativo eólico. Neste sentido, o planejamento da manutenção atrelado à visão integrada dos critérios que permeiam às necessidades das unidades eólicas e das organizações que a possuem, torna-se extremamente válido, visto que dessa maneira é possível unir a avaliação de critérios econômicos, técnicos para análise de desempenho e também variáveis socioambientais.

Conforme apresentado no capítulo 4, existem inúmeras metodologias de planejamento de manutenção, sendo a metodologia de múltiplos critérios uma metodologia que pode auxiliar no planejamento da manutenção, a qual possui diversos estudos que geraram a criação de métodos para apoio à tomada de decisão em diferentes âmbitos. Para a realização deste trabalho, o método utilizado foi o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), por conta da consistência na obtenção de resultados, permitindo aos decisores a avaliação de seus julgamentos através do Coeficiente de Racionalidade e, além disso, pela sua facilidade de aplicação.

Em linha com a revisão bibliográfica apresentada nos capítulos anteriores e com a aplicação das metodologias estudadas, a proposta de modelo multicritério para análise de criticidade dos equipamentos de um aerogerador foi estabelecida, com o intuito de proporcionar auxílio à tomada de decisão acerca do planejamento da manutenção em unidades eólicas. Este modelo pautado nos PVFs técnico, econômico e socioambiental que, apesar de possuírem naturezas distintas, através da metodologia utilizada, é possível transformar os critérios inseridos nos PVFs em mesmas unidades de medidas, assim, a análise pode ser feita de forma

simultânea. Entretanto, é necessário salientar que o modelo proposto sofre a influência do decisor e dos demais atores envolvidos no processo de análise e, por conseguinte, os resultados obtidos podem ser alterados conforme haja a mudança dos atores que realizam tal análise.

6.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros é recomendável que o modelo proposto seja submetido a aplicações práticas através de estudos de caso em unidades eólicas reais. Desta maneira, a validação do comportamento dos critérios utilizados será obtida. Além disso, após a aplicação do modelo, torna-se viável a avaliação de sua eficácia e, caso necessário, poderá passar por ajustes a fim de torná-lo mais robusto.

Atrelado à sugestão mencionada acima, foi submetido um resumo para o Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Eólica (SNPTEE) com o intuito de receber a aprovação para o desenvolvimento de um artigo, o qual conterá a aplicação do modelo proposto em um estudo de caso em uma unidade eólica.

REFERÊNCIAS

- AFGAN, N. H. *et al.* Evaluation of natural gas supply options for Southeast and Central Europe: Part 2. Multi-criteria assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p.2345-2353, mar. 2008.
- ALBUQUERQUE, I. M.; MATOS, F. F. S. A characterization of vertical axis wind turbines. **IEEE Latin America Transactions**, v.14, n.10, p.4255-4260, out. 2016.
- ANDRAWUS, Jesse A. **Maintenance Optimisation for Wind Turbines**. 2008. 212 f. Tese (Pós-Doutorado em Engenharia de confiabilidade e otimização de manutenção) – The Robert Gordon University, Aberdeen, 2008.
- ARENDT, J. S. Using quantitative risk assessment in the chemical process industry. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 29, p. 133-149. 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração eólica**. São Paulo, 2018. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Acesso em: 08 jan. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Eólica já é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira com 15 GW de capacidade instalada**. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/noticias/eolica-ja-e-a-segunda-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira-com-15-gw-de-capacidade-instalada/>. Acesso em: 08 jan. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462: confiabilidade a manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- AVEN, T. Identification of safety and security critical systems and activities. **Reliability Engineering & System Safety**, v.94, p. 404-411, fev. 2009.
- BAASCH, Sandra S. N. **Um sistema de suporte multicritério aplicado na gestão de resíduos sólidos nos municípios catarinenses**. 1995. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.
- BARAN, Leandro R. **Proposta de um modelo multicritério para determinação da criticidade na gestão da manutenção industrial**. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.
- BARBOSA, João P. **Modelagem da confiabilidade de equipamentos por combinações ou extensões de distribuição de weibull**. 2008. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.
- BELLINI, Vadis. **Metodologia para análise dos modos de falhas aplicada à segurança de condicionadores de ar**. 2008. 45 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

BERTSCHE, Bernd. **Reliability automotive and mechanical engineering**. Berlim: Springer, 2008.

BESNARD, François *et al.* Reliability-Centred Asset Maintenance – A step towards enhanced reliability , availability , and profitability of wind power plants. In: **2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)**, Gothenburg, 2010.

BILLINTON, Roy; ALLAN, Ronald. N. **Reliability evaluation of engineering system**. 2ª Ed., New York: Plenum Press, 1992.

BRITO A. J.; ALMEIDA A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 2, p. 187-198, 2009.

CAITHNESS WINDFARM INFORMATION FORUM (CWIF). **Summary of wind turbine accident**. Disponível em: <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/accidents.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2021.

CAMPOS, Vanessa Ribeiro *et al.* Modelagem do apoio à decisão multicritério utilizando a metodologia EKD. In: **XXX Encontro Nacional De Engenharia De Produção**. São Carlos, 2010.

CANDIOTTO, Daniel F. **Inferência do desempenho da manutenção de aerogeradores utilizando dados de operação**. 65f. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, UFF, Niterói, 2016. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/2261>. Acesso em: 16 jan. 2021.

CARAZAS, Fernando J. G. **Decisões baseadas em risco – método aplicado na indústria de geração de energia elétrica para a seleção de equipamentos críticos e políticas de manutenção**. 2011. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CASTRO, Rui M. G. **Energias renováveis e produção descentralizada: introdução à energia eólica**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2005.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. **3. Energia e potência extraída do vento**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=221. Acesso em: 06 jan. 2021.

CHAN, D.; MO, J. Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines. **Energy Procedia**, v. 110, p. 328-333, dez. 2016.

COSTA, Helder Gomes. **Auxílio multicritério à decisão: método AHP**. Rio de Janeiro: Abepro, 2006.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DEPARTMENTT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. **Multi-criteria analysis: a manual**. 1 ed. Londres, 2009.

DIAS, Acires; CALIL, Fernando Peres; RIGONI, Emerson; SAKURADA, Eduardo Yuji; OGLIARI, André; KAGUEIAMA, Heitor Azuma. **Metodologia para Análise de Risco: Mitigação de perda de SF6 em disjuntores**. Florianópolis: Ed. Studio e Arte Visual, 2013.

DUARTE, Antônio M.A importância do gerenciamento de riscos em bancos. **Global Risk Management**, p. 1-13, 2003.

DUTRA, Ademar. **Elaboração de um sistema de avaliação de desempenho dos recursos humanos do SEA à luz da metodologia multicritério de apoio à decisão**. 1998. 459 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

ENERCON. **E-141 EP4**. Disponível em: <https://www.enercon.de/en/products/ep-4/e-141-ep4>. Acesso em: 11 jan. 2021.

FLORIAN, M.; SØRENSEN, J. D. Risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind farms. **Energy Procedia**, v. 137, p. 261–272, jan. 2017.

FUENTES, Fernando F. E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. Florianópolis. 2006. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

GOMES, Luiz F. A. M.; ARAYA, Marcela C. G.; CARIGNANO, Claudia. **Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. São Paulo: Thomson, 2004.

HELMANN, Kurtt S. **Uma sistemática para determinação da criticidade de equipamentos em processos industriais baseada na abordagem multicritério**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2008.

HIJES, F, C. G. L.; CARTAGENA, J. J. R. Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments. **Reliability Engineering & System Safety**, p. 444-451, mai. 2006.

IEEE. **The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms**. 7 ed. New York: Standards Information Network, IEEE Press, 2000.

IGBA, J. *et al.* A systems approach towards reliability-centred maintenance (RCM) of wind turbines. **Conference on Systems Engineering Research**, v. 16, p. 914-823, mar. 2013.

KARDEC, Alan *et al.* **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

KUMAR, A.*et al.* A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p.596-609, mar. 2017.

LONGARAY, André A. *et al.* Modelo multicritério de apoio à decisão construtivista para avaliação de desempenho do trade marketing: um caso ilustrado no setor farmacêutico. **Produção Online**, Florianópolis, mar. 2016. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1885/1367>. Acesso em: 30 mar. 2021.

MÁRQUEZ, F. P. G. *et al.* Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time. **Renewable Energy**, v. 87, n.2, p.869-883, mar. 2016.

MEIRELLES, C. L. A.; GOMES, L. F. A. M. O apoio multicritério à decisão como instrumento de gestão do conhecimento: uma aplicação à indústria de refino do petróleo. **Pesquisa operacional**, v. 29, n.2, p. 451-470, ago. 2009.

MORAES, Leonardo N. **Proposta de ferramenta de análise multicritério de apoio à gestão municipal da mobilidade urbana**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

NOGUEIRA, Christiane W. **A metodologia multicritério de apoio à decisão analytic hierarchy process (AHP): um estudo de caso na priorização de traçado de pavimentação de uma estrada**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PALAFY, Paul. **FMEA: Análise dos modos de falha e efeitos**: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. São Paulo: Instituto IMAM, 2004.

PAVINATTO, Eduardo F. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2005. 174 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PUENTE, J.*et al.* A Decision Support System for Applying Failure Mode and Effects Analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.19, n.2, p.137-150, 2002.

RAUSAND, Marvin; HOYLAND, Arnljot. **System reliability theory**. New Jersey: Hoboken, 2004.

RÊGO, L. de O. **Análise do impacto da geração eólica na regulação de frequência de sistemas de energia elétrica**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

RIBEIRO, G. C. A importância dos critérios de sustentabilidade na definição da criticidade dos equipamentos analisados sob a ótica de RCM2. **Comisión de Integración Energética Regional (CIER)**, n.55, p. 3-10, jun. 2010.

RIBEIRO, Luíza B. **Um estudo sobre energia eólica no Brasil**. 71f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Elétrica) – Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica, UFOP, João Monlevade, 2017. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/356/1/MONOGRAFIA_EstudoEnergiaE%c3%b3lica.pdf. Acesso em: 06jan. 2021.

RIBRANT, J.; BERTLING, L. M. Survey of failures in wind power systems with focus on swedish wind Power plants during 1997-2005. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v.22, n.1, p.167-173, fev. 2007.

RIVAS, René E. G. **Uso do método multicritério para tomada de decisão operacional tendo em conta riscos operacionais, à segurança, ambientais e à qualidade**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

ROBITAILLE, Denise. **Root Cause Analysis: Basic Tools and Techniques**. Chico: Paton Press, 2004.

ROMIO, Pedro C. **Modelo para garantia de disponibilidade de turbinas**. 2016. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

ROY, B.; VANDERPOOTEN, D. An overview on “The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works”. **European Journal of Operational Research**, v.99, n.1, p.26-27, 1997.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v.48, p.9-26, 1990.

SÁNCHEZ, Mauricio, S. **Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos**. Bogotá: Ediciones Unidas, 2005.

SANSIGOLO, C. A. Distribuição de probabilidade de velocidade de potência do vento. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p. 207-214, 2005.

SCHIMITT, José C. **Método de análise de falha utilizando a integração das ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2013.

SELVIK, J. T.; AVEN T. A framework for reliability and risk centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, vol. 96, p. 324-331, 2011.

SEQUEIRA, Cláudia D. **A análise de vibrações como ferramenta para melhoria da manutenção em aerogeradores**. 2012. 183 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

SICA, Everthon T. *et al.* Avaliação multicritério de empreendimentos de geração e transmissão de energia elétrica: uma abordagem por meio dos critérios de projetos de MDL. In: **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Recife, nov. 2009.

SILVA, Roterdan M.; BELDERRAIN, Mischel C. N. Considerações sobre métodos de decisão multicritério. In: **XI Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, São José dos Campos, out. 2005.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2000.

STARCREATION. **VAWT**. Disponível em: <http://www.shstarcreation.com/52/i-1114.html>. Acesso em: 11 jan. 2021.

TEOH, P. C. Case, K. Failure modes and effects analysis through knowledge modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 253-260, 2004.

TSOUKUÀS, A. From decision theory to decision aiding methodology. **European Journal of Operational Research**, v.187, p. 138-161, 2008.

VESELY, W. E.; BELHADJ, M.; REZOS, J. T. PRA importance measures for maintenance prioritization applications. **Reliability Engineering and System Safety**, vol 43, p. 307-318, 1994.

VIANA, H. R. G. PCM, **Planejamento e controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

ZAIONS, Douglas R. **Consolidação da metodologia de manutenção centrada em confiabilidade em uma planta de celulose e papel**. 2003. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WALFORD, Christopher A. **Wind turbine reliability**: understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2006.

WANG, John X.; ROUSH, Marvin L. **What every engineer should know about risk engineering and management**. New York: Marcel Dekker, 2000.

WINTER, Caroline A; SEGALOVICH, Raísa N. **Análise das condições de segurança em usinas eólicas**. 100f. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Elétrica) – Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrotécnica, UTFPR, Curitiba, 2018. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11893/1/CT_COELE_2018_1_17.pdf. Acesso em: 03 abr. 2021.

WIREMAN, Terry. **Developing performance indicators for managing maintenance.** New Yor: Industrial Press, Inc., 1998.