

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIO MISARI RODRIGUEZ

**PLANEJAMENTO DE TAREFAS DE MANUTENÇÕES CENTRADAS
EM CONFIABILIDADE PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Ilha Solteira

2017



ANTONIO MISARI RODRIGUEZ

**PLANEJAMENTO DE TAREFAS DE MANUTENÇÕES CENTRADAS
EM CONFIABILIDADE PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

Área de concentração: Automação.

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani

Ilha Solteira

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M678p Misari Rodriguez, Antonio.
Planejamento de tarefas de manutenções centradas em confiabilidade para redes de distribuição de energia elétrica / Antonio Misari Rodriguez. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
164 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Confiabilidade. 2. Indicadores de continuidade. 3. Manutenções centradas em confiabilidade. 4. Métodos de otimização. 5. NSGA-II. 6. Sistema de distribuição.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Planejamento de Tarefas de Manutenções Centradas em Confiabilidade para Redes de Distribuição de Energia Elétrica

AUTOR: ANTONIO MISARI RODRÍGUEZ

ORIENTADOR: JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dr. JONATAS BOAS LEITE
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. DIEGO PIASSON
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade do Estado do Mato Grosso

Ilha Solteira, 16 de agosto de 2017

DEDICO

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, aos meus pais Dulgo e Inocenta, pelo exemplo, força e carinho. A meus irmãos Jhony, Tania, Wilder e Maria pelos gratos momentos ainda que à distância. A minha namorada Danithza pelo apoio e compreensão.

Agradecimentos especiais, ao professor José Roberto Sanches Mantovani pela orientação e dedicação, mas principalmente, pela amizade, confiança e apoio no período que este trabalho foi desenvolvido, e ao professor Rubén Romero Lazaro por sua ajuda e amizade desde minha chegada ao Brasil.

Agradeço aos professores, amigos e colegas do LaPSEE que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho

Agradeço a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira pelo trabalho notável que realizam.

Ao CNPq pelo apoio financeiro fornecido para o desenvolvimento deste trabalho.

*“A única coisa necessária para o triunfo do
mal é que homens bons não façam nada”*

Edmund Burke

RESUMO

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a gestão eficiente de tarefas de manutenções de redes elétricas de distribuição; otimizando os recursos humanos e materiais, permitindo ações efetivas que preservem a qualidade da energia fornecida ao consumidor, procurando atender deste modo os critérios estabelecidos pelo PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). O problema é tratado como um modelo de otimização multi-objetivo não linear dinâmico misto. No modelo proposto, busca-se minimizar os custos com a realização de tarefas de manutenção em equipamentos e componentes dos sistemas de distribuição e maximizar a confiabilidade dos mesmos, sob as restrições dos índices individuais de continuidade e frequência do fornecimento de energia elétrica (o DIC e o FIC), da disponibilidade de recursos financeiros e de equipes de manutenção, entre outras. A modelagem é totalmente centrada sobre os índices de confiabilidade dos equipamentos e componentes, os quais são avaliados por uma abordagem envolvendo modelos probabilísticos de falhas e sistemas de inferência fuzzy. Para a solução do modelo utiliza-se um algoritmo evolutivo NSGA-II.

Palavras-chave: Confiabilidade. Indicadores de continuidade. Manutenções centradas em confiabilidade. Métodos de otimização. NSGA-II. Sistema de distribuição.

ABSTRACT

In this work, the development of a computational tool for the efficient management of maintenance tasks of electrical distribution networks is proposed; optimizing human and material resources, allowing effective actions that preserve the quality of energy supplied to the consumer, thus seeking to meet the criteria established by PRODIST (Procedure for Distribution of Electric Energy in the National Electric System). The problem is treated as a mixed dynamic nonlinear multi-objective optimization model. In the proposed model, it is sought to minimize the costs of performing maintenance tasks on equipment and components of the distribution systems and to maximize their reliability, under the constraints of individual indices of continuity and frequency of electric power supply (DIC and FIC), of the availability of financial resources and maintenance equipment, among others. The modeling is totally focused on the reliability indices of the equipment and components, which are evaluated by an approach involving probabilistic fault models and fuzzy inference systems. For the solution of the model, an evolutionary algorithm NSGA-II is used.

Keywords: Reliability. Indicators of continuity. Reliability-Centric Maintenance. Optimization methods. NSGA-II. Distribution system.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Manutenção Corretiva não Planejada</i>	23
<i>Figura 2 - Manutenção Preventiva</i>	24
<i>Figura 3 - Manutenção Preditiva</i>	25
<i>Figura 4 - Diferença dos tipos de falhas.</i>	27
<i>Figura 5 - Diferença dos tipos das manutenções</i>	27
<i>Figura 6 - Custo incremental da confiabilidade</i>	29
<i>Figura 7- Confiabilidade e custos totais do sistema</i>	30
<i>Figura 8 - Modelo de Dois estados de Markov</i>	31
<i>Figura 9 - Diagrama de Tempo Médio de Estado</i>	32
<i>Figura 10 - Curva banheira: típica curva de taxa de falhas.</i>	37
<i>Figura 11 - Curva do gráfico da função confiabilidade versus o tempo</i>	38
<i>Figura 12 - Modelo da curva banheira com dentes de serra.</i>	38
<i>Figura 13 - Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o ponto de vista da lógica convencional (à esquerda) e da lógica fuzzy (à direita)</i>	41
<i>Figura 14 - Fuzzyficação das variáveis linguísticas de entrada x e y, resultando nos seus respectivos conjuntos fuzzy e graus de pertinência.</i>	44
<i>Figura 15 - Conjuntos fuzzy e graus de pertinência da variável linguística de saída z e respectivos graus de pertinência, produzidos pela aplicação das regras fuzzy 1, 2 e 3</i>	45
<i>Figura 16 - Conjunto fuzzy resultante do processo de agregação das regras fuzzy 1, 2 e 3</i> ..	45
<i>Figura 17 - Modelo de cálculo da confiabilidade dos equipamentos</i>	47
<i>Figura 18 - Fuzzyficação da variável probabilidade de falha.</i>	48
<i>Figura 19 - Fuzzificação dos conjuntos fuzzy de saída adotada para todos os equipamentos analisados</i>	49
<i>Figura 20 - Cálculo do modelo probabilístico para os equipamentos.</i>	52
<i>Figura 21 - Fluxograma de impactos das manutenções na confiabilidade para as metodologias proposta em 1 e 2.</i>	59
<i>Figura 22 - Fluxograma de impactos das manutenções na confiabilidade da metodologia 3.</i>	60
<i>Figura 23 – Representação do cromossomo para a metodologia 1.</i>	80
<i>Figura 24 – Representação do cromossomo para as metodologias 2 e 3.</i>	80
<i>Figura 25 – Pais selecionados para o cruzamento.</i>	81
<i>Figura 26- Filhos resultado do cruzamento.</i>	81

<i>Figura 27 – Processo de mutação pela metodologia 1.</i>	82
<i>Figura 28 - Processo de mutação pela metodologia 2 e 3.</i>	82
<i>Figura 29 – Ordenação por Rank das fronteiras de Pareto.</i>	85
<i>Figura 30 – Esquema do modelo NSGA-II</i>	86
<i>Figura 31 – Taxa de cruzamento adaptativo.</i>	94
<i>Figura 32 – Taxa de mutação adaptativo.</i>	95
<i>Figura 33 – Índices de restauração das manutenções para a metodologia 1.</i>	95
<i>Figura 34 – Índices de restauração no tempo de vida útil para a metodologia 2.</i>	102
<i>Figura 35 – Componentes de uma seção típica.</i>	104
<i>Figura 36 – Sistema teste 1 dividido em seções.</i>	105
<i>Figura 37 – Curva de Pareto otimizada do sistema teste 1.</i>	106
<i>Figura 38 – Perfis de investimento em manutenções para o sistema teste 1.</i>	106
<i>Figura 39 – Perfil de confiabilidade para o sistema teste 1, considerando diferentes planos de manutenção.</i>	107
<i>Figura 40 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha do ponto “P1”</i>	108
<i>Figura 41 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha do ponto “P2”</i>	109
<i>Figura 42 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha do ponto “P3”</i>	110
<i>Figura 43 – Curva de Pareto otimizada para o sistema teste 2.</i>	111
<i>Figura 44 –Planejamentos das manutenções na escolha dos pontos da fronteira de Pareto.</i>	111
<i>Figura 45 – Perfil de confiabilidade na escolha do programa de manutenção da solução do “P1”</i>	112
<i>Figura 46 – Perfil de custos na escolha do programa de manutenção da solução do “P1”.</i>	112
<i>Figura 47 – Perfil de confiabilidade na escolha do programa de manutenção da solução do “P2”</i>	113
<i>Figura 48 – Perfil de custos na escolha do programa de manutenção da solução do “P2”.</i>	113
<i>Figura 49 –Perfil de confiabilidade da solução fornecida por “P3”</i>	114
<i>Figura 50 – Custos mensais com manutenção para a solução fornecida por “P3”.</i>	114
<i>Figura 51 – Curva de Pareto para o sistema teste 1.</i>	115
<i>Figura 52 – Comportamento dos índices de confiabilidades com o tempo para as soluções escolhidas da fronteira de Pareto.</i>	116
<i>Figura 53 – Custos mensais com manutenção para as soluções selecionadas da fronteira de Pareto.</i>	116

Figura 54 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha da solução referente ao ponto “P1”.....	117
Figura 55 –Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha da solução referente ao ponto “P2”.....	118
Figura 56 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha da solução do ponto “P3”.....	120
Figura 57 – Curva de Pareto otimizada para o sistema teste 2.....	121
Figura 58 – Comportamento da confiabilidade do sistema ao longo do horizonte de planejamento pela solução fornecida pelo “P2” da fronteira de Pareto.....	122
Figura 59 – Custos mensais com atividades de manutenção da solução fornecida por “P2”.....	122
Figura 60 – Comportamento do índice de confiabilidade no horizonte de planejamento devido a escolha da solução de “P1”.....	123
Figura 61 – Custos mensais com tarefas de manutenções para a solução de “P1”.....	123
Figura 62 – Curva de Pareto para o sistema teste 1 e horizonte de planejamento de 2anos.....	125
Figura 63 – Comportamento do FEC mensal no horizonte de planejamento para o sistema teste 1.....	125
Figura 64 – Custo mensal em tarefas de manutenções para a solução fornecida pelo pontos P1 e P2 da fronteira de Pareto para o sistema teste 1.....	126
Figura 65 – Curva de Pareto para o sistema teste 1 e horizonte de planejamento de 5 anos.....	127
Figura 66 – Comportamento do FEC mensal acumulado.....	128
Figura 67 – Comportamento do FEC mensal devido a escolha da solução dos pontos extremos para o horizonte de 5 anos.....	128
Figura 68 – Custos de investimentos em manutenções devido a escolha da solução referente aos pontos extremos para o horizonte de 5 anos.....	129
Figura 69 – Curva de Pareto para o sistema teste 2.....	129
Figura 70 –Comportamento mensal do FEC na escolha das soluções dos pontos extremos da fronteira de Pareto.....	130
Figura 71 – Custo mensais com atividades de manutenções para as soluções dos pontos extremos da fronteira de Pareto.....	131

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “probabilidade de falha” dos componentes do SDEE sob estudo.</i>	48
<i>Tabela 2 - Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “Índice de Confiabilidade” dos componentes do SDEE sob estudo.</i>	49
<i>Tabela 3 - Valores de λ para um número de falhas n de 0 a 7 e para $T= 11$ anos para um sistema de distribuição de pequeno porte.</i>	53
<i>Tabela 4 - Custo das tarefas de manutenção.</i>	89
<i>Tabela 5 – O TME (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.</i>	90
<i>Tabela 6 – O TMD (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.</i>	91
<i>Tabela 7 – O TMP (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.</i>	91
<i>Tabela 8 – O TML (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.</i>	91
<i>Tabela 9 - Valores das constantes de execução de manutenções.</i>	92
<i>Tabela 10 - Dados de entrada dos Consumidores.</i>	93
<i>Tabela 11 - Dados das taxas de falha para os equipamentos.</i>	93
<i>Tabela 12 - Valores de controle do algoritmo NSGA-II.</i>	93
<i>Tabela 13 - Índice IRmt de impacto das manutenções nos transformadores de distribuição.</i>	96
<i>Tabela 14 - Índice IRmt de impacto das manutenções nos reguladores de tensão.</i>	97
<i>Tabela 15 - Índice IRmt de impacto das manutenções nos disjuntores.</i>	98
<i>Tabela 16 - Índice IRmt de impacto das manutenções para os bancos de capacitores.</i>	99
<i>Tabela 17 - Índice IRmt de impacto das manutenções para as chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto.</i>	99
<i>Tabela 18 - Índice IRmt de impacto das manutenções nos seccionalizadores.</i>	100
<i>Tabela 19 - Impacto das manutenções para os cabos primários.</i>	101
<i>Tabela 20 – Definição dos $\phi_{(e,m)}^t$ para os equipamentos do sistema.</i>	102
<i>Tabela 21 – Definição dos $\delta_{(e,m)}^t$ para os equipamentos do sistema.</i>	103
<i>Tabela 22 - Dados dos Equipamentos.</i>	139
<i>Tabela 23 - Dados dos Nós.</i>	139
<i>Tabela 24 - Dados dos Equipamentos.</i>	140
<i>Tabela 25 - Dados dos Nós.</i>	145
<i>Tabela 26- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “idade”.</i>	151
<i>Tabela 27- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “esforço”.</i>	152

Tabela 28- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “desequilíbrio”.....	152
Tabela 29- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “idade”.....	152
Tabela 30- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável “esforço”.....	153
Tabela 31 - Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "idade".	153
Tabela 32 - Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "tensão".....	154
Tabela 33- Idade de acordo com a faixa de tensão da rede	154
Tabela 34- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "idade".	154
Tabela 35- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "número de operações".	154
Tabela 36- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "tempo sem manutenção".	155
Tabela 37- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "idade".	155
Tabela 38- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "número de operações".	156
Tabela 39- Universo de discurso para os conjuntos fuzzy da variável "idade".	157
Tabela 40 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos	158
Tabela 41- Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade das chaves	159
Tabela 42 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos Disjuntores.....	159
Tabela 43 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos reguladores de tensão.....	161
Tabela 44 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos transformadores.....	162
Tabela 45 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade das probabilidades de falha	164

LISTA DE ABREVIATURAS

PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.
RCM	Reliability Centered Maintenance
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RT	Regulador de tensão
AE	Algoritmo Evolutivo.
AEM	Algoritmo Evolutivo Multiobjectivo.
AG	Algoritmo Genético.
AT	Alta Tensão.
TR	Transformador de distribuição
CP	Banco de capacitores.
BT	Baixa Tensão.
CS	Chaves de proteção e/ou manobras.
LN	Cabos de rede primária.
SC	Seccionalizadores.
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora.
DJ	Disjuntor.
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Individual por Unidade Consumidora.
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora. Frequência
FEC	Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
HP	Conjunto dos meses do horizonte de planejamento dos planos de manutenções.
hp	Número de meses do horizonte de planejamento, ou seja, $hp = HP $.
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade.
MP	Manutenção (ões) preventiva (s).
MT	Média Tensão
TTF	Time to failure
TTR	Time to repair

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO.....	21
2	MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	22
2.1	MANUTENÇÃO.....	22
	2.1.1 Definição de Manutenção:.....	22
	2.1.2 Tipos de Manutenção.....	22
2.2	CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	28
	2.2.1 Conceitos Gerais da Análise de Confiabilidade.....	30
	2.2.2 Índices e Critérios de Confiabilidade.....	32
	2.2.3 Função de distribuição acumulada e função densidade de probabilidade.....	33
	2.2.4 Taxa de Falhas.....	35
	2.2.5 Modelos de falhas.....	36
2.3	LÓGICA <i>FUZZY</i> E SUA APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS....	39
	2.3.1 Introdução à Lógica Fuzzy.....	39
	2.3.2 Lógica Fuzzy.....	40
	2.3.3 Lógica Fuzzy versus lógica convencional.....	40
	2.3.4 Conjuntos Fuzzy.....	42
	2.3.5 Regras Fuzzy.....	42
	2.3.6 Inferência Fuzzy.....	43
2.4	AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS MEDIANTE A LÓGICA <i>FUZZY</i>	46
	2.4.1 Variável Modelo Probabilístico de Falha.....	46
	2.4.2 Sistema de Inferência Fuzzy da Confiabilidade.....	46
	2.4.3 Fuzzificação dos fatores de falhas dos equipamentos sob estudo.....	47
	2.4.4 Fuzzificação do índice de confiabilidade de saída.....	48
	2.4.5 Definição das regras de inferência.....	50
	2.4.6 Método de Inferência e Defuzzificação.....	50
	2.4.7 Discussão da modelagem dos índices de confiabilidade.....	50
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS PROBABILÍSTICOS.....	51
	2.5.1 Ajuste da metodologia para pequenas amostras pelo processo pontual de renovação	52
	2.5.2 Considerações sobre a composição do sistema de inferência.....	53

3	IMPACTOS DAS MANUTENÇÕES SOBRE A CONFIABILIDADE	54
3.1	IMPACTO DAS MANUTENÇÕES NA CONFIABILIDADE: UM ESTADO DA ARTE	54
3.2	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MANUTENÇÕES.....	56
	3.2.1 Impactos para a Metodologia 1.....	56
	3.2.2 Impactos para a Metodologia 2:.....	57
	3.2.3 Impactos para a Metodologia 3:.....	57
3.3	DEFINIÇÃO DAS ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO.....	60
	3.3.1 Manutenções em Transformadores de Distribuição e Reguladores de Tensão	62
	3.3.2 Manutenções nos Disjuntores das Subestações	63
	3.3.3 Manutenções em Bancos de Capacitores.....	64
	3.3.4 Manutenções em Chaves a Óleo/Vácuo e Hexafluoreto.....	65
	3.3.5 Manutenções em Chaves Fusíveis Simples, Religadoras e By-pass	66
	3.3.6 Manutenções em Cabos.....	67
	3.3.7 Manutenções em Seccionalizadores	68
4	METODOLOGIA PROPOSTA	69
4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA	69
	4.1.1 Considerações Iniciais.....	69
	4.1.2 Codificação das Variáveis do Modelo	70
4.2	TÉCNICA DE SOLUÇÃO.....	75
	4.2.1 NSGA II-Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II	78
	4.2.2 Algoritmos Genéticos	79
	4.2.3 O NSGA-II	83
5	RESULTADOS	88
5.1	DADOS DE ENTRADA	88
	5.1.1 Custos das tarefas de manutenções	89
	5.1.2 Tempos das manutenções preventivas e corretivas	89
	5.1.3 Disponibilidades das equipes de manutenção	91
	5.1.4 Constantes das equações.....	92
	5.1.5 Considerações sobre os consumidores	92
	5.1.6 Taxas de falha dos equipamentos	93
	5.1.7 Parâmetros de controle do algoritmo NSGA-II	93
	5.1.8 Índice de restauração dos equipamentos em estudo	95
	5.1.9 Considerações finais	103

5.2	RESULTADOS OBTIDOS.....	105
5.2.1	Metodologia 1.....	105
5.2.2	Metodologia 2.....	115
5.2.3	Metodologia 3.....	124
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	132
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICE A- SISTEMAS TESTES.....	139
	A.1 SISTEMA TESTE ALIMENTADOR REAL COM 14 EQUIPAMENTOS.....	139
	A.2 SISTEMA TESTE ALIMENTADOR REAL COM 257 EQUIPAMENTOS.....	140
	ANEXO A - MODELAMENTO DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA	151
	ANEXO B - REGRAS DE INFERÊNCIA DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA	158

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o setor de energia elétrica possui forte regulação, com a predominância de agentes do setor privado. Neste cenário o setor energético é um sistema muito regulado, com um mercado justo e ao mesmo tempo competitivo, forçando principalmente as empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica a promoverem mudanças em sua estrutura de negócios e de tomadas de decisões sobre investimentos. Desta forma, um dos maiores desafios das empresas distribuidoras tem sido a busca por um alto nível de confiabilidade de seus sistemas e, principalmente, de continuidade no fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores.

Tradicionalmente, em todo o mundo, esses níveis de confiabilidade mínimos são estabelecidos por órgão reguladores do setor. No Brasil a responsabilidade dessa regulação é da ANEEL-Agencia Nacional de Energia Elétrica, que inicialmente através da resolução número 024 de 27 de janeiro de 2000, (ANEEL, 2000) definiu as disposições acerca dos níveis de continuidade nos sistemas de distribuição de energia elétrica, estabelecendo metas de controle mensais, trimestrais e anuais para a área de concessão de cada empresa, para grupos de clientes e clientes individualmente. Para mensurar esse controle a ANEEL definiu indicadores, dentre os quais se destacam os que tratam da duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC), duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC), duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora (DMIC), frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC) e frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC).

Os fornecimentos ininterruptos de energia são impossíveis de serem praticados. Um sistema de potência é constituído por um número muito grande de componentes/equipamentos suscetíveis à ocorrência de inúmeras falhas, seja pela deterioração natural dos equipamentos no tempo, seja por falhas no seu funcionamento ou devido às intempéries. Além disso, os sistemas de potência estão expostos às ações imprevisíveis da natureza, como queda de raios, tempestades, terremotos, furacões, enchentes e etc. Embora muitas medidas preventivas possam ser adotadas para atenuarem os impactos das ações da natureza e/ou do envelhecimento dos componentes dos sistemas sobre a continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica, o custo global dessas medidas elevaria os preços deste

serviço para valores inviáveis de serem praticados e, mesmo assim, não garantiriam um fornecimento absolutamente ininterrupto. Por outro lado, a demanda por serviços de qualidade (com baixos índices de interrupção) e a fiscalização em relação aos limites dos indicadores de continuidade por parte dos órgãos reguladores, pressionam as empresas de distribuição de energia elétrica a investirem em programas de manutenções preventivas para assegurar a confiabilidade dos seus sistemas. Portanto, essas empresas precisam buscar alternativas viáveis para melhorarem a confiabilidade de seus sistemas, garantindo assim bons índices de continuidade de fornecimento, sem elevarem os custos de produção a valores impraticáveis, ou, preferencialmente, minimizando-os. Nesse sentido, a programação de manutenções centrada em confiabilidade se apresenta como uma técnica promissora para a elaboração de uma ferramenta de otimização capaz de planejar as manutenções preventivas em componentes e equipamentos de sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), que atenda satisfatoriamente os dois objetivos conflitantes.

O planejamento ótimo de tarefas de manutenção de sistemas de distribuição tem sido pesquisado ao longo dos anos, mas esses trabalhos utilizam abordagens tradicionais de manutenção, que se baseiam em ações realizadas periodicamente, ou programadas de acordo com a análise das necessidades e prioridades após a realização de inspeções periódicas. Nessas abordagens não se incluem os impactos das manutenções na confiabilidade do sistema. Neste trabalho propõe-se uma abordagem de manutenções baseada em confiabilidade, comumente chamadas RCM (*reliability centered maintenance*). A RCM em sistemas de distribuição de energia elétrica continua sendo um problema interessante para os pesquisadores da área devido às fortes penalizações econômicas impostas pelo órgão regulador do Brasil, a ANEEL, às empresas distribuidoras de energia elétrica pela perda de fornecimento de energia aos consumidores e, também por suas características complexas, que permitem que o problema possa ser tratado como um modelo de otimização combinatória complexo devido ao grande número de recursos escassos que devem ser gerenciados, tais como equipes de manutenção, limites de recursos econômicos, indicadores individuais de confiabilidade DIC, FIC, DMIC e etc. Para solução do problema de RCM em sistemas de distribuição de energia elétrica propõe-se uma meta-heurística multiobjectivo baseada no algoritmo NSGA-II, considerando-se como funções objetivos o custo de manutenções (preventiva) dos equipamentos e a confiabilidade do sistema, analisados em subperíodos mensais em um horizonte preestabelecido de planejamento. A confiabilidade de cada tipo de equipamento do sistema é modelada através de técnicas baseadas em probabilidades de falhas

e usando sistemas de inferência *fuzzy*, os quais fornecem a confiabilidade do equipamento mensalmente. Desta forma, tem-se como objetivo propor melhorias no modelo desenvolvido em Piasson (2013) e apresentar uma proposta de solução para resolver o problema de planejamento de tarefas de manutenção centradas em confiabilidade de sistemas de distribuição, encontrando-se uma curva de Pareto ótima das funções conflitantes em estudo, escolhendo soluções de boa qualidade via a recuperação da confiabilidade do sistema em um tempo aceitável para o controle do sistema de distribuição, considerando as necessidades de manter os limites de continuidade (FEC – DEC), respeitando os limites de operação e fornecendo ao final uma sequência lógica de tarefas de manutenção que garantam o atendimento dos aspectos operacionais da confiabilidade da rede de acordo com as normas impostas pelas agências reguladoras.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura são encontrados vários métodos que são dedicados à formulação e solução do problema de alocação de recursos e elaboração de programas de manutenção em redes de distribuição, além de trabalhos que consideram apenas a confiabilidade do sistema. A maioria destes trabalhos aborda o problema como um modelo de otimização mono-objetivo. Endrenyi, Anders & Leite da Silva (1998) descrevem o impacto na confiabilidade do sistema de distribuição devido o processo de deterioração dos seus componentes. Os autores apresentam uma formulação para o cálculo do custo de várias alternativas de políticas de manutenção, identificando as melhores através de método Markoviano para avaliação do impacto das inspeções na confiabilidade do sistema. Kuntz, Christie e Venkata (2002) utilizam redes neurais para previsão das taxas de falhas devido a interrupções ocasionadas pela vegetação existente sob os alimentadores. As técnicas *simulated annealing*, algoritmo genético, busca tabu e combinações dessas técnicas foram utilizadas para resolver o problema de definição do cronograma de poda de árvore para redução do custo total para melhorar a confiabilidade do sistema.

Endrenyi *et al.* (2001) partem da hipótese que as empresas distribuidoras de energia elétrica, sempre contam com programas de manutenções para manter seus equipamentos em boas condições de funcionamento por um tempo tão longo quanto possível. A confiabilidade dos sistemas de potência pode ser comprometida devido à ocorrência de falhas em seus componentes, que são restabelecidos às condições normais de funcionamento através da

realização de reparos ou substituições de elementos danificados. Lafraia (2001), assegura que essas manutenções são planejadas utilizando a experiência das equipes e as orientações dos fabricantes dos equipamentos. No entanto, segundo Mendes e Ribeiro (2011), no que concerne às orientações dos fabricantes, especialmente sobre os intervalos entre as manutenções de seus equipamentos, elas podem ser tendenciosas para que se estabeleçam intervalos de manutenções mais curtos do que realmente necessitam, com o intuito de minimizar suas responsabilidades e aumentar suas vendas. Assim, planos de manutenções baseados nestas informações podem ser caros e não necessariamente melhores, pois de acordo com Lafraia (2001), grande parte das falhas é introduzida pelas próprias equipes de manutenção, assim, quanto maior o número de manutenções, maior é a probabilidade do equipamento e/ou sistema apresentarem falhas inseridas pelas equipes de manutenção.

Na política de manutenções centrada na confiabilidade do sistema, os planos de manutenções são otimizados através da análise das consequências das falhas funcionais (operacionais) dos equipamentos, sob o ponto de vista de segurança, meio ambiente, qualidade e custos (LAFRAIA, 2001). De acordo com Rausand (1998) e Mendes e Ribeiro (2011), as MCC possibilitam a redução de custos das manutenções por meio da priorização das funções mais importantes do sistema, agregando atividades de manutenções estritamente necessárias para a continuidade destas funções e evitando ações de manutenções desnecessárias. Janjic e Popovic (2007) propõem uma abordagem de otimização para determinar o plano ótimo de ações de manutenção. O modelo de transição de soluções apoiou-se em uma árvore de decisões que representam os possíveis cenários anuais de manutenções preventivas. Sittithumwat, Soudi e Tomsovic (2004) propuseram uma metodologia usando multiplicadores de taxa de falha para três níveis de manutenção: intensiva, mínima e nenhuma manutenção. As melhores políticas de manutenção são encontradas através da solução de um problema de programação linear binária. Reis (2007) discute o problema de redução dos custos de manutenção, utilizando duas abordagens de meta-heurísticas, o método GRASP (*greedy randomized adaptive search procedure*) e o algoritmo genético híbrido, com o objetivo de minimizar os custos de manutenção, restritos para um nível mínimo de confiabilidade do sistema.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. Neste capítulo introdutório, são apresentados, em linhas gerais, o problema de tarefas de manutenção ótima centradas em confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica, uma breve revisão bibliográfica, o objetivo do trabalho e a técnica de solução que é abordada com mais detalhes nos capítulos posteriores.

No capítulo 2, apresentam-se uma breve introdução à teoria de confiabilidade; conceitos básicos de manutenção; lógica *fuzzy*; confiabilidade centrada na manutenção; o impacto da manutenção na confiabilidade dos equipamentos; otimização multi-objetivo e a meta-heurística NSGA-II.

No capítulo 3, apresentam-se os impactos das manutenções na confiabilidade para as três metodologia propostas e a definição dos níveis de manutenção dos equipamentos presentes nos sistemas reais de distribuição.

No capítulo 4, apresentam-se a metodologia proposta para solução do problema de planos ótimos de manutenções e os critérios para definir as seções .

No capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos com a implementação computacional da metodologia proposta através de testes em alimentadores reais de distribuição de pequeno e grande porte.

No capítulo 6, apresentam-se as considerações finais, conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 MANUTENÇÃO

2.1.1 Definição de Manutenção:

A manutenção pode ser conceituada como: “*as ações necessárias para manter um sistema ou restaurá-lo, para uma condição satisfatória capaz de executar sua função*” (DHILLON, 2006). Kardec e Nasfic (2009) observam que além de permitir a restauração das funções do sistema, a manutenção deve garantir sua confiabilidade e disponibilidade, atendendo ao processo que se destina o sistema com segurança, preservando o meio-ambiente e com custos adequados, sendo essa a missão da manutenção.

Dohi *et. al* (2011) estabelecem que uma política de manutenção em sistemas industriais, que sofrem deteriorações em consequência da sua utilização e seu ciclo de vida, acarretando custos de produção, reduzindo a qualidade e possibilitando a ocorrência de acidentes, é fundamental para mitigar esses problemas.

2.1.2 Tipos de Manutenção

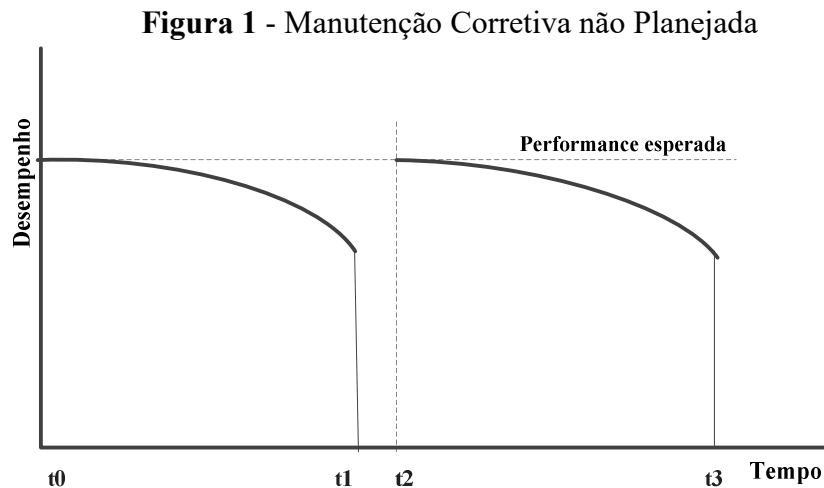
O conceito predominante, até recentemente, era que a missão da manutenção era a de restabelecer as condições originais dos equipamentos/sistemas. O conceito moderno é de que a missão da manutenção é garantir a disponibilidade das funções dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados. Atualmente são definidos seis tipos básicos de manutenção que são abordados nas próximas subseções.

2.1.2.1 Manutenção Corretiva

A Manutenção corretiva é a atuação para a correção da falha ou do desempenho menor que o esperado, onde a ação principal é corrigir ou restaurar e pode ser dividida em duas classes:

2.1.2.2 Manutenção Corretiva Não Planejada

Neste tipo de manutenção efetua-se a correção da falha de maneira aleatória, quando ela ocorre. Na Figura 1, representa-se, de forma ilustrativa, o desempenho ao longo do tempo de um determinado equipamento ou sistema submetido a manutenções corretivas não planejadas.



Fonte: Adaptada de Nascif (2009).

(t_0-t_1) – tempo de funcionamento 1.

(t_1-t_2) – tempo de manutenção corretiva não planejada.

(t_2-t_3) – tempo de funcionamento 2.

2.1.2.3 Manutenção Corretiva Planejada

A manutenção corretiva planejada é a correção de desempenho menor do que o esperado ou da falha, por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função do acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a falha. A manutenção executada de forma planejada tem um custo menor, é executada de forma mais rápida e segura em relação a uma manutenção executada de forma não planejada. A característica principal da manutenção corretiva planejada, que é executar a manutenção por uma decisão gerencial, é função da qualidade de informações fornecidas pelo acompanhamento preditivo do equipamento.

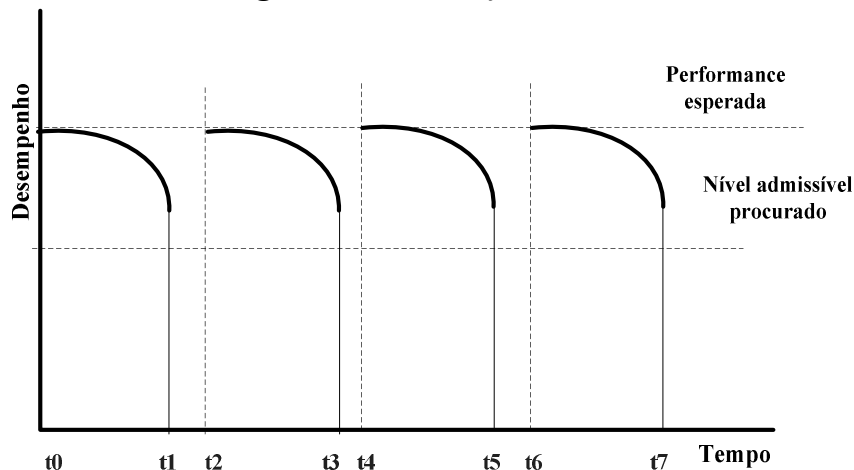
2.1.2.4 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho do sistema ou processo industrial, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. A ação principal neste tipo de

manutenção é prevenir. Em função das dificuldades de definir corretamente estes intervalos, podem ocorrer duas situações:

- A ocorrência de falhas antes de se completar o período estimado pelo mantenedor para a intervenção;
- Abertura do equipamento/reposição de componente prematuramente.

Figura 2 - Manutenção Preventiva



Fonte: Adaptada de Nascif (2009).

(t_0-t_1) – tempo de funcionamento 1.

(t_1-t_2) – tempo de manutenção preventiva.

(t_2-t_3) – tempo de funcionamento 2.

(t_3-t_4) – tempo de manutenção preventiva.

(t_4-t_5) – tempo de funcionamento 3.

(t_5-t_6) – tempo de manutenção preventiva.

(t_6-t_7) – tempo de funcionamento 4.

Na Figura 2 representa-se, de forma ilustrativa, o desempenho de um determinado equipamento ou sistema ao longo do tempo, submetido a um programa de manutenção preventiva. Pode ser observada neste exemplo a necessidade de realização de manutenção corretiva não planejada, a exemplo de equipamentos ou sistemas submetidos a este tipo de manutenção.

2.1.2.5 *Manutenção Preditiva*

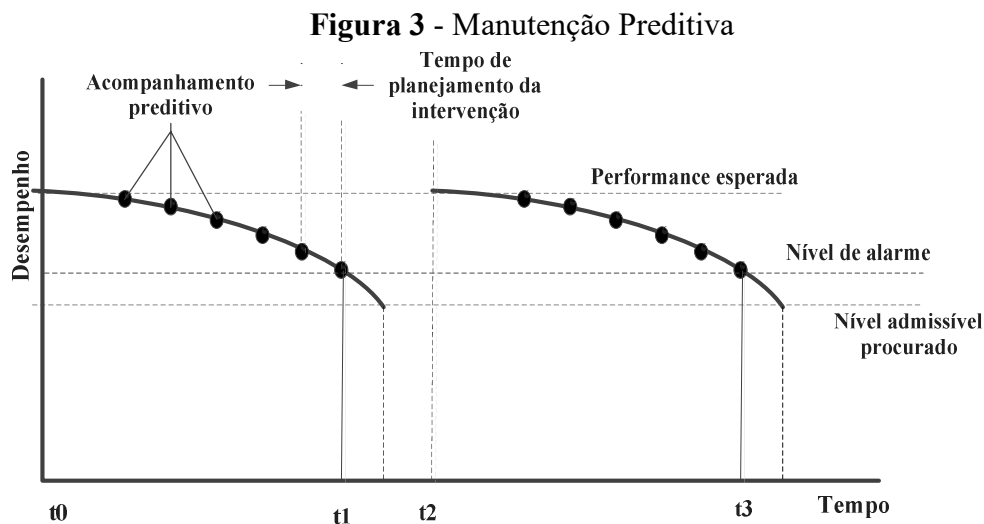
A manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificações de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. A ação

principal é prever. Este tipo de manutenção é a primeira grande quebra de paradigma na manutenção e tanto mais se intensifica quanto mais o conhecimento tecnológico desenvolve equipamentos que permitam a avaliação confiável das instalações e sistemas operacionais em funcionamento.

São condições básicas para a adoção da manutenção preditiva em um equipamento, sistema ou instalação:

- Devem permitir algum tipo de monitoramento/medição;
- Devem merecer este tipo de ação (relação custo vs. benefício);
- Causas de falhas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada;
- Acompanhamento, análise e diagnóstico sistematizado.

Na Figura 3 representa-se, de forma ilustrativa, o desempenho de um equipamento ou sistema ao longo do tempo, submetido a um programa de manutenção preditiva, com intervenção de manutenção corretiva planejada baseada no acompanhamento preditivo do equipamento ou sistema.



Fonte: Adaptada de Nascif (2009).

(t_0-t_1) – tempo de funcionamento 1.

(t_1-t_2) – tempo de manutenção corretiva planejada.

(t_2-t_3) – tempo de funcionamento 2.

O conceito de manutenção preditiva possui uma outra abordagem proposta por Almeida (2008): “A manutenção preditiva é um meio de se melhorar a produtividade, a qualidade do produto, o lucro e a efetividade global de nossas plantas industriais de

manufatura e de produção. A manutenção preditiva não é meramente monitoramento de vibração ou análise de óleo lubrificante ou de imagens térmicas ou qualquer das outras técnicas de teste não destrutivo que têm sido marcadas como ferramentas de manutenção preditiva”.

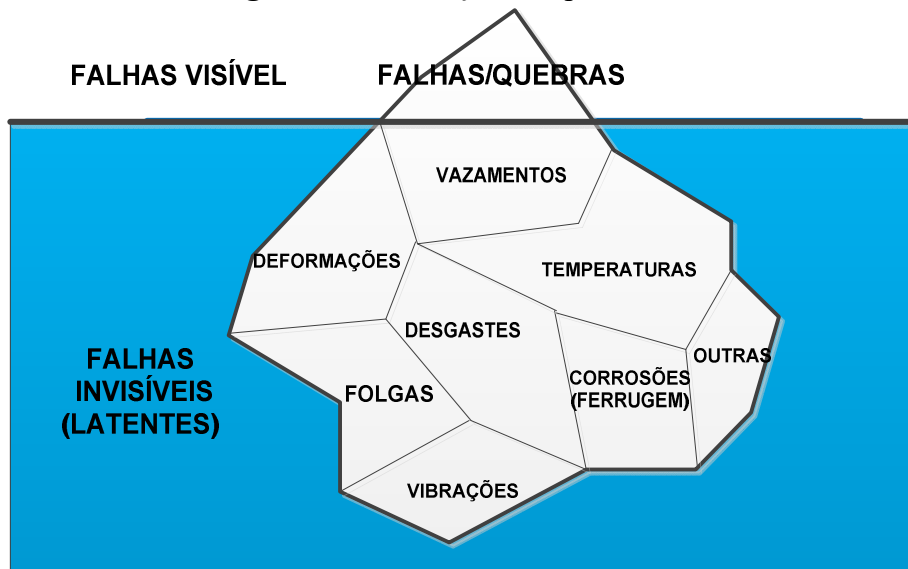
A manutenção preditiva é uma filosofia ou atitude que usa a condição operacional real do equipamento e sistemas da planta industrial para otimizar a operação total da planta industrial. Um programa abrangente de gerência de manutenção preditiva utiliza uma combinação das ferramentas mais efetivas em termos de custos para obter a condição operativa real de sistemas críticos da planta industrial, baseando-se nestes dados reais, todas as atividades de manutenção são programadas numa certa base, conforme necessário.

2.1.2.6 Manutenção Detectiva

A manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção. A ação principal neste caso é detectar. Como exemplo simples e objetivo, é possível citar o botão de teste de lâmpadas de sinalização e alarme em painéis. A identificação de falhas ocultas é primordial para garantir a confiabilidade. Em sistemas complexos, essas ações só devem ser levadas a efeito por pessoal da área de manutenção, com treinamento e habilitação para tal, assessorado pelo pessoal de operação.

Para um melhor entendimento dos tipos de manutenção é aplicado a visão do “iceberg de manutenção” a qual induz o entendimento que as avarias, mesmo que não conformidades e mesmo que falhas invisíveis possam estar presentes nas máquinas e/ou equipamentos de forma latente, se não cuidadas a tempo, podem vir à tona e provocar a quebra dos mesmos, pois, aí se torna visível a todo mundo.

Figura 4 - Diferença dos tipos de falhas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 4, é apresentada a análise da visão do *iceberg* para as falhas de um equipamento em estudo, na qual pode-se ressaltar que só as quebras são visíveis, porém o equipamento tem ainda muitas falhas escondidas, as quais devem ser analisadas.

Figura 5 - Diferença dos tipos das manutenções



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 5, é apresentada a análise da visão do *iceberg* para os tipos de manutenção de um equipamento em estudo, na qual pode-se ressaltar que só as ações de manutenções corretivas são visualmente percebidas pelos equipes de manutenções enquanto as

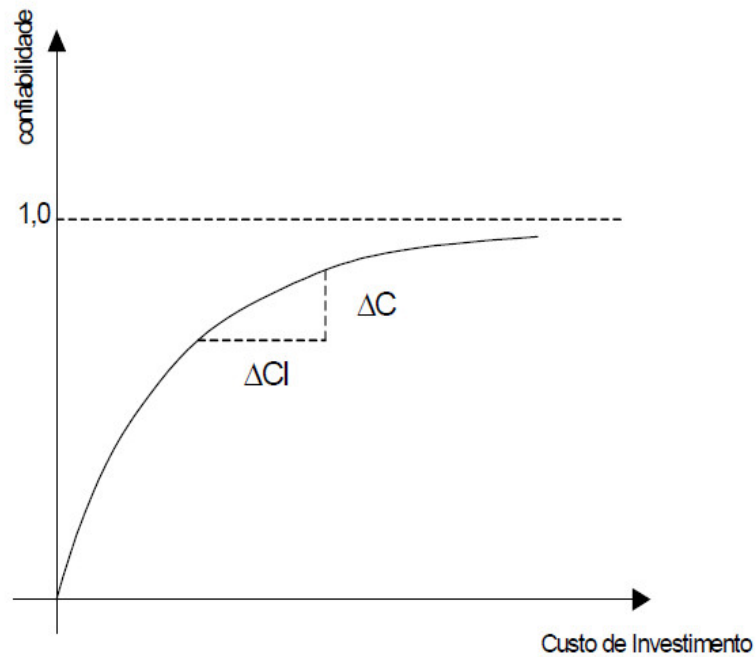
manutenções preventivas, detectivas e preditiva são percebidas só pelo pessoal capacitado com equipamentos de detecção sofisticados.

2.2 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A confiabilidade é a capacidade de um dispositivo desempenhar sua função durante o período de tempo desejado, sob as condições operativas encontradas. Desta forma, um dos grandes desafios para os profissionais envolvidos com o planejamento e operação de um sistema elétrico de potência é encontrar um ponto ótimo de suprimento de energia aos consumidores entre menor custo e a maior confiabilidade possível.

A probabilidade de um sistema atender a seus consumidores de maneira contínua e adequada, ou seja, com maior confiabilidade, está diretamente relacionada com os investimentos realizados durante as fases de planejamento da expansão e de operação do sistema. Entretanto, grandes investimentos resultam em custos finais elevados e, conseqüentemente, tarifas altas. A análise inversa também pode ser feita, ou seja, a redução de investimentos resulta em custos finais pequenos e num sistema pouco confiável. Uma questão bastante difícil de ser respondida diz respeito a quanto e como investir no sistema elétrico para obter a maior confiabilidade. A confiabilidade e a economia formam a principal regra no processo de decisão no planejamento e operação de um sistema. O primeiro passo é analisar como a confiabilidade de um produto está relacionada ao custo. O gráfico da Figura 6 mostra que um aumento da confiabilidade é obtido a partir de um aumento de investimento.

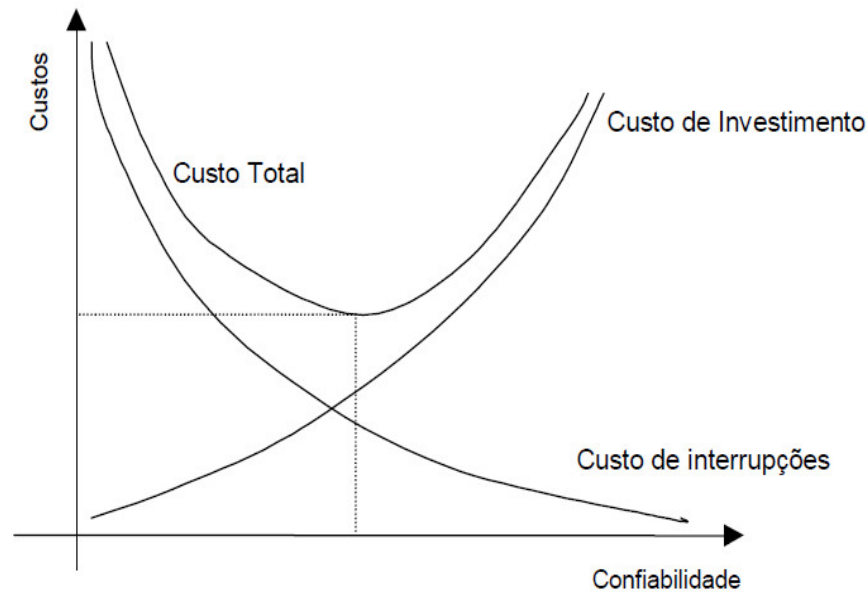
O custo incremental da confiabilidade, $\Delta CI/\Delta C$, é uma das maneiras de decidir se um investimento no sistema é adequado ou não, onde ΔCI é a variação do custo incremental e ΔC é a variação da confiabilidade.

Figura 6 - Custo incremental da confiabilidade

Fonte: Adaptada de Nascif (2009).

Comparando-se os custos da confiabilidade (investimento necessário para atingir um certo nível de confiabilidade) com o de interrupções, um outro tipo de análise pode ser feito. A curva de custo vs. confiabilidade mostrada na Figura 6 apresentam a ideia de que uma maior confiabilidade só pode ser obtida através de um aumento no custo de investimento e conseqüentemente na diminuição do custo de interrupções. O custo total será a soma destes dois custos individuais representados por uma curva cujo ponto mínimo representa o ponto ótimo da confiabilidade.

Figura 7- Confiabilidade e custos totais do sistema



Fonte: Adaptada de Nascif (2009).

Nesta análise tem-se, porém, duas dificuldades. Na primeira, os índices calculados são obtidos somente de modelos aproximados e na segunda, a análise do custo de interrupção depende tanto da frequência como da duração da interrupção.

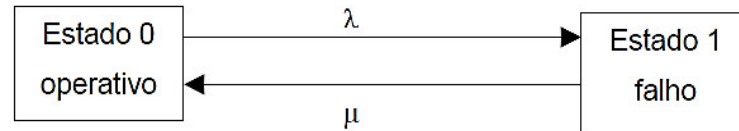
2.2.1 *Conceitos Gerais da Análise de Confiabilidade*

Alguns conceitos importantes para a análise da confiabilidade de sistemas de potência são apresentados a seguir (CEPEL,1998).

- **Cenário:** é formado pelo conjunto de informações relativas à configuração do sistema, nível de carga e condições hidrológicas. A probabilidade da ocorrência de um cenário é dada pelo produto das probabilidades de seus componentes e esta é utilizada nas análises de índices de confiabilidade globais (anuais).
- **Caso-base:** é um cenário sendo analisado para um determinado ponto de operação dentre todos os possíveis. Um caso-base é caracterizado por apresentar um perfil particular de tensões nas barras e despacho de potências ativa e reativa. Na realidade, para um único cenário pode-se ter diversos casos-bases.
- **Contingências:** são alterações introduzidas no caso-base, resultantes de eventos aleatórios que ocorrem em um ou mais componentes do sistema que podem ou não provocar mudanças no estado do sistema como um todo.

- **Estado de um sistema/componente:** define a condição operativa do sistema / componente. Por exemplo, a grande maioria dos componentes é representada pelo modelo a dois estados de Markov (estado operativo e falho), como mostra-se na Figura 8, onde λ é a taxa de falha e μ é a taxa de reparo.

Figura 8 - Modelo de Dois estados de Markov.



Fonte: Adaptada de Zapata (2010).

- **Taxa de transição:** é a relação entre o número de vezes que uma transição ocorre num dado estado e o tempo gasto naquele estado. Para a modelagem do sistema, basicamente, são necessários dois tipos de taxas: taxa de falha (λ) e taxa de reparo (μ), como ilustra-se na Figura 8, cujos significados são dados por (1) e (2):

$$\lambda = \frac{(\text{número de falhas de um componente})}{(\text{período de tempo total que o componente esteve em falha})} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{(\text{número de reparos de um componente})}{(\text{período de tempo total que o componente esteve em reparo})} \quad (2)$$

- **MTTF** (*mean time to failure*) - tempo médio para falha: valor médio dos tempos de funcionamento:

$$MTTF = m = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

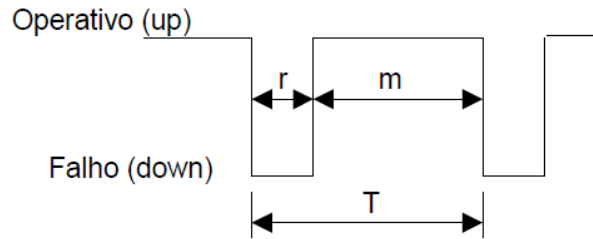
- **MTTR** (*mean time to repair*) – tempo médio para reparo: valor médio dos tempos de reparo:

$$MTTR = r = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

- **MTBF** (*mean time between failure*) – tempo médio entre falhas: tempo médio de funcionamento de um componente reparável entre duas falhas consecutivas:

$$MTBF = m + r = T = \frac{1}{f} \quad (5)$$

Sendo f a frequência e T o período.

Figura 9 - Diagrama de Tempo Médio de Estado

Fonte: Adaptado de Zapata(2010) .

- Disponibilidade - P : é a probabilidade de um componente permanecer no estado de operação:

$$P = \frac{m}{m+r} = \frac{\mu}{\mu+\lambda} \quad (6)$$

- Indisponibilidade - \bar{P} : é a probabilidade de um componente permanecer no estado falho:

$$P = \frac{r}{m+r} = \frac{\lambda}{\mu+\lambda} \quad (7)$$

2.2.2 Índices e Critérios de Confiabilidade

A definição de confiabilidade apresentada no início deste capítulo é fundamentada em quatro aspectos: probabilidade, desempenho, tempo e condições de operação. A probabilidade é o índice clássico usado para avaliar a confiabilidade e fornece o primeiro índice de adequação do sistema. Muitos outros índices são calculados dependendo do sistema e suas solicitações. Todos os índices importantes são chamados de índices de confiabilidade; neste caso o termo confiabilidade é utilizado de forma genérica descrevendo todos estes índices desde que estejam relacionados com probabilidade.

De acordo com Billinton (1986), os índices de confiabilidade de SDEE dependem de fatores/variáveis como:

1. Taxa de falha (λ);
2. Taxa de reparação (μ);
3. Tempo para falha (ttf);

4. Tempo entre falhas (tbt_2);
5. Tempo até o reparo ou restauração (ttr_3);

Essas variáveis são de natureza aleatória e, portanto, seus valores não podem ser preditos de forma exata, as quais então somente podem ser expressas em termos de probabilidades. Assim, sob esta ótica e de acordo Eletrobras (1982), a confiabilidade de um item/equipamento pode ser expressa como uma probabilidade.

A confiabilidade $C(t)$ de um equipamento pode ser definida como a probabilidade P deste sobreviver por um tempo t . Ou seja, é o grau de certeza que se tem que sua vida T exceda um valor estipulado t . Matematicamente, $C(t)$ é expressa por:

$$C(t) = P[T > t] \quad (8)$$

Desta forma, o estudo da confiabilidade pode ser realizado através da teoria da probabilidade e da estatística uma vez que, de acordo com Zapata (2011), a primeira contempla a porção da teoria matemática encarregada do planejamento dos modelos para estudar fenômenos aleatórios; e a segunda, se encarrega da aplicação desta teoria aos problemas reais.

Nas seções subsequentes uma breve abordagem dos conceitos básicos destas teorias é apresentada para fundamentar os conceitos da teoria da confiabilidade.

2.2.3 Função de distribuição acumulada e função densidade de probabilidade

Para uma variável aleatória T , a probabilidade de que seu valor seja menor ou igual a um número real t , é dada pelo valor de sua função de distribuição acumulada, $F(t)$. Tem-se, portanto, que:

$$F(t) = P[T \leq t] \quad (9)$$

De acordo com Brown (2009), funções de distribuição acumuladas são equações matemáticas que permitem que uma grande quantidade de informações, características e comportamentos sejam descritos por um pequeno número de parâmetros. Além disso, toda função de distribuição acumulada $F(t)$, tem uma função densidade de probabilidade associada, $f(t)$, que representa a probabilidade de que t seja um valor específico. Logo, $f(t)$ é tal que:

$$0 \leq f(t) \leq 1 \quad (10)$$

Sendo que $f(t)=0$ indica que a probabilidade de ocorrência de t ser um valor específico é nula, e $f(t)=1$ indica certeza absoluta de ocorrência desse evento. Outra característica da função densidade de probabilidade, é que sua integral sobre todos os resultados possíveis (a área abaixo de sua curva) deve ser igual à unidade, ou seja

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)dt = 1 \quad (11)$$

A função de densidade de probabilidade se relaciona com a função de distribuição acumulada, da seguinte forma:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(X)dX = P[T \leq t] = F(t) \quad (12)$$

Porém, quando a variável t representa tempo, a qual assume valores no intervalo $[0,+\infty)$, tem-se;

$$\int_0^{+\infty} f(t)dt = 1 \quad (13)$$

$$\int_0^t f(X)dX = P[T \leq t] = F(t) \quad (14)$$

Logo, a função de distribuição acumulada fornece a probabilidade de que $f(t)$ seja igual a, ou menor que t .

Da equação (14), segue que:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (15)$$

Por sua vez, $C(t) = 1 - F(t)$, então:

$$C(t) = 1 - \int_0^t f(X)dX \quad (16)$$

Também é possível determinar a confiabilidade de itens/equipamentos em termos de valores populacionais, embora seja difícil e, às vezes impraticável, observar a população completa de forma a obter esses valores. Contudo, em termos populacionais, a confiabilidade $C(t)$ pode ser determinada pela relação:

$$C(t) = \frac{N(t)}{N} \quad (17)$$

Onde $N(t)$ é o número de componentes sobreviventes de uma população no tempo t e N é o total de componentes da população.

2.2.4 Taxa de Falhas

O termo falha é empregado para caracterizar o término das funções requeridas de um equipamento. Entre as causas que provocam a falha de um equipamento, o processo de deterioração do item ao longo do tempo, é um dos principais fatores. Neste caso, modelos de taxa de falhas são aplicados para determinar o provável momento da falha de um item. No estudo do comportamento das falhas dos componentes de um sistema está o cerne da confiabilidade do sistema. Entretanto, a questão é muito mais complexa, pois os modelos de taxas de falhas variam de acordo com as características de cada componente do sistema. Além disso, algumas falhas são resultado de eventos independentes do sistema, como por exemplo, a queda de um raio.

Em termos populacionais, a taxa de falha média $\bar{\lambda}$, de um componente é a relação entre a quantidade de componentes que falharam e o número de componentes que sobreviveram em um intervalo de tempo Δt . Mais especificamente, se $N(t_1)$ é o número de componentes sobreviventes de uma população no tempo t_1 e $N(t_2)$ é o número de componentes sobreviventes dessa população no tempo t_2 , então, a taxa de falha $\bar{\lambda}$ desse componente no intervalo de tempo é dada pela equação (18).

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{N(t_1) - N(t_2)}{\Delta t \cdot N(t_1)} \quad (18)$$

No entanto, muitas vezes, é quase impossível ou inviável estudar a população dos componentes do sistema para determinar o valor verdadeiro da taxa de falhas do componente. Neste caso, o valor é estimado a partir de uma amostra dessa população, por meio de uma análise probabilística, onde o valor obtido é o valor limite de um intervalo de confiança. Assim, estatisticamente, pode-se dizer que o valor da taxa de falha $\bar{\lambda}$, para um período de tempo de t_1 a t_2 , é a probabilidade condicionada, no instante t_1 , de um item falhar no intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, dado que ele sobreviveu por um tempo t_1 , dividido por Δt . Ou seja,

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{P\left[t_1 < T \leq \frac{t_2}{T} > t_1\right]}{\Delta t} \quad (19)$$

Ou ainda,

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{[1 - F(t_1)]} \frac{1}{\Delta t} \quad (20)$$

Considerando agora a equação (8):

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{C(t_1) - C(t_2)}{C(t_1)} \frac{1}{\Delta t} \quad (21)$$

Fazendo com que $\Delta t \rightarrow 0$, obtém-se a taxa instantânea $\lambda(t_1)$, ou seja,

$$\lambda(t_1) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t_1, t_2) \quad (22)$$

Fazendo agora $t_1 = t$ e $t_2 = t + \Delta t$, tem-se:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t, t + \Delta t) \quad (23)$$

De (21) e (18) segue que:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{C(t)} \frac{d}{dt} C(t) \quad (24)$$

Utilizando agora as equações (15) e (16), tem-se que:

$$f(t) = -\frac{d}{dt} C(t) \quad (25)$$

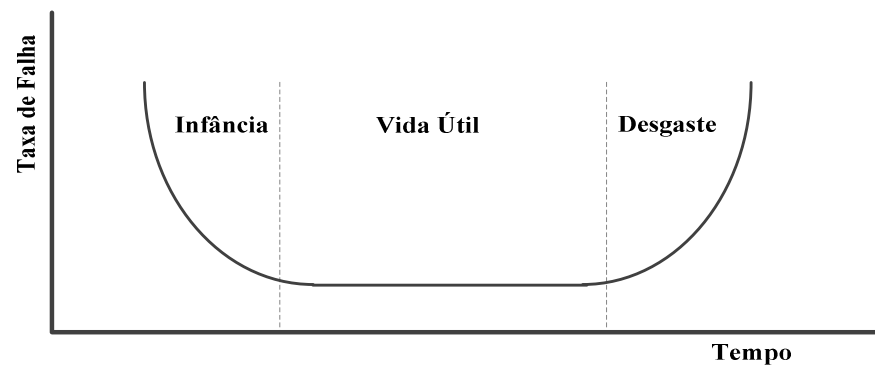
E, conseqüentemente,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)} \quad (26)$$

2.2.5 Modelos de falhas

Os modelos de falhas, ou de taxas de falhas, são funções que descrevem o comportamento da taxa de falha de um item ao longo do tempo. De acordo com Eletrobras (1982). Este modelo está apresentado na Figura 10 e é conhecido como a curva da banheira (*bathhtub*).

Figura 10 - Curva banheira: típica curva de taxa de falhas.



Fonte: Adaptada de Brown (2009).

A curva da banheira apresenta três fases, uma de decrescimento, uma de valor constante e uma de crescimento. Na primeira fase, tem-se um período de alta taxa de falha que decresce com o tempo. Este período é conhecido como período de "mortalidade infantil" ou "período de adaptação" (BROWN, 2009). Ainda segundo Brown (2009), certos equipamentos, principalmente elétricos, recentemente instalados têm uma taxa de falha relativamente alta, devido que há possibilidade de que o equipamento tenha falhas de fabricação e/ou foi danificado durante o transporte ou durante a instalação, ou ainda, devido à uma instalação incorreta. Com o tempo, essa taxa decai para um valor constante, correspondente à fase de operação normal ou vida útil do equipamento.

A fase de operação normal é caracterizada por uma taxa de falha constante e, conseqüentemente, nesta fase, podem-se aplicar modelos de distribuição exponencial para determinar a probabilidade de um item sobreviver após um tempo t . Assim, considerando então,

$$\lambda(t) = \lambda$$

e, de acordo com a equação (24), tem-se:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{C(t)} \frac{d}{dt} C(t)$$

$$\int_0^t -\lambda dx = \int_0^t \frac{d}{C(x)} C(x) \quad (27)$$

$$-\lambda t + k = \ln|C(t)|$$

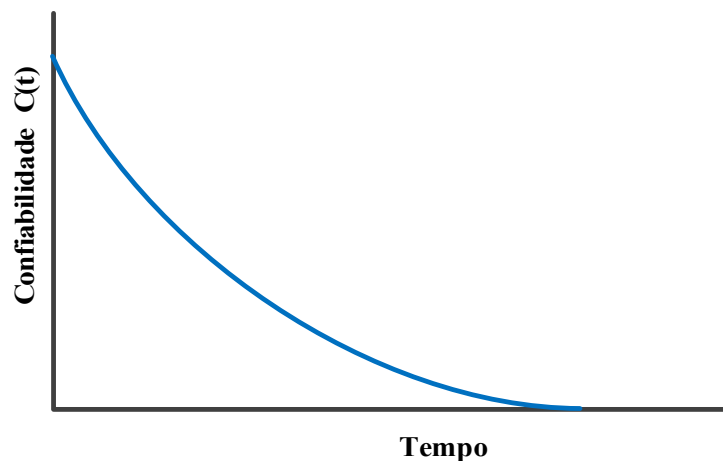
$$C(t) = Ke^{-\lambda t}$$

Sendo $C(0) = 1$ (condição inicial), tem-se:

$$C(t) = e^{-\lambda t} \quad (28)$$

A equação 28, fornece a probabilidade de um item ter sobrevivido no tempo t . De acordo com o esboço de $C(t)$ na Figura 11, pode-se verificar que a confiabilidade é uma função decrescente no tempo, mesmo considerando a taxa de falha constante.

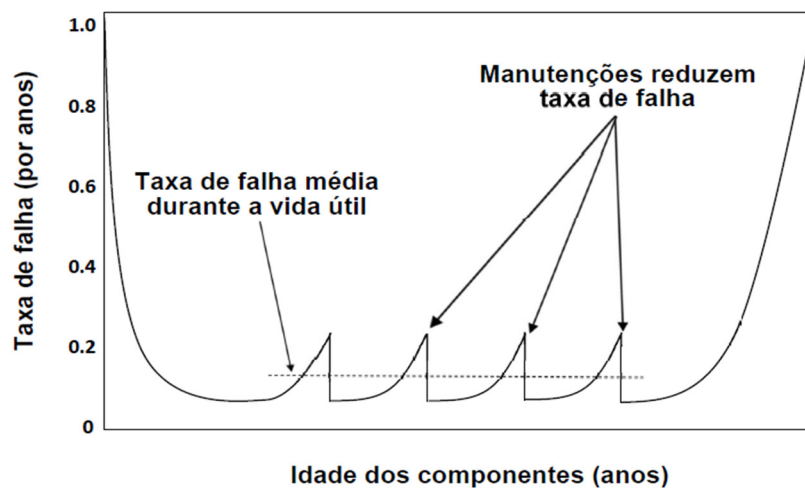
Figura 11 - Curva do gráfico da função confiabilidade versus o tempo .



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com as devidas manutenções, o equipamento pode permanecer na fase de operação normal por um longo período. Contudo, entre manutenções do equipamento nesta fase, é mais provável que a taxa de falha seja crescente com o tempo. Assim, de acordo com Brown (2009), um modelo mais realístico seria o modelo da banheira com dentes de serra.

Figura 12 - Modelo da curva banheira com dentes de serra.



Fonte: Adaptada de Brown (2009).

Imediatamente após uma manutenção bem-sucedida, a taxa de falhas do equipamento retorna ao seu nível mais baixo da fase e reinicia seu comportamento de ascensão até uma nova manutenção ou até o fim da sua vida útil. Após a vida útil do equipamento, a taxa de falhas começará a aumentar à medida que o componente começa a se desgastar, e por isto esta fase é conhecida como o período de desgaste do equipamento (BROWN, 2009). Durante o período de desgaste do equipamento a taxa de falha de um componente cresce exponencialmente até a falha do equipamento.

A curva banheira com dentes de serra, embora possa modelar melhor o comportamento da taxa de falhas ao longo do tempo, tomando-se como constante a média da variação da taxa de falhas no período de vida útil do equipamento, a curva banheira com dentes de serra torna-se uma curva banheira padrão, conforme Figura 12. Portanto, pode-se considerar a curva banheira como uma aproximação da curva banheira com dentes de serra.

Em cada período da vida útil, entretanto, os equipamentos podem apresentar um padrão de distribuição de falhas distinto uns dos outros, devido a sua natureza, condições inerentes à funcionalidade, entre outros diversos fatores que podem influenciar na confiabilidade destes ao longo do tempo. A compreensão do comportamento das falhas e dos fatores que afetam a confiabilidade dos equipamentos é essencial para uma análise dos sistemas compostos por estes equipamentos.

Na seção seguinte, uma abordagem de inferência da confiabilidade dos equipamentos de um SDEE utilizando lógica *fuzzy* e modelos probabilísticos de falhas é apresentada.

2.3 LÓGICA FUZZY E SUA APLICAÇÃO NA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS

2.3.1 Introdução à Lógica Fuzzy

A lógica convencional ou clássica usa distinções bem definidas para separar conjuntos. Por exemplo, pode-se dizer que uma pessoa com 1,70m é considerada alta ou mediana, nunca os dois. Isso força a construção de regras que diferenciem membros dos não membros de uma classe. Essa divisão, muitas vezes, é um processo complicado e que não reflete a realidade do problema a ser modelado. Por outro lado, a lógica *fuzzy* reflete a maneira como as pessoas pensam, tentando modelar o seu senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum.

Como consequência, a introdução da lógica *fuzzy* tem conduzido as pesquisas para sistemas inteligentes mais humanos e mais adequados à realidade.

Nas próximas seções são apresentados os principais conceitos concernentes à lógica *fuzzy* e aos conjuntos *fuzzy*, que fundamentam essa teoria, bem como as regras de inferência presentes nesse contexto. Por fim, são elencados aspectos positivos e limitações que essa lógica não clássica apresenta.

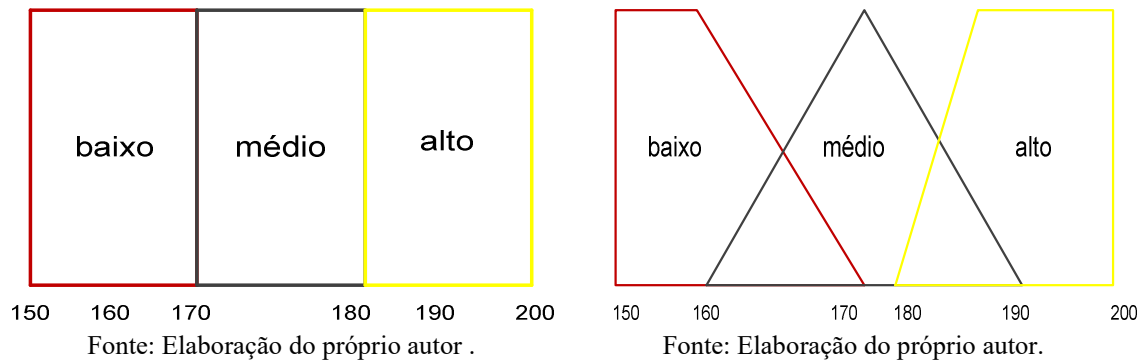
2.3.2 *Lógica Fuzzy*

Tomando como exemplo a frase a seguir: Embora o transformador esteja um pouco carregado, pode-se utilizá-lo por um tempo. Nessa frase existem dois termos (um pouco e um tempo) bastante subjetivos e difíceis de representar. Para um especialista que esteja conversando com outro especialista, o entendimento seria normal; no entanto, durante o processo de aquisição, fica bastante complicado para o engenheiro de conhecimento entender e representar esse tipo de conhecimento. Dessa forma, uma maneira de tentar solucionar o processo de representação de conhecimento impreciso é através da lógica *fuzzy*. A Lógica *fuzzy* tem como principal objetivo a modelagem computacional do raciocínio humano, impreciso, ambíguo e vago.

2.3.3 *Lógica Fuzzy versus lógica convencional*

A teoria clássica de conjuntos permite o tratamento de classes de objetos e suas inter-relações em um universo definido. Nessa teoria, a pertinência de um dado elemento com relação a um conjunto refere-se ao fato de tal elemento pertencer ou não a esse conjunto. De forma ilustrativa, considere o gráfico apresentado no lado esquerdo da figura 13, que representa um exemplo típico da teoria clássica e descreve a altura de uma pessoa através de três conjuntos: baixo, médio e alto. Nesse exemplo, dado um elemento x qualquer, o mesmo pertencerá a um dos conjuntos do gráfico; por exemplo, se $x = 1,65$, então x pertence ao conjunto baixo e não aos demais, ou seja, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto e, além disso, tal elemento não pertence a mais de um conjunto.

Figura 13 - Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o ponto de vista da lógica convencional (à esquerda) e da lógica *fuzzy* (à direita)



Ao contrário da lógica convencional, a lógica *fuzzy* utiliza a ideia de que todas as coisas admitem (temperatura, altura, velocidade, etc.) graus de pertinências. Com isso, a lógica *fuzzy* tenta modelar o senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum do ser humano. Ainda tomando como exemplo o gráfico da Figura 13, dados dois elementos $x_1 = 1,69$ e $x_2 = 1,71$, se a lógica clássica for utilizada, esses dois elementos pertencem a classes diferentes, x_1 pertencendo à classe baixo e x_2 à classe médio. No entanto, na realidade fica difícil de dizer que uma pessoa com $1,69$ m e outra com $1,71$ m pertencem às classes diferentes.

Na lógica *fuzzy*, por outro lado, tanto o x_1 quanto o x_2 têm graus de pertinências aos conjuntos *fuzzy* definidos, que podem variar de 0 a 1. Em outras palavras, enquanto que a tomada de decisão na teoria clássica seria como a da expressão 29, a da lógica *fuzzy* seria como a da expressão 30, considerando um conjunto A e um elemento x com relação a esse conjunto.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0, & \text{se, e somente se, } x \notin A \end{cases} \quad (29)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin A \\ 0 \leq \mu(x) \leq 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \end{cases} \quad (30)$$

Dessa forma, a lógica *fuzzy* pode ser considerada como um conjunto de princípios matemáticos para a representação do conhecimento baseado no grau de pertinência dos termos (graus de verdade). Como pode ser observado na expressão 30, o intervalo de pertinência é $[0,1]$, onde 0 significa que um elemento não pertence a um determinado conjunto, 1 significa completa pertinência ao conjunto, e valores entre 0 e 1 representam graus parciais de pertinências. Assim, na lógica *fuzzy*, um elemento pertence a um conjunto

com um certo grau de pertinência, fazendo com que uma determinada sentença possa ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa. Além do mais, um mesmo elemento pode ter graus de pertinências diferentes de 0 para mais de um conjunto *fuzzy*.

2.3.4 Conjuntos Fuzzy

Como discutido anteriormente, na lógica clássica os conjuntos são bem definidos, de modo que um elemento pertence ou não a um conjunto; se pertencer, pertence somente a um. Isso evita que ambiguidades apareçam e tornam a lógica mais simples. Ainda considerando o exemplo da utilização de conjuntos para separar pessoas pela altura, uma pessoa com 1,69m seria considerada uma pessoa de altura baixa, se assim fosse definido, estando apenas nesse conjunto e em nenhum outro; já uma pessoa com 1,71m faria parte do conjunto das pessoas medianas, e somente deste. Todavia, na realidade, fica bem difícil identificar que pessoas com uma diferença de altura tão mínima pertencem a conjuntos diferentes. Por outro lado, pela ótica da lógica *fuzzy*, ter-se-ia as duas pessoas com certo grau de pertinência aos dois conjuntos, variando entre 0 e 1, ou seja, ter-se-ia a tomada de decisão baseada em fatores mais humanos, mais maleáveis. Assim, pode-se concluir que os conjuntos *fuzzy* que classificam os elementos de um dado universo são menos rígidos do que aqueles utilizados na teoria clássica, visto que eles admitem graus parciais de pertinência.

2.3.5 Regras Fuzzy

As regras *fuzzy* são regras normais utilizadas para operar, da maneira correta, conjuntos *fuzzy*, com o intuito de obter consequentes. Para criar tais regras é preciso de um raciocínio coerente com o que se deseja manusear e obter. Para isso, este raciocínio deve ser dividido em duas etapas: (1) avaliar o antecedente da regra e (2) aplicar o resultado no consequente.

Por exemplo, considerando a sentença, se x é alto, então x é pesado seguindo os passos 1 e 2 acima, tem-se que para $x = 1,70m$, deve-se, primeiramente, verificar o grau de pertinência da entrada para o conjunto ao qual se encaixa, médio, que é, para este caso, $\mu(x) = 0.5$. Como o grau de pertinência da entrada x é tal, então se deve passar este valor de pertinência para um $y = 80 kg$ (por exemplo), pertencente ao conjunto pesado.

Para casos em que existem vários antecedentes, é preciso encontrar um grau de pertinência resultante de todos os dos antecedentes. Nos casos em que o conectivo entre os

antecedentes seja “e”, deve-se utilizar métodos de combinação, contanto que o resultado não ultrapasse o valor de menor pertinência entre os antecedentes; um exemplo de método seria o mínimo das pertinências. Já nos casos em que o conectivo entre os antecedentes for “ou”, deve-se utilizar métodos de combinação, contanto que o resultado não seja menor que o maior grau de pertinência. O raciocínio é bem mais simples para casos em que existem vários consequentes, pois o grau de pertinência resultante será o mesmo para todos os consequentes.

2.3.6 Inferência Fuzzy

A inferência *fuzzy* é um processo de avaliação de entradas com o objetivo de, através das regras previamente definidas e das entradas, obter conclusões utilizando-se a teoria de conjuntos *fuzzy*. Esse processo pode ser executado através de modelos de inferência, cuja escolha deve levar em consideração o tipo de problema a ser resolvido, obtendo-se assim um melhor processamento. Existem vários métodos de inferência, mas o que geralmente é mais utilizado é o método Mamdani, que é apresentado na subseção 2.3.6.1.

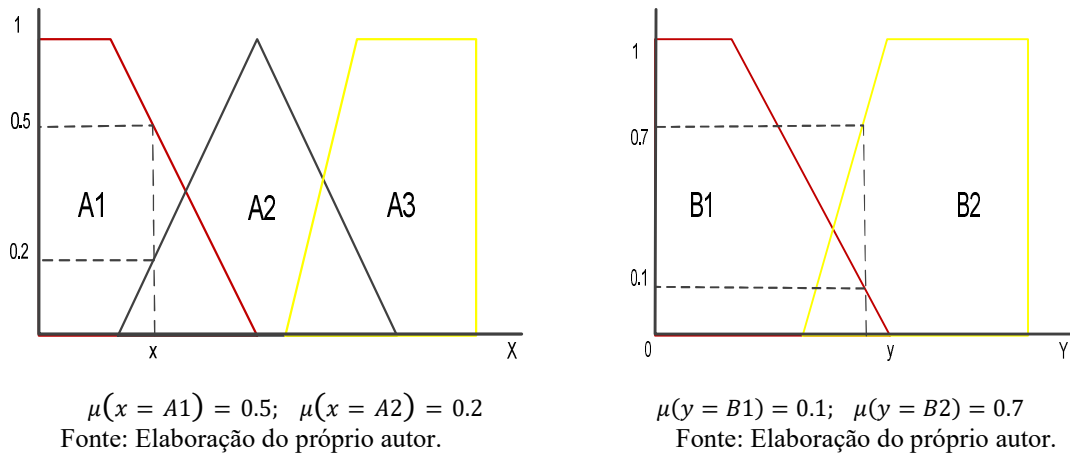
2.3.6.1 Inferência fuzzy: Estilo Mandami

O estilo de inferência Mandami foi criado pelo professor Ebrahim Mamdani da Universidade de Londres (Reino Unido) em 1975 no contexto do desenvolvimento de sistemas *fuzzy* baseando-se em regras de conjuntos *fuzzy* no intuito de representar experiências da vida real. Para a construção desse sistema, foi definido um processo de raciocínio dividido em quatro passos: (1) *fuzzy*ificação, (2) avaliação das regras *fuzzy*, (3) agregação das regras *fuzzy* e (4) defuzzyificação, cada um deles explicadas sucintamente nas subseções a seguir.

2.3.6.1.1 Fuzzyificação

Essa etapa obtém o grau de pertinência com que cada entrada pertence a cada conjunto *fuzzy*. Cada uma dessas entradas foi previamente limitada no universo de discurso em questão e associada a um grau de pertinência em cada conjunto *fuzzy* através do conhecimento do especialista. Então para obter o grau de pertinência de uma determinada entrada *crisp* basta buscar esse valor na base de conhecimento do sistema *fuzzy*. Para o exemplo em questão, tem-se os conjuntos *fuzzy* e graus de pertinência para cada uma das variáveis de entrada, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Fuzzyficação das variáveis linguísticas de entrada x e y , resultando nos seus respectivos conjuntos *fuzzy* e graus de pertinência.



2.3.6.1.2 Avaliação das Regras Fuzzy

Depois de obter as entradas fuzzyficadas é só aplicá-las nos antecedentes obtendo assim o valor do conseqüente para cada regra. Para um antecedente composto, os operadores “e” e “ou” são utilizados para obter um único resultado; no caso do operador “ou” é utilizada a operação de união (pega o maior grau de pertinência), e, no caso do operador “e”, é utilizada a de interseção (pega o menor grau de pertinência). Depois de obter um único valor para o antecedente é necessário obter o valor do conseqüente através de um método de correlação dos mesmos. O método mais comum é conhecido como *clipped*, onde o conseqüente é “cortado” para o nível de valor verdade do antecedente da regra avaliada, ou seja, o valor obtido é simplesmente passado para o conseqüente dessa regra.

Por exemplo, com base nos graus de pertinência e nas correlações entre as variáveis linguísticas, têm-se as regras, como exemplificado em (31).

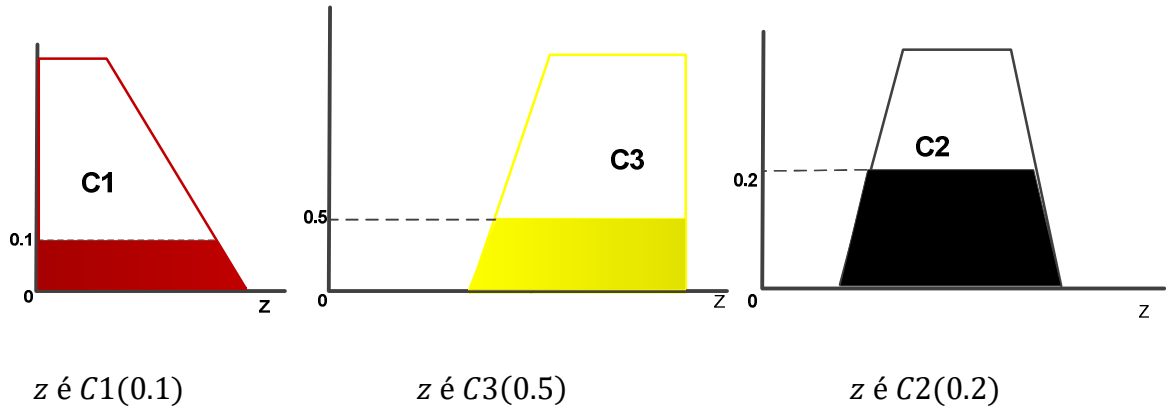
- 1: SE (x É $A_3(0)$ OU y É $B_1(0.1)$ ENTÃO (Z É $C_1(0.1)$))
 - 2: SE (x É $A_2(0.2)$ E y É $B_2(0.7)$ ENTÃO (Z É $C_2(0.2)$))
 - 1: SE (x É $A_1(0.5)$ ENTÃO (Z É $C_2(0.5)$))
- (31)

2.3.6.1.3 Agregação das Regras Fuzzy

Como o nome sugere, nessa etapa são agregadas todas as funções membro dos conseqüentes de cada regra em um único conjunto *fuzzy*. Para o exemplo em questão, considerando os conjuntos *fuzzy* para a variável z e respectivos graus de pertinência,

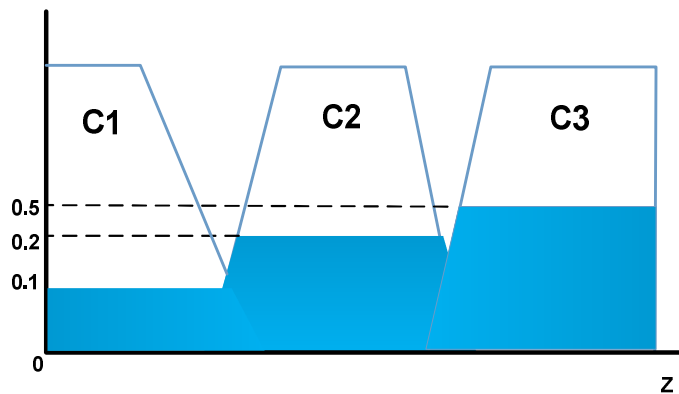
produzidos pela aplicação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3 (Figura 15) a agregação desses conjuntos resulta no conjunto *fuzzy* da Figura 16.

Figura 15 - Conjuntos *fuzzy* e graus de pertinência da variável linguística de saída z e respectivos graus de pertinência, produzidos pela aplicação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 16 - Conjunto *fuzzy* resultante do processo de agregação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3



Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.3.6.1.4 Defuzzyficação

Para se obter uma saída numérica é necessário defuzzyficar a saída obtida na etapa anterior. O método de defuzzyficação mais comum é a técnica do centroide, que obtém o ponto onde uma linha vertical divide ao meio um conjunto agregado. A fórmula matemática que obtém esse ponto é expressa da seguinte forma (expressão 32). A precisão do método depende do intervalo escolhido, quanto maior mais impreciso, porém mais rápido de calcular.

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^b \mu(x)} \quad (32)$$

Considerando o conjunto *fuzzy* da Figura 16, o resultado numérico obtido com a aplicação da técnica do centroide (COG) tem um valor de (considerando intervalos

percentuais de 10%, variando de 0% a 100%) 67.4. Assim, tem-se que o risco do projeto em questão é de 67.4%.

2.4 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS MEDIANTE A LÓGICA FUZZY

A avaliação da confiabilidade de cada equipamento, de acordo com a proposta desenvolvida por Piasson (2013), está centrada no desenvolvimento das etapas descritas a seguir e sistematizadas de acordo com a Figura 17. Exceto pela primeira (modelo probabilístico), as demais etapas (fatores de falhas) correspondem às etapas gerais de um sistema de inferência *fuzzy*, conforme pode ser visto em Barros, Bassanezi (2006). A seguir são apresentadas uma breve descrição das estratégias adotadas em cada etapa.

2.4.1 Variável Modelo Probabilístico de Falha

As interrupções nos sistemas de distribuição de energia elétrica são seguidas de registros constando informações como: data e horário do evento, descrição das causas e do equipamento afetado, tempo de restauração e/ou reparação, entre outros. A coleção destes registros fornece, portanto, a base de dados histórica necessária para a elaboração dos modelos probabilísticos. O processo de ocorrência dessas interrupções, para cada equipamento, é um processo aleatório discreto em estado e contínuo no tempo e, portanto, cumpre as condições necessárias para o uso de Processo de Poisson (PP) ou Processo Estocástico Pontual (PEP) (Ross (2007)). Por meio da análise da distribuição dos tempos para as falhas (*t_{ff}*) de um equipamento, é possível obter um modelo probabilístico de falhas, $P[N(t) = k]$, o qual fornece a probabilidade de ocorrência de um número de falhas igual a k , com $k = 0, 1, 2, \dots$, no período de tempo $[0, t]$.

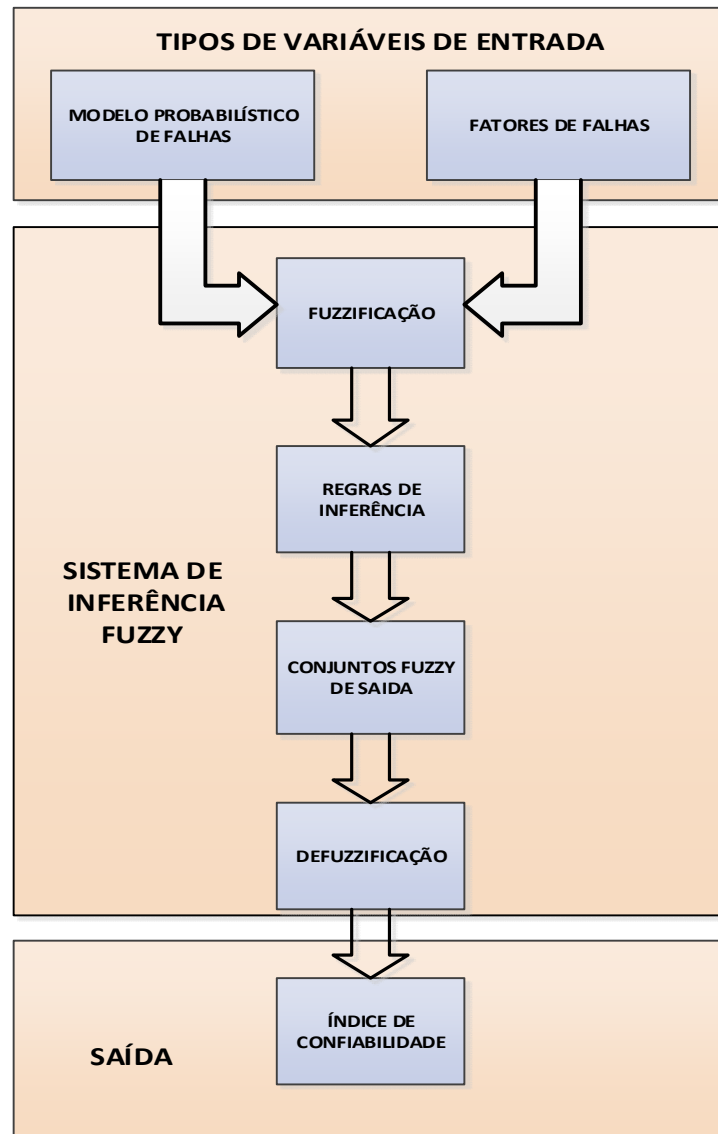
2.4.2 Sistema de Inferência Fuzzy da Confiabilidade

Nesta etapa da metodologia proposta, um sistema de inferência *fuzzy* é formulado com o objetivo de ajustar os índices de confiabilidade dos equipamentos do SDEE produzidos por seus modelos probabilísticos de falhas. Considera-se nesta análise, que para cada equipamento sob estudo, a probabilidade destes apresentarem alguma falha no período de tempo de t sob estudo, é dada pela equação (33) e pelos fatores que afetam a confiabilidade desses equipamentos.

$$F(t) = 1 - P[N(t) = 0]$$

(33)

Figura 17 - Modelo de cálculo da confiabilidade dos equipamentos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

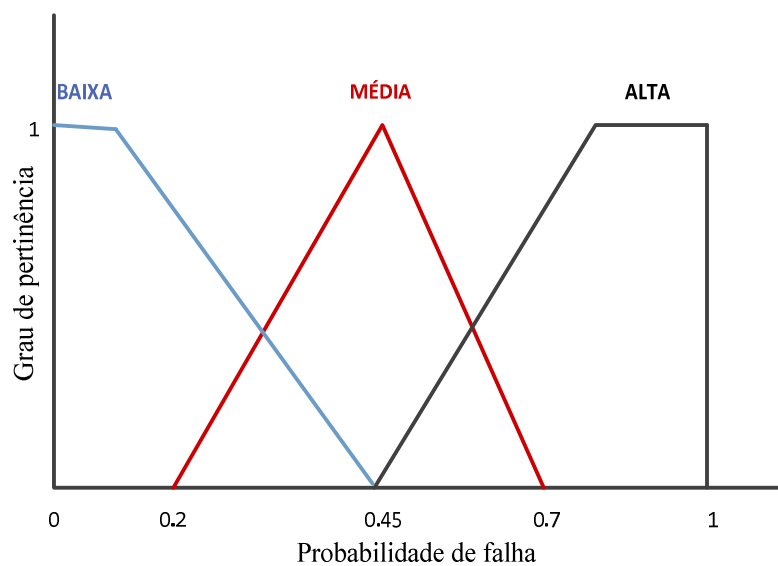
2.4.3 Fuzzificação dos fatores de falhas dos equipamentos sob estudo

Para cada equipamento considerado na análise, um conjunto de fatores causadores de falha devem ser identificados e modelados por conjuntos *fuzzy*. Para melhor traduzir em termos linguísticos as características apresentadas por estes fatores (variáveis de entrada do sistema *fuzzy*), ao longo do horizonte de tempo sob estudo, cada um destes dá origem a 3 (três) conjuntos *fuzzy* que correspondem a 3 (três) níveis ou classificação de cada fator. Os três conjuntos *fuzzy* considerados são:

$$\text{Variável fuzzy} = [\text{BAIXO}, \text{MÉDIO}, \text{ALTO}]$$

Os fatores considerados para cada equipamento do SDEE analisado e os universos de discurso de cada um de seus conjuntos *fuzzy* são apresentados nas próximas seções. Para exemplificar a fuzzyficação destes parâmetros, na Figura 18 apresenta-se a fuzzyficação dos três conjuntos *fuzzy* da variável "probabilidade de falha". Essa variável é considerada na análise de confiabilidade de todos os equipamentos sob estudo e, portanto, é facultada na discussão de cada equipamento feita nas seções adiante. O universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* são detalhados a seguir, na Figura 18 e Tabela 1.

Figura 18 - Fuzzyficação da variável probabilidade de falha.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 1 - Universo de discurso para os conjuntos **fuzzy** da variável “probabilidade de falha” dos componentes do SDEE sob estudo.

Fator "probabilidade de falha"	
Conjuntos Fuzzy	Universo de Discurso
Baixa	[0;0,45]
Média	[0,2;0,7]
Alta	[0,45;1]

Fonte: Piasson (2014)

2.4.4 Fuzzificação do índice de confiabilidade de saída

A saída do sistema de inferência é o conjunto *fuzzy* do índice de confiabilidade do equipamento sob estudo. Este índice também deve ser considerado para diferentes níveis. Dado o número de combinações possíveis que podem ser geradas com os conjuntos *fuzzy* de

entrada e pela abrangência do intervalo de discurso da variável *fuzzy* R (índice de confiabilidade), são propostos os seguintes conjuntos *fuzzy*:

Variável *fuzzy* R = [MUITO BAIXA,BAIXA,MÉDIA-BAIXA,MÉDIA,MÉDIA-ALTA,ALTA,MUITO ALTA]

Figura 19 - Fuzzificação dos conjuntos *fuzzy* de saída adotada para todos os equipamentos analisados

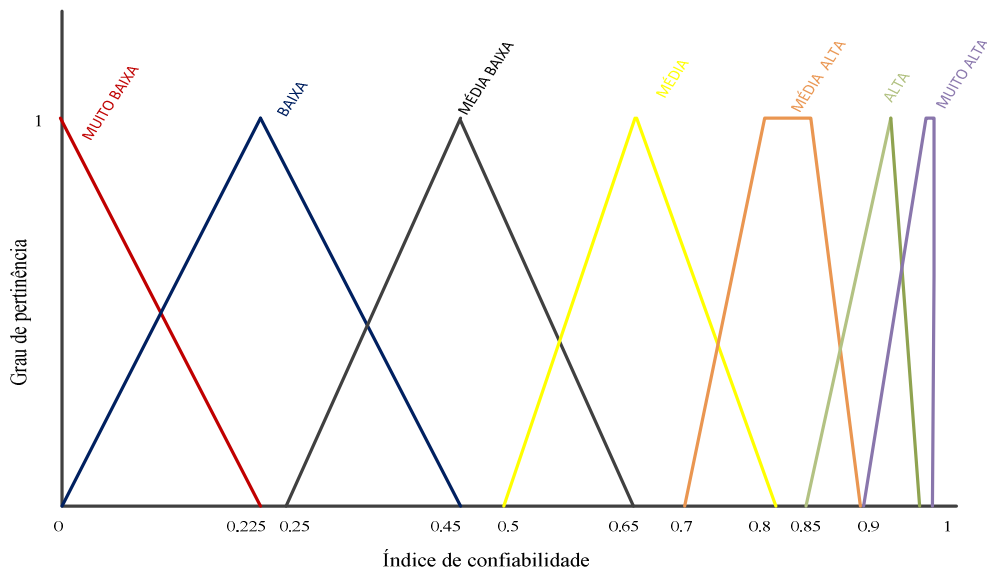


Tabela 2 - Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável “Índice de Confiabilidade” dos componentes do SDEE sob estudo.

Fator "probabilidade de falha"	
Conjuntos Fuzzy	Universo de Discurso
Muito Baixa	[0;0,225]
Baixa	[0;0,45]
Média Baixa	[0,25;0,65]
Média	[0,50;0,8]
Média Alta	[0,70;0,9]
Alta	[0,85;0,98]
Muito Alta	[0,9;1]

Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.4.5 Definição das regras de inferência

Esta etapa do processo é a mais delicada e, portanto, deve ser cercada de precauções para evitar distorções da análise. Ela constitui a base de análise do sistema de inferência. O domínio da relação "condição vs. efeito" dos equipamentos sobre a sua confiabilidade é fundamental. Trata-se da etapa mais trabalhosa, pois o número de regras de inferência, de modo que haja uma correspondência de qualquer combinação de cenários dos conjuntos *fuzzy* de entrada com os conjuntos *fuzzy* de saída, cresce exponencialmente. As tabelas com a base de regras de inferência de cada equipamento considerado neste estudo são apresentadas no ANEXO B.

2.4.6 Método de Inferência e Defuzzificação

Os métodos de inferência consistem em técnicas de lógica *fuzzy* para relacionar matematicamente proposições *fuzzy* estabelecidas e que compõem o conjunto de regras de inferência. Neste trabalho propõe-se o método de inferência de Mamdani, que se baseia na regra de composição de inferência "*max-min*". O resultado deste processo são os conjuntos *fuzzy* da variável de saída que é o índice de confiabilidade dos equipamentos modelados. Para a obtenção do índice de confiabilidade de cada equipamento, ou seja, para a defuzzificação do processo de inferência, é adotado o centróide dos conjuntos *fuzzy* de saída produzidos pelo método de inferência adotado. Tal método, produz um número real (número *crisp*) correspondente ao índice de confiabilidade $C(t)$, considerando a decisão de controle do sistema de inferência sobre as variáveis de entrada. Maiores detalhes sobre o método de inferência e de defuzzificação, utilizados neste trabalho, podem ser encontrados em Barros e Bassanezi (2006).

2.4.7 Discussão da modelagem dos índices de confiabilidade

Para se obter os modelos de confiabilidade, $C(t)$, dos componentes ativos de um SDEE, de acordo com a metodologia apresentada na seção anterior, é necessária a modelagem dos dados de falhas dos equipamentos sob estudo e a identificação e modelagem dos fatores que influenciam a confiabilidade destes equipamentos (de acordo com o diagrama da Figura 17). No ANEXO A são apresentadas, de forma separada, cada uma destas modelagens a fim de compor o sistema de inferência integrado de avaliação da confiabilidade dos equipamentos analisados.

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS PROBABILÍSTICOS

De acordo com Zapata (2010), a obtenção do dados para construir os modelos probabilísticos dos componentes apresenta os seguintes problemas:

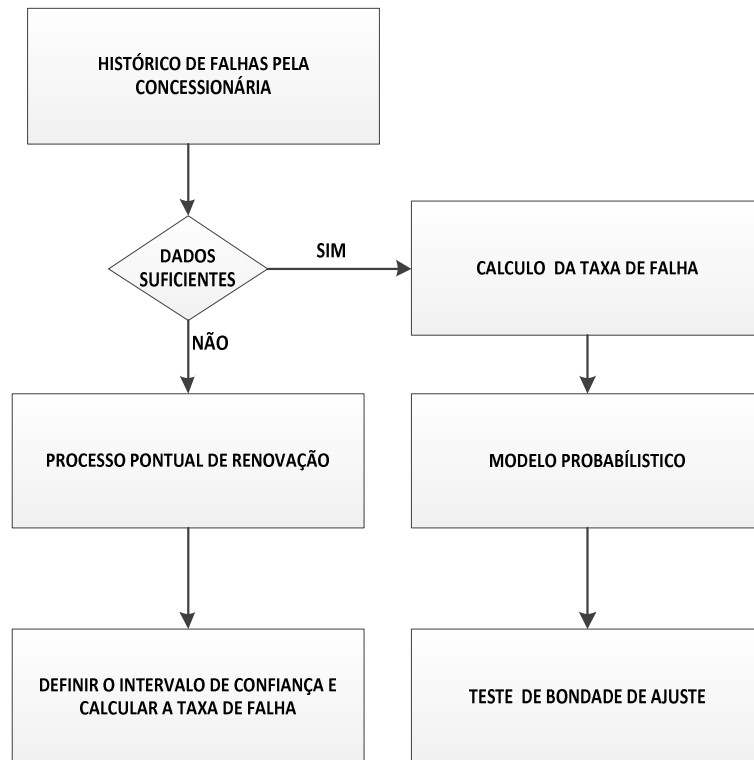
1. As falhas são fenômenos aleatórios, por enquanto, deve-se esperar que ocorram para registrar os dados associados a estes eventos. Este difere de outras áreas de estudo como o *marketing* ou a demografia, onde se pode se consultar muitos indivíduos da população no estudo, para obter um nível de erro calculado preestabelecido.
2. Alguns dos componentes do sistema elétrico têm taxas de falhas muito baixas durante seu período de vida útil; na observação de sua operação por períodos largos de tempo é possível que registrem poucas falhas ou não registre nenhuma. Isto é comum em equipamentos que não têm partes em movimento como para-raios, transformadores de corrente e de potencial, reatores, capacitores, etc.

Para resolver estes problemas, é comum agrupar os dados de componentes similares. Desta forma, é comum que se apresentem as seguintes situações:

1. Não apresentem falhas no período de tempo dos registros.
2. Ele tem um único dado, pelo qual não podem ser utilizados os métodos clássicos de estimação de parâmetros ou ajustes de uma distribuição de probabilidade.
3. Existem poucos dados e seu gráfico em forma de histograma tem uma ou poucas classes e pelo qual, não se pode aplicar o procedimento de ajuste a uma cadeia de Markov ou processo pontual, ou embora este procedimento possa ser aplicado não são cumpridas as condições de adequações de seus ajustes.

Então não é realista assumir que existem componentes 100% confiáveis, e devem-se estudar os métodos para construir modelos probabilísticos em situações onde se possui quantidades limitadas ou ausência de dados de falha. Na subseção a seguir apresenta-se um método para contemplar estas situações.

Figura 20 - Cálculo do modelo probabilístico para os equipamentos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.5.1 Ajuste da metodologia para pequenas amostras pelo processo pontual de renovação

Um número pequeno de falhas não favorece a modelagem, mas pode significar/indicar que o equipamento está no seu período de vida útil e, portanto, tem taxa de falha constante (BILLINTON; ALLAN, 1992). Assim, utilizando uma amostra de n falhas no período de tempo T , se determina o valor da taxa de falhas estimada para o qual se alcança a probabilidade crítica ou de rejeição (α). Assim, partindo desta hipótese e considerando uma probabilidade crítica de $\alpha = 5\%$, estima-se a taxa de falha $\hat{\lambda}$, e pode-se afirmar que com $\delta\%$ de confiança $\lambda < \hat{\lambda}$, através da equação:

$$\alpha = 1 - \delta = \sum_{i=1}^k \frac{(\hat{\lambda}.T)^i}{i!} . e^{-\hat{\lambda}.T} \quad (34)$$

Onde k é o número de falhas.

Tabela 3 - Valores de $\hat{\lambda}$ para um número de falhas n de 0 a 7 e para $T= 11$ anos para um sistema de distribuição de pequeno porte.

n (número de falhas)	λ (taxa de falha estimada)
0	0,2723
1	0,4312
2	0,5723
3	0,7048
4	0,8321
5	0,9557
6	1,0765
7	1,1952

Fonte: Piasson (2014).

Os valores das taxas de falhas da tabela 3 foram obtidos através da solução da equação 34, observe que só para $n=0$ a solução é simples, no entanto para $n \neq 0$ é necessário aplicar métodos iterativos.

2.5.2 Considerações sobre a composição do sistema de inferência

As variáveis de entrada do sistema de inferência proposta se dividem em dois grupos: o primeiro são os intervalos reais dos valores da probabilidade de falha e o segundo são dos fatores de falha de cada equipamento. Entre os equipamentos de um SDEE que são considerados neste trabalho, somente os componentes ativos do sistema são considerados nesta análise, os transformadores de distribuição, os bancos de capacitores os disjuntores e as chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto. Para os componentes não ativos chaves e cabos são formulados um sistema de inferência *fuzzy* simplificado, envolvendo somente a probabilidade de falhas e a idade dos equipamentos. As informações contidas nesta seção foram obtidas parcialmente através de técnicos com larga experiência com sistemas de distribuição e dos resultados de um estudo sobre vida útil de equipamentos encontrado em ANEEL (2000) (PIASSON, 2013).

No capítulo seguinte, são apresentadas uma discussão sobre a avaliação do impacto das tarefas de manutenção sobre o índice $C_e(t)$ de confiabilidade de cada equipamento, e são apresentadas três metodologias para estabelecer planos otimizados de manutenção em SDEE.

3 IMPACTOS DAS MANUTENÇÕES SOBRE A CONFIABILIDADE

Para avaliar os impactos das manutenções na confiabilidade, necessita-se de amplo conhecimento do funcionamento e das características de cada um dos componentes do sistema em estudo, embora na realidade, não seja viável um detalhamento específico de cada atividade de manutenção para cada equipamento a ser reparado e nem mesmo possível de planejar. Assim, tarefas de manutenções mais generalizadas são adotadas para a elaboração de planos de manutenções.

No presente trabalho, são definidos 4 níveis de manutenção generalizada para os transformadores e reguladores de tensão e 3 níveis de manutenção generalizada para os demais equipamentos que compõem o sistema, por níveis de qualidade variando de "nenhuma manutenção" até o nível mais alto "manutenção completa" ou (substituição por um equipamento novo).

Cada atividade de manutenção é apresentada e discutida nas seções seguintes. Três metodologias para avaliação do impacto de cada manutenção sobre a confiabilidade dos equipamentos, que são submetidos a uma tarefa de manutenção, também são apresentadas, além de uma revisão bibliográfica da literatura sobre o tema de impacto das manutenções sobre os índices de confiabilidade.

3.1 IMPACTO DAS MANUTENÇÕES NA CONFIABILIDADE: UM ESTADO DA ARTE

Os principais trabalhos envolvendo tarefas de manutenções e seus impactos sobre a confiabilidade são destacados aqui, sendo que os dois aspectos fundamentais destes trabalhos e relevantes para este estudo são os níveis ou qualidades das tarefas de manutenções (estabelecidas para os componentes dos SDEE) e as metodologias de avaliação do impacto de cada tarefa sobre a confiabilidade destes componentes.

Endrenyi, Anders e Silva (1998), consideram, para avaliação de impacto sobre a confiabilidade, três atividades de manutenções sobre equipamentos de um SDEE: (i) não realizar manutenção; (ii) realizar pequenos reparos (menor manutenção) e; (iii) realizar uma manutenção maior (maior manutenção). Neste trabalho, o processo de deterioração dos

equipamentos é representado através de estágios discretos e o impacto de cada atividade de manutenção sobre a confiabilidade dos equipamentos consiste em retroceder a confiabilidade dos equipamentos reparados para estágios de deterioração anteriores. O novo estágio de deterioração de um equipamento reparado depende, de acordo com a metodologia proposta neste trabalho, do tipo de atividade realizada, do estágio de deterioração em que se encontra o equipamento antes de ser reparado e de um índice probabilístico que é definido através do histórico de faltas e da experiência das equipes de manutenção.

Sittithumwat, Soudi e Tomsovic (2004), classificam as tarefas de manutenção em alimentadores de distribuição de acordo com níveis de qualidade: extensiva, mínima e nenhuma manutenção. Para cada uma destas tarefas é atribuído um multiplicador para atualizar a taxa de falhas de cada seção do alimentador sob estudo. Neste trabalho são consideradas apenas atividades de podas de árvores e de manutenções em religadores.

Bertling, Allan e Eriksson (2005), consideram os efeitos de cada atividade de manutenção através de duas estratégias: (1) definindo multiplicadores constantes para reduzir a taxa de falha de um componente, em função da atividade de manutenção preventiva realizada, como em Sittithumwat, Soudi e Tomsovic (2004), e; (2) atualizando o valor da taxa de falha em função da atividade de manutenção preventiva e do tempo em que esta foi realizada. Em relação às tarefas de manutenções preventivas, diferentemente de Sittithumwat, Soudi e Tomsovic (2004) e Endrenyi, Anders e Silva (1998), os autores estabelecem as atividades de manutenções preventivas (para cada equipamento), de acordo com o tipo de falha que se deseja prevenir e não por níveis de qualidade.

Em Reis (2007), níveis de manutenção e impactos são definidos de acordo com as propostas desenvolvidas por Sittithumwat, Soudi e Tomsovic (2004) e Endrenyi, Anders e Silva (1998). Contudo, neste trabalho são consideradas atividades de manutenção para todos os componentes principais de um sistema de distribuição.

No trabalho de Phoothong *et al.* (2008), os impactos das atividades de manutenções sobre os sistemas de distribuição de energia elétrica são inferidos relacionando a taxa de falha dos alimentadores com os orçamentos destinados às manutenções preventivas.

Teera-Achariyakul *et al.* (2010), com o objetivo de otimizar a alocação de orçamentos de manutenções definem diferentes atividades de manutenções para um sistema de

distribuição, como por exemplo, podas de árvores, limpeza de isoladores e instalação de guarda-pássaros.

Neste trabalho propõe-se três metodologias para a avaliação dos impactos das manutenções na confiabilidade, as duas primeiras medem o impacto das atividades de manutenções em termos de regeneração da vida útil do equipamento em análise, assim a idade do equipamento é substituída pela idade aparente e a terceira metodologia usa o conceito dos multiplicadores de taxas de falhas e estas, por sua vez, é dependente da quantidade e do nível das manutenções realizadas ao longo do período de funcionamento do equipamento ou do período sob análise. Na seção seguinte, é detalhada as metodologias de avaliação da confiabilidade dos equipamentos discutida no capítulo anterior.

3.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MANUTENÇÕES

3.2.1 *Impactos para a Metodologia 1*

A primeira metodologia segue a proposta desenvolvida em Piasson (2013), a qual propõe que os impactos das atividades de manutenção incidem na regeneração da vida útil do equipamento em análise, Contudo, tarefas de manutenções podem prolongar a vida útil dos equipamentos, e assim, a idade do equipamento deixa de ser tão representativa das condições de desgastes destes. Neste caso, pode-se utilizar a "idade aparente" do equipamento para uma inferência mais precisa das reais condições de desgastes dos equipamentos. A idade aparente de um equipamento que passou por uma manutenção, é a idade que este tinha quando apresentava estado de conservação e rendimento equivalente ao estado pós-manutenção. Ou seja, na comparação dos rendimentos e estado de um equipamento mais antigo e restaurado com um equipamento novo, a idade aparente do primeiro é igual a idade do segundo no instante em que este apresentar o mesmo estado de conservação e rendimento que o primeiro.

As tarefas de manutenções impactam, portanto, na vida útil dos equipamentos, devolvendo-os o estado de funcionalidade equivalente a um período anterior à realização da manutenção. O quão longo é este período depende da qualidade (nível) das manutenções e do tempo que esta foi realizada. Portanto, esse tempo adicionado à vida útil dos equipamentos pode ser considerado como um fator de impacto das manutenções sobre a confiabilidade destes equipamentos. Este tempo é denotado, nesta metodologia, por IR_m^t e referenciado

como "**Índice de Restauração**" da atividade de nível m no tempo t . Através da definição deste índice, é possível estabelecer uma relação das atividades de manutenções com a idade aparente de cada equipamento. Uma proposta de modelagem desta relação é apresentada na equação 35.

$$I_{(a,e)}^t = \left\{ \begin{array}{l} I_{(a,e)}^{t-1} - \sum_{m=1}^{Me} (x_{e,m}^t \times IR_m^t), se I_{(a,e)}^{t-1} \geq \sum_{m=1}^{Me} (x_{e,m}^t \times IR_m^t) \forall t = 1, \dots, HP \\ 0, cc \end{array} \right\} \quad (35)$$

em que,

- $I_{(a,e)}^t$: idade aparente do equipamento e no tempo t ;
- IR_m^t : idade regenerada mediante uma atividade de manutenção do tipo m no tempo t ;
- HP : horizonte de planejamento;
- Me : níveis de manutenções definidos para o equipamento e ;
- $x_{e,m}^t$: variável binária de decisão sobre a realização (ou não) de uma atividade de manutenção do tipo m no tempo t para o equipamento e .

3.2.2 Impactos para a Metodologia 2:

Nesta metodologia proposta também se consideram que as tarefas de manutenções impactam na vida útil dos equipamentos, enquanto a diferença com a primeira é o uso de um termo que é definido como multiplicador de idade.

$$I_{(a,e)}^t = I_{(a,e)}^{t-1} \cdot (1 - \phi_{(e,m)}^t), \forall t = 1, 2, \dots, HP \quad (36)$$

em que,

- $I_{(a,e)}^t$: idade aparente do equipamento e no tempo t ;
- $\phi_{(e,m)}^t$: multiplicador de idade para um equipamento e após a realização de uma atividade de manutenção do tipo m no tempo t ;
- HP : horizonte de planejamento.

3.2.3 Impactos para a Metodologia 3:

Nesta última proposta é considerada como um complemento das duas primeiras, já que as taxas de falhas já não são constantes, assim as tarefas de manutenções impactam diretamente nas taxas de falha dos componentes, mediante um termo chamado multiplicador de taxa de falha.

$$\lambda_{(a,e)}^t = \lambda_{(a,e)}^{t-1} \cdot \delta_{(e,m)}^t, \forall t = 1, 2, \dots, HP \quad (37)$$

em que,

$\lambda_{(a,e)}^t$: taxa de falha do equipamento e no tempo t ;

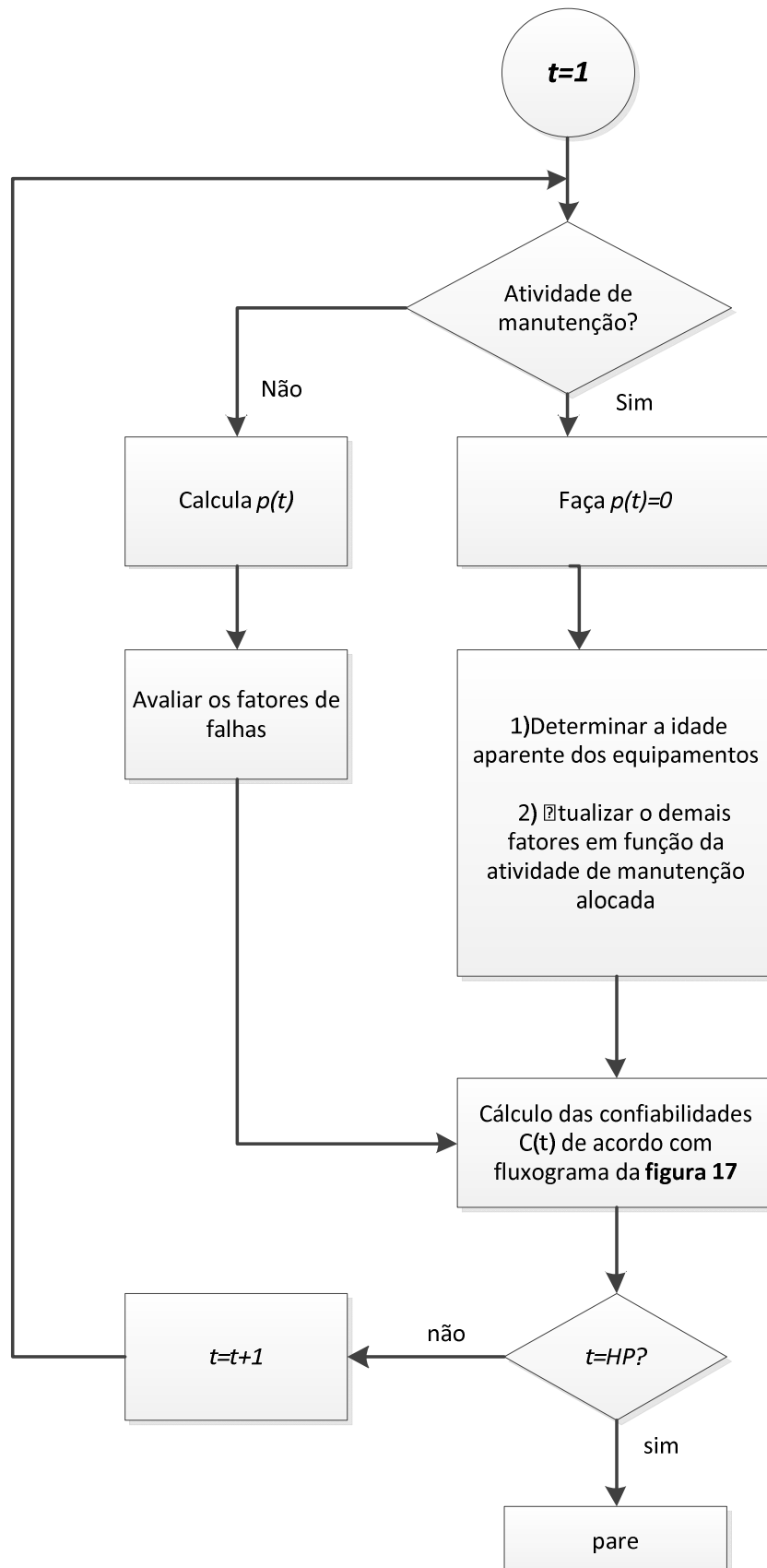
$\delta_{(e,m)}^t$: multiplicador da taxa de falha para um equipamento e após de uma atividade de manutenção do tipo m no tempo t ;

HP : horizonte de planejamento;

Para avaliar as três metodologias necessita-se como valor de entrada os índices de confiabilidade dos equipamentos. O fator que pode propagar o impacto das atividades de manutenções preventivas sobre este índice esperado, é a probabilidade de falha dos equipamentos, inferidos pelos seus respectivos modelos probabilísticos. Neste trabalho, considera-se que toda atividade de manutenção sobre determinado equipamento, independentemente do nível m_i estabelecido (exceto para $i=1$), anula a probabilidade de falha desse equipamento no tempo t , em que a manutenção é executada. Ou seja, para qualquer manutenção preventiva m_i , com $i \neq 1$, programada para algum $t \in HP$, tem-se $P(t)=0$, que resulta em $C(t)=1-P(t)=1$ (modelo probabilístico). Em outras palavras, admite-se que, do ponto de vista do modelo probabilístico de falhas não é esperado que ocorra qualquer falha no equipamento imediatamente após a realização da manutenção m_i programada. Assim, para as duas primeiras metodologias é deixado ao sistema de inferência *fuzzy* o ajuste final do índice de confiabilidade $Ce(t)$ dos equipamentos; enquanto que para a terceira metodologia a função de probabilidade realiza esta tarefa de ajuste do índice de confiabilidade.

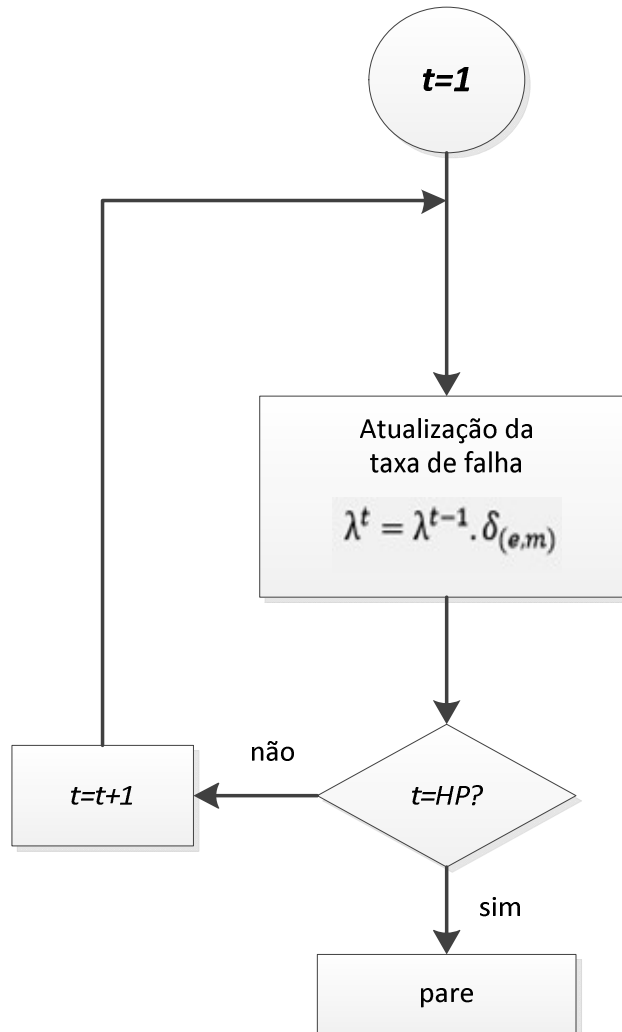
Nas Figura 21 e 22 são apresentados os fluxogramas dos impactos das manutenções nos índices de confiabilidade considerados neste trabalho.

Figura 21 - Fluxograma de impactos das manutenções na confiabilidade para as metodologias proposta em 1 e 2.



Fonte: Adaptado de Piasson (2014).

Figura 22 - Fluxograma de impactos das manutenções na confiabilidade da metodologia 3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3 DEFINIÇÃO DAS ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO

Os equipamentos de cada classe de componentes que constitui um sistema de distribuição de energia elétrica apresentam características construtivas distintas, e, em alguns casos, até mesmo entre componentes de uma mesma classe há certas distinções. De modo geral, cada equipamento é constituído por uma série de subcomponentes e/ou subsistemas que interagem para garantir sua funcionalidade. Essa diversidade de subsistemas de cada equipamento dá origem a vários modos de falhas e, conseqüentemente, diferentes atividades de manutenções, sejam elas mínimas ou completas.

Na prática, o número de manutenções é sempre reduzido para que o equipamento a ser reparado fique indisponível o menor tempo possível. Logo, as atividades de manutenções planejadas devem ser mais gerais, sendo diferenciadas uma das outras por nível de qualidade

ou de restauração, de modo que subcomponentes e/ou subsistemas prioritários sejam reparados (ou substituídos) em atividades de baixo nível, enquanto que aqueles mais robustos são reparados somente em atividades de manutenção de nível mais alto.

Do ponto de vista da confiabilidade, no entanto, tal medida garante melhor confiabilidade ao sistema visto que todos os fatores relevantes e considerados na análise da confiabilidade do ativo seriam atenuados. Diante deste contexto, é estabelecida para este trabalho uma quantidade de níveis de manutenção não menor que 2 (duas) e nem maior que 4 (quatro). Entre essas atividades, "não realizar manutenção" e "manutenção completa", também são consideradas como atividades de manutenção. A seguir seguem as definições dos quatro níveis de manutenção que podem ser considerados:

- a) *m1*– não realizar manutenção;
- b) *m2*– manutenção mínima;
- c) *m3*– manutenção media;
- d) *m4*– manutenção completa.

Em termos de custo, a "manutenção preventiva" *m2*, é considerada a menos dispendiosa, mas por outro lado, é aquela que menos impacta na confiabilidade do equipamento, produzindo apenas um adiamento de uma falha iminente. Já a "manutenção corretiva" *m3*, é considerada a atividade de manutenção de custo intermediário entre a manutenção mínima e a completa. Neste tipo de manutenção considera-se que a confiabilidade do equipamento é parcialmente restaurada e a vida útil é prolongada para um período de tempo maior que a manutenção mínima.

Para todos os equipamentos considerados neste estudo, define-se a atividade *m1* como sendo "não realizar manutenção", e as demais tarefas de manutenções, tanto em quantidade quanto em especificação, são definidas de acordo com as características construtivas dos equipamentos, sendo estes quatro níveis o máximo de manutenções consideradas para um equipamento do SDEE.

Os equipamentos não reparáveis e que também são considerados neste trabalho, como por exemplo, as chaves fusíveis, são tratados como equipamentos reparáveis, sendo que para estes equipamentos as atividades de manutenção estão relacionadas com vistorias e substituição de partes ou do equipamento como um todo, dependendo de suas características construtivas.

Nas seções seguintes, são definidos os tipos de tarefas de manutenção de cada classe (tipo) de componentes de um SDEE que são considerados neste trabalho. Também são apresentados e discutidos os impactos de cada uma destas tarefas sobre a confiabilidade destes equipamentos.

3.3.1 Manutenções em Transformadores de Distribuição e Reguladores de Tensão

Os transformadores de distribuição são os componentes mais importantes de um sistema elétrico de distribuição. Também configuram no conjunto dos componentes mais caros e, portanto, a execução de tarefas de manutenções é essencial para garantir a durabilidade do equipamento, a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica e prolongar a necessidade de substituição por equipamentos novos. Como discutida na seção anterior, a definição das atividades de manutenções de um equipamento depende, entre outras coisas, das características construtivas do equipamento.

De acordo com ANEEL (2000), os transformadores de distribuição devem-se fazer inspeções periódicas a cada 12 meses, medição da resistência e retirada de uma amostra do óleo isolante a cada 5 anos e uma revisão completa com 10 anos de utilização, necessitando para esta última, a remoção do equipamento para uma oficina. Ainda de acordo com ANEEL (2000), nas atividades anuais de inspeção são verificados os seguintes itens:

- a) Verificação da inexistência de fissuras, lascas ou sujeiras nas buchas e danos externos no tanque ou acessórios;
- b) Estado dos terminais e ligações;
- c) Possíveis vazamentos;
- d) Indícios de corrosão;
- e) Verificação de ruídos anormais de origem mecânica ou elétrica;
- f) Verificação do aterramento e sistema de proteção;
- g) Verificação do nível de óleo isolante.

Essas atividades são de baixo custo, mas podem prevenir falhas cujo impacto financeiro é muito maior. Além disso, de acordo com a idade do equipamento, após uma inspeção bem criteriosa destes itens, pode-se considerar que o estado do equipamento seja tão bom quanto um novo e que a confiabilidade é alta.

Considerando essa variedade de atividades de manutenção para transformadores de distribuição, pode-se agrupá-las de forma a compor 4 (quatro) níveis de manutenção para esta classe de equipamentos dos SDEE. Estes quatro níveis estão descritos na seção anterior e se relacionam com as atividades de manutenções recomendadas por ANEEL (2000), da seguinte forma:

- a) m_1 – não realizar manutenção;
- b) m_2 – inspeção dos itens recomendados por ANEEL (2000) e mencionados anteriormente;
- c) m_3 – medição da resistência, prova de impulso e retirada de uma amostra do óleo isolante;
- d) m_4 – bobinado do transformador ou substituir por novo.

3.3.2 Manutenções nos Disjuntores das Subestações

Os disjuntores são equipamentos eletromecânicos de manobras. Em SDEE, os disjuntores das subestações são, geralmente, utilizados para realizar operações de abertura e/ou de fechamento do tronco principal de um alimentador na subestação. Nestes sistemas, como a tensão é inferior a 69 kV é comum encontrar disjuntores a óleo, de acordo com ANEEL (2000), a vida útil média destes equipamentos é de 25 anos.

ANEEL (2000), recomenda a realização de manutenção preventiva para disjuntores a óleo a cada 05 anos ou menos, de acordo com o número de operações realizadas por estes equipamentos. No entanto, ainda segundo ANEEL (2000), disjuntores de tensões mais baixas tendem a atuar mais vezes, devido as condições operativas desses sistemas. Logo, podem se estabelecer inspeções mais periódicas de modo a detectar problemas iminentes. Por outro lado, a não realização de manutenções periódicas pode acelerar o estado de degradação do equipamento, necessitando assim, de uma manutenção mais intensiva e, conseqüentemente, mais onerosa. Outra opção é a substituição do disjuntor por um equipamento novo. Esta opção está, na realidade, atrelada à depreciação do ativo. Nesse sentido, são definidos também 4 (quatro) níveis de manutenções para esta classe de equipamentos, que variam de m_1 a m_4 , conforme definido anteriormente.

3.3.3 *Manutenções em Bancos de Capacitores*

As potências ativa e reativa presentes no sistema de distribuição são igualmente necessárias, mas devem ser cuidadosamente compensadas de modo a manter a qualidade e evitar perdas. A potência reativa, necessária para diversos equipamentos, como motores elétricos, transformadores e etc., pode ser obtida de geradores, motores síncronos e capacitores (ANEEL, 2000).

Os capacitores, na forma de bancos, é a opção utilizada pelas concessionárias de sistemas de distribuição para a injeção de reativos nas suas redes. Os bancos de capacitores são constituídos basicamente pelas unidades capacitivas, as quais são as causas da maioria das falhas destes equipamentos (ANEEL, 2000). Logo, exigem cuidados adicionais, principalmente, quanto ao tipo e qualidade do isolante usado. A vida útil econômica estabelecida para estes equipamentos é de 15 anos. (ANEEL, 2000). As tarefas de manutenções preventivas tornam-se de extrema importância no controle da vida útil destes equipamentos. A periodicidade recomendada por ANEEL (2000) é em torno de um ano. Tais manutenções constituem de inspeção e/ou reparos (ou substituição) de:

- a) conexões;
- b) fusíveis;
- c) barramento e isoladores;
- d) contadores e chaves;
- e) capacitores.

Assim, são definidas 4 (quatro) tarefas de manutenção para estes equipamentos:

- a) *m1* – não realizar manutenção;
- b) *m2* – manutenção mínima;
- c) *m3* – manutenção média;
- d) *m4* – manutenção completa.

Através destas tarefas é possível detectar e corrigir possíveis problemas, como vazamentos ou inchaço da unidade, decorrentes de condições adversas de operação do sistema, como por exemplo, sobretensões.

3.3.4 *Manutenções em Chaves a Óleo/Vácuo e Hexafluoreto*

Os principais tipos de chaves encontrados no sistema de distribuição são: chaves facas, chaves-fusíveis (incluindo religadora e de *by-pass*) e chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto (ANEEL, 2000). As chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto e as chaves faca com suas diversas variações (unipolar, multipolar, uma ou duas direções, com base própria e ligações na face anterior, etc.) são chaves exclusivamente destinadas para operações de manobras do sistema elétrico enquanto as chaves-fusíveis são utilizadas para proteção de equipamentos e/ou conjuntos de consumidores, embora também possam ser utilizadas para operações de manobras.

As chaves tipo faca não requerem atividades de manutenções preventivas. Os poucos defeitos apresentados por estes equipamentos não comprometem a funcionalidade do sistema e, portanto, são considerados neste trabalho como 100% confiáveis em qualquer período de tempo t . Por sua vez, as chaves de manobra e proteção, como por exemplo, as chaves-fusíveis, podem afetar a confiabilidade do sistema porque os mecanismos de proteção podem apresentar defeitos ao longo do tempo, podendo ocasionar o desarme inesperado da chave e/ou não desarmar quando solicitada para a proteção de algum componente e/ou de conjunto de consumidores. Para estas chaves, portanto, atividades de manutenções preventivas são requeridas para melhorar a confiabilidade destes equipamentos e, conseqüentemente, do sistema como um todo. Na seção que seguinte, são apresentadas as atividades de manutenções e seus respectivos impactos sobre esse tipo de chave.

As chaves a óleo, vácuo ou a gás hexafluoreto são assim denominadas devido ao material isolante utilizado na câmara de extinção do arco voltaico destes equipamentos. De acordo com ANEEL (2000), essas chaves são utilizadas para energização e desenergização de equipamentos com o sistema sob carga. As atividades de manutenções nestas chaves consistem basicamente em inspeções e substituição de componentes. Assim, são definidas para esta classe de equipamentos, as seguintes atividades de manutenção:

- a) $m1$ – não realizar manutenção;
- b) $m2$ – manutenção mínima;
- c) $m3$ – manutenção completa.

A atividade de manutenção mínima é considerada como sendo a realização de inspeção *in loco* do equipamento, na qual, devem ser verificados, entre outros itens (e de acordo com o isolante dielétrico da chave):

- a) vazamentos e estanqueidade à infiltração de umidade;
- b) nível do isolante dielétrico;
- c) número de operações;
- d) integridade das buchas e da ligação com a terra.

Para a atividade de manutenção completa, é considerada aquela que devolve ao equipamento reparado o estado de "tão bom quanto novo". Neste tipo de atividade, é considerada a troca de componentes do equipamento.

3.3.5 Manutenções em Chaves Fusíveis Simples, Religadoras e By-pass

As chaves fusíveis são dispositivos de proteção muito utilizados no sistema distribuição. A função destes equipamentos é atuar na proteção dos equipamentos do sistema contra sobrecorrentes e isolar trechos do alimentador sob faltas. Do ponto de vista das características construtivas, estes equipamentos são basicamente constituídos de um porta-fusível e uma estrutura destinada a receber um elo-fusível, que é uma peça facilmente substituível e barata (ANEEL, 2000). No entanto, ao atuarem diante de uma sobrecorrente, seja ela temporária ou permanente, o elo-fusível é queimado, necessitando de mão de obra qualificada e tempo para que este seja substituído e a corrente restabelecida (LEITAO, 2011). No entanto, a chave pode também ser desarmada por pequenas oscilações da corrente, porque a curva tempo versus corrente do fusível pode ser alterada com o envelhecimento do elo-fusível, levando-os a operar com valores de corrente diferentes de suas características originais(Leitão, 2011).

Para uma melhor confiabilidade destes componentes do sistema elétrico de distribuição, ANEEL (2000) sugere a realização de atividades de inspeção periódica em todas as chaves, ou por setor, ou ainda por amostragem. Nestas inspeções, devem ser observados os seguintes itens:

- a) a posição na cruzeta;
- b) integridade do circuito;
- c) condições das ferragens de fixação, das porcelanas, dos cartuchos porta-fusíveis, dos conectores e dos contatos;

d) conexões frouxas e ajustes.

Contudo, a realização de inspeção não é suficiente para garantir que o elo-fusível não seja rompido de forma inesperada, pois esse tipo de manutenção não restaura as características físico-químicas destes componentes. Logo, somente a substituição do fusível pode devolver a confiabilidade deste dispositivo e, conseqüentemente, melhorar a confiabilidade do sistema sob proteção destes. Assim, consideram-se os seguintes níveis de manutenção sobre estes componentes:

- a) m_1 – não realizar manutenção;
- b) m_2 – manutenção mínima;
- c) m_3 – manutenção completa;

Para a manutenção mínima é considerada a realização da inspeção conforme recomendada por ANEEL (2000) e especificada anteriormente, enquanto que para a manutenção completa é considerada a realização de uma inspeção seguida da troca do elo-fusível instalado por outro novo, além de, eventualmente, algum outro componente que se faz necessária a troca de modo a restabelecer a confiabilidade do equipamento para o estado de "tão bom quanto novo"

As chaves fusíveis religadores e as chaves fusíveis de *by-pass*, em termos de características construtivas, apresentam praticamente a mesma estrutura que as chaves fusíveis simples. Portanto, são definidas para estas chaves, as mesmas atividades de manutenção descritas acima. Também são considerados iguais, os impactos destas atividades sobre a confiabilidade destes equipamentos.

3.3.6 Manutenções em Cabos

Cada trecho de cabos da rede primária é considerado neste trabalho como um componente do sistema, e por este motivo, é o componente mais numeroso do sistema. Em termos de manutenções, cada tarefa atribuída a um componente deste tipo, significa a realização de manutenções em cruzetas e isoladores. Manutenções nos cabos propriamente ditos não são consideradas neste estudo, pois estas implicam em substituição dos cabos, ou por motivo de rompimento devido aos fatores ambientais e ações humanas, ou, por motivo de redimensionamento da rede, ambos são considerados neste estudo. Para estes componentes, portanto, são considerados os seguintes tipos de tarefas:

- a) m_1 – não realizar manutenção;
- b) m_2 – manutenção mínima;
- c) m_3 – manutenção completa.

A manutenção mínima é considerada aqui como sendo uma inspeção *in locu* para verificar as condições das cruzetas e dos isoladores. Esta ação implica somente em custos com os deslocamentos das equipes de manutenções para realizar as inspeções. A manutenção é classificada como completa se cruzetas e/ou isoladores forem substituídos.

3.3.7 *Manutenções em Seccionalizadores*

Os seccionalizadores são dispositivos mecânicos de manobra capazes de abrirem e fecharem um circuito quando uma corrente de intensidade desprezível é interrompida, ou restabelecida, quando não ocorre variação de tensão significativa em seus terminais (ANEEL, 2000). Nas redes aéreas de distribuição, esses equipamentos têm a finalidade de seccionar os alimentadores durante os trabalhos de manutenção ou realizar manobras diversas previstas em operação (ANEEL, 2000).

Em termos de vida útil, estima-se para estes equipamentos um período de tempo de 40 anos. No entanto, por operarem sobre carga, alguns de seus componentes necessitam de manutenções periódicas devido ao desgaste provocado pelas as ações eletromecânicas. ANEEL (2000) propõe a realização de manutenções preventivas a cada 3 anos, nas quais devem ser verificadas: regulagem dos seccionadores; ajuste e lubrificação do sistema de articulação; resistência ôhmica dos contatos; verificação da abertura e fechamento manual através da manivela; funcionamento dos contatos auxiliares; entre outras. Neste trabalho, são definidas para esses equipamentos, as seguintes atividades de manutenção:

- a) m_1 – não realizar manutenção;
- b) m_2 – manutenção mínima;
- c) m_3 – manutenção completa;

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo são apresentados tanto o modelo matemático como também a metodologia proposta para a sua solução, a qual consiste num problema de otimização multi-objetivo, combinatório binário, dinâmico, *fuzzy* e não linear.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Ao final desta seção é apresentado o modelo de otimização de planos de manutenção preventiva com foco na confiabilidade. Ao longo desta seção, algumas considerações iniciais importantes sobre a modelagem, bem como cada uma das equações do modelo são apresentadas e discutidas.

4.1.1 *Considerações Iniciais*

No modelo de otimização proposto neste trabalho, os sistemas de sub-transmissão e a subestação de distribuição secundária não são considerados na modelagem. Logo, por sistema de distribuição neste trabalho, considera-se o sistema composto pelo alimentador de distribuição de média tensão (MT) (rede primária), formados pelos transformadores de distribuição e os demais componentes auxiliares como os bancos de capacitores e reguladores de tensão. Além disso, consideram-se que os alimentadores de distribuição e os ramais são aéreos apresentam topologia radial. O modelo também leva em consideração o seccionamento da rede em seções, definidas pelos dispositivos de proteção e/ou manobra instalados ao longo dos alimentadores e ramais.

Os componentes que são contemplados na modelagem são: Os bancos de capacitores, as chaves seccionadoras automáticas (disjuntores, religadores e etc.) e fusíveis, religadores automáticos, transformadores de distribuição, reguladores de tensão, cabos dos alimentadores e ramais de distribuição, cruzetas e isoladores dos postes de rede primária. Cada trecho de cabos de rede primária, conjuntamente com as cruzetas e os isoladores que os sustentam, é referenciado por "cabo primário (CP)". Outra consideração adotada na modelagem refere-se ao modo de falha dos equipamentos. Cada componente pode apresentar diferentes modos de falhas, que por sua vez afetam o sistema de diferentes formas. Neste estudo, no entanto, onde

se tem também como objetivo a confiabilidade do sistema como um todo, é considerado sempre o pior cenário do sistema diante das falhas de seus componentes, ou seja, para os componentes considerados no estudo, considera-se que toda falha é seguida de uma interrupção de parte ou de todo o sistema. Essa abordagem tem como objetivo estabelecer o máximo custo com as interrupções, o que permite uma melhor análise da relação custo-benefício dos planos de manutenções propostos. Assim, se um cenário é esperado devido a uma falha num componente, e um outro cenário mais favorável se apresentar, os benefícios do planejamento são maximizados, visto que o custo-benefício do plano de manutenção estabelecido foi avaliado para o primeiro cenário. Enquanto que o contrário, se um cenário favorável é esperado e um outro cenário pior se configurar, os custos aumentariam frente aos benefícios do plano de manutenções adotado, podendo até inviabilizar sua execução.

4.1.2 Codificação das Variáveis do Modelo

4.1.2.1 Codificação das Variáveis para a metodologia 1

Dado um conjunto de equipamentos E , considerando que para cada equipamento $e \in E$ há um conjunto de Me manutenções para cada período de tempo t de HP, cada tomada de decisão então pode ser modelada pela variável binária, $x_{(e,m)}^t = \{0,1\}$. Portanto, a solução do modelo de otimização é a lista X de todas estas variáveis de decisão,

$$X = \{x_{(e,m)}^t\}, \text{ para } t=1, \dots, hp; e=1, \dots, E \text{ e } m=1, \dots, Me \quad (38)$$

4.1.2.2 Codificação das Variáveis para as metodologias 2 e 3

Dado um conjunto de equipamentos E , considerando que para cada equipamento $e \in E$ há um conjunto de Me manutenções para cada período de tempo $t \in HP$, cada tomada de decisão então pode ser modelada pela variável inteira, $x_e^t = \{0,1,2,3\}$.

Onde “0” significa o nível mais baixo (nenhuma manutenção) e “3” significa execução do nível mais alto (manutenção completa).

O objetivo de qualquer empresa, seja ela uma concessionária de distribuição elétrica ou outra qualquer, é o lucro. Despesas com manutenções do sistema significam redução da margem de lucro. Por outro lado, metas de qualidade do serviço impostas pelas agências reguladoras, exigem que as empresas realizem tarefas de manutenções para garantir a confiabilidade de seus sistemas sob pena de multas.

Os efeitos de planos subdemandados afetam a confiabilidade dos sistemas e, consequentemente, o serviço de fornecimento de energia aos consumidores vinculados. Para as concessionárias, tais efeitos são revertidos em custos adicionais devido ao acréscimo do número de manutenções corretivas, prejuízos com energia não distribuída e pagamento de compensações aos consumidores, em caso de violação dos índices de confiabilidade. Um estudo envolvendo a previsão de tais custos adicionais pode levar a um redimensionamento do orçamento com manutenções preventivas, produzindo assim, uma redução do custo global envolvendo manutenções (preventiva e corretiva) e custos complementares devido às interrupções do sistema. Por outro lado, manutenções excessivas elevam os custos de operação e podem ainda, não garantir índices de confiabilidade otimizados. Neste contexto, é esperado que planos de manutenções otimizados possam garantir uma melhor relação entre os custos com manutenções preventivas e a confiabilidade do sistema como um todo. Portanto, propõe-se neste trabalho a elaboração de um modelo multiobjetivo que busca: (i) minimizar os custos com a realização de manutenções preventivas, e; (ii) maximizar a confiabilidade do SDEE.

4.1.2.2.1 Função custo

Um plano ótimo de manutenções considera os custos pela realização de tarefas de manutenção no horizonte de planejamento e para nosso problema é definido a primeira função objetivo para as três metodologias de acordo com a equação (39).

$$\text{Min } f_1 = \sum_t \sum_e \sum_{m=2}^{Me} P_{(e,m)} \cdot x_{(e,m)}^t \quad (39)$$

Onde:

$P_{(e,m)}$: custo da tarefa de manutenção de nível m para o equipamento e .

$x_{(e,m)}^t$: variável de decisão para uma ação de manutenção de nível m do equipamento e no tempo t .

4.1.2.2.2 Função confiabilidade

A segunda função objetivo para as duas primeiras metodologias (metodologia 1 e 2) é a confiabilidade do sistema de acordo com a equação (40).

$$\text{Max } f_2 = \frac{1}{hp} \sum_{t=1}^{hp} \left[\frac{\sum_{s=1}^S C_s(t) \times W_s}{\sum_{s=1}^S W_s} \right] \quad (40)$$

Embora para fins práticos é definido a função inconfiabilidade de acordo com a equação (41) a qual será a função objetivo avaliado em nosso problema

$$\text{Min } f_2 = \frac{1}{hp} \sum_{t=1}^{hp} \left[\frac{\sum_{s=1}^S (1 - C_s(t)) \times W_s}{\sum_{s=1}^S W_s} \right] \quad (41)$$

Onde:

$C_s(t)$: confiabilidade da seção s no tempo t .

W_s : potência total dos consumidores da seção s .

hp : horizonte de planejamento.

S : número de seções na rede.

No entanto, para a metodologia 3 é definida a função objetivo o qual calcula o **FECm** (Frequência Equivalente por Consumidor médio) como a segunda função objetivo de acordo com a equação (42).

$$\text{Min } f_2 = \frac{1}{hp} \frac{\sum_{t=1}^{hp} \sum_{s=1}^S \lambda_s^t \cdot W_s}{\sum_{s=1}^S W_s} \quad (42)$$

Onde:

$$\lambda_s^t = \sum_{e=1}^s \lambda_e^t$$

λ_e^t : taxa de falha do equipamento e no tempo t .

λ_s^t : taxa de falha da seção s .

W_s : potência total dos consumidores da seção s .

4.1.2.3 Restrições

Para o problema de planos ótimos de tarefas de manutenção são considerados as seguintes restrições:

- **Duração individual pelo consumidor mensalmente:** É uma medida do tempo das interrupções por cada consumidor, considerando que só temos perda do fornecimento da energia nas manutenções nos transformadores, então para nosso problema pode-se calcular de acordo com a equação (43)

$$DIC_{mensal}(t) = \sum_{m=2}^{M_{tr}} TME_{(e_{tr}, m_{tr})} \cdot x^t_{(e_{tr}, m_{tr})} \quad (43)$$

Contudo considerando as falhas pelos atendimentos de emergência é calculado o valor esperado como apresenta-se na equação (44).

$$E[DIC_{mensal}(t)] = \sum_{m=2}^{M_{tr}} TME_{(e_{tr}, m_{tr})} \cdot x^t_{(e_{tr}, m_{tr})} + TMAE \cdot P^t_{FalhaSistema} \quad (44)$$

Onde:

$TME_{(e_{tr}, m_{tr})}$: tempo médio de execução da manutenção ao transformador tr de nível m .

TMAE: tempo médio de atendimento de emergências.

$P^t_{FalhaSistema}$: probabilidade de falha do sistema no tempo t .

Então são definidos as restrições das metas mensais, trimestrais e anuais em função do valor esperado mensal de acordo com as equações (45), (46) e (47).

$$E[DIC_{mensal}(t)] \leq DIC_{\min} \text{ mensal} \quad \forall t \in HPe \forall etr \in ETR \quad (45)$$

$$\frac{1}{k_{trim} DIC} \sum_{t=1+3(trim-1)}^{3(trim)} E[DIC_{mensal}(t)] \leq DIC_{\min} \text{ trim}; \quad \forall trim \in HPTe \forall etr \in ETR. \quad (46)$$

$$\frac{1}{k_{anual} DIC} \sum_{t=1+12(ano-1)}^{12(ano)} E[DIC_{mensal}(t)] \leq DIC_{\min} \text{ anual}; \quad \forall ano \in HPAe \forall etr \in ETR \quad (47)$$

Onde:

$$k_{trim} \approx 1,5 \text{ e } k_{anual} \approx 3.$$

- **Frequência individual pelo consumidor mensalmente:** É uma medida do número das interrupções por cada consumidor, considerando que só temos perda do fornecimento da energia nas manutenções nos transformadores, então para nosso problema pode-se calcular de acordo com a equação (48)

$$FIC_{mensal}(t) = \sum_{m=2}^{M_{tr}} x^t_{(e_{tr}, m_{tr})} \quad \forall t \in HP e \forall etr \in ETR. \quad (48)$$

Contudo considerando as falhas pelos atendimentos de emergência é calculado o valor esperado como apresenta-se na equação (49).

$$E[FIC_{mensal}(t)] = \sum_{m=2}^{M_{tr}} x^t_{(e_{tr}, m_{tr})} + P^t_{FallaSistema} \quad \forall t \in HP e \forall etr \in ETR. \quad (49)$$

Onde:

$P^t_{FallaSistema}$: Probabilidade de falha do sistema no tempo t .

$x^t_{(e_{tr}, m_{tr})}$: Variável de decisão da tarefa de manutenção do equipamento tr de nível m no tempo t .

Então são definidos as restrições das metas mensais, trimestrais e anuais em função do valor esperado mensal de acordo com as equações (50), (51) e (52).

$$E[FIC_{mensal}(t)] \leq FIC_{mensal} \quad \forall t \in HP, e \forall etr \in ETR. \quad (50)$$

$$\frac{1}{k_{trim} FIC} \sum_{t=1+3(trim-1)}^{3(trim)} E[FIC_{mensal}(t)] \leq FIC_{min\ trim}; \quad \forall trim \in HPT e \forall etr \in ETR. \quad (51)$$

$$\frac{1}{k_{anual} FIC} \sum_{t=1+12(ano-1)}^{12(ano)} E[FIC_{mensal}(t)] \leq FIC_{min\ anual}; \quad \forall ano \in HP Ae \forall etr \in ETR \quad (52)$$

- **O número de manutenções:** O número de manutenções para cada tipo de equipamento é uma das restrições importantes já que garantem um plano real de manutenções, então são definidos restrições para equipamentos com 5 níveis de manutenção (equação (53)), 4 níveis de manutenção (equação (54)) e 3 níveis de manutenção (equação (55)).

$$\sum_{t=1}^{hp} [a_{12} \cdot x^t_{(e,2)} + a_{13} \cdot x^t_{(e,3)} + a_{14} \cdot x^t_{(e,4)} + a_{15} \cdot x^t_{(e,5)}] \leq b_1 \quad (53)$$

$$\sum_{t=1}^{hp} [a_{22} \cdot x^t_{(e,2)} + a_{23} \cdot x^t_{(e,3)} + a_{24} \cdot x^t_{(e,4)}] \leq b_2 \quad (54)$$

$$\sum_{t=1}^{hp} [a_{32} \cdot x^t_{(e,2)} + a_{33} \cdot x^t_{(e,3)}] \leq b_3 \quad (55)$$

- **Tempo disponível das equipes de manutenção:** O Tempo médio disponíveis pelos equipes de manutenção é uma das restrições que garantem a factibilidade dos recursos humanos disponíveis para esta tarefa, então é definida como apresenta na equação (56).

$$\sum_{e=1}^E \sum_{m=2}^{Me} (TMP_{(e,m)} + TMD_e + TME_{(e,m)}) \cdot x_{(e,m)}^t \leq T_{factivel}; \quad (56)$$

Onde:

$T_{factivel}$: tempo disponível pelos equipas de manutenção.

$TMP_{(e,m)}$: tempo médio de preparação dos equipas de manutenção.

TMD_e : tempo médio de deslocamento dos equipas até o equipamento e .

$TME_{(e,m)}$: tempo médio de execução da manutenção.

- **Depreciação de ativos dos equipamentos:** A depreciação de ativos é inserida para garantir o investimento de manutenção dentro da vida útil dos equipamentos e é definida de acordo com a equação (57) .

$$I_e + t - x_{t(e, \max\{me\})} \times I_{de} \geq 0; \quad \forall t \in HP, \forall e \in E \quad (57)$$

Onde:

I_e : Idade do equipamento no início do estudo.

I_{de} : Idade na qual o equipamento é considerado depreciável.

$x_{t(e, \max\{me\})}$: Máximo nível de manutenção do equipamento e .

Para garantir ainda que, para cada equipamento $e \in E$, apenas uma atividades de manutenção seja programada em cada período de tempo t , a equação (58) é inserida, complementando assim, o conjunto de restrições do modelo.

$$\sum_{m=1}^{Me} x_{(e,m)}^t = 1 \quad \forall t \in HP, \forall e \in E \quad (58)$$

Este modelo foi proposto inicialmente por Piasson (2014) que considera: os limites dos indicadores de continuidade DIC e FIC de cada conjunto de consumidores da rede; os limites do número de tarefas de manutenções alocadas por componentes; a disponibilidade das equipas de manutenções para executar as tarefas programadas para cada período de tempo t ; o período de vida útil econômica dos equipamentos.

4.2 TÉCNICA DE SOLUÇÃO

Para cada equipamento calcula-se a confiabilidade através do sistema de inferência *fuzzy*. O modelo proposto não apresenta uma formulação explícita, limitando assim a

utilização das técnicas clássicas de otimização para resolução do problema. Por outro lado, embora seja possível encontrar uma solução ótima de problemas combinatoriais, através de busca exploratória das combinações possíveis, essa estratégia é geralmente inviável para problemas reais cujo número de variáveis é demasiadamente grande. Para o problema proposto, cuja variável de decisão, $x_{(e,m)}^t$, é a realização (ou não) de uma tarefa de manutenção tipo $m \in Me$ de um equipamento e , pertencente ao conjunto E de equipamentos de um SDEE, no tempo t de um horizonte de planejamento HP , tem-se que o número de combinações possíveis é dado por:

$$\text{Número de soluções do espaço de busca} = hpn \times Me_1 \times Me_2 \times \dots \times Me_n, \quad (59)$$

Onde Me_i é o número de manutenções possíveis para o equipamento e_i , com $i=1,2,\dots,n$ e n o número de equipamentos do SDEE sob estudo. Ou seja, de acordo com a relação (51) tem-se que o número de combinações possíveis cresce exponencialmente. Este fato decorre que o modelo pertence à classe dos problemas "NP-complexos" (*Non - Polynomial time*) e, portanto, inviabiliza uma exploração ponto a ponto do espaço de busca.

Os Algoritmos Evolutivos (AE) apresentam-se como alternativa para solução deste tipo de problema, assim como as heurísticas e/ou outras meta-heurísticas se apresentam como alternativas eficientes para obtenção de soluções de ótima qualidade para o problema de otimização proposto. Konak, Coit e Smith (2006), enfatizam a grande utilização de abordagens evolucionárias para a resolução de problemas multi-objetivos. Entre estes, os algoritmos evolutivos, mais especificamente, os Algoritmos Genéticos - AGs, têm sido amplamente utilizados nos últimos anos na resolução de problemas de otimização (DEB, 2001; MICHALEWICZ, 1998). De acordo com Bäck, Hammel e Schwefel (1997), a maioria das implementações dos algoritmos evolutivos descendem de três abordagens fortemente relacionadas, mas desenvolvidas de forma independente: os algoritmos genéticos, a programação evolucionária e estratégias de evolução, sendo os AGs os mais adequados e utilizados no campo da otimização.

Neste sentido, um algoritmo evolutivo é proposto como metodologia de resolução do problema de otimização proposto. Os algoritmos genéticos são procedimentos de busca e otimização cujo princípio de funcionamento se baseia na seleção natural das espécies (DEB, 2001; MICHALEWICZ, 1998). No AG uma população de indivíduos (propostas de solução do problema) evolui ao longo de uma sequência de gerações (iterações), após as quais se

espera a obtenção do ótimo global ou de soluções com valores na vizinhança deste (NETO, 2008).

Os AGs, como técnica de otimização, apresentam algumas vantagens frente aos métodos de otimização tradicionais: (i) Trabalham com uma população de soluções simultaneamente, ao contrário dos métodos tradicionais que trabalham com uma única solução; (ii) Não necessitam de informações adicionais, como por exemplo, da derivada dos objetivos e das restrições; (iii) Possuem mecanismos para escapar da atração de ótimos locais, e, principalmente; (iv) Não necessitam de um modelo matemático explícito para execução do processo de otimização. Esta última característica justifica em parte a utilização de um AG para otimização do problema de otimização proposto. Já a característica (i), segundo Deb (2001), permite a aplicabilidade dos AGs na resolução de problemas multi-objetivos, visto que num procedimento de otimização multi-objetivo ideal, espera-se encontrar tantas soluções ótimas de Pareto quantas forem possíveis.

Um EA para otimização multi-objetivo foi implementado pela primeira vez em 1984 e denominava VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) (DEB, 2001). Alguns anos depois, Fonseca e Fleming (1993) implementam o primeiro MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) que utiliza uma classificação da população de um AG por dominância. Desde então, vários outros MOGAs foram e continuam sendo desenvolvidos com o objetivo de melhorar a convergência dos algoritmos (obter soluções de melhor qualidade) e diminuir a complexidade computacional, entre eles, o algoritmo evolutivo NSGA-II.

O NSGA-II (*Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*), proposto por Deb et al. (2002), é um algoritmo evolutivo multi-objetivo baseado em elitismo através de ordenamento por não dominância. Ainda de acordo com Deb et al. (2002) o NSGA-II apresenta três importantes características diante da grande maioria dos AEs: (i) Complexidade computacional da ordem de MN^2 ao invés de MN^3 ; (ii) Abordagem elitista, que de acordo com Zitzler, Deb e Thiele (2000), melhora a otimização dos AEs; (iii) Utilização de um operador de seleção por distância de multidão (uma medida de densidade das soluções numa vizinhança), que elimina a necessidade de um parâmetro de nicho adicional, como em outros AEs. Essas características colocam o NSGA-II numa posição de destaque diante de outros AEs, o que justifica a crescente utilização deste algoritmo em problemas de otimização multi-objetivos. Portanto, diante deste contexto de desenvolvimento das técnicas dos AEs para tratar problemas multi-objetivos e, em especial, das características do NSGA-II, é de se esperar que

a utilização de tal algoritmo como metodologia de resolução do problema de otimização de planos de manutenções forneça resultados de qualidade.

4.2.1 *NSGA II-Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

Nesta seção apresenta-se o NSGA-II. Na primeira subseção (subseção 4.2.1.1) apresenta-se o conceito de dominância. Posteriormente, na subseção 4.2.1.2, descreve-se o funcionamento de um algoritmo genético clássico, sua utilização como algoritmo de busca, seus aspectos evolutivos que permitem a melhora dos resultados ao longo das gerações e suas principais etapas. Após isso, na subseção 4.2.1.3, o algoritmo NSGA II, que usa em sua implementação o critério de dominância afim de estabelecer o conceito de qualidade no seu espaço de soluções é apresentado. Por fim, na subseção 4.2.3 descreve-se o funcionamento de dois processos importantes que o NSGA II utiliza para fazer a seleção das soluções, primeiramente o *Fast Non-Dominated Sorting* e depois o *Crowding Distance* (que é um tipo de Operador de Diversidade).

4.2.1.1 *Dominância*

O conceito de dominância, que é um conceito usado pelos algoritmos multi-objetivos que utilizam tomada de decisão *a posteriori*, foi implementado para proporcionar uma comparação mais justa entre os vários objetivos. Essa classe de algoritmos considera a otimização de mais de um objetivo (vários objetivos são minimizados ou maximizados dependendo do tipo de problema), sendo estes normalmente conflitantes.

O critério de dominância é definido como:

Dado dois indivíduos p e q pertencentes a uma mesma população P , então, um indivíduo p domina um indivíduo q , se no mínimo o valor num dos objetivos de p é melhor que o mesmo objetivo em q e o restante dos valores dos objetivos de p não podem ser piores que o restante dos mesmos valores nos objetivos em q . Ou seja, isso significa dizer que p não pode possuir nenhum objetivo com menos qualidade do que q .

Ao final de cada análise, um determinado número de indivíduos é classificado como pertencente a uma categoria específica denominada *fronteira de Pareto*, e ao ser concluído o processo classificatório todos os indivíduos estarão inseridos em uma das n fronteiras.

A fronteira 1 é constituída de todas as soluções não-dominadas. A fronteira 2 pode ser obtida considerando todas as soluções não-dominadas excluídas as soluções da fronteira 1. Para determinação da fronteira 3, excluem-se se as soluções previamente classificadas nas fronteiras 1 e 2, e assim por diante até que todos os indivíduos tenham sido classificados em alguma fronteira. A seguir, é apresentada uma descrição completa sobre o Algoritmo Genético clássico.

4.2.2 Algoritmos Genéticos

AGs foram introduzidos pela primeira vez por J.H. Holland e são baseados no mecanismo de seleção natural proposto por Charles Darwin. Estes algoritmos permitem que, a partir de um conjunto de soluções iniciais, com o passar das gerações (número de iterações do AG), este possa atingir resultados ainda melhores do que os das gerações anteriores.

Um AG convencional é constituído por quatro etapas: Geração de população inicial, Cruzamento, Mutação e Seleção. Através dos operadores de cruzamento, mutação e seleção, é possível melhorar a qualidade dos indivíduos entre uma geração e outra. São eles que atribuem ao algoritmo a capacidade de evoluir. Nas próximas subsecções são apresentados cada um desses operadores utilizados neste trabalho.

4.2.2.1 Codificação do Problema

A estratégia de codificação das variáveis de decisão é uma das etapas mais importantes na implementação do problema para ser resolvido através de um AG. Desta codificação decorre a natureza dos genes e a dimensão do cromossomo, que em termos computacionais, estão relacionados com a quantidade de memória de máquina necessária e o tempo de execução do algoritmo, os quais devem ser considerados para a resolução de problemas de grande porte. Para o problema de otimização em questão, a variável de decisão é:

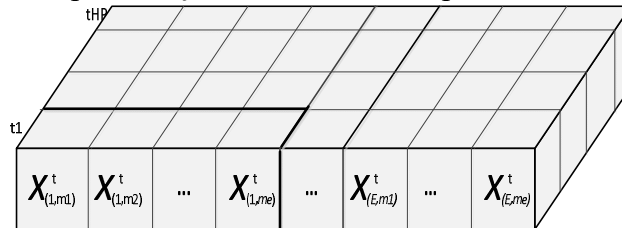
$$x_{(e,m)}^t \tag{60}$$

Esta variável corresponde à tomada de decisão sobre a realização ou não, de uma atividade de manutenção de nível m no equipamento e no tempo t . Cada cromossomo deve representar uma proposta de solução do problema de otimização. Logo, o cromossomo deve conter conjunto das variáveis de decisão $x_{(e,m)}^t$ do modelo proposto, ou seja,

$$\text{Cromossomo} = \{x_{(e,m)}^t\} \text{ para } t=1, \dots, hp; e=1, \dots, |E|; m=1, \dots, Me; \quad (61)$$

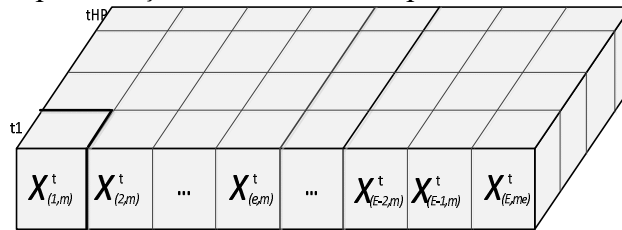
Assim, define-se o cromossomo como sendo a cadeia de $|E|$ genes, onde E é o conjunto dos equipamentos considerados no planejamento. As Figura 23 e Figura 24 ilustram a composição destes cromossomos para as codificações apresentadas na seção 4.1.2.

Figura 23 – Representação do cromossomo para a metodologia 1.



Fonte: Adaptado de Piasson (2014).

Figura 24 – Representação do cromossomo para as metodologias 2 e 3.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2.2 Geração de População Inicial

Diferentemente das outras etapas, a geração de população inicial é realizada somente no começo do algoritmo e não se repete ao longo das próximas gerações. Indivíduos que codificam um grupo de tarefas de manutenções são aleatoriamente gerados dentro do algoritmo e armazenados em uma estrutura de dados.

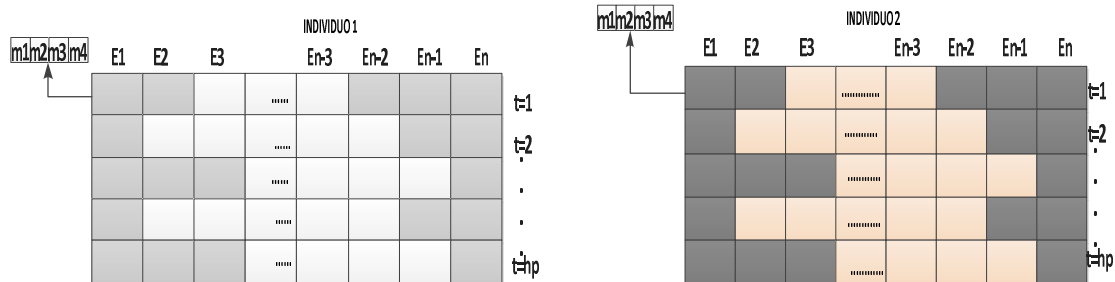
4.2.2.3 Operador de Seleção

Esta é a etapa mais importante de um AG, pois é nessa fase que utiliza a avaliação da função objetivo que fornece ao algoritmo padrões para selecionar os melhores indivíduos. A função objetivo é essencial para propagar às gerações futuras os melhores resultados de cada geração. Neste caso, somente as melhores soluções continuarão a existir na próxima geração. Nesse trabalho é considerado o processo de seleção usado no NSGA-II que utiliza o conceito de dominância.

4.2.2.4 Operador de Cruzamento

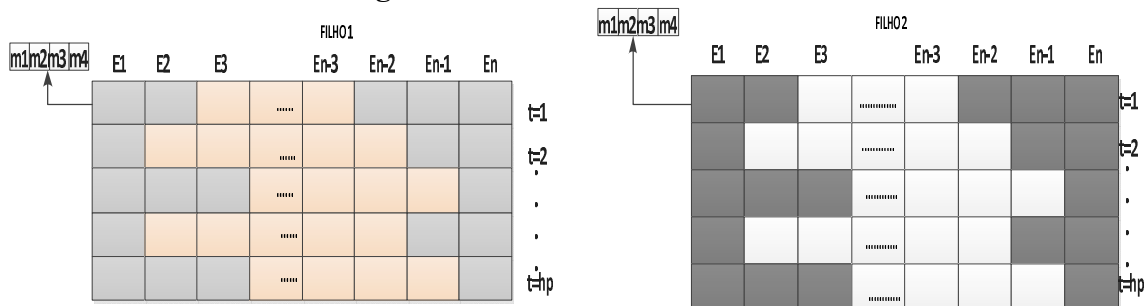
Os indivíduos existentes na população, respeitando uma probabilidade inicialmente imposta para cada tempo, $t=1, \dots, HP$ irão trocar sequências, aleatoriamente escolhidas, de suas informações mediante a seleção aleatória de dois pontos de cruzamento, gerando novos indivíduos que herdam características dos indivíduos anteriores. Este operador é semelhante à união cromossômica para formar novas combinações de genes.

Figura 25 – Pais selecionados para o cruzamento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 26- Filhos resultado do cruzamento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2.5 Operador de Mutação

A operação de mutação não agrega novos indivíduos à população e sim uma pequena perturbação em alguns elementos. Com este operador modificam-se indivíduos obedecendo às duas probabilidades predefinidas, a primeira delas participa na seleção do equipamento e que será modificado. A segunda altera o nível de manutenção, e para isto, define-se uma probabilidade de modificação do nível de manutenção no equipamento e no tempo t . Se a probabilidade for menor que a probabilidade predefinida, diminui-se um nível de manutenção, caso contrário, um nível é acrescentado.

Figura 27 – Processo de mutação pela metodologia 1.

Equipamento sim mutação

m1	m2	m3	m4	
0	1	0	0	t=1
1	0	0	0	t=2
0	0	1	0	t=3
0	0	1	0	t=4
0	1	0	0	t=5

Subir o nível se a Pmut > 50

m1	m2	m3	m4	
0	1	0	0	t=1
1	0	0	0	t=2
0	0	0	1	t=3
0	0	1	0	t=4
0	1	0	0	t=5

baixar o nível se a Pmut ≤ 50

m1	m2	m3	m4	
0	1	0	0	t=1
1	0	0	0	t=2
0	1	0	0	t=3
0	0	1	0	t=4
0	1	0	0	t=5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 - Processo de mutação pela metodologia 2 e 3.

Equipamento sim mutação

E1	E2	E3	E4	
0	1	0	0	t=1
3	2	3	1	t=2
2	0	2	0	t=3
2	0	1	0	t=4
1	1	0	1	t=5

Baixar o nível se a Pmut > 50

E1	E2	E3	E4	
0	1	0	0	t=1
3	2	3	1	t=2
2	0	1	0	t=3
2	0	1	0	t=4
1	1	0	1	t=5

Subir o nível se a Pmut ≤ 50

E1	E2	E3	E4	
0	1	0	0	t=1
3	2	3	1	t=2
2	0	3	0	t=3
2	0	1	0	t=4
1	1	0	1	t=5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2.6 Convergência

Para verificar a convergência do AGMO foi adotado o critério de quantidade de gerações como condição, o que finaliza a sua execução.

4.2.3 O NSGA-II

O algoritmo NSGA-II (DEB *et al.*, 2000) é baseado em uma ordenação elitista por dominância (*Pareto ranking*). Esse procedimento consiste em classificar as soluções de um conjunto M em diversas fronteiras F_1, F_2, \dots, F_k conforme ao grau de dominância de tais soluções. Assim, a fronteira F_1 contém as soluções não -dominadas de todo o conjunto M . A fronteira F_2 possui as soluções não – dominadas de $M-F_1$; F_3 contém as soluções de $M-(F_1 \cup F_2)$ e assim sucessivamente.

O procedimento de ordenação por dominância proposto por Deb *et al.* (2000) é mostrado no algoritmo 1. Para cada solução i contida em P são calculados dois valores:

- ndi número de soluções que dominam a solução i ;
- Ui conjunto de soluções que são dominadas pela solução i .

Nas linhas 1–7 do algoritmo 1 calculam-se estes valores para as soluções em M . Além disso, as soluções com $ndi = 0$ estão contidas na fronteira F_1 . Em seguida, as linhas 9–16 percorrem o conjunto de soluções dominadas Ui para cada solução i de F_1 . O contador ndj de cada solução j em Ui é reduzido de 1. Se $ndj = 0$ então a solução j pertence à próxima fronteira, neste caso F_2 . A iteração das linhas 9–16 é repetida até que todas as soluções estejam classificadas em uma fronteira. A Figura 29 ilustra este procedimento aplicado às soluções que minimizam f_1 e f_2 .

O algoritmo NSGA-II trabalha com duas populações, denotadas como P e Q de dimensão N . As populações P e Q em cada iteração $t=1,2,\dots,Niter$ são denotadas por P_t e Q_t , respectivamente. Na primeira geração, os indivíduos iniciais da população P_1 geram as soluções em Q_1 pela aplicação dos operadores de seleção, recombinação e mutação. A seguir, é estabelecido um processo competitivo para preencher N vagas na população P_{t+1} entre $2N$ indivíduos contidos em $R_t = P_t \cup Q_t$. Esta operação é realizada usando ordenação por dominância em R_t , encaminhando as soluções não dominadas contidas nas

fronteiras diretamente para a próxima geração (elitismo). Para garantir a diversidade na fronteira calculada, o NSGA-II emprega uma estimativa da densidade das soluções que são vizinhas de cada indivíduo da população. Assim, calcula-se a distância média entre duas soluções adjacentes a cada indivíduo para todos os objetivo.

Esse valor é denominado distância de multidão. O Algoritmo 2 mostra os passos a seguir para calcular tal valor, onde $crowdist_n$ é o valor da distância de multidão do n -ésimo indivíduo do conjunto M (denotado como Mn) e $fm(Mn)$ é o valor da m -ésima função objetivo para tal indivíduo.

Algoritmo1: Algoritmo para Ordenação por Dominância.

Entrada: M , um conjunto de soluções.

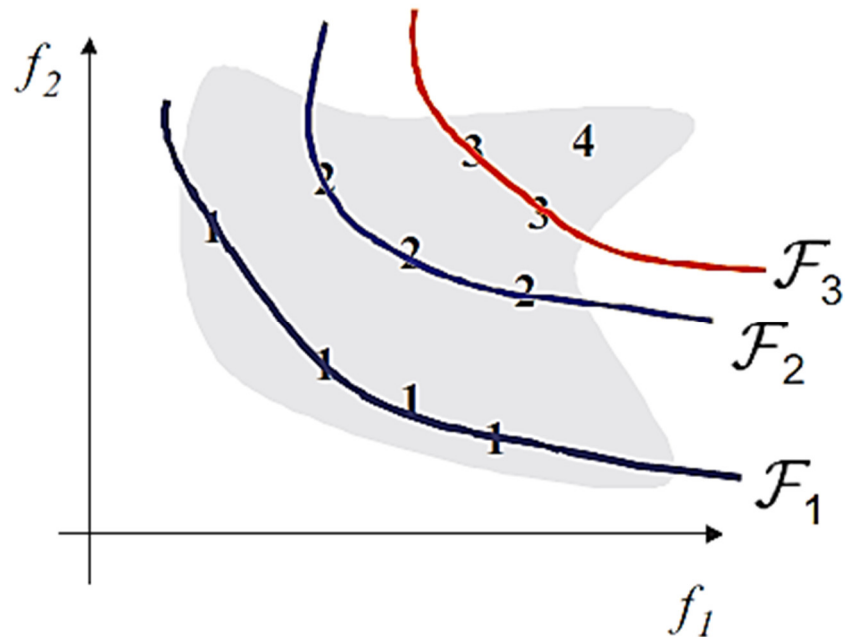
Saída: $F1, F2, \dots, Fk$, as fronteiras que classificam as soluções de M .

```

1  para cada solução  $i \in M$  faça
2       $nd_i = 0$ 
3       $U_i = \emptyset$ 
4          Para cada solução  $j \neq i$  e  $j \in M$  faça
5              se  $i \leq j$  então  $U_p = U_p \cup \{j\}$ 
6              se  $j \leq i$  então  $nd_i = nd_i + 1$ 
7          Fim
8      se  $nd_i = 0$  então  $F1 = F1 \cup \{i\}$ 
9      Fim
10      $K = 1$ 
11     Enquanto  $Fk \neq \emptyset$  faça
12          $Temp = \emptyset$ 
13         Para cada solução  $i \in Fk$  faça
14             Para cada solução  $j \in U_i$  faça
15                  $n_j = n_j - 1$ 
16             Se  $n_j = 0$  então  $Temp = Temp \cup \{j\}$ 
17         Fim
18     Fim
19      $k = k + 1$ 
20      $Fk = Temp$ 
21 Fim
```

Fonte: (Deb,2001)

Figura 29 – Ordenação por Rank das fronteiras de Pareto.



Fonte: Deb (2001)

A aptidão de cada solução i é determinada pelos seguintes valores:

1. $rank_i = k$, o valor de *ranking* i é igual ao número da fronteira F_k à qual pertence;
2. $crowdist_i$, o valor de distância de multidão de i .

Algoritmo2: Cálculo da distância de multidão.

Entrada: M , um conjunto de $|M|$ soluções.

Saída: $crow_n$, valores de distância de multidão da n -ésima solução em M .

- 1 para solução $n = 1, 2, 3, \dots, |M|$ faça $dist_n = 0$
 - 2 para $m = 1, 2, \dots, N_{obj}$ faça
 - 3 Classificar M por f_m
 - 4 $crowdist_1 = crowdist_{|M|} = \infty$
 - 5 para $n = 2 \dots |M| - 1$ faça

$$crowdist_n = crowdist_n + f_m(M_{n+1}) - f_m(M_{n-1})$$
- Fim
- Fim
-

Fonte: Deb (2001)

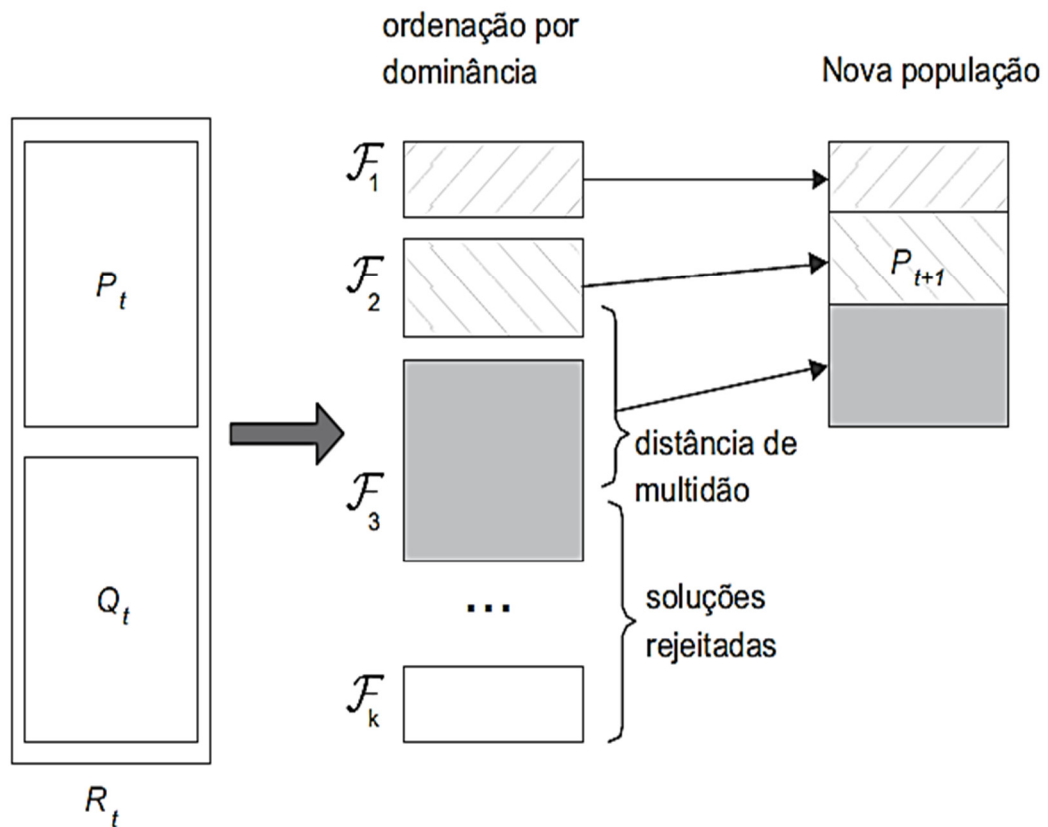
O NSGA-II emprega um processo de seleção por torneio. Em tal abordagem, duas soluções são comparadas para escolher qual delas vai gerar descendentes na nova população.

Uma solução i é escolhida sobre uma solução j se:

1. i possui um ranking menor que j , ou seja, $\text{rank}_i < \text{rank}_j$;
2. Se ambas as soluções possuem o mesmo ranking e i possui um maior valor de distância de multidão (ou seja, $\text{rank}_i = \text{rank}_k$ e $\text{crowdist}_i > \text{crowdist}_j$).

O cálculo da distância de multidão permite que as soluções melhores espalhadas passem a ocupar as últimas vagas disponíveis de P_{t+1} garantindo a diversidade das soluções. A população Q_{t+1} é gerada utilizando os operadores de seleção por torneio, recombinação e mutação em P_{t+1} . O NSGA-II continua por $Niter$ iterações e as soluções finais encontram-se em $P_{t+1} \cup R_{t+1}$. A sequência de passos do NSGA-II é descrita no Algoritmo 3. A Figura 30 mostra o esquema para uma iteração do NSGA-II.

Figura 30 – Esquema do modelo NSGA-II



Fonte: Deb (2001).

Algoritmo 3: NSGA-II

Entrada: Conjunto de parâmetros relevantes ao NSGA-II.

Saída: soluções nas populações P_{final} e Q_{final} .

```

1  Inicialização
2      Criar uma população de soluções aleatórias  $PI$  de  $N_{ind}$  indivíduos
3      Ordenhar  $PI$  por dominância
4      Aplicar operadores genéticos em  $PI$  para gerar uma nova população,  $QI$ 
    de tamanho  $N_{ind}$ 
5      Para cada geração  $t=1, \dots, N_{iter}$  faça
        Aplicar o algoritmo 1 em  $R_t = P_t \cup Q_t$ 
         $K = 1$ 
7      Enquanto  $|P_{t+1} + F_k| \leq N_{ind}$  faça
            Aplicar o Algoritmo 2 em  $F_k$ 
8             $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_k$ 
9             $k = k + 1$ 
11         Fim
12         Aplicar o Algoritmo 2 em  $F_k$ 
13         Classificar a  $F_k$  pelo ranking e a distância de multidão
14         Copiar as primeiras  $N_{ind} - |P_{t+1}|$  soluções de  $F_k$  para  $P_{t+1}$ 
            Gerar a nova população  $Q_{t+1}$  aplicando os operadores genéticos em  $P_{t+1}$ 
            Fim
15      $P_{final} = P_{t+1}$ 
16      $Q_{final} = Q_{t+1}$ 

```

Fonte: Deb (2001)

5 RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos com a implementação computacional da metodologia proposta para efetuar a otimização dos planos de manutenções preventivas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os sistemas testes utilizados são mostrados no APENDICE A e consistem de um alimentador real de pequeno porte e um alimentador real de médio porte , que são analisados com objetivo de avaliar a metodologia proposta.

5.1 DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada do programa computacional para simular o plano de manutenções otimizadas de equipamentos elétricos em cada mês do horizonte de planejamento (HP) são:

- Os custos das tarefas de manutenções de cada equipamento.
- Os tempos decorridos entre a realização de cada tarefa de manutenção dos equipamentos da rede.
- A disponibilidade de tempo das equipes para a execução de tarefas de manutenções preventivas.
- O tempo consumido das equipes de manutenção para cada equipamento em estado de falha em função do tipo de manutenção a ser realizado.
- O horizonte de planejamento (HP).
- A idade de cada equipamento do sistema no início do estudo.
- Dados de relatórios de falhas de cada equipamento para o cálculo da taxa de falhas, fornecidos pela empresa distribuidora.

5.1.1 Custos das tarefas de manutenções

Tabela 4 - Custo das tarefas de manutenção.

Equipamento	Custo das tarefas de manutenção para cada nível m (R\$)			
	M1	M2	M3	M4
Chaves	0	15	50	-
Chaves de óleo/sf6	0	50	400	-
Banco de capacitores	0	200	500	-
Reguladores de tensão	0	120	1500	12500
Disjuntores	0	200	300	12500
Transformador de distribuição	0	120	300	1974,5
Cabos primários	0	8	100	-

Fonte: Piasson (2014).

Na Tabela 4 são mostrados os valores de custo para os diferentes tipos de equipamentos que compõem o sistema em estudo. Estes custos foram fornecidos por técnicos e engenheiros do setor de manutenção de empresas de distribuição de energia elétrica. Esses valores representam um custo médio para cada equipamento de uma mesma classe de componentes.

Na realidade os custos de manutenção para uma mesma classe de equipamento dependem muito das características próprias como da potência, modelo, fabricante, materiais isolantes, etc. Porém neste trabalho, para estimar os valores da Tabela 4 considerou-se um nivelamento dos valores de cada tarefa de manutenção, entre os equipamentos de uma mesma classe, com base nas manutenções de custo mais elevado. Deste modo, os valores de custo mostrados nestas tabelas estão superestimados e, portanto, o valor real do custo de cada plano de manutenção do sistema, é menor ou, no máximo, igual ao valor obtido.

5.1.2 Tempos das manutenções preventivas e corretivas

O $TMAE_{(e,m)}$ (o tempo médio de atendimento de emergências devido à falha dos equipamentos $e \in E$) está relacionado com os tempos desde o reporte da falha na central até a restauração desta.

$$TMAE = TMP + TMD + TME + TMLF \quad (62)$$

Onde:

$TMAE(e,m)$: tempo médio de atendimento de emergências devido à falha dos equipamentos.

$TML(e,m)$: tempo médio de localização da falha.

$TMP(e,m)$: tempo médio de preparação das equipes de manutenção.

$TMD(e,m)$: tempo médio de deslocamento até o equipamento.

$TME(e,m)$: tempo médio de execução da manutenção.

Enquanto o $TME_{(e,m)}$ (tempo médio decorrido com a realização de uma atividade de manutenção do tipo $m \in Me$ para um equipamento $e \in E$), está relacionado com os tempos de execução das atividades de manutenções preventivas.

As informações tanto do TME quanto dos $TMAE$ estão disponíveis nos relatórios das equipes de manutenções dos SDEE. No entanto, estes relatórios podem não estar prontamente disponíveis para a obtenção dos TME e $TMAE$ de cada equipamento, assim, uma estimativa destes tempos pode ser obtida utilizando os valores dos TME e $TMAE$ apurados pelas empresas detentoras de concessão de SDEE, no conjunto dos componentes dos alimentadores de cada subestação de distribuição. O órgão regulador ANEEL torna, portanto, estes tempos de conhecimento público.

Tabela 5 – O TME (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>
TR	0	120	150	180
RT	0	120	150	180
CS	0	30	60	0
CP	0	30	60	0
DJ	0	60	120	0
LN	0	30	120	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 6 – O *TMD* (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>
TR	0	60	80	100
RT	0	60	80	100
CS	0	60	100	0
CP	0	60	100	0
DJ	0	60	100	0
LN	0	60	100	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 7 – O *TMP* (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>
TR	0	20	30	60
RT	0	20	30	60
CS	0	20	30	0
CP	0	20	30	0
DJ	0	20	30	0
LN	0	20	30	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8 – O *TML* (minutos) para cada tipo de equipamento e nível de manutenção.

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>TEMPO MÉDIO DE LOCALIZAÇÃO DE FALHA (minutos)</i>
TR	30
RT	30
CS	30
CP	30
DJ	30
LN	30

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.3 Disponibilidades das equipes de manutenção

Um plano de manutenção otimizado deve alocar tarefas de manutenções distribuídas ao longo do horizonte de planejamento considerado, de modo que as tarefas programadas para cada subperíodo de tempo *t mensal* não requeiram uma quantidade de horas-homens-mensal maior que a disponível. Deve-se também considerar que as equipes de manutenção não são encarregadas somente da realização de manutenções preventivas, mas também das

manutenções corretivas, atendimentos emergenciais, ligação e religação de consumidores na rede, entre outras atividades. Assim para as simulações realizadas é considerado que o 10% de carga horária de trabalho das equipes de manutenções é utilizada com a execução de atividades de manutenções preventivas do sistema.

As horas mensais disponíveis para a execução de atividades de manutenções preventivas para o sistema é de 36,96 horas.

5.1.4 Constantes das equações

Os valores para as constantes a_{ij} b_j das equações do modelo de otimização proposto, são apresentados na Tabela 9. Estes valores são definidos de modo que apenas uma atividade de manutenção de nível mais alto $m3$ ou $m4$ ou até duas atividades de manutenções de níveis mais baixos $m1$ e $m2$, possam ser alocadas para cada equipamento $e \in E$ dos sistemas sob estudo no horizonte de planejamento considerado.

Tabela 9 - Valores das constantes de execução de manutenções.

i/j	a_{ij}				b_i
	2	3	4	5	
1	4	5	6	-	9
2	4	5	6	-	9
3	4	5	-	-	9

Fonte: Piasson (2014).

5.1.5 Considerações sobre os consumidores

A energia elétrica fornecida aos consumidores é cobrada por unidades de KWh, sendo considerado neste trabalho o valor de R\$ 0,36078 para cada KWh. O faturamento mensal é utilizado na modelagem para o cálculo das penalizações devido às violações dos indicadores padrão de continuidade (*DICp* e *FICp* mensal, trimestral e anual).

Para este trabalho considerou-se que todos os consumidores têm os mesmos valores padrões dos indicadores de continuidade definidos pela ANEEL

Tabela 10 - Dados de entrada dos Consumidores.

<i>CONSUMIDOR</i>	<i>DICp MENSAL</i>	<i>FICp MENSAL</i>	<i>DICp TRIM</i>	<i>FICp TRIM</i>	<i>DICp ANUAL</i>	<i>DICp ANUAL</i>
Consumidores individuais	4	4	6	6	8	8

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.6 *Taxas de falha dos equipamentos*

Nos testes fazem parte dos dados de entrada as taxas de falha dos equipamentos modeladas de acordo ao histórico de falhas no tempo de funcionamento de cada equipamento, as quais foram apresentadas no capítulo 2. Contudo, na Tabela 11 apresentam-se os valores das taxas de falha para cada tipo de equipamento.

Tabela 11 - Dados das taxas de falha para os equipamentos

EQUIPAMENTO “e”	TAXA DE FALHA (falhas/ano)
CS	0,2723
LN	0,4312
CP	0,2723
RT	0,4312
TR	0,2723

Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.7 *Parâmetros de controle do algoritmo NSGA-II*

A calibração dos parâmetros de controle do algoritmo NSGA-II foi realizada através de taxas de cruzamento e mutação adaptativas. As faixas ajustes destes parâmetros foram definidas executando exaustivamente o programa computacional implementado em linguagem de programação C⁺⁺ obtendo-se valores de boa qualidade de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de controle do algoritmo NSGA-II

Descrição	Valores
Número dos indivíduos sistema teste 1 e 2	800
Número de gerações sistema teste 1 e 2	5000

Fonte: Elaboração do próprio autor.

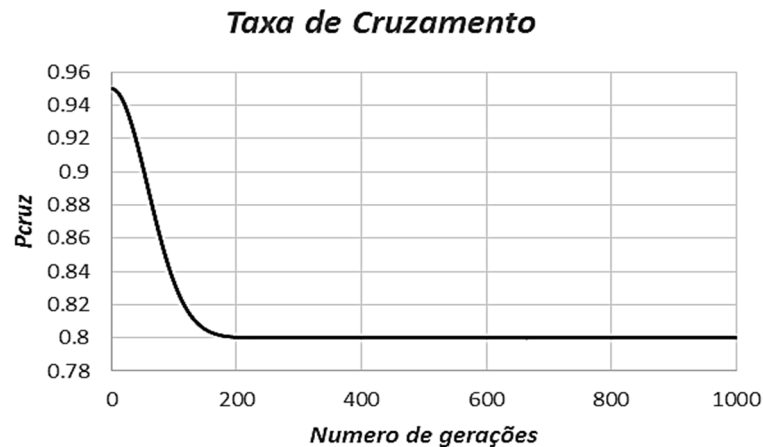
5.1.7.1 Taxa de cruzamento adaptativa para o controle no algoritmo NSGA-II

Neste trabalho foi proposto uma taxa de cruzamento adaptativo para os dois sistemas teste em estudo, baseado no trabalho desenvolvido em Barboza (2010). A taxa adaptativa é função do número das gerações como mostra na equação (63).

$$P_{cruz}(i) = 0.8 + 0.15e^{\frac{-0.5.i^2}{2ng}} ; \text{para } i = 1,2 \dots ng. \quad (63)$$

Então de acordo com a equação (63) a taxa de cruzamento varia com o índice da geração em andamento i até o número total de gerações ng .

Figura 31 – Taxa de cruzamento adaptativo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

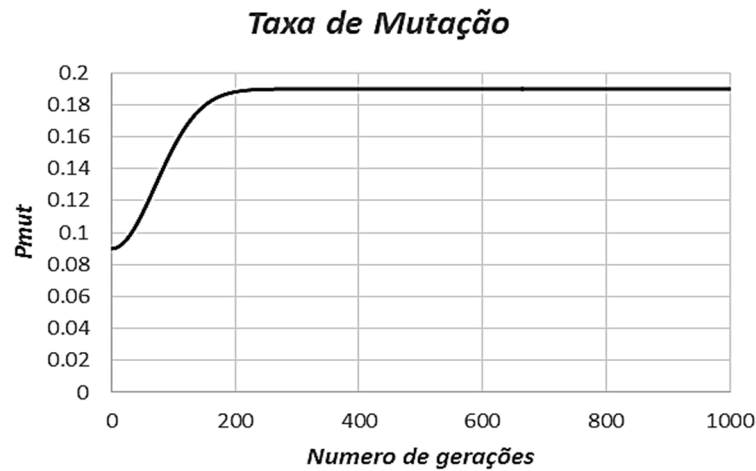
5.1.7.2 Taxa de mutação adaptativa de controle no algoritmo NSGA-II

Neste trabalho foi proposto uma taxa de mutação adaptativa para os dois sistemas teste em estudo, baseado no trabalho desenvolvido em Barboza (2010). A taxa adaptativa é função do número das gerações como mostra na equação (64).

$$P_{mut}(i) = 0.19 - 0.1e^{\frac{-0.4.i^2}{2ng}} ; \text{para } i = 1,2 \dots ng. \quad (64)$$

Então de acordo com a equação (64) a taxa de mutação varia com o índice da geração em andamento i até o número total de gerações ng .

Figura 32 – Taxa de mutação adaptativo.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

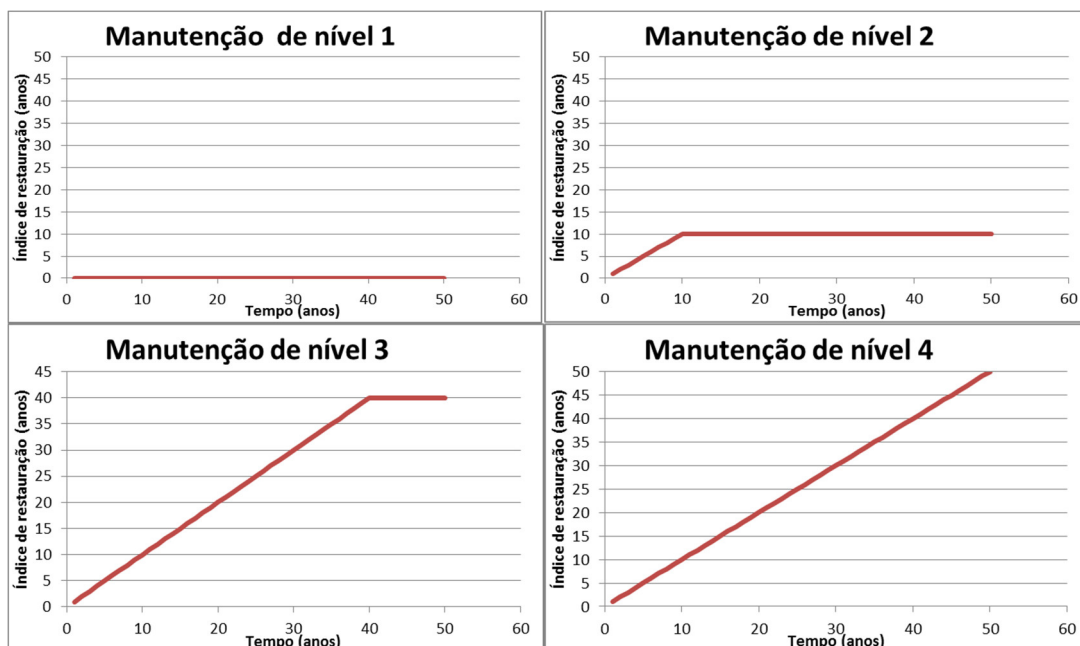
Nas figuras 30 e 31 pode-se verificar que a taxa de cruzamento diminui na faixa de 0,95 até 0,8 e a taxa de mutação aumenta na faixa de 0,09 até 0,19 enquanto aumenta-se o número de gerações.

5.1.8 Índice de restauração dos equipamentos em estudo

Nesta seção são apresentados os impactos dos níveis de manutenções em cada equipamento presentes nos sistema para as diferentes metodologias propostas nestes trabalho.

5.1.8.1 Impactos dos níveis de manutenção para a metodologia 1

Figura 33 – Índices de restauração das manutenções para a metodologia 1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 33 são apresentados os impactos das manutenções nas idades dos componentes devido às manutenções realizadas.

Nas tabelas seguintes são apresentados os valores dos impactos das manutenções nos equipamentos considerados neste estudo, os quais têm comportamento similar aos mostrados na Figura 33. Esses valores foram fornecidos por técnicos e engenheiros com vários anos de experiência na fabricação e manutenção de equipamentos elétricos.

Tabela 13 - Índice IR_m^t de impacto das manutenções nos transformadores de distribuição.

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO				
t(anos)	m1	m2	m3	m4
1	0	1	1	1
2	0	2	2	2
3	0	3	3	3
4	0	4	4	4
5	0	5	5	5
6	0	5	6	6
7	0	5	7	7
8	0	5	8	8
9	0	5	9	9
10	0	5	10	10
11	0	5	10	11
12	0	5	10	12
13	0	5	10	13
14	0	5	10	14
15	0	5	10	15
16	0	5	10	16
17	0	5	10	17
18	0	5	10	18
19	0	5	10	19
20	0	5	10	20
21	0	5	10	20
22	0	5	10	20
23	0	5	10	20
24	0	5	10	20
25	0	5	10	20

Fonte: Piasson (2014).

Na Tabela 13 são apresentados os valores de IR_m^t para um intervalo discretizado de tempo de 25 anos, que corresponde ao período de vida útil econômica estabelecido por ANEEL (2000) e ANEEL (2012), para os transformadores de distribuição. Como se pode verificar, cada manutenção produzirá um recuo temporal (em anos) e, conseqüentemente, um acréscimo na confiabilidade do equipamento reparado. O índice IR_m^t definido para esta classe de componentes é também utilizado para avaliar os impactos das tarefas de manutenções das demais classes de equipamentos consideradas neste estudo, e os valores destes índices, assim como se deu para os transformadores de distribuição, são atribuídos de

acordo com ANEEL (2000) e com as informações obtidas de técnicos e engenheiros atuantes em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Tabela 14 - Índice IR_m^t de impacto das manutenções nos reguladores de tensão

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO				
t(anos)	m1	m2	m3	m4
1	0	1	1	1
2	0	2	2	2
3	0	3	3	3
4	0	4	4	4
5	0	5	5	5
6	0	5	6	6
7	0	5	7	7
8	0	5	8	8
9	0	5	9	9
10	0	5	10	10
11	0	5	10	11
12	0	5	10	12
13	0	5	10	13
14	0	5	10	14
15	0	5	10	15
16	0	5	10	16
17	0	5	10	17
18	0	5	10	18
19	0	5	10	19
20	0	5	10	20
21	0	5	10	20
22	0	5	10	20
23	0	5	10	20
24	0	5	10	20
25	0	5	10	20

Fonte: Piasson (2014).

Tabela 15 - Índice IR_m^t de impacto das manutenções nos disjuntores.

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO				
t(anos)	m1	m2	m3	m4
1	0	1	1	1
2	0	2	2	2
3	0	3	3	3
4	0	4	4	4
5	0	5	5	5
6	0	5	6	6
7	0	5	7	7
8	0	5	8	8
9	0	5	9	9
10	0	5	10	10
11	0	5	11	11
12	0	5	12	12
13	0	5	13	13
14	0	5	14	14
15	0	5	15	15
16	0	5	16	16
17	0	5	17	17
18	0	5	18	18
19	0	5	19	19
20	0	5	20	20
21	0	5	20	21
22	0	5	20	22
23	0	5	20	23
24	0	5	20	24
25	0	5	20	25
26	0	5	20	25
27	0	5	20	25
28	0	5	20	25
29	0	5	20	25
30	0	5	20	25

Fonte: Piasson (2014).

Na Tabela 15 são apresentados os valores dos impactos IR_m^t de cada tarefa de manutenção m_i realizada em um período de tempo t , sobre a linha temporal da vida útil econômica dos disjuntores.

Tabela 16 - Índice IR_m^t de impacto das manutenções para os bancos de capacitores.

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO				
t(anos)	m1	m2	m3	m4
1	0	1	1	1
2	0	2	2	2
3	0	3	3	3
4	0	4	4	4
5	0	5	5	5
6	0	6	6	6
7	0	7	7	7
8	0	7	8	8
9	0	7	9	9
10	0	7	10	10
11	0	7	11	11
12	0	7	11	12
13	0	7	11	13
14	0	7	11	14
15	0	7	11	15

Fonte: Piasson (2014).

Tabela 17 - Índice IR_m^t de impacto das manutenções para as chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto.

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO				
t(anos)	m1	m2	m3	m4
1	0	1	1	1
2	0	2	2	2
3	0	3	3	3
4	0	4	4	4
5	0	5	5	5
6	0	6	6	6
7	0	7	7	7
8	0	8	8	8
9	0	8	9	9
10	0	8	10	10
11	0	8	11	11
12	0	8	12	12
13	0	8	13	13
14	0	8	14	14
15	0	8	15	15
16	0	8	15	16
17	0	8	15	17
18	0	8	15	18
19	0	8	15	19
20	0	8	15	20

Fonte: Piasson (2014).

De acordo com ANEEL (2000), as chaves de um modo geral têm uma vida útil econômica de 15 anos. Cada uma das atividades de manutenção descritas acima impacta sobre

a vida útil das chaves fusíveis de acordo com o tempo que estas são realizadas dentro da linha de tempo da vida útil econômica destes equipamentos. Na Tabela 17 apresentam-se os valores definidos para estes impactos.

Tabela 18 - Índice IR_m^t de impacto das manutenções nos seccionadores.

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO				
t(anos)	m1	m2	m3	m4
1	0	1	1	1
2	0	2	2	2
3	0	3	3	3
4	0	4	4	4
5	0	5	5	5
6	0	6	6	6
7	0	7	7	7
8	0	8	8	8
9	0	9	9	9
10	0	10	10	10
11	0	10	11	11
12	0	10	12	12
13	0	10	13	13
14	0	10	14	14
15	0	10	15	15
16	0	10	16	16
17	0	10	17	17
18	0	10	18	18
19	0	10	19	19
20	0	10	20	20
21	0	10	21	21
22	0	10	22	22
23	0	10	23	23
24	0	10	24	24
25	0	10	25	25
26	0	10	26	26
27	0	10	27	27
28	0	10	28	28
29	0	10	29	29
30	0	10	30	30
31	0	10	31	31
32	0	10	32	32
33	0	10	33	33
34	0	10	34	34
35	0	10	35	35
36	0	10	36	36
37	0	10	37	37
38	0	10	38	38
39	0	10	39	39
40	0	10	40	40

41	0	10	40	41
42	0	10	40	42
43	0	10	40	43
44	0	10	40	44
45	0	10	40	45
46	0	10	40	46
47	0	10	40	47
48	0	10	40	48
49	0	10	40	49
50	0	10	40	50

Fonte: Piasson (2014).

A Tabela 18 apresenta os valores dos impactos IR_m^t de cada tarefa de manutenção mi realizada em um período de tempo t , nos equipamentos do tipo seccionadores.

Tabela 19 - Impacto das manutenções para os cabos primários.

ÍNDICE DE RESTAURAÇÃO POR NÍVEL DE MANUTENÇÃO			
t(anos)	m1	m2	m3
1	0	1	1
2	0	2	2
3	0	3	3
4	0	4	4
5	0	5	5
6	0	5	6
7	0	5	7
8	0	5	8
9	0	5	9
10	0	5	10
11	0	5	11
12	0	5	12
13	0	5	13
14	0	5	14
15	0	5	15
16	0	5	16
17	0	5	17
18	0	5	18
19	0	5	19
20	0	5	20

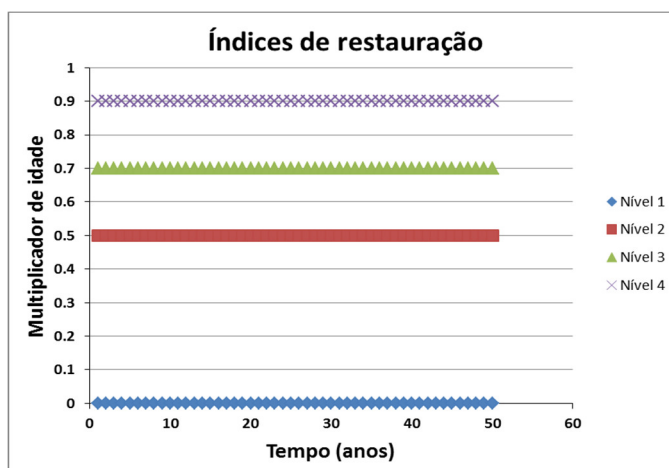
Fonte: Piasson (2014).

Para os cabos, cruzetas e isoladores, referenciados neste trabalho simplesmente por cabos primários, é considerado um período de vida útil de 20 anos. Este valor é tomado como referência para estabelecer a Tabela 19 de valores de impactos das atividades de manutenções sobre a confiabilidade destes componentes do sistema.

5.1.8.2 Impactos dos níveis de manutenção para a metodologia 2

Na Figura 34 são apresentados os impactos das manutenções nas idades de componentes devido às manutenções realizadas nos equipamentos.

Figura 34 – Índices de restauração no tempo de vida útil para a metodologia 2.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 20 apresentam-se os valores dos impactos das manutenções nos equipamentos considerados neste estudo, os quais têm comportamento similar aos ilustrados na Figura 34. Esses valores são os resultados de calcular o valor médio do índice de restauração, os quais foram fornecidos pelas empresas de fabricação e manutenção de equipamentos elétricos.

Tabela 20 – Definição dos $\phi_{(e,m)}^i$ para os equipamentos do sistema.

EQUIPAMENTO	M1	M2	M3	M4
TR	0	0,5	0,7	0,9
RT	0	0,5	0,7	0,9
DJ	0	0,7	1	0
CS	0	0,7	1	0
LN	0	0,7	1	0
CP	0	0,7	1	0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 20 são apresentados os valores dos multiplicadores de idade para esta metodologia, os quais foram calibrados de acordo com a experiência de técnicos e engenheiros no setor de manutenção de sistemas de distribuição.

5.1.8.3 Impactos dos níveis de manutenção para a metodologia 3

Para esta metodologia são definidos os $\delta_{(e,m)}^t$ (multiplicadores da Taxa de Falha) para cada equipamento e para cada nível de manutenção .

Tabela 21 – Definição dos $\delta_{(e,m)}^t$ para os equipamentos do sistema.

<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>
TR	1,04	0,8	0,5	0,01
RT	1,03	0,8	0,5	0,01
DJ	1,01	0,8	0,01	1,01
CS	1,01	0,8	0,01	1,01
LN	1,04	0,8	0,08	1,04
CP	1,04	0,8	0,08	1,04

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Tabela 21 são apresentados os valores dos impactos das atividades de manutenções sobre as taxas de falhas dos componentes do sistema, estes valores consideram que realizar uma manutenção de tipo M1 (nenhuma manutenção) aumenta em 4% a taxa de falha, realizar uma manutenção de tipo M2 (manutenção mínima) diminui em 20% a taxa de falha, realizar uma manutenção de tipo M3 (manutenção média) diminui em 50% a taxa de falha e realizar uma manutenção de tipo M4 (manutenção completa) diminui em 99% a taxa de falha.

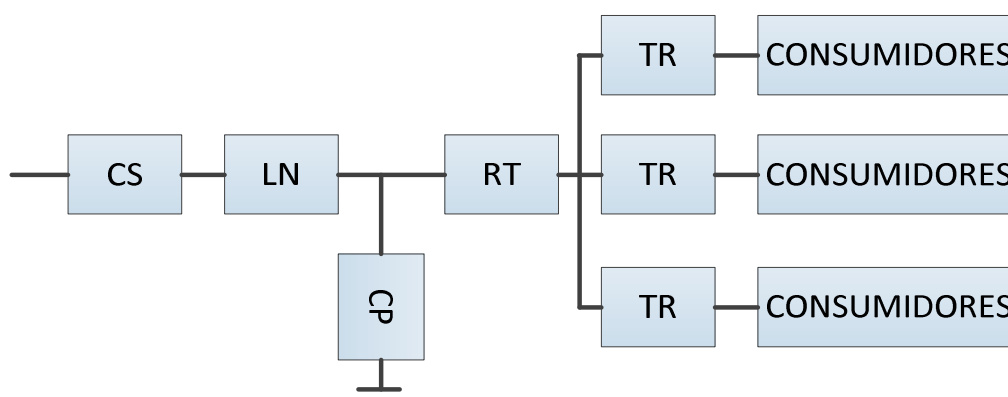
5.1.9 Considerações finais

5.1.9.1 Cálculo do índice de confiabilidade das seções

Neste trabalho os equipamentos são agrupados em seções; já que permite isolar setores com faltas permanentes dos demais setores da rede, e assim, reduzir o número de consumidores afetados por uma falta. Este agrupamento da rede do sistema é feito por meio das chaves de proteção e manobra. Estas últimas, no entanto, permitem isolar seções para a realização de manutenções, mas não são capazes de isolá-las em caso de faltas que afetam o sistema. Desta forma, na avaliação da confiabilidade das seções de uma rede, devem-se distinguir as seções definidas por chaves de proteção daquelas definidas por chaves de manobras. Neste trabalho, no entanto, as chaves de proteção dos equipamentos (transformadores de distribuição, reguladores de tensão, etc.) não são consideradas para o seccionamento das redes de distribuição e nem para o rol de equipamentos considerados pelos planos de manutenções.

A relação de dependência dos principais equipamentos de uma seção, necessária para análise da confiabilidade, é definida por meio do diagrama de rede da Figura 35. Neste diagrama é considerada uma seção composta com os principais componentes dos sistemas de distribuição: Chaves (CS), cabos primários (LN), bancos de capacitores (CP), reguladores de tensão (RT) e transformadores de distribuição (TR); embora alguns destes componentes possam não ser encontrados em todas as seções, como por exemplo os reguladores de tensão. Ressalta-se novamente que as chaves de proteção dos equipamentos, neste caso, dos transformadores de distribuição, reguladores de tensão e banco de capacitores, não são consideradas para seccionamento da rede, o que justifica a formação de uma única seção na Figura 35.

Figura 35 – Componentes de uma seção típica.



Fonte: Adaptado de Piasson (2014).

Para cada consumidor dentro da seção s pode-se calcular a confiabilidade de acordo com a equação (65).

$$C_{consi} = C_{CS} \cdot (1 - (1 - C_{LN}) \cdot (1 - C_{CP})) \cdot C_{RT} \cdot C_{TRI} \quad (65)$$

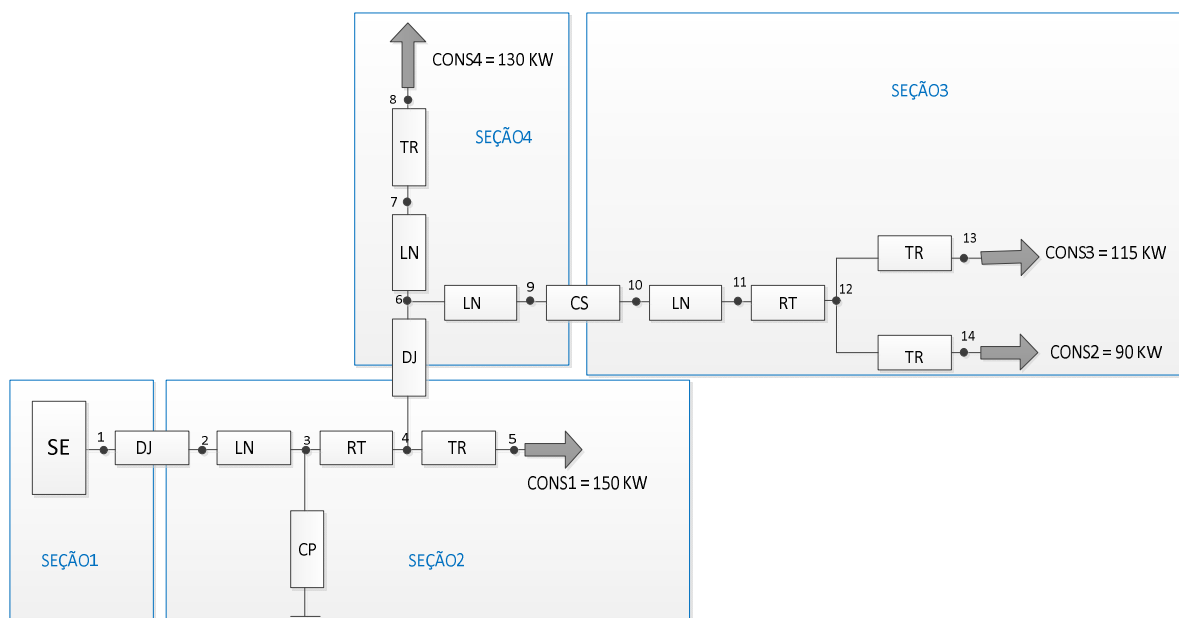
Já com o cálculo da confiabilidade de cada consumidor i pode-se calcular a confiabilidade da seção de acordo com a equação (66).

$$C_s = C_{cons1} \cdot C_{cons2} \cdot C_{cons3} \quad (66)$$

Pode-se ressaltar que a confiabilidade da cada seção s depende das confiabilidades dos consumidores dentro da seção, já que para este trabalho consideramos que eles encontram-se em série.

Na Figura 36 é apresentado um exemplo da metodologia proposta aplicada para o sistema teste com 14 equipamentos

Figura 36 – Sistema teste 1 dividido em seções.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

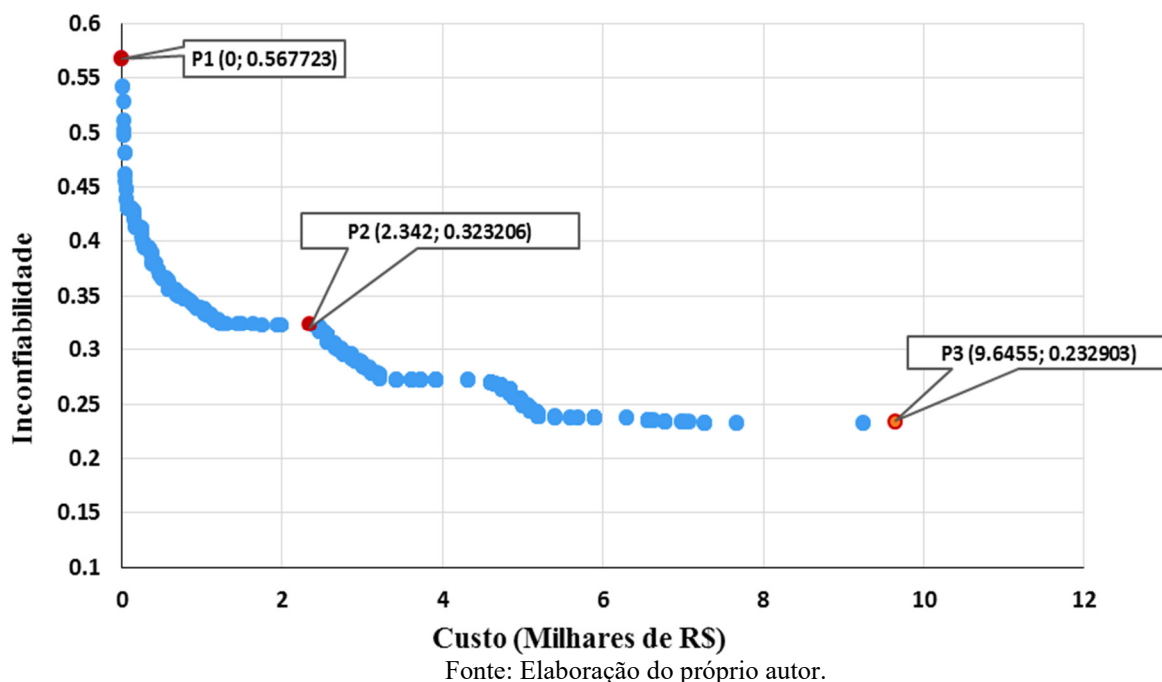
5.2 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta parte apresentam-se os resultados obtidos pelas metodologias propostas a discussão dos mesmos, para os diferentes sistemas testes cujos dados estão apresentados no apêndice A.

5.2.1 Metodologia 1

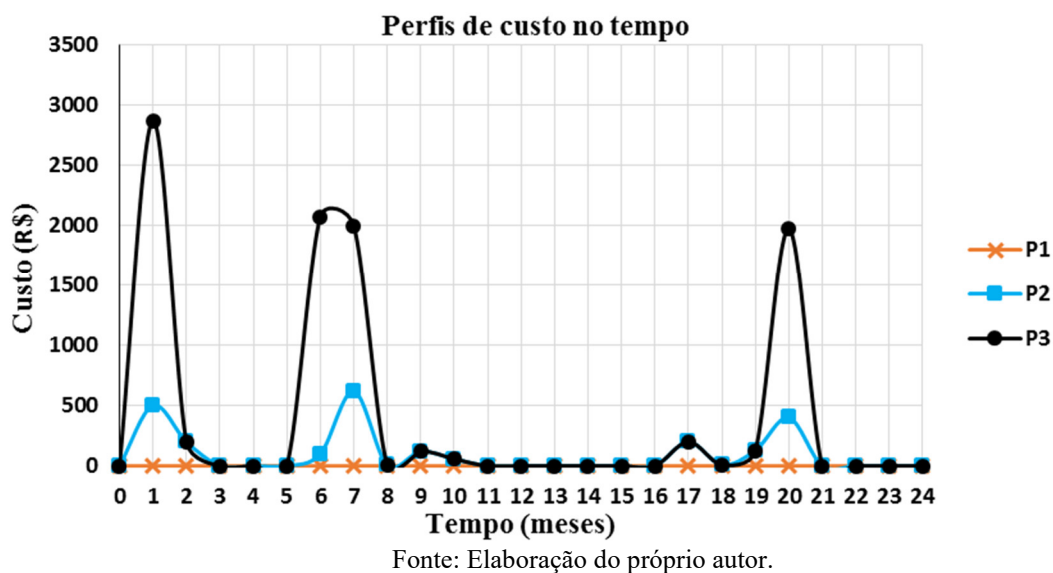
Os resultados para esta metodologia são apresentados nas Figuras 37 a 42 para os dois sistemas teste simulados neste trabalho.

Figura 37 – Curva de Pareto otimizada do sistema teste 1.



Na Figuras 37 é apresentada a fronteira de Pareto otimizada para o sistema teste de 14 equipamentos, dos quais foram selecionados três pontos desta curva para analisar o comportamento dos perfis de custo e da confiabilidade para cada um deles.

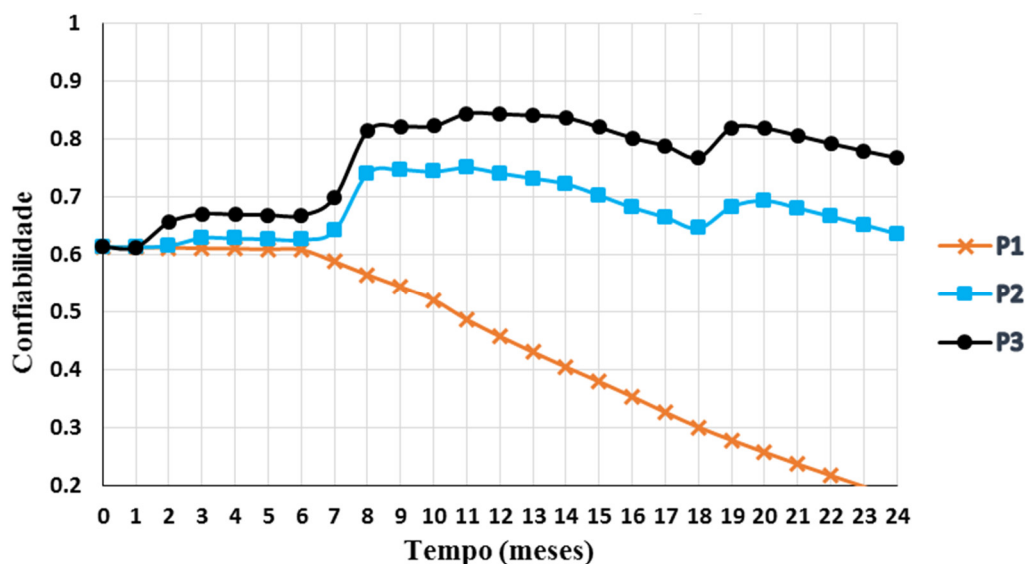
Figura 38 – Perfis de investimento em manutenções para o sistema teste 1.



Na Figura 38 apresentam-se os resultados dos perfis de investimento em manutenções para os três pontos escolhidos da fronteira de Pareto mostrado na Figura 37. O perfil de cor laranja corresponde ao ponto extremo da fronteira de Pareto, a qual representa a ausência das

ações de manutenção ao longo do horizonte de planejamento e o perfil de cor preta representa o máximo custo para a recuperação da confiabilidade, com as restrições do modelo.

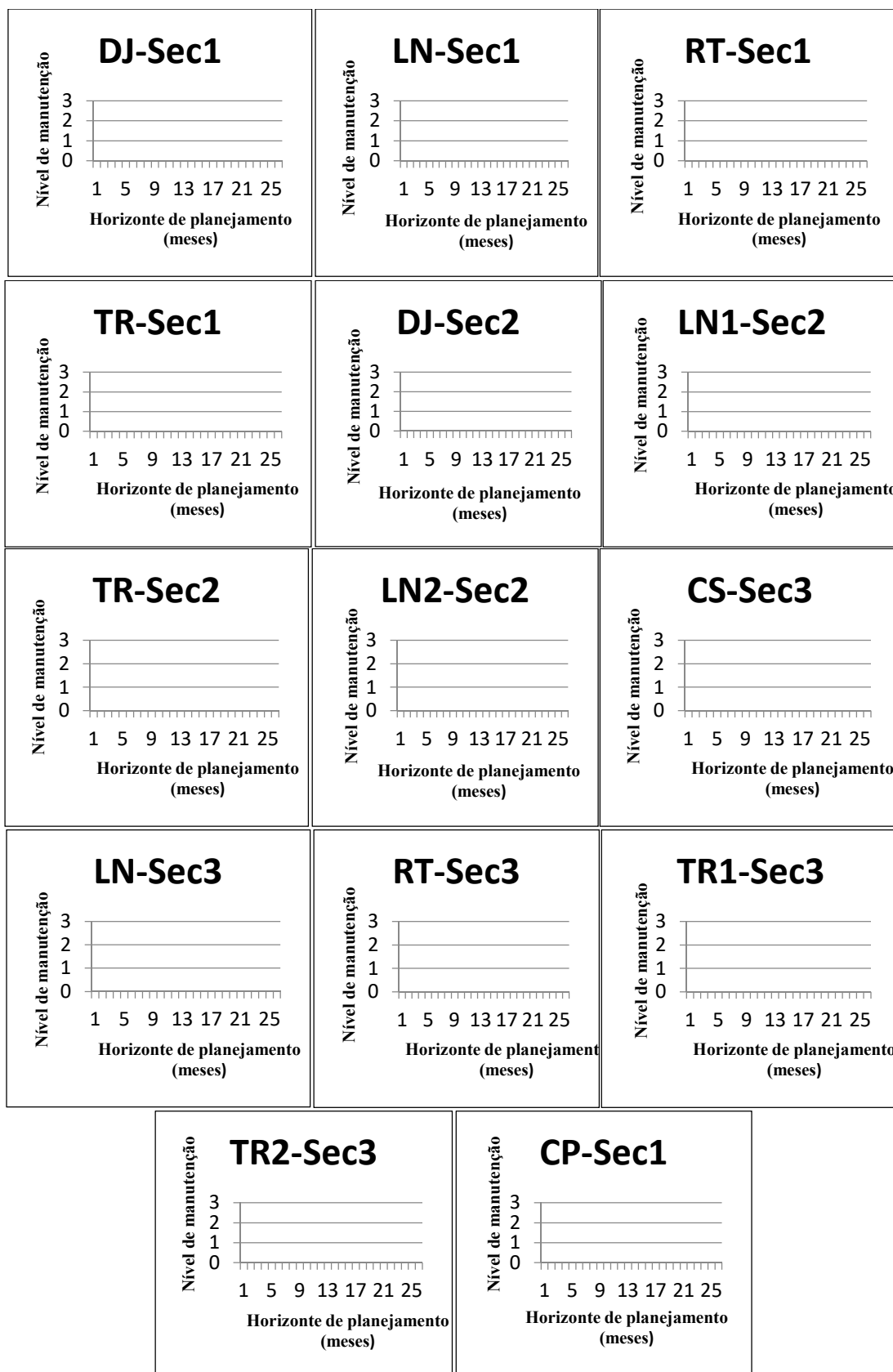
Figura 39 – Perfil de confiabilidade para o sistema teste 1, considerando diferentes planos de manutenção.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

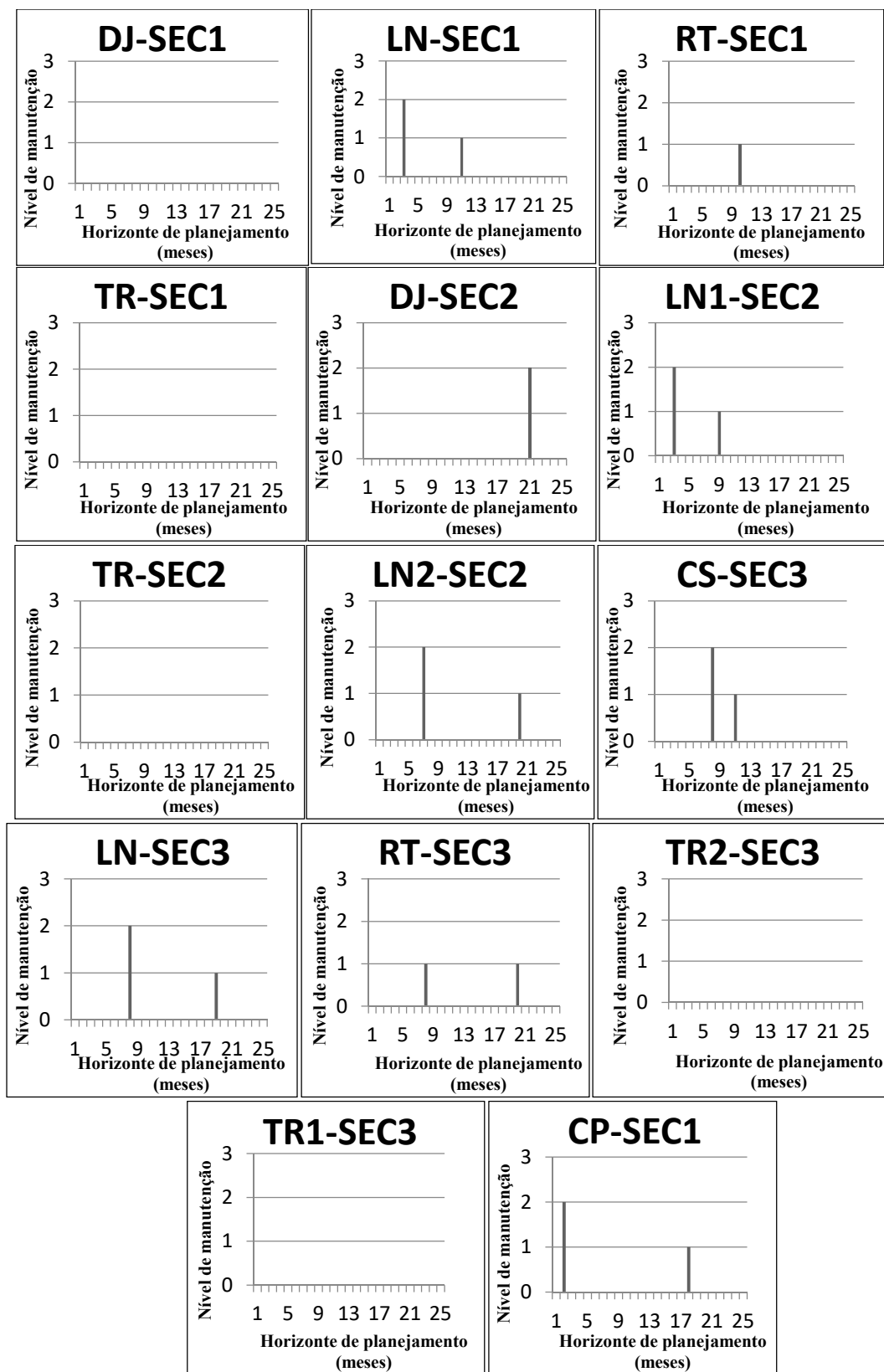
Na Figura 39 são apresentados os resultados do comportamento da confiabilidade ao longo do horizonte de planejamento para os três pontos escolhidos da fronteira de Pareto mostrado na Figura 37. O perfil de cor laranja corresponde ao ponto extremo da fronteira de Pareto, a qual representa a caída da confiabilidade pela ausência das ações de manutenção ao longo do horizonte de planejamento e o perfil de cor preta representa a máxima confiabilidade obtida pela metodologia para este sistema teste.

Figura 40 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha do ponto “P1”.



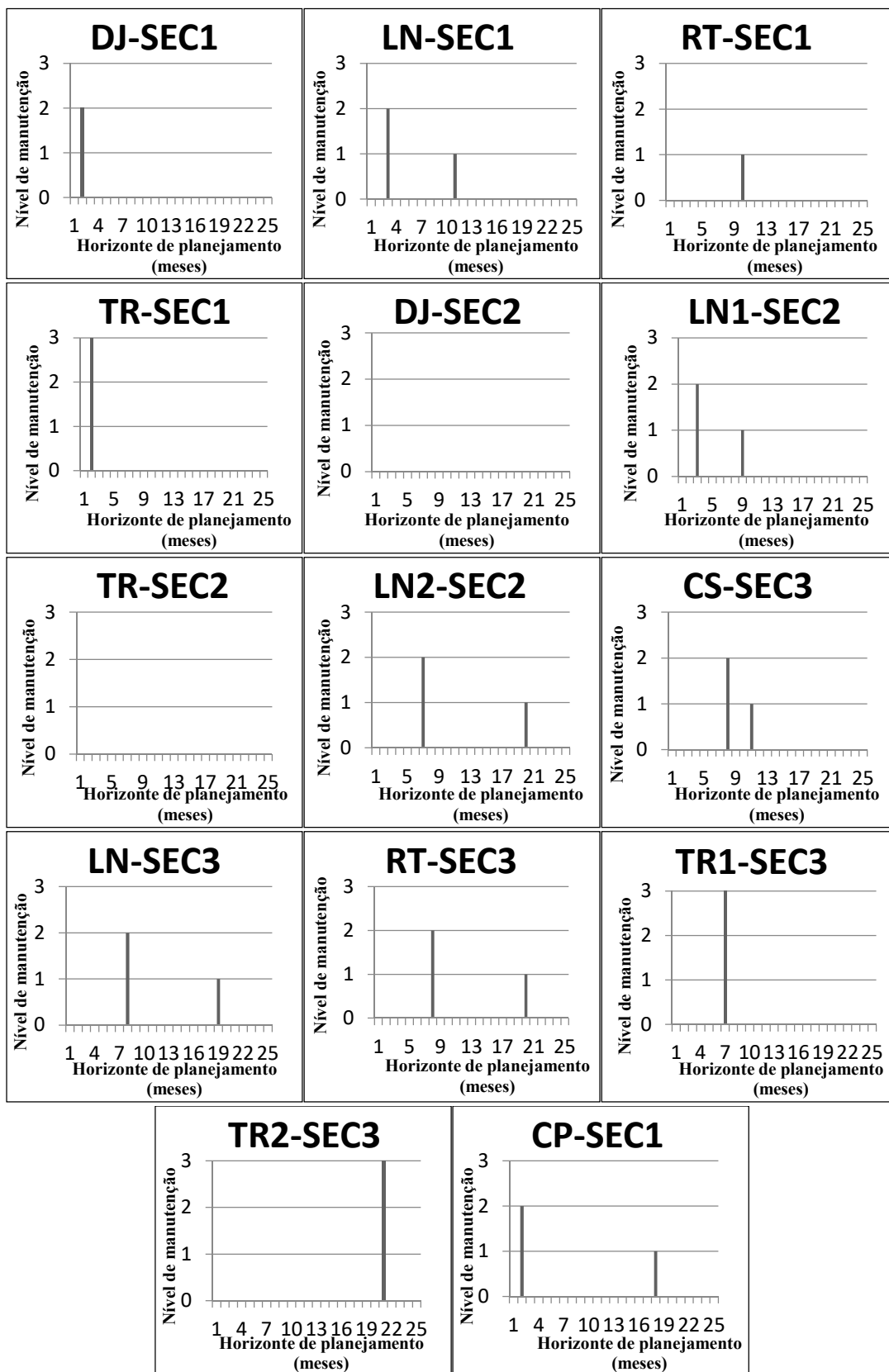
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 41 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha do ponto “P2”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 42 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha do ponto “P3”.

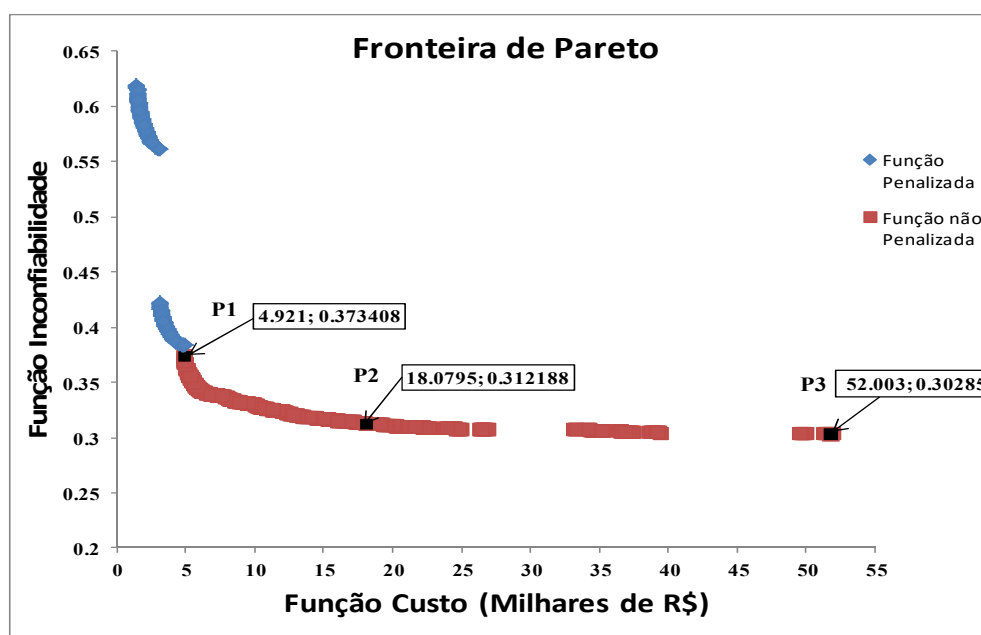


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 40, 41 e 42 são apresentadas as ações de manutenção necessárias nos equipamentos para este sistema teste em estudo, em um horizonte de 2 anos com subperíodos mensais.

Nas Figuras 43 a 50 apresentam-se os resultados obtidos com a metodologia 1 para o sistema teste2, que é composto por 257 equipamentos.

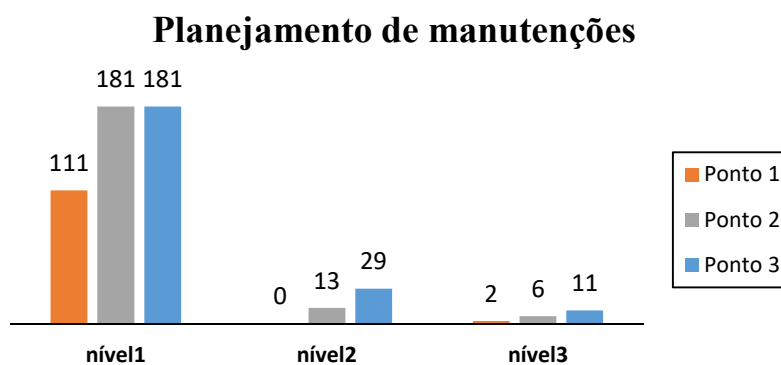
Figura 43 – Curva de Pareto otimizada para o sistema teste 2.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 43 é apresentado a curva de Pareto para o sistema teste 2, a curva de cor azul representa valores na qual as funções objetivos encontram-se penalizados enquanto que a curva de cor vermelho representa valores que as funções objetivos encontram-se não penalizados (região factível).

Figura 44 –Planejamentos das manutenções na escolha dos pontos da fronteira de Pareto.

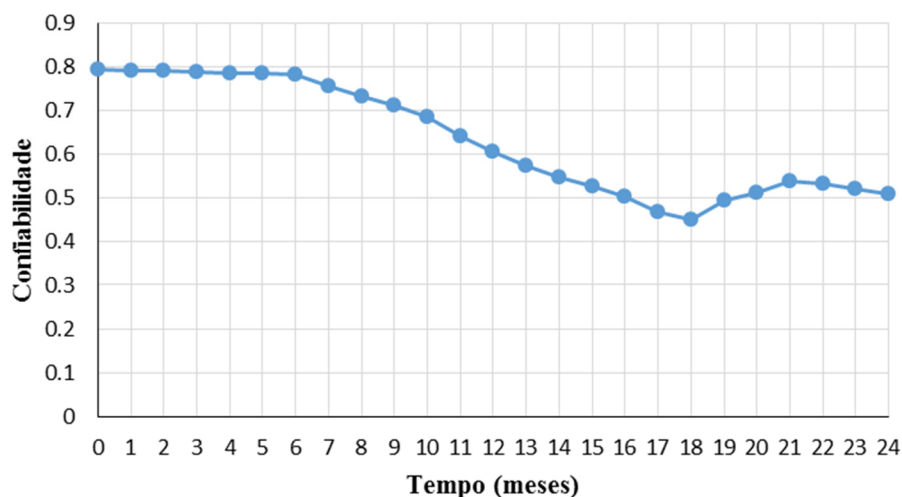


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 44 são apresentados os números de ações de manutenção e os níveis na escolha dos três pontos da regia factível da fronteira de Pareto apresentada na Figura 43.

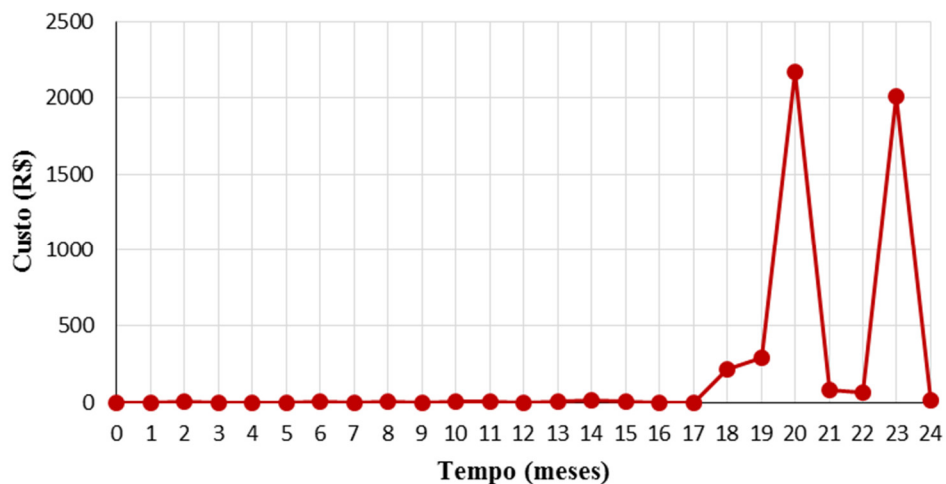
Para um melhor entendimento são analisados os perfis de custo e confiabilidade para cada ponto escolhido.

Figura 45 – Perfil de confiabilidade na escolha do programa de manutenção da solução do “P1”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 46 – Perfil de custos na escolha do programa de manutenção da solução do “P1”.

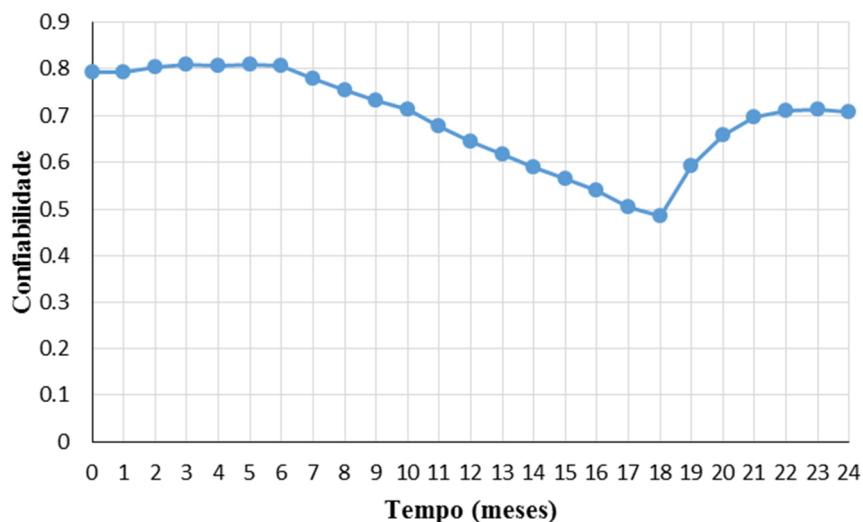


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 45 e 46 são apresentados os perfis de confiabilidade e de custo na escolha da solução do ponto P1 da fronteira de Pareto. Pode-se ressaltar que este ponto é o ponto de menor custo porém também o de menor índice de confiabilidade, já que é um ponto extremo da curva de Pareto.

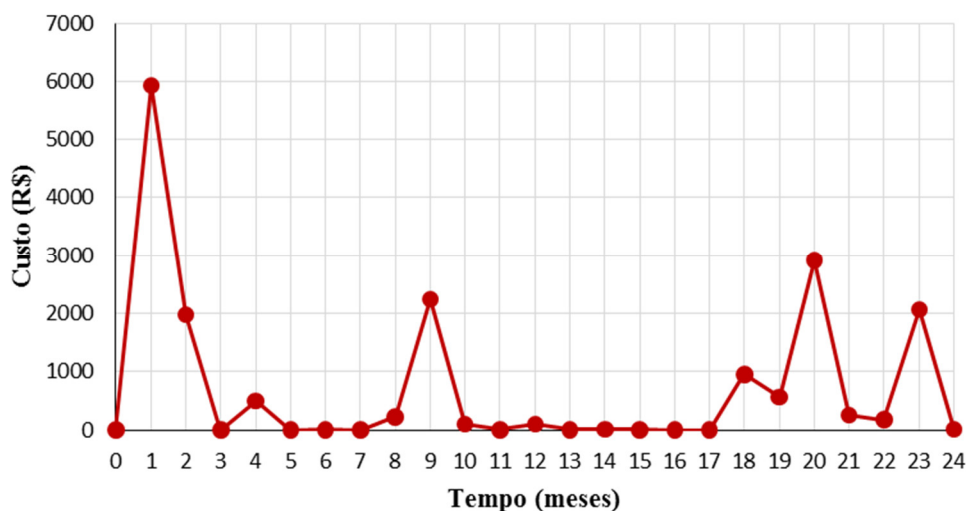
As ações de manutenção são efetuadas só nos meses finais já que o sistema inicia com uma confiabilidade alta de 0,8; tendo como custo máximo no mês 20, na qual se executam a maior quantidade de manutenções no sistema.

Figura 47 – Perfil de confiabilidade na escolha do programa de manutenção da solução do “P2”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 48 – Perfil de custos na escolha do programa de manutenção da solução do “P2”.

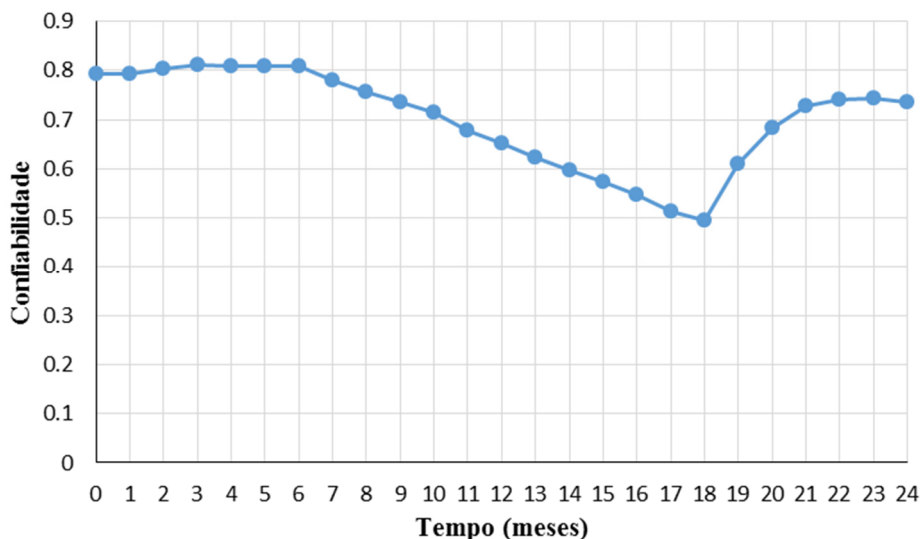


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 47 e 48 são apresentados os perfis de confiabilidade e de custo na escolha da solução do ponto P2 da fronteira de Pareto. Pode-se ressaltar que este ponto é o ponto intermédio de custo porém também o de maior índice de confiabilidade comparado ao ponto anterior “P1”.

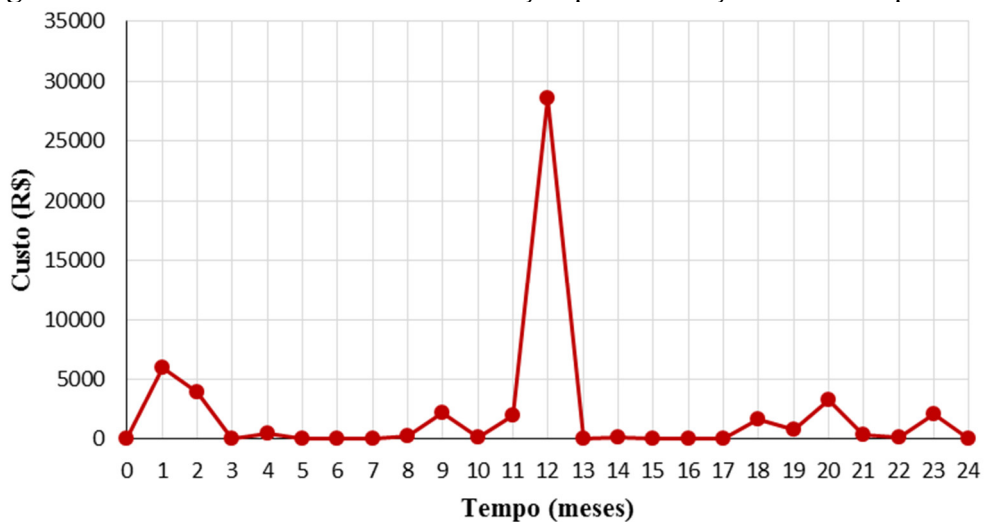
As ações de manutenção são efetuadas no início e final do horizonte de planejamento; tendo como custo máximo no mês 1, no qual se executa a maior quantidade de manutenções no sistema.

Figura 49 – Perfil de confiabilidade da solução fornecida por “P3”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 – Custos mensais com manutenção para a solução fornecida por “P3”.



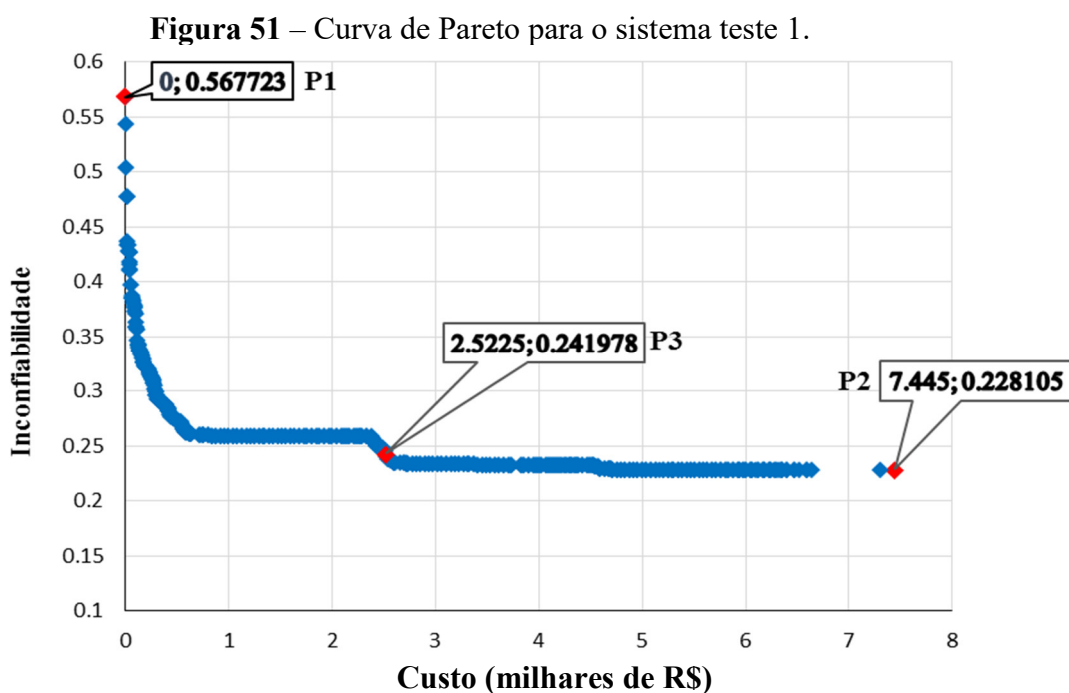
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 49 e 50 são apresentados os perfis de confiabilidade e de custo na escolha da solução fornecida pelo ponto “P3” da fronteira de Pareto. Pode-se ressaltar que este ponto tem o melhor perfil de confiabilidade, no entanto, também é o de maior custo com relação aos pontos anteriores.

As ações de manutenção são efetuadas ao longo do planejamento; tendo como custo máximo na metade do planejamento (mês 12), na qual se executaram a maior quantidade de manutenções no sistema.

5.2.2 Metodologia 2

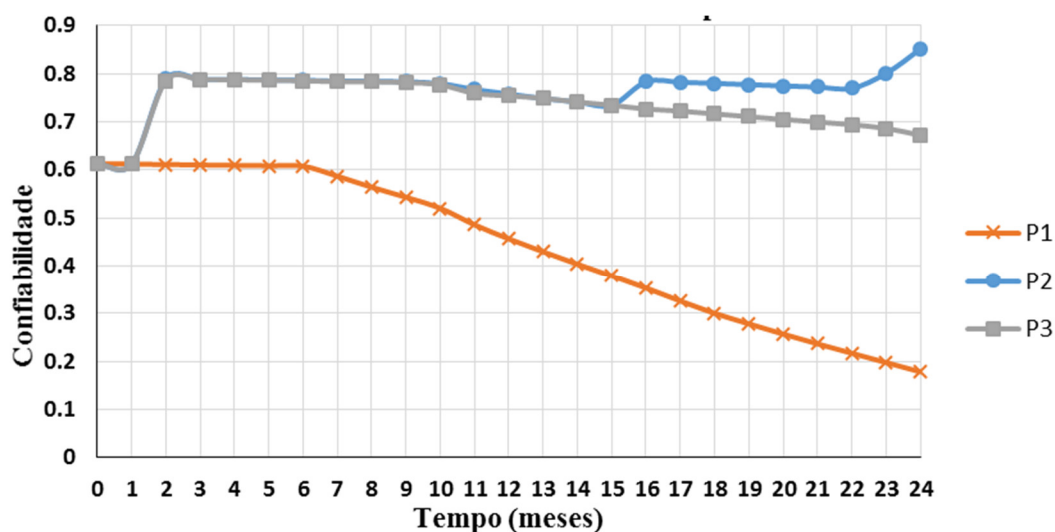
Os resultados para esta metodologia são apresentados nas Figuras 51 a 56 para o sistemas teste 1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figuras 51 é apresentado o resultado da fronteira de Pareto otimizada para o sistema teste com 14 equipamentos, dos quais foram selecionados três pontos desta curva para poder analisar o comportamento do custo mensal com manutenção e da confiabilidade para cada um destes pontos.

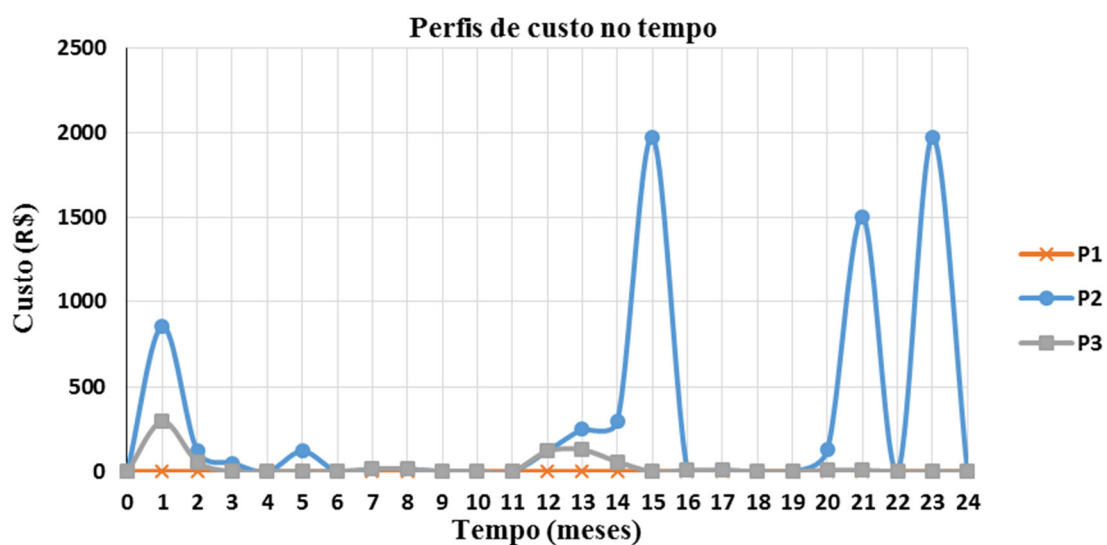
Figura 52 – Comportamento dos índices de confiabilidades com o tempo para as soluções escolhidas da fronteira de Pareto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 52 são apresentados o comportamento dos índices de confiabilidade para os três pontos selecionados da fronteira de Pareto da Figura 51. O perfil de cor laranja corresponde à solução do ponto extremo da fronteira de Pareto, a qual representa a redução da confiabilidade com o tempo pela ausência das ações de manutenção ao longo do horizonte de planejamento e o perfil de cor azul representa a máxima confiabilidade obtida pela metodologia para este sistema teste.

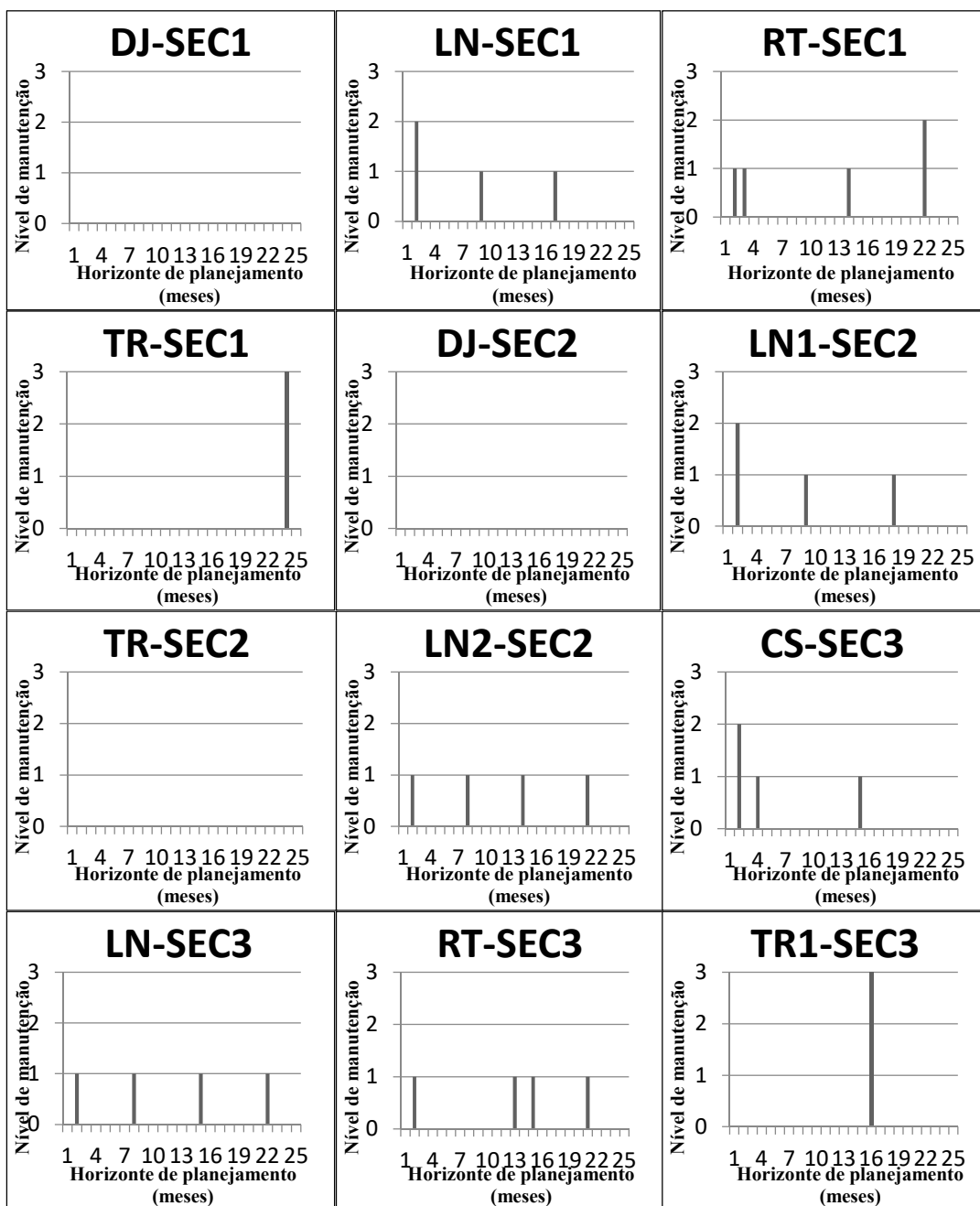
Figura 53 – Custos mensais com manutenção para as soluções selecionadas da fronteira de Pareto.

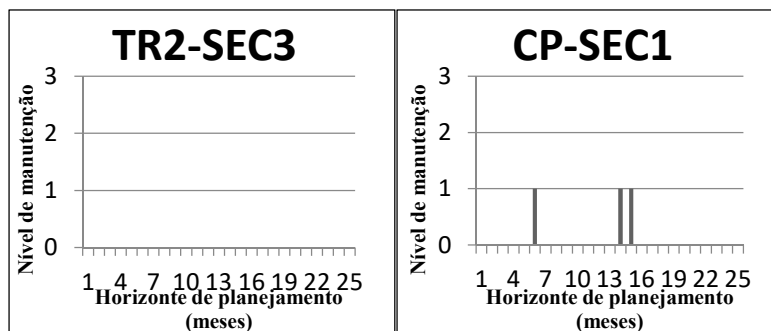


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 53 apresentam-se os resultados dos gastos mensais com manutenções para as soluções referentes aos três pontos escolhidos da fronteira de Pareto mostrada na Figura 51. O perfil de cor laranja corresponde à solução do ponto extremo da fronteira de Pareto, a qual representa a ausência das ações de manutenção ao longo do horizonte de planejamento e o perfil de cor azul representa o máximo custo para a recuperação da confiabilidade.

Figura 54 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha da solução referente ao ponto “P1”.

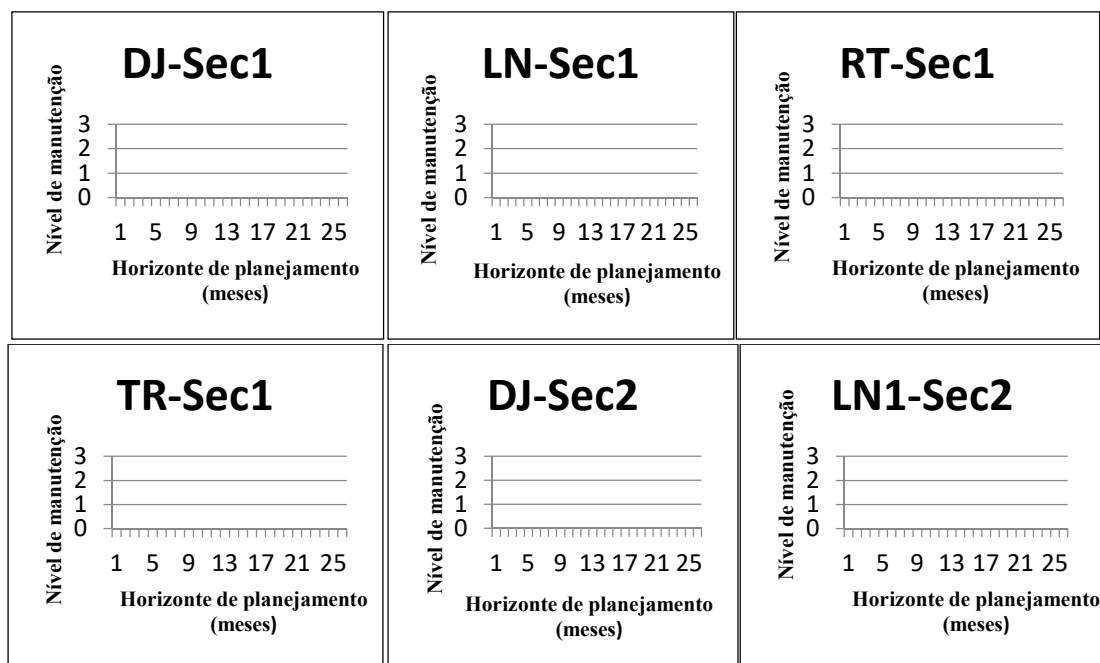


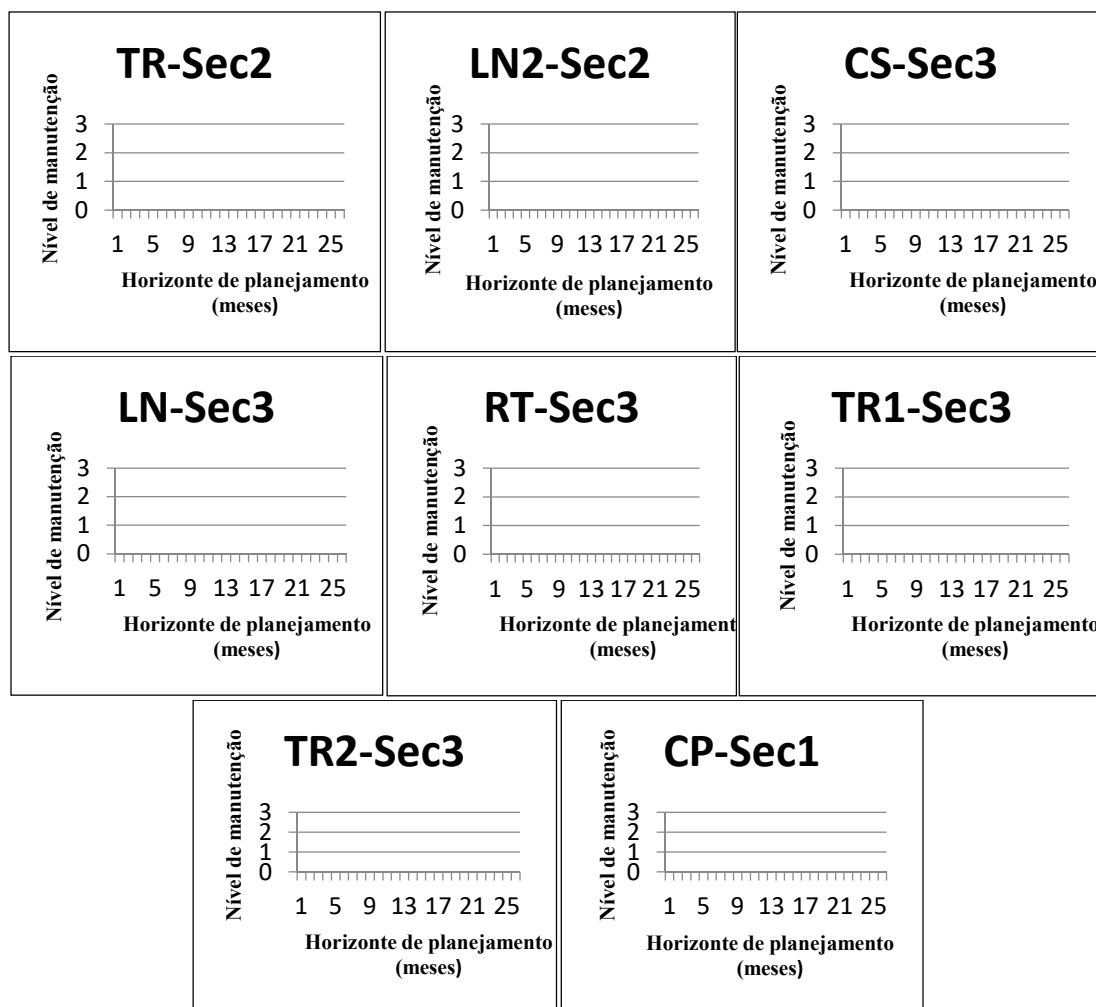


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na figura 54 apresentam-se as ações de manutenções nos equipamentos que compõem as seções do sistema em estudo no horizonte de planejamento de 24 meses, analisados em subperíodos mensais. O valor “0” significa que se realizou uma manutenção do nível $m1$, “1” significa que se realizou uma manutenção do nível $m2$, “2” significa que se realizou uma manutenção do nível $m3$ e “3” significa que se realizou uma manutenção do nível $m4$.

Figura 55 –Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha da solução referente ao ponto “P2”.

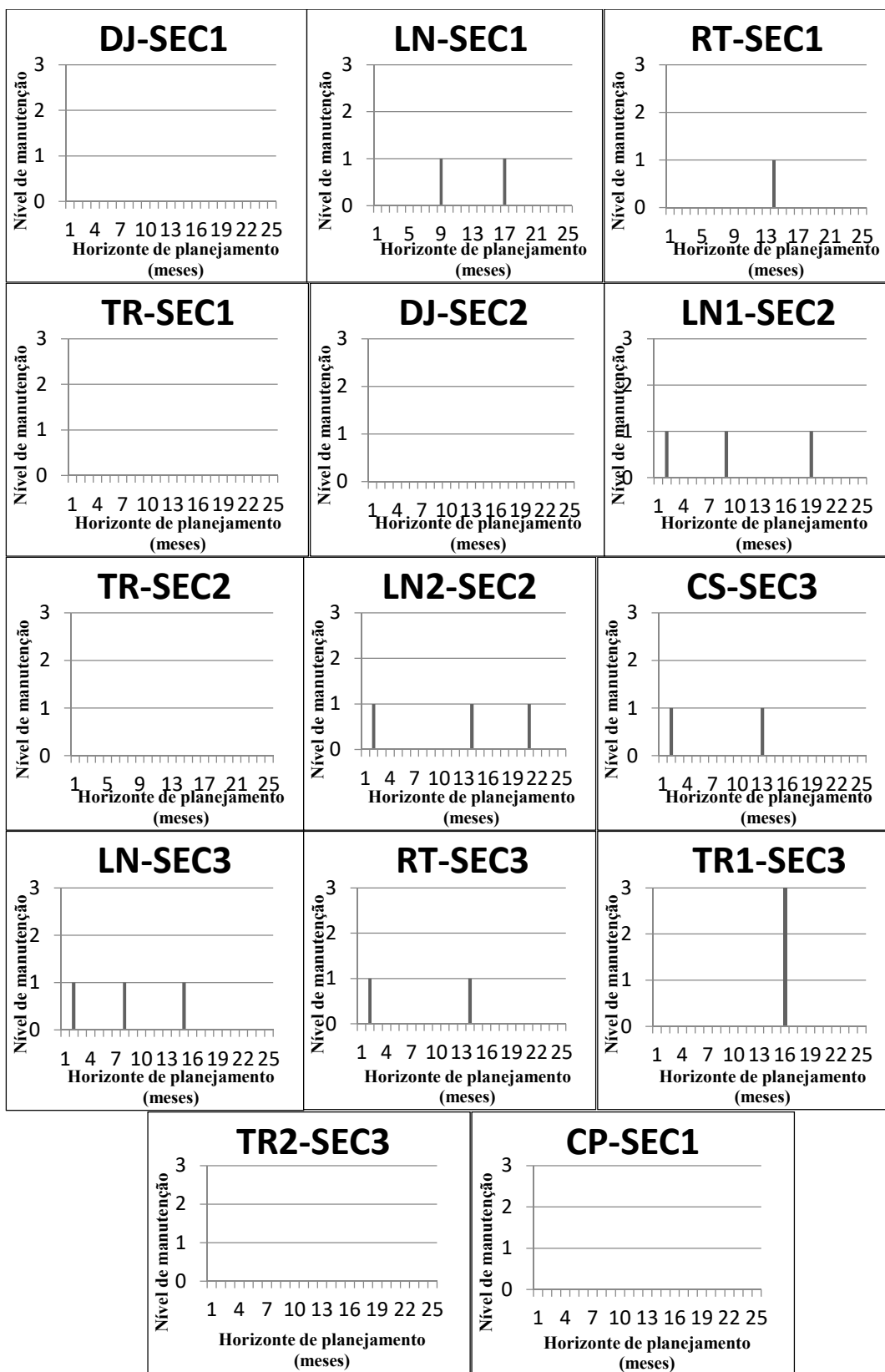




Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na figura 55 apresentam-se as ações de manutenção nos equipamentos que compõem as seções do sistema em estudo no horizonte de planejamento de 24 meses, analisados em subperíodos mensais. O valor de “0” significa que se realizou uma manutenção do nível $m1$, “1” significa que se realizou uma manutenção do nível $m2$, “2” significa que se realizou uma manutenção do nível $m3$ e “3” significa que se realizou uma manutenção do nível $m4$.

Figura 56 – Ações de manutenção dos equipamentos pela escolha da solução do ponto “P3”.



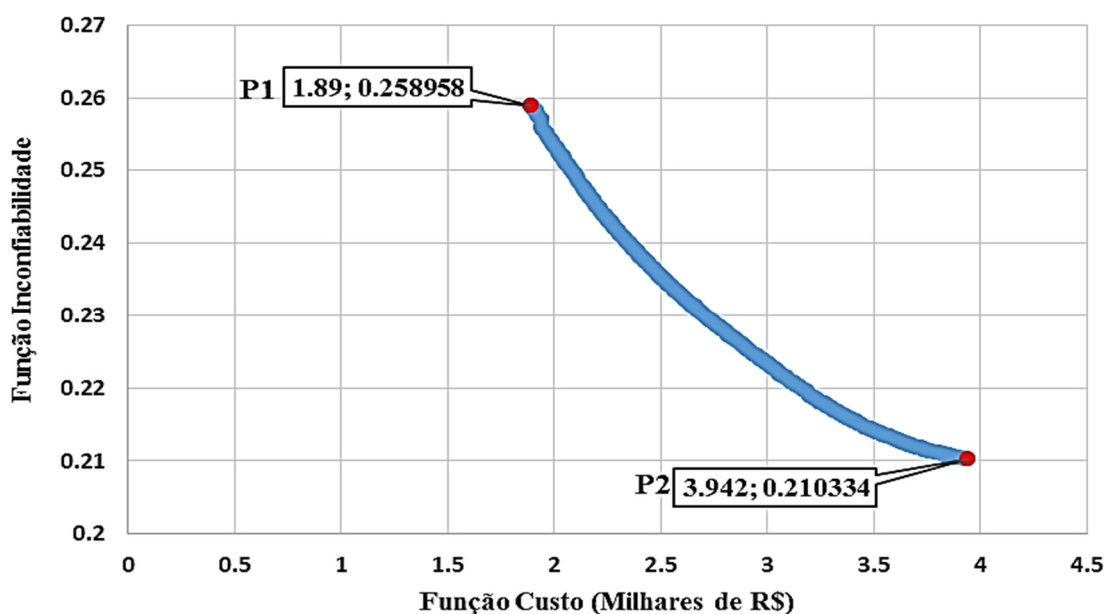
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na figura 56 apresentam-se as ações de manutenção nos equipamentos que compõem as seções do sistema em estudo no horizonte de planejamento de 24 meses, analisados em subperíodos mensais. O valor de “0” significa que se realizou uma manutenção do nível $m1$, “1” significa que se realizou uma manutenção do nível $m2$, “2” significa que se realizou uma manutenção do nível $m3$ e “3” significa que se realizou uma manutenção do nível $m4$.

Os planos de manutenção das soluções escolhidas na fronteira de Pareto são analisados e comparados como mostram as Figuras 52 e 53. Então pode-se ressaltar que o plano “P2” produz melhores índices mensais de confiabilidade que P1, e que “P3” possui melhor comportamento da confiabilidade ao longo do período de planejamento do que para o alimentador sem nenhuma tarefa de manutenção programada para o período de tempo sob estudo “P1”.

Nas Figuras 57 a 60 apresentam-se os resultados obtidos com esta metodologia para o sistema teste com 257 equipamentos.

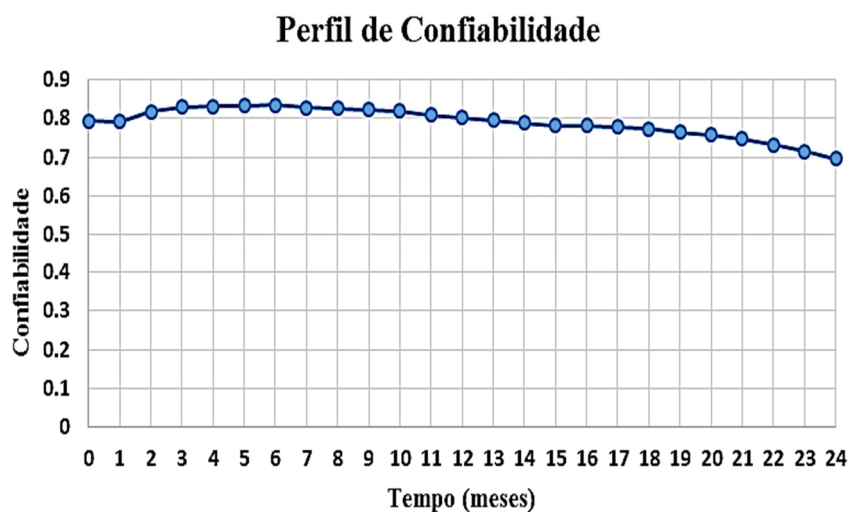
Figura 57 – Curva de Pareto otimizada para o sistema teste 2.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

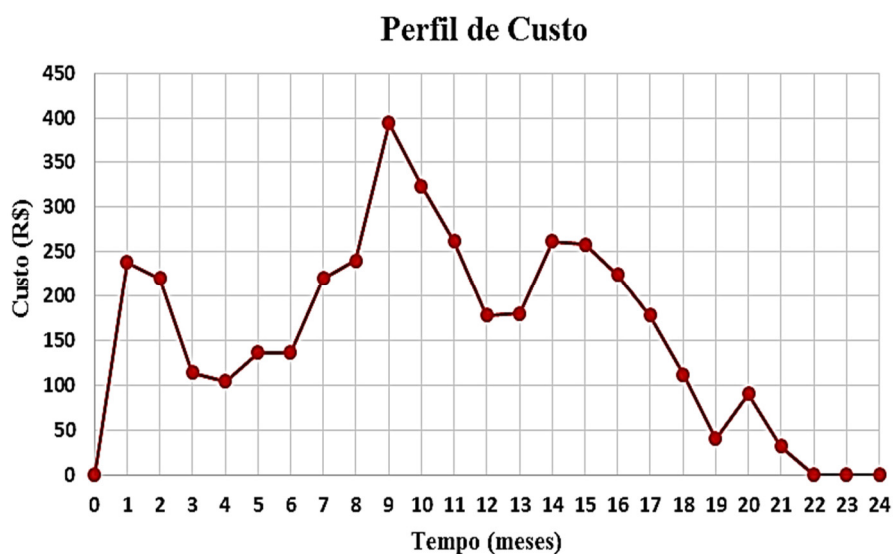
Na Figura 57 é apresentada a curva de Pareto para o sistema teste 2, a curva de cor azul representa valores na qual as funções objetivos encontra-se não penalizadas (região factível).

Figura 58 – Comportamento da confiabilidade do sistema ao longo do horizonte de planejamento pela solução fornecida pelo “P2” da fronteira de Pareto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 59 – Custos mensais com atividades de manutenção da solução fornecida por “P2”.

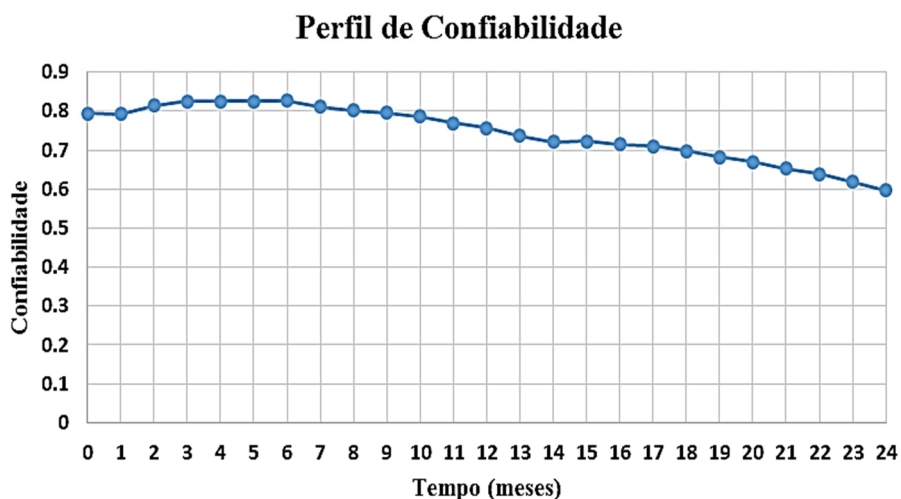


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 58 e 59 são apresentados os comportamentos dos índices de confiabilidade e do custo na escolha da solução referente ao ponto “P2” da fronteira de Pareto. Pode-se ressaltar que a solução referente a este ponto apresenta ao longo do horizonte de planejamento o melhor perfil de confiabilidade, no entanto, também é a solução de maior custo com relação às fornecidas pelos pontos anteriores.

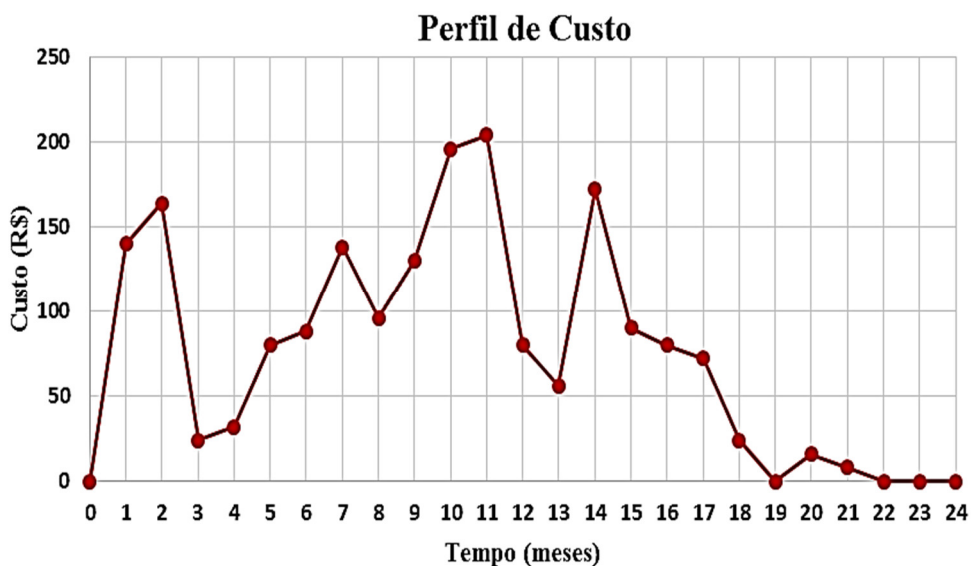
As ações de manutenção são efetuadas na maioria dos meses de planejamento com a exceção dos meses finais (22, 23 e 24 mês); tendo custo máximo no mês 9, no qual se executa a maior quantidade de manutenções ao sistema.

Figura 60 – Comportamento do índice de confiabilidade no horizonte de planejamento devido a escolha da solução de “P1”.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 61 – Custos mensais com tarefas de manutenções para a solução de “P1”.



Fonte: Elaboração do autor.

Nas Figuras 60 e 61 são apresentados o comportamento do índice de confiabilidade do sistema no horizonte de planejamento e os custos mensais devido a escolha da solução referente ao ponto “P1” da fronteira de Pareto. Pode-se ressaltar que a solução referente a este

ponto tem o menor custo, no entanto, também é o de menor confiabilidade com relação à solução do ponto “P2”.

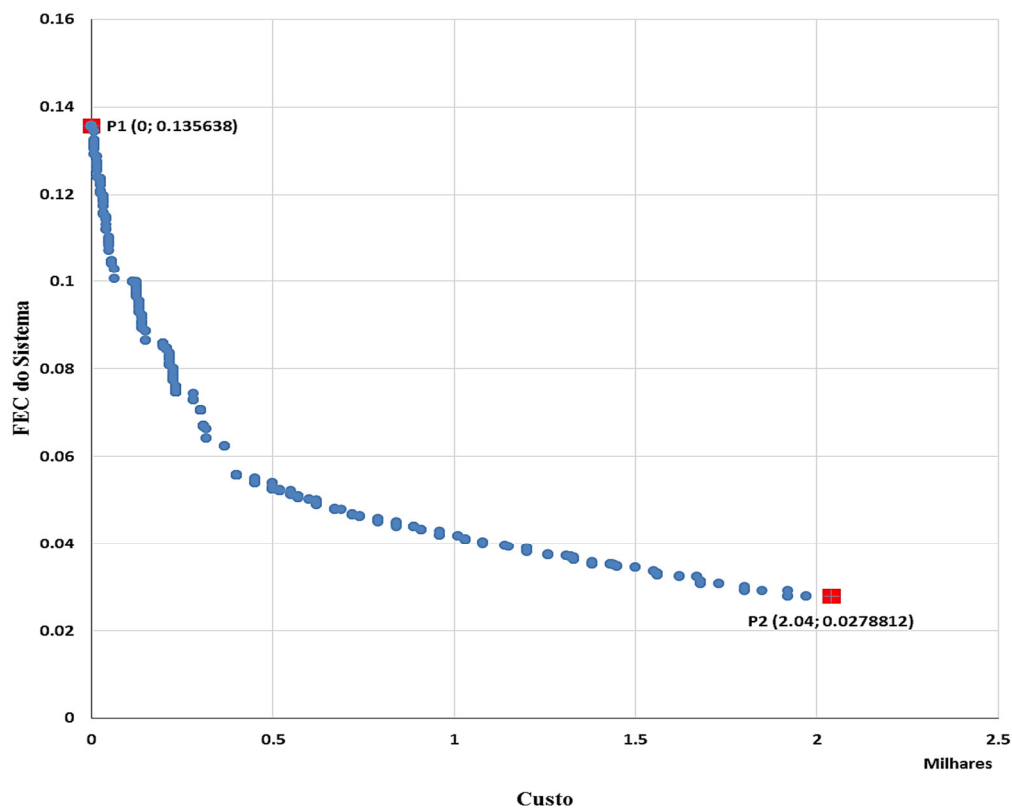
As ações de manutenção são efetuadas na maioria dos meses de planejamento com a exceção dos meses finais (19,22, 23 e 24 mês); tendo custo máximo no mês 11, no qual se executaram a maior quantidade de tarefas de manutenções no sistema.

5.2.3 Metodologia 3

Nesta metodologia os impactos das manutenções na confiabilidade são refletidas nas taxas de falha de cada equipamento, através dos multiplicadores de taxa de falhas; os quais são avaliados mensalmente até completar o horizonte de planejamento. As funções objetivos são o custo de investimento nos planos de manutenções e o FEC (Frequência Equivalente pelo Consumidores), sujeito às restrições das metodologias anteriores (FIC, DIC, número de manutenções, tempo dos equipes de manutenções, etc.) apresentadas no capítulo 4 .

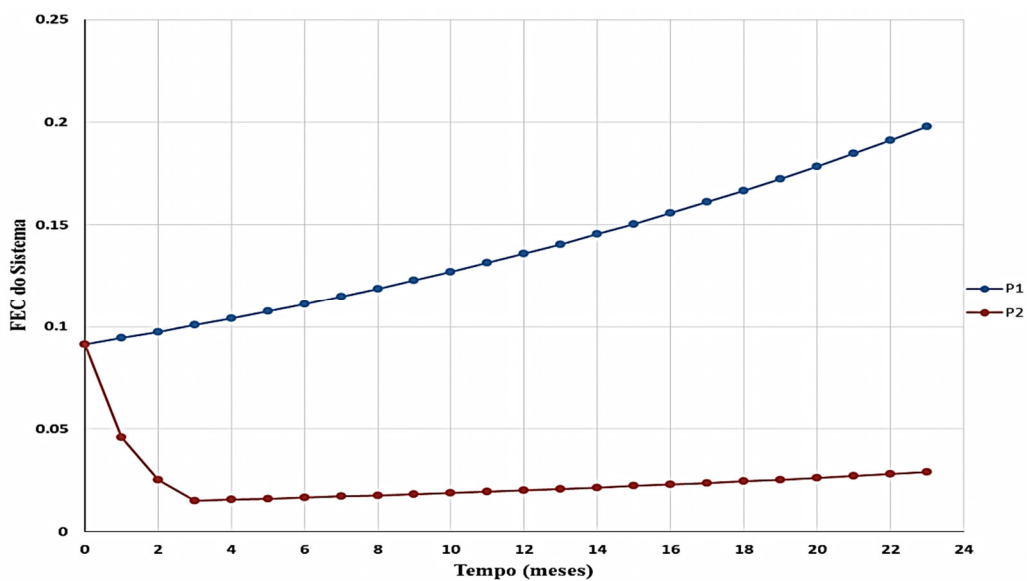
Na Figuras 62 é apresentado o resultado da fronteira de Pareto otimizada para o sistema teste com 14 equipamentos, para um melhor análise foram selecionados dois pontos desta curva para poder analisar o comportamento dos custos com tarefas de manutenções e do FEC do sistema ao longo do horizonte de planejamento.

Figura 62 – Curva de Pareto para o sistema teste 1 e horizonte de planejamento de 2anos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

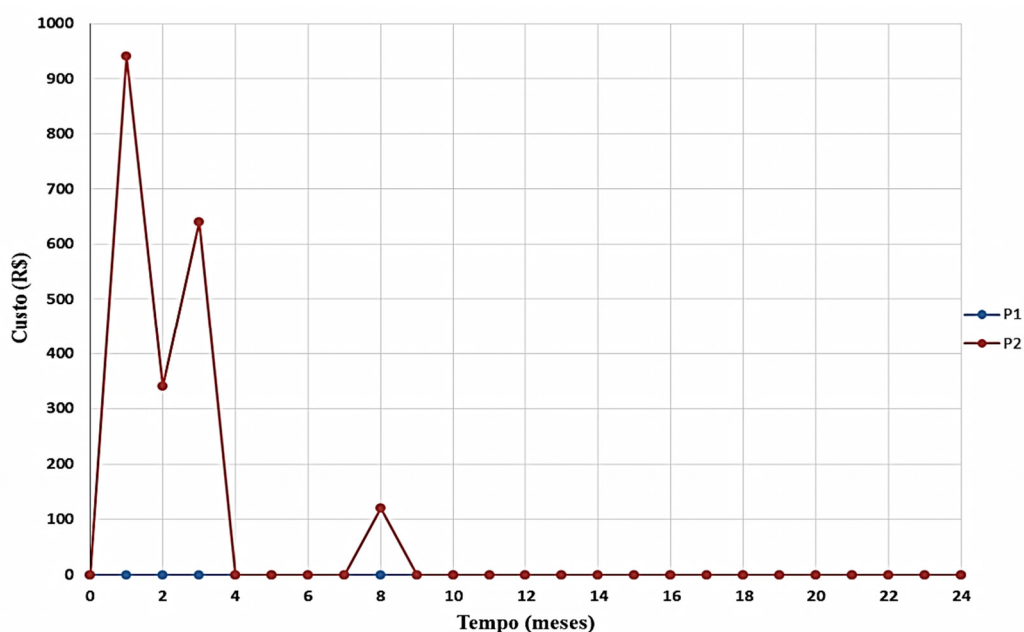
Figura 63 – Comportamento do FEC mensal no horizonte de planejamento para o sistema teste 1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 63 são apresentados os perfis do FEC mensal para o sistema teste de 14 equipamentos no longo do horizonte de planejamento pelas soluções fornecidas pelos dois pontos extremos da fronteira de Pareto da Figura 62. A curva de cor azul é a curva com ausência de manutenções no sistema e a curva de cor vermelho é a que tem maior investimento em ações de manutenção os quais permitem ter um FEC baixo.

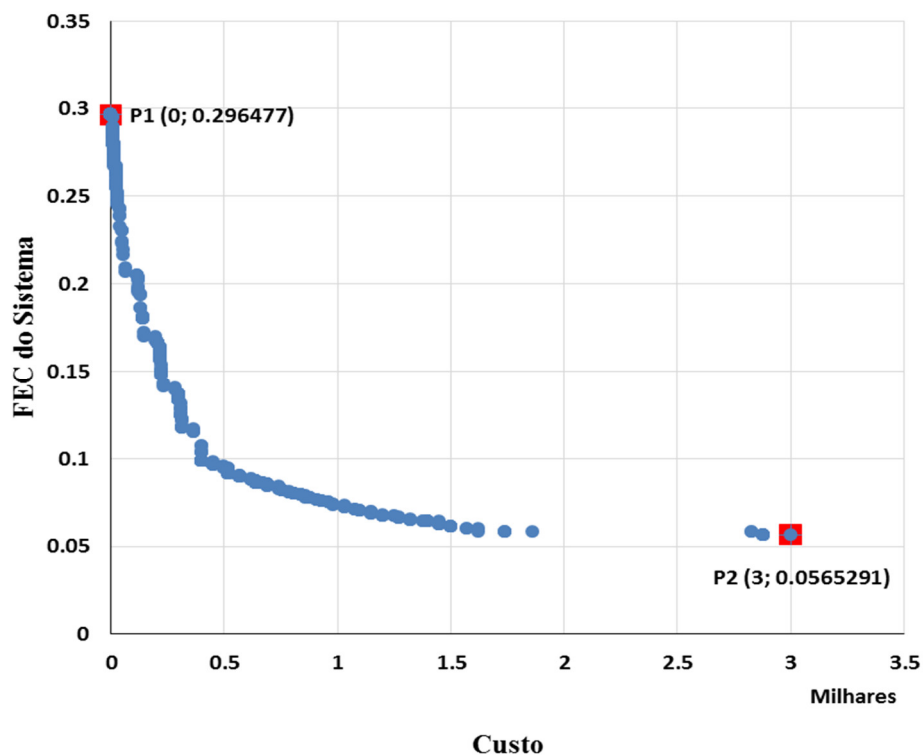
Figura 64 – Custo mensal em tarefas de manutenções para a solução fornecida pelo pontos P1 e P2 da fronteira de Pareto para o sistema teste 1.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 64 apresentam-se os resultados dos investimentos mensais em manutenções para as soluções fornecidas pelos dois pontos escolhidos da fronteira de Pareto mostrado na Figura 62. A curva de cor azul corresponde à solução fornecida pelo ponto extremo da fronteira de Pareto, a qual representa a ausência das ações de manutenção ao longo do horizonte de planejamento e a curva de cor vermelho representa o máximo custo para manter o FEC em um valor baixo.

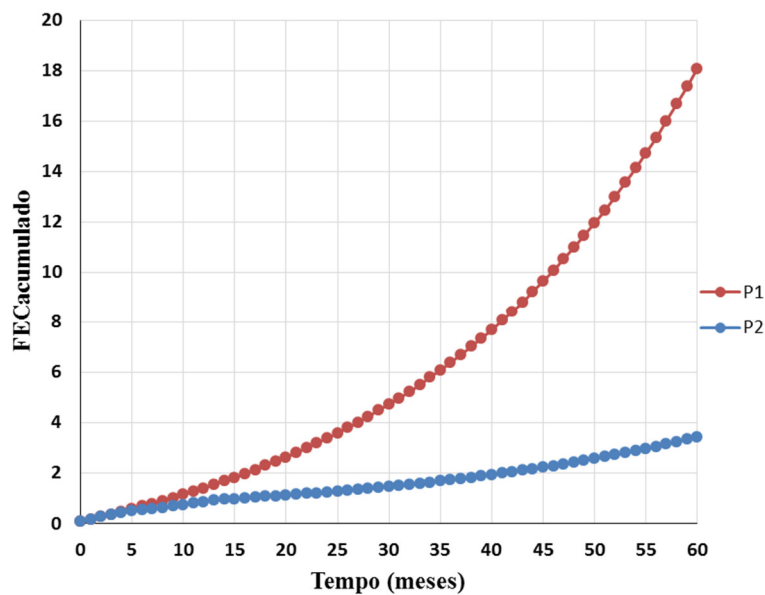
Figura 65 – Curva de Pareto para o sistema teste 1 e horizonte de planejamento de 5 anos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 65 é apresentado o resultado da fronteira de Pareto otimizada para o sistema teste com 14 equipamentos, para um horizonte de planejamento de 5 anos, para um melhor análise foram selecionados os dois pontos extremos e assim poder mostrar o comportamento dos custos de investimentos com manutenções e do FEC do sistema ao longo do horizonte de planejamento.

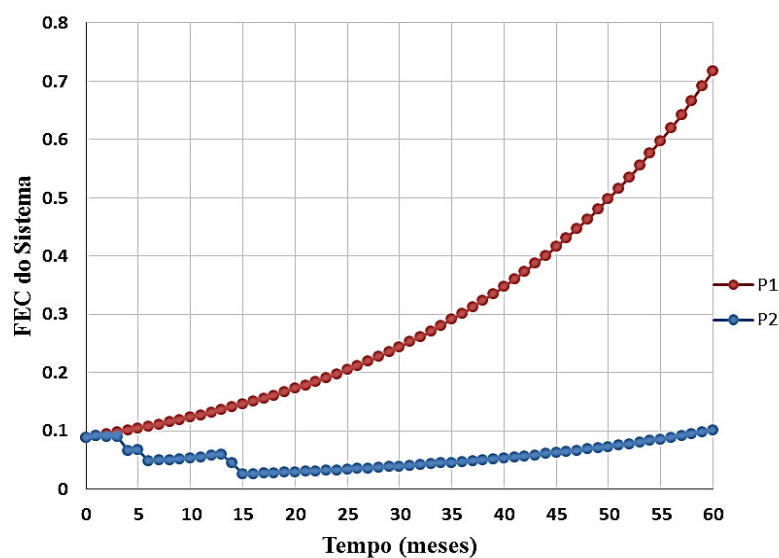
Figura 66 – Comportamento do FEC mensal acumulado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

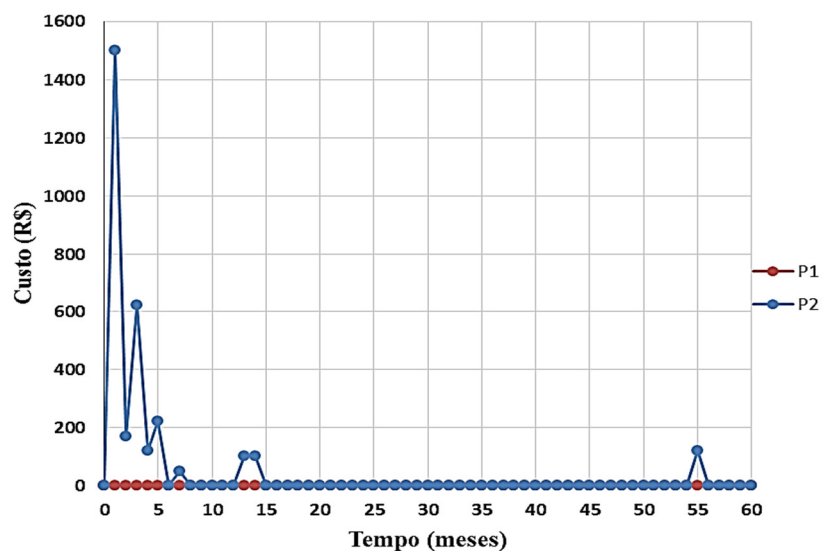
Na Figura 66 é apresentada o comportamento do FEC acumulado nos meses de planejamento para os dois pontos escolhidos da curva de Pareto mostrada na Figura 65. Obtendo no final do horizonte de planejamento um FEC de 3.34 ao escolher o “P2” e o valor de 18 na escolha do “P1”.

Figura 67 – Comportamento do FEC mensal devido a escolha da solução dos pontos extremos para o horizonte de 5 anos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 68 – Custos de investimentos em manutenções devido a escolha da solução referente aos pontos extremos para o horizonte de 5 anos.

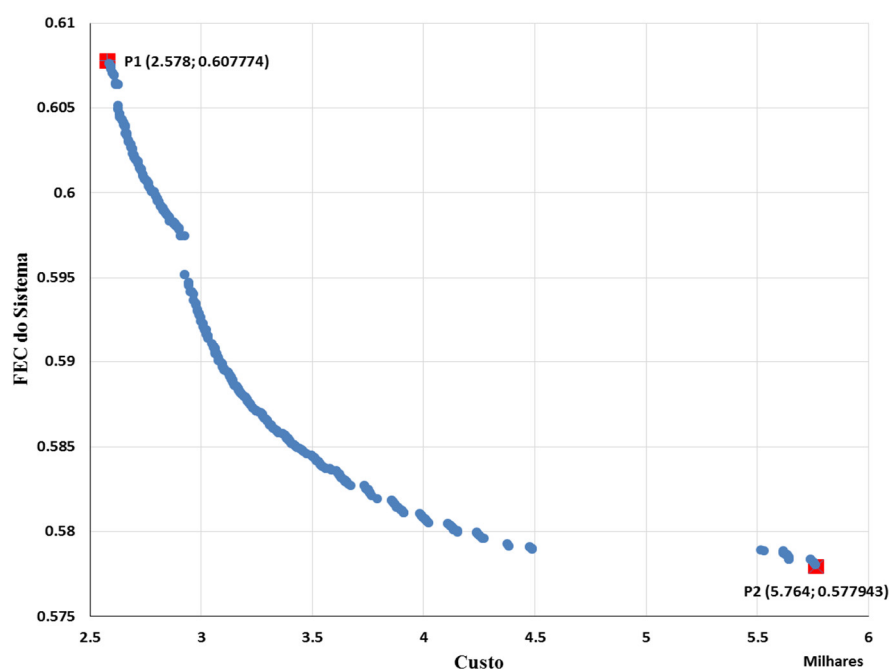


Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com as Figuras 67 e 68 as ações de manutenção para os 5 anos concentram-se estrategicamente no início do tempo de planejamento, tendo como valor máximo o mês 1.

Nas Figuras 69 a 71 são apresentados os resultados desta metodologia para o sistema teste com 257 equipamentos.

Figura 69 – Curva de Pareto para o sistema teste 2.

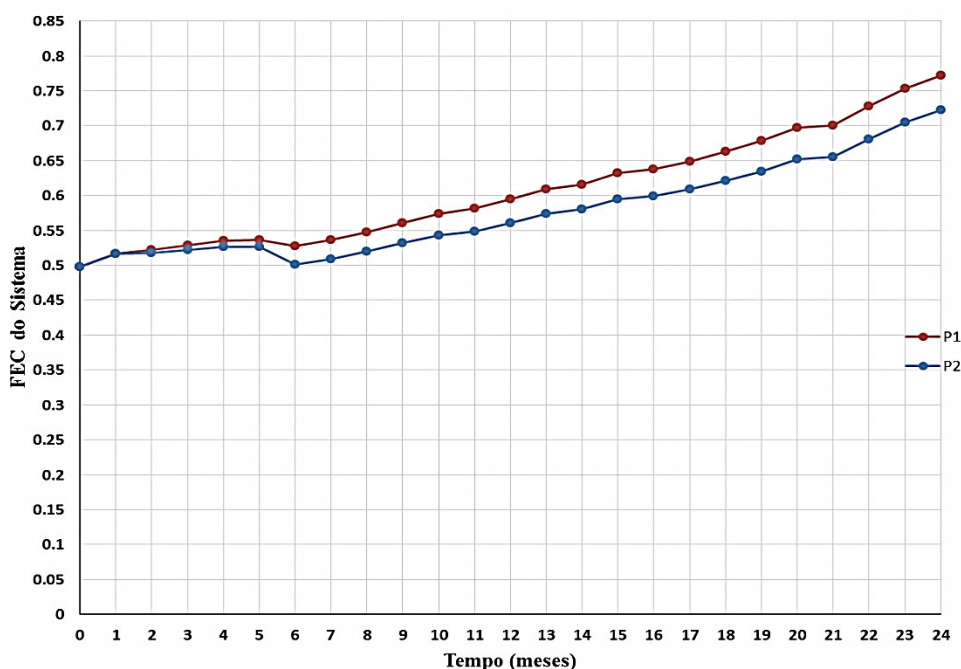


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 69 é apresentado o resultado da fronteira de Pareto otimizada para o sistema teste com 257 equipamentos, para um tempo de planeamento de 2 anos. A curva resultante desta figura é uma curva factível já que todos os pontos que pertencem à fronteira encontram-se não penalizados.

Para um melhor análise são escolhidos dois pontos extremos da curva de Pareto da Figura 69, da qual são analisados o FEC e custo mensal em um horizonte de planeamento de 2 anos.

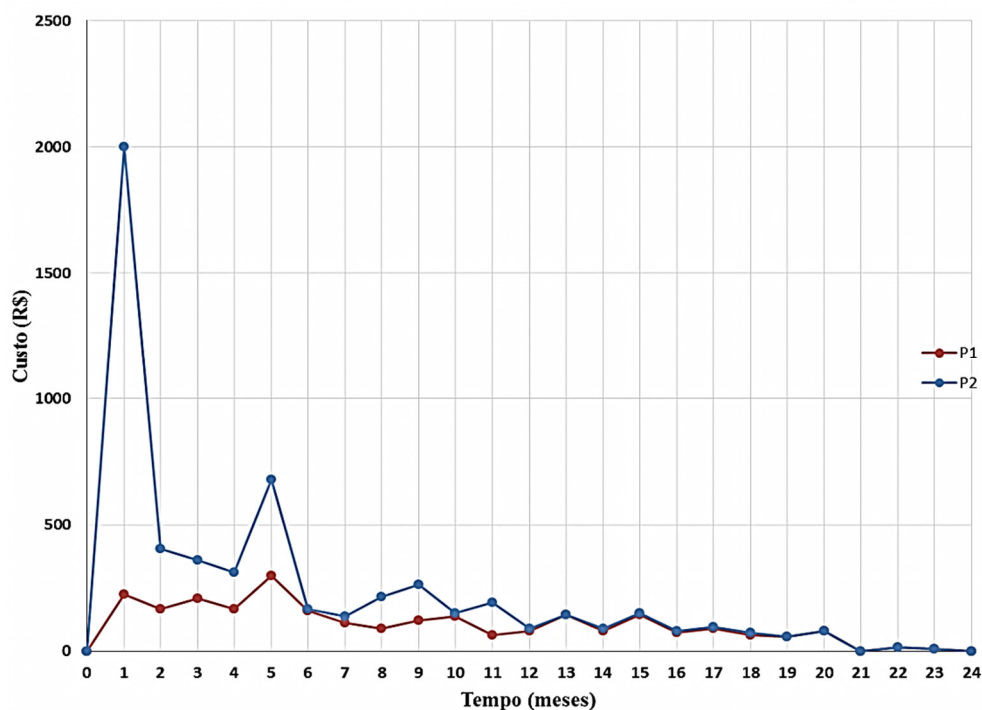
Figura 70 –Comportamento mensal do FEC na escolha das soluções dos pontos extremos da fronteira de Pareto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 70 são apresentados os desempenhos do FEC mensal para as soluções dos dois pontos extremos escolhidos da fronteira de Pareto da Figura 69. A curva de cor vermelha é aquela que tem um menor investimento nas ações de manutenção “P1” e a curva de cor azul são aquelas que tem um maior investimento nas ações de manutenção “P2”, ambos pontos são factíveis.

Figura 71 – Custo mensais com atividades de manutenções para as soluções dos pontos extremos da fronteira de Pareto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 71 apresentam-se os investimentos mensais em manutenções para as soluções referentes aos dois pontos escolhidos da fronteira de Pareto mostrados na Figura 69. O perfil de cor azul representa o comportamento dos investimentos em ações de manutenção na escolha do ponto “P2” e o perfil de cor vermelho representa o comportamento dos investimentos na escolha do ponto “P1”.

De acordo com a Figura 71 as ações de manutenção para os 2 anos concentram-se nos primeiros meses de planejamento, tendo como valor máximo o mês 1.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentadas três metodologias para tratar o problema de otimização de planos de manutenção centrada em confiabilidade de sistemas de energia elétrica, baseadas na meta-heurística multi-objetivo NSGA-II. O modelo matemático considera os principais objetivos e restrições no problema de indicadores de continuidade (mensal, trimestral e anual), número máximo de manutenções, horas disponíveis dos equipes de manutenção e depreciação da vida útil, considerando os sistemas de codificação (binária e inteira) , os operadores de seleção por nível de dominância, distância de multidão e os operadores adaptativos de cruzamento e mutação, os quais se mostraram eficientes ao problema, produzindo soluções de qualidade e atendem todas as restrições do modelo.

As funções objetivos para cada alimentador foram modeladas considerando-se a topologia completa do sistema, visando obter a máxima confiabilidade com um o menores investimentos, procurando reduzir o tempo de interrupção dos consumidores e melhorar a qualidade do serviço de fornecimento. Assim os modelos propostos neste trabalho permitem desenvolver com segurança e economia o planejamento da confiabilidade de sistemas de distribuição. Também são ferramentas de análise para estudos das condições de confiabilidade do sistema ao longo de sua vida útil e para propor melhorias no mesmo. Para obtenção de bons resultados com este modelo são necessários os dados históricos de falhas dos equipamentos os quais são fornecidos pelos reportes das empresas distribuidoras.

As taxas de falhas estão em função do tempo e têm o comportamento da curva de banheira mostrada na Figura 10, neste sentido as análises podem ser realizadas quando a taxa de falha é constante (tempo de vida útil) e o tempo onde a taxa de falha é crescente (tempo de desgaste). Então neste trabalho são mostradas 3 metodologias; as duas primeiras consideram as taxas de falha constantes (metodologia 1 e metodologia 2) e a última que considera taxas de falhas variáveis mensalmente (metodologia 3).

A restrição fortemente penalizada deste modelo matemático de acordo com a técnica de solução proposta é o número máximo dos níveis de manutenção para cada tipo de equipamento, então a população inicial foi gerada considerando-se que a metade do tempo os equipamentos encontram-se em seu nível mais baixo ($m1$ -nenhuma manutenção) e para a outra metade foi gerada aleatoriamente níveis de manutenção diferentes a $m1$.

Os resultados para as três metodologias foram satisfatórios, os planos ótimos de tarefas de manutenções obtidas asseguram o fornecimento de energia às seções sem falta, evitando que a empresa sofra penalizações pela violação dos indicadores de qualidade de energia com a obtenção de propostas de soluções factíveis, com um tempo computacional baixo para as diferentes simulações, mostrando a viabilidade prática de aplicar o algoritmo proposto.

Em função das conclusões chegadas após do análise dos resultados das três metodologias para os dois sistemas testes justifica-se o modelo proposto no capítulo 4. Nesse modelo temos nas funções objetivos uma penalização econômica, pela perda permitida do fornecimento da energia dos consumidores das seções e pelo excesso dos limites de recursos humanos (tempos disponíveis para atender uma emergência pelos equipes de manutenção). Outra característica importante é que, para o planejamento da metodologia 3 consideram-se dois cenários; o primeiro com um horizonte de planejamento igual a dois anos e o segundo com um horizonte de planejamento maior que dois, (nos testes adotou-se um horizonte de cinco anos). Como comentado, os dois cenários levam a busca à soluções diferentes, mas que de acordo com a situação podem ser igualmente utilizadas para o apoio à decisão.

Definido o modelo para o problema, os próximos testes se concentraram na avaliação das metodologias desenvolvidas. Esses testes foram executados com um horizonte de planejamento igual a 2 anos. A primeira característica a ser avaliada corresponde à robustez dos métodos. A robustez de um método, ou seja, sua habilidade em devolver soluções de qualidade em cada execução, indica a eficiência do modelo na exploração para evitar ótimos locais.

Os tempos computacionais foram obtidos utilizando um computador com processador Intel Core i7 com 8GB de memória RAM. Para a metodologia 1 foi implementado uma codificação binária para resolver o modelo mostrado no Capítulo 4, para o cálculo das confiabilidades e para os impactos de manutenção são utilizados sistemas de inferência *fuzzy* e índices de restauração propostas em Piasson (2014). Para a solução deste problema foi implementado um algoritmo multi-objetivo NSGA-II, obtendo resultados de boa qualidade para os sistemas testes analisados. O tempo de execução para obter resultados de boa qualidade para o sistema teste com 14 equipamentos foi de 175 segundos e para o sistema teste com 257 equipamentos foi de 17 horas

Para a metodologia 2 foi implementado uma codificação inteira como apresenta-se em capítulos anteriores, para o cálculo das confiabilidades e para os impactos de manutenção são utilizados sistemas de inferência *fuzzy* e multiplicadores de idade. Para a solução deste problema foi implementado um algoritmo multi-objetivo NSGA-II, obtendo resultados de boa qualidade para os sistemas testes analisados. O tempo de execução para obter resultados de boa qualidade para o sistema teste de 14 equipamentos foi de 130 segundos e para o sistema teste de 257 equipamentos foi de 12 horas

Para a metodologia 3 foi implementada uma codificação inteira para tratar, de forma diferente o problema de otimização de planos de manutenção centrada em confiabilidade de sistemas de energia elétrica. A diferença do modelo matemático é a segunda função objetivo o qual calcula o FEC médio do sistema sujeito às restrições mostradas no Capítulo 4. Para a solução deste problema foi implementado um algoritmo multi-objetivo NSGA-II, obtendo resultados de boa qualidade para os sistemas testes analisados. O tempo de execução para obter resultados de boa qualidade para o sistema teste com 14 equipamentos foi de 30 segundos e para o sistema teste com 257 equipamentos foi de 3 horas

Para desenvolvimentos futuros deste trabalho, propõe-se a pesquisa e abordagem dos seguintes tópicos:

- Incluir o conceito de micro redes que serão delimitadas por chaves inteligentes ou chaves de proteção considerando localização de faltas e estudos de coordenação.
- Incorporar heurísticas construtivas e de busca para obter maior diversidade na fronteira ótima de Pareto.
- Ajustar os controladores *fuzzy* para que possam ter maior sensibilidade para tempos menores de dados de falhas.
- Incorporar uma metodologia para a localização de faltas centrada no potencial de falhas de seções e macrosseções.
- Implementar um modelo de taxas de falhas com dados históricos de falhas que considere as três faixas de acordo com a curva de banheira.
- Desenvolver um modelo matemático para solução do problema de manutenção de redes de confiabilidade usando *solvers* comerciais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Estudo de vida útil econômica e taxa de depreciação*. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI; Rio de Janeiro: Centro de Estudos de Recursos Naturais e Energia - CERNE, 2000. v. 1-2. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/012/documento/relatorio_vida_util_volume_1.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: qualidade da energia elétrica, procedimento (módulo 8)*. Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_4.pdf. Acesso em: 15 fev. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Manual e controle patrimonial do setor elétrico*. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/aren2009367_2_primeira_Ver.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais*. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Tempos_medios_de_atendimento/>. Acesso em: 15 mar. 2017.

ALMEIDA, M. T. de. *Manutenção preditiva: confiabilidade e qualidade*. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>> Acesso em: 10 dez. 2015.

BARVOSA, A.; RIBEIRO, L.; ARANTES, J. Algoritmos genéticos multiobjectivos: sistemas adaptativos com elitismo. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS CONTROL AND THEIR APPLICATIONS – DINCON, 9th., Serra Negra. *Proceedings...* São Paulo: SBMAC, 2010. p. 940-945.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. *Tópicos de lógica Fuzzy e biomatemática*. In: TEXTOS didáticos. Campinas: IMECC, 2006. (Coleção IMECC).

BERTLING, L.; ALLAN, R.; ERIKSSON, R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 1, p. 75-82, 2005.

BILLINTON, R. An analytical approach to evaluate probability distributions associated with the reliability indices of electric distributions Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 1, n. 3, p. 245-251, jul. 1986.

BILLINTON, R; ALLAN, R. N. *Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques*. New York: Plenum, 1992.

BLOOM, N. *Reliability centered maintenance (RCM): implementation made simple*. New York: McGraw-Hill, 2005.

BROWN, R. *Electric power distribution reliability*. New York: CRC, 2009.

DAVIS, L. *Genetic algorithms and simulated annealing*. London: Pitman, 1987. (Research notes in artificial intelligence).

DEB, K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. New York: Wiley, 2001. (Interscience series in systems and optimization).

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, New York, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DHILLON, B. S. *Maintainability, maintenance and reliability for Engineers*. New York: CRC, 2006.

ELETROBRAS. *Coleção distribuição de energia elétrica: desempenho de sistemas de distribuição*. Rio de Janeiro: Campus, 1982.

ENDRENYI, J.; ANDERS, G. J.; SILVA, A. M. L. da. Probabilistic evaluation of the effect of maintenance on reliability: an application. *IEEE Transaction on Power Systems*, Piscataway, v. 13, n. 2, p. 576-582, 1998.

FERREIRA, G. D. *Otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica: uma abordagem considerando a seleção e alocação de dispositivos de proteção e manobras*. 2009. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC ALGORITHMS, 7., 1993, San Francisco. *Proceedings...* San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993. p. 416-423.

JANJIC, A.; POPOVIC, D. Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 22, n. 2, p. 597-604, 2007.

KARDEC, A.; NASFIC, J. *Manutenção: função estratégica*. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, London, v. 91, n. 9, p. 992-1007, 2006.

KUNTZ, P. A.; CHRISTIE, R. D.; VENKATA, S. S. Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 17, n. 4, 2002, p. 1164-1169. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1046899>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2001.

LEITAO, E. M. P. *Religador automático para redes de baixa tensão*. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MEDES, A. A.; RIBEIRO, J. L. D. Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC. *ABEP Produção*, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 583-593, 2011.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NETO, A. R. P. *Modelo híbrido de otimização multiobjetivo para formação de células de manufatura*. 2008. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PHOOTHONG, N.; VANITTANAKOM, P.; TEERA-ACHARIYAKUL, N.; RERKPREEDAPONG, D. Optimal preventive maintenance budget setting for electric power distribution utilities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY, 5., 2008, Krabi. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2008, p. 957-960.

PIASSON, D. *Otimização de planos de manutenções de componentes de sistemas de distribuição de energia elétrica centrados em confiabilidade*. 2014. 266 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

Fábio B. Leão

PIASSON, D.; RODRIGUES, R. B.; BISCARO, A. A. P.; MANTOVANI, J. R. S. A proposal for reliability evaluation of components on electric power distribution system integrating probabilistic models and fuzzy inference systems. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION: LATIN AMERICA CONFERENCE AND EXPOSITION (T&D-LA), 6., 2012, Montevideo. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, Sep. 2012, p. 1 - 8.

PIASSON, D.; BISCARO, A. A. P.; LEÃO, F. B.; MANTOVANI, J. R. S. A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm, *Power Systems Research*, vol. 137, Aug. 2016, pp. 41-50.

SITTITHUMWAT, A., SOUDI, F.; TOMSOVIC, K. Optimal allocation of distribution maintenance resources with limited information. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 68, p. 208-220, 2004.

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering and System*, London, v. 60, p. 121-132, 1998.

REIS, P. A. *Otimização baseada em confiabilidade de planos de manutenção de sistemas de*

distribuição de energia elétrica. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ROSS, S. M. *Introduction of probability models*. [S. l.]: Elsevier Science, 2007.

SITTITHUMWAT, A.; SOUDI, F.; TOMSOVIC, K. Optimal allocation of distribution maintenance resources with limited information. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 68, p. 208 - 220, 2004.

SOUZA, D. C. P. *Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso*. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2008.

ZAPATA, C. J. *Análisis probabilístico e simulación*. Colômbia: Universisdade de Pereira, 2010. Disponível em: <http://academia.edu/1995572/Analisis_probabilistico_y_simulacion>. Acesso em: 01 jul. 2013.

ZAPATA, C. J. *Confiabilidad en Ingeniería*. Colombia: Universidade de Pereira, 2011.

APÊNDICE A- SISTEMAS TESTES

Neste apêndice são apresentados os componentes dos sistemas testes em análise, o qual consta de dois alimentadores reais : Um alimentador de pequeno porte (14 equipamentos) e outro de médio porte (257 equipamentos).

A.1 Sistema teste alimentador real com 14 equipamentos

Tabela 22 - Dados dos Equipamentos.

<i>N_inicial</i>	<i>TIPO</i>	<i>N_final</i>	<i>SE</i>	<i>IDADE (ANOS)</i>
1	DJ	2	1	10
2	LN	3	1	18
3	RT	4	1	11
4	TR	5	1	18
4	DJ	6	1	11
6	LN	7	1	19
7	TR	8	1	12
6	LN	9	1	13
9	CS	10	1	18
10	LN	11	1	16
11	RT	12	1	17
12	TR	13	1	12
3	CP	NO	1	15
12	TR	14	1	13

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 23 - Dados dos Nós.

<i>NUM</i>	<i>TIPO</i>	<i>CARGA</i>	<i>SE</i>	<i>POTÊNCIA (kW)</i>
1	NO	NA	1	0
2	NO	NA	1	0
4	NO	NA	1	0
5	NO	LOAD	1	150
6	NO	NA	1	0
7	NO	NA	1	0
8	NO	LOAD	1	130
9	NO	NA	1	0
10	NO	NA	1	0
11	NO	NA	1	0
12	NO	NA	1	0
13	NO	LOAD	1	115
14	NO	LOAD	1	90

Fonte: Elaboração do autor.

A.2 Sistema teste alimentador real com 257 equipamentos

Tabela 24 - Dados dos Equipamentos.

<i>N_inicial</i>	<i>TIPO</i>	<i>N_final</i>	<i>SE</i>	<i>IDADE (ANOS)</i>
166	LN	167	1	12
167	TR	168	1	5
163	LN	169	1	6
169	LN	170	1	9
170	TR	171	1	1
170	LN	172	1	3
172	CS	173	1	5
173	LN	174	1	7
174	LN	175	1	2
175	LN	176	1	6
176	LN	177	1	4
177	TR	178	1	2
177	LN	179	1	8
179	LN	180	1	3
180	LN	181	1	2
181	LN	182	1	9
182	LN	183	1	12
183	TR	184	1	5
181	LN	185	1	6
185	RT	186	1	9
186	LN	187	1	1
187	LN	188	1	3
188	CS	189	1	5
189	LN	190	1	7
190	TR	191	1	2
188	LN	192	1	6
180	LN	193	1	4
193	LN	194	1	2
194	CS	195	1	8
195	LN	196	1	3
196	LN	197	1	2
197	LN	198	1	9
198	LN	199	1	12
199	LN	200	1	5
200	LN	201	1	6
201	LN	202	1	9
202	LN	203	1	1
203	LN	204	1	3
204	LN	205	1	5
205	LN	206	1	7
206	LN	207	1	2
207	TR	208	1	6
207	TR	147	1	4
198	LN	209	1	2
209	LN	210	1	8
210	TR	211	1	3
210	LN	212	1	2

212	LN	213	1	9
213	LN	214	1	12
214	LN	215	1	5
215	TR	216	1	6
197	LN	217	1	9
217	TR	218	1	9
174	LN	220	1	3
220	LN	221	1	5
221	LN	222	1	7
222	TR	223	1	7
2	DJ	3	1	2
3	LN	4	1	6
4	CS	5	1	4
5	LN	6	1	2
6	CS	7	1	8
7	LN	8	1	3
8	RT	9	1	2
9	LN	10	1	9
10	RT	11	1	12
11	LN	12	1	5
12	RT	13	1	6
13	LN	14	1	9
14	LN	15	1	1
15	LN	16	1	3
16	LN	17	1	5
17	LN	18	1	7
18	LN	19	1	2
19	LN	20	1	6
20	LN	21	1	4
21	LN	22	1	2
22	LN	23	1	8
23	LN	24	1	3
24	RT	25	1	2
25	LN	26	1	9
26	RT	27	1	12
27	LN	28	1	5
28	LN	29	1	6
29	LN	30	1	9
30	LN	31	1	1
31	LN	32	1	3
32	LN	33	1	5
33	TR	34	1	7
33	LN	35	1	2
35	LN	36	1	6
36	LN	37	1	4
37	LN	38	1	2
38	LN	39	1	8
39	RT	40	1	3
40	LN	42	1	2
42	CS	43	1	9
43	CS	44	1	12
44	LN	41	1	12
41	TR	52	1	12
43	LN	45	1	5
45	LN	46	1	6

46	TR	47	1	9
46	LN	48	1	1
48	LN	49	1	3
49	LN	54	1	6
54	RT	55	1	4
55	LN	56	1	2
56	LN	57	1	8
57	LN	58	1	3
58	LN	59	1	2
59	LN	60	1	9
60	TR	61	1	12
59	LN	62	1	5
62	LN	63	1	6
63	TR	64	1	9
63	TR	65	1	1
63	LN	66	1	3
66	TR	67	1	5
58	LN	68	1	7
68	LN	69	1	2
69	CS	70	1	6
70	LN	71	1	4
71	TR	72	1	2
69	LN	73	1	8
73	LN	74	1	3
74	LN	82	1	1
82	LN	83	1	3
83	LN	84	1	5
84	RT	85	1	7
85	LN	86	1	2
86	TR	87	1	6
86	LN	88	1	4
88	LN	89	1	2
89	CS	90	1	8
90	LN	91	1	3
91	LN	92	1	2
92	LN	93	1	9
93	TR	94	1	12
93	LN	95	1	5
95	LN	96	1	6
96	LN	97	1	9
97	LN	98	1	1
98	TR	99	1	3
98	LN	100	1	5
100	LN	101	1	7
101	LN	102	1	2
102	LN	103	1	6
103	CS	104	1	4
104	LN	144	1	4
144	TR	145	1	4
103	LN	105	1	2
105	LN	106	1	8
106	CS	107	1	3
107	LN	108	1	2
108	TR	109	1	9
106	LN	110	1	12

110	CS	111	1	5
111	LN	112	1	6
112	LN	113	1	9
113	LN	114	1	1
114	LN	115	1	3
115	LN	116	1	5
116	LN	117	1	7
117	LN	118	1	2
118	TR	119	1	6
118	LN	120	1	4
120	RT	121	1	2
121	LN	122	1	8
122	LN	123	1	3
123	LN	124	1	2
124	LN	125	1	9
125	TR	126	1	12
125	LN	127	1	5
127	LN	128	1	6
128	LN	129	1	9
129	LN	130	1	1
130	TR	131	1	1
129	LN	132	1	3
132	LN	133	1	5
133	TR	134	1	7
128	LN	135	1	2
135	LN	136	1	6
136	CS	137	1	4
137	LN	141	1	4
141	TR	142	1	6
112	RT	148	1	5
148	LN	149	1	6
149	LN	150	1	9
150	LN	151	1	1
151	TR	152	1	3
105	RT	153	1	5
153	LN	154	1	7
154	CS	155	1	2
155	LN	156	1	6
156	TR	157	1	4
156	LN	158	1	2
158	TR	159	1	8
158	LN	160	1	3
160	LN	161	1	2
162	TR	161	1	9
163	LN	162	1	12
163	LN	164	1	5
164	TR	165	1	6
164	LN	166	1	9
100	CS	224	1	1
224	LN	247	1	1
247	TR	251	1	1
96	LN	225	1	3
225	LN	226	1	5
226	TR	227	1	7
225	LN	228	1	2

228	CS	229	1	6
229	LN	230	1	4
230	LN	231	1	2
231	LN	232	1	8
232	LN	233	1	3
233	LN	234	1	2
234	LN	235	1	9
235	LN	236	1	12
236	LN	237	1	5
237	LN	238	1	6
238	LN	239	1	9
239	TR	240	1	1
236	LN	242	1	5
242	LN	243	1	7
243	LN	244	1	2
244	LN	245	1	6
245	LN	246	1	4
246	LN	248	1	8
248	LN	249	1	3
249	TR	250	1	2
232	LN	252	1	12
252	LN	254	1	6
254	LN	255	1	9
255	TR	256	1	1
91	LN	257	1	3
257	LN	259	1	7
259	LN	260	1	2
260	LN	261	1	6
261	RT	262	1	4
262	RT	263	1	2
263	LN	264	1	8
264	LN	265	1	3
265	LN	266	1	2
266	LN	267	1	9
267	CS	268	1	12
268	LN	269	1	5
269	TR	270	1	6
262	LN	271	1	9
271	TR	272	1	1
83	CS	273	1	3
273	LN	77	1	4
77	TR	78	1	6
42	CS	274	1	5
274	LN	51	1	5
51	TR	53	1	5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 25 - Dados dos Nós.

Nodo	TIPO	CARGA	SE	POTÊNCIA (KW)
2	NO	NA	1	0
3	NO	NA	1	0
4	NO	NA	1	0
5	NO	NA	1	0
6	NO	NA	1	0
7	NO	NA	1	0
8	NO	NA	1	0
9	NO	NA	1	0
10	NO	NA	1	0
11	NO	NA	1	0
12	NO	NA	1	0
13	NO	NA	1	0
14	NO	NA	1	0
15	NO	NA	1	0
16	NO	NA	1	0
17	NO	NA	1	0
18	NO	NA	1	0
19	NO	NA	1	0
20	NO	NA	1	0
21	NO	NA	1	0
22	NO	NA	1	0
23	NO	NA	1	0
24	NO	NA	1	0
25	NO	NA	1	0
26	NO	NA	1	0
27	NO	NA	1	0
28	NO	NA	1	0
29	NO	NA	1	0
30	NO	NA	1	0
31	NO	NA	1	0
32	NO	NA	1	0
33	NO	NA	1	0
34	NO	LOAD	1	30
35	NO	NA	1	0
36	NO	NA	1	0
37	NO	NA	1	0
38	NO	NA	1	0
39	NO	NA	1	0
40	NO	NA	1	0
42	NO	NA	1	0
43	NO	NA	1	0
44	NO	NA	1	0
41	NO	NA	1	0
45	NO	NA	1	0
46	NO	NA	1	0
47	NO	LOAD	1	18

48	NO	NA	1	0
49	NO	NA	1	0
52	NO	LOAD	1	30
54	NO	NA	1	0
55	NO	NA	1	0
56	NO	NA	1	0
57	NO	NA	1	0
58	NO	NA	1	0
59	NO	NA	1	0
60	NO	NA	1	0
61	NO	LOAD	1	20
62	NO	NA	1	0
63	NO	NA	1	0
64	NO	LOAD	1	25
65	NO	LOAD	1	56
66	NO	NA	1	0
67	NO	LOAD	1	89
68	NO	NA	1	0
69	NO	NA	1	0
70	NO	NA	1	0
71	NO	NA	1	0
72	NO	LOAD	1	56
73	NO	NA	1	0
74	NO	NA	1	0
77	NO	NA	1	0
78	NO	LOAD	1	60
82	NO	NA	1	0
83	NO	NA	1	0
84	NO	NA	1	0
85	NO	NA	1	0
86	NO	NA	1	0
87	NO	LOAD	1	64
88	NO	NA	1	0
89	NO	NA	1	0
90	NO	NA	1	0
91	NO	NA	1	0
92	NO	NA	1	0
93	NO	NA	1	0
94	NO	LOAD	1	24
95	NO	NA	1	0
96	NO	NA	1	0
97	NO	NA	1	0
98	NO	NA	1	0
99	NO	LOAD	1	24
100	NO	NA	1	0
101	NO	NA	1	0
102	NO	NA	1	0
103	NO	NA	1	0
104	NO	NA	1	0

105	NO	NA	1	0
106	NO	NA	1	0
107	NO	NA	1	0
108	NO	NA	1	0
109	NO	LOAD	1	67
110	NO	NA	1	0
111	NO	NA	1	0
112	NO	NA	1	0
113	NO	NA	1	0
114	NO	NA	1	0
115	NO	NA	1	0
116	NO	NA	1	0
117	NO	NA	1	0
118	NO	NA	1	0
119	NO	LOAD	1	32
120	NO	NA	1	0
121	NO	NA	1	0
122	NO	NA	1	0
123	NO	NA	1	0
124	NO	NA	1	0
125	NO	NA	1	0
126	NO	LOAD	1	34
127	NO	NA	1	0
128	NO	NA	1	0
129	NO	NA	1	0
130	NO	NA	1	0
131	NO	LOAD	1	34
132	NO	NA	1	0
133	NO	NA	1	0
134	NO	LOAD	1	53
135	NO	NA	1	0
136	NO	NA	1	0
137	NO	NA	1	0
144	NO	NA	1	0
147	NO	LOAD	1	36
145	NO	LOAD	1	56
141	NO	NA	1	0
142	NO	LOAD	1	36
148	NO	NA	1	0
149	NO	NA	1	0
150	NO	NA	1	0
151	NO	NA	1	0
152	NO	LOAD	1	36
153	NO	NA	1	0
154	NO	NA	1	0
155	NO	NA	1	0
156	NO	NA	1	0
157	NO	LOAD	1	23
158	NO	NA	1	0

159	NO	LOAD	1	25
160	NO	NA	1	0
161	NO	LOAD	1	36
162	NO	NA	1	0
163	NO	NA	1	0
164	NO	NA	1	0
165	NO	LOAD	1	23
166	NO	NA	1	0
167	NO	NA	1	0
168	NO	LOAD	1	15
169	NO	NA	1	0
170	NO	NA	1	0
171	NO	LOAD	1	16
172	NO	NA	1	0
173	NO	NA	1	0
174	NO	NA	1	0
175	NO	NA	1	0
176	NO	NA	1	0
177	NO	NA	1	0
178	NO	LOAD	1	46
179	NO	NA	1	0
180	NO	NA	1	0
181	NO	NA	1	0
182	NO	NA	1	0
183	NO	NA	1	0
184	NO	LOAD	1	23
185	NO	NA	1	0
186	NO	NA	1	0
187	NO	NA	1	0
188	NO	NA	1	0
189	NO	NA	1	0
190	NO	NA	1	0
191	NO	LOAD	1	64
192	NO	NA	1	0
193	NO	NA	1	0
194	NO	NA	1	0
195	NO	NA	1	0
196	NO	NA	1	0
197	NO	NA	1	0
198	NO	NA	1	0
199	NO	NA	1	0
200	NO	NA	1	0
201	NO	NA	1	0
202	NO	NA	1	0
203	NO	NA	1	0
204	NO	NA	1	0
205	NO	NA	1	0
206	NO	NA	1	0
207	NO	NA	1	0

208	NO	LOAD	1	32
209	NO	NA	1	0
210	NO	NA	1	0
211	NO	LOAD	1	12
212	NO	NA	1	0
213	NO	NA	1	0
214	NO	NA	1	0
215	NO	NA	1	0
216	NO	LOAD	1	34
217	NO	NA	1	0
218	NO	LOAD	1	32
220	NO	NA	1	0
221	NO	NA	1	0
222	NO	NA	1	0
223	NO	LOAD	1	12
224	NO	NA	1	0
247	NO	NA	1	0
225	NO	NA	1	0
226	NO	NA	1	0
227	NO	LOAD	1	54
228	NO	NA	1	0
229	NO	NA	1	0
230	NO	NA	1	0
231	NO	NA	1	0
232	NO	NA	1	0
233	NO	NA	1	0
234	NO	NA	1	0
235	NO	NA	1	0
236	NO	NA	1	0
237	NO	NA	1	0
238	NO	NA	1	0
239	NO	NA	1	0
240	NO	LOAD	1	23
242	NO	NA	1	0
243	NO	NA	1	0
244	NO	NA	1	0
245	NO	NA	1	0
246	NO	NA	1	0
248	NO	NA	1	0
249	NO	NA	1	0
250	NO	LOAD	1	24
251	NO	LOAD	1	42
252	NO	NA	1	0
254	NO	NA	1	0
255	NO	NA	1	0
256	NO	LOAD	1	23
257	NO	NA	1	0
259	NO	NA	1	0
260	NO	NA	1	0

261	NO	NA	1	0
262	NO	NA	1	0
263	NO	NA	1	0
264	NO	NA	1	0
265	NO	NA	1	0
266	NO	NA	1	0
267	NO	NA	1	0
268	NO	NA	1	0
269	NO	NA	1	0
270	NO	LOAD	1	13
271	NO	NA	1	0
272	NO	LOAD	1	14
273	NO	NA	1	0
274	NO	NA	1	0
51	NO	NA	1	0
53	NO	LOAD	1	13

Fonte: Elaboração do próprio autor.

ANEXO A - MODELAMENTO DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA

Neste anexo é apresentada o modelamento da confiabilidade dos equipamentos do sistema o qual foi desenvolvido em Piasson (2014). De acordo com Piasson os conjuntos *fuzzy* de entrada do sistema de inferência, são os intervalos reais dos valores da probabilidade de falha e dos fatores de falha de cada equipamento. Entre os equipamentos de um SDEE que são considerados somente os componentes ativos do sistema; os transformadores de distribuição, os bancos de capacitores os disjuntores e as chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto. Para os componentes não ativos chaves e cabos, é formulado um sistema de inferência *fuzzy* simplificado, envolvendo somente a probabilidade de falhas e a idade dos equipamentos. As informações contidas nesta seção foram obtidas parcialmente através de técnicos com larga experiência com sistemas de distribuição e dos resultados de um estudo sobre vida útil de equipamentos encontrado em ANEEL (2000). Os fatores de falhas e o universo de discurso de cada um dos componentes analisados e considerados neste trabalho são descritos a seguir

A.1 Transformadores de distribuição

A.1.1 Idade dos transformadores de distribuição

Tabela 26- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável “idade”.

Fator “idade dos transformadores de distribuição”	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 12,5] (anos)
Média	[5; 20] (anos)
Alta	[12,5; ∞] (anos)

Fonte: Piasson (2014).

A.1.2 Esforço operacional

$$esforço = \frac{S_{aparente}}{S_{nominal}} = \frac{S_a + S_b + S_c}{S_{nominal}} \quad (67)$$

Tabela 27- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável “esforço”.

Fator “esforço dos transformadores de distribuição”	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 0,70]
Média	[0,50; 0,90]
Alta	[0,70; ∞]

Fonte: Piasson (2014).

A.1.3 Desequilíbrio das cargas

$$desequilíbrio = \max\left\{\frac{|S_b - S_a|}{S_{\text{minimo}}}, \frac{|S_c - S_a|}{S_{\text{minimo}}}, \frac{|S_b - S_c|}{S_{\text{minimo}}}\right\}, \quad (68)$$

$$\text{.Sendo: } S_{\text{minimo}} = \min\{S_a, S_b, S_c\} \quad (69)$$

Tabela 28- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável “desequilíbrio”.

Fator “desequilíbrio das cargas dos transformadores de distribuição”	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 0,20]
Média	[0,10; 0,40]
Alta	[0,25; ∞]

Fonte: Piasson (2014).

A.2 Reguladores de tensão

De acordo com ANEEL (2000) a vida útil econômica dos reguladores de tensão é estimada em 21 anos. A fuzzificação dos conjuntos fuzzy para esta variável e seus respectivos universos de discurso são apresentados na Tabela 29.

A.2.1 Idade dos reguladores de tensão

Tabela 29- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável “idade”.

Fator “idade dos reguladores de tensão”	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 12,5] (anos)
Média	[5; 20] (anos)
Alta	[12,5; ∞] (anos)

Fonte: Piasson (2014).

A.2.2 Esforço operacional

$$esforço = \frac{S_{aparente}}{S_{nominal}} \quad (70)$$

Tabela 30- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável “esforço”.

Fator “esforço dos reguladores de tensão”	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 0,70]
Média	[0,50; 0,90]
Alta	[0,70; ∞]

Fonte: Paison(2014).

A.3 Banco de Capacitores

Os componentes principais dos bancos capacitores são as unidades capacitivas e também representam o ponto principal de falha decorrente das características do sistema. (ANEEL, 2000). Dentre essas características a sobre tensão é a principal delas. A idade dos componentes do banco como um todo, também é um fator relevante na análise da confiabilidade desse equipamento do sistema, portanto tais fatores são considerados neste trabalho e a definição dos universos de discurso e fuzzificação são apresentados a seguir.

A.3.1 Idade dos capacitores

De acordo com ANEEL (2000), a vida útil dos bancos de capacitores é estimada em 15 anos. Desse período, decorrem os intervalos de domínio dos conjuntos *fuzzy* da idade dos capacitores, os quais são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "idade".

Fator “idade dos bancos de capacitores”	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 10] (<i>anos</i>)
Média	[5; 15] (<i>anos</i>)
Alta	[10; ∞] (<i>anos</i>)

Fonte: Paison (2014).

A.3.2 Tensão

Tabela 32 - Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "tensão".

Fator "tensão dos bancos de capacitores"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 0,95]
Média	[0,90; 1.1]
Alta	[1,05; ∞]

Fonte: Paison (2014).

A.4 Disjuntores

Relevante na confiabilidade de qualquer equipamento, a idade é considerada de acordo com a faixa de tensão da rede, conforme Tabela 33.

Tabela 33- Idade de acordo com a faixa de tensão da rede

Classe de tensão (U)	Faixa de vida útil
$U < 69$ KV	20 a 25 anos
$69 \leq U \leq 138$ KV	25 a 30 anos
$U > 138$ KV	35 a 40 anos (para SF6) 30 a 35 anos (para os demais)

Fonte: Extraída de ANEEL (2000).

A.4.1 Idade dos disjuntores

Tabela 34- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "idade".

Fator "idade dos disjuntores"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 15] (anos)
Média	[10; 20] (anos)
Alta	[15; ∞] (anos)

Fonte: Paison (2014).

A.4.2 Número de operações

Tabela 35- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "número de operações".

Fator "número de operações"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 10]
Média	[5; 15]
Alta	[10; ∞]

Fonte: Paison (2014).

A.4.3 Tempo sem manutenção

Tabela 36- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "tempo sem manutenção".

Fator "tempo sem manutenção"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 1] (anos)
Média	[5; 5] (anos)
Alta	[3; ∞] (anos)

Fonte: Paisson (2014).

A.5 Chaves

Há uma variedade de tipos de chaves encontrados no sistema de distribuição, sendo os principais: as chaves tipo faca, as chaves fusíveis e as chaves à óleo. As chaves do tipo faca possuem características construtivas muito simples e, praticamente, 100% confiáveis no que se refere às interrupções do fornecimento de energia elétrica devido a presença de alguma falta nestes equipamentos, assim, para esse tipo de chave não é realizado nenhum estudo da confiabilidade e é, portanto, adotado o índice de confiabilidade $C(t) = 1$, para todo $t \in HP$. Para as chaves do tipo fusíveis e a óleo, são considerados para avaliação da confiabilidade, os fatores: idade, probabilidade de falha e, exclusivamente para as chaves a óleo, o número de operações.

I.5.1 Idade das chaves fusíveis e a óleo/vácuo/hexafluoreto

De acordo com ANEEL (2000), a vida útil econômica média das chaves (sejam elas fusíveis ou a óleo/vácuo/hexafluoreto), é estimada em 15 anos. Os intervalos de domínio dos conjuntos *fuzzy* estabelecidos para a variável idade das chaves, são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "idade".

Fator "idade das chaves"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 10] (anos)
Média	[5; 15] (anos)
Alta	[10; ∞] (anos)

Fonte: Paisson (2014).

A.5.2 Número de operações das chaves fusíveis e a óleo/vácuo/hexafluorets

As chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto, por atuarem sob carga, transferem um grande esforço elétrico, térmico e mecânico em suas partes componentes. Esse esforço, segundo

ANEEL (2000), reduz a vida útil destes equipamentos. Além disso, o material dielétrico utilizado nas câmaras de interrupção dessas chaves, tende a perder sua propriedade isolante em função do número de operações dessas chaves. Logo, o número de operações das chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto está relacionado com o estado de degradação desses equipamentos. É esperado que quanto maior seja o número de operações realizadas por uma chave a óleo, maior deve ser o desgaste de seus componentes e do material dielétrico e, portanto, menor a confiabilidade desses equipamentos. Não há, no entanto, na literatura especializada, um número máximo de operações especificado para as chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto, em geral, dada a natureza do material dielétrico utilizado, a variedade de marcas e modelos desses equipamentos e a evolução dos materiais componentes. Com base, no entanto, no número de operações das chaves disjuntoras dos alimentadores, é considerado para este trabalho o número médio de 15 operações como sendo o limite máximo adequado de operações dessas chaves entre cada atividade de manutenção. Portanto, considerando o número de operações realizadas pelas chaves a óleo/vácuo/hexafluoreto como um fator que influencia na análise da confiabilidade destes equipamentos, são definidos os seguintes conjuntos fuzzy para a variável "número de operações" e seus respectivos universos de discurso, conforme Tabela 38.

Tabela 38- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "número de operações".

Fator "número de operações"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 10]
Média	[5; 15]
Alta	[10; ∞]

Fonte: Piasson (2014).

A.6 Cabos

A.6.1 Idade dos cabos

De acordo com ANEEL (2000), a vida útil econômica dos cabos é estimada em 20 anos. Neste trabalho, no entanto, o termo cabo (cabo primário) engloba, além dos cabos condutores propriamente ditos, os isoladores e as cruzetas em cada poste da rede. Assim, a vida útil deste item deve corresponder a vida útil média do conjunto dos cabos, isoladores e cruzetas. Visto que não é encontrado na literatura especializada um valor de vida útil deste conjunto, considera-se para este trabalho uma estimativa de 15 anos. Os intervalos de domínio dos conjuntos fuzzy estabelecidos para a idade dos cabos são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39- Universo de discurso para os conjuntos *fuzzy* da variável "idade".

Fator "idade dos cabos"	
<i>Conjuntos Fuzzy</i>	<i>Universo de Discurso</i>
Baixa	[0; 10] (anos)
Média	[5; 15] (anos)
Alta	[10; ∞] (anos)

Fonte: Piasson (2014).

ANEXO B - REGRAS DE INFERÊNCIA DA CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA

Nesta seção são apresentadas as tabelas com as bases de regras linguísticas de inferência da confiabilidade de cada equipamento considerado no estudo deste trabalho.

Tabela 40 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos bancos de capacitores.

Se	Probabilidade de Falha	e	Tensão	e	Idade	Então	Confiabilidade
R1	Baixa	\wedge	baixa	\wedge	media	\Rightarrow	alta
R2	Baixa	\wedge	média	\wedge	baixa	\Rightarrow	alta
R3	Baixa	\wedge	média	\wedge	media	\Rightarrow	alta
R4	Baixa	\wedge	alta	\wedge	baixa	\Rightarrow	alta
R5	Baixa	\wedge	baixa	\wedge	alta	\Rightarrow	alta
R6	Alta	\wedge	alta	\wedge	baixa	\Rightarrow	baixa
R7	Alta	\wedge	alta	\wedge	media	\Rightarrow	baixa
R8	Alta	\wedge	baixa	\wedge	alta	\Rightarrow	baixa
R9	Alta	\wedge	média	\wedge	alta	\Rightarrow	baixa
R10	Alta	\wedge	média	\wedge	media	\Rightarrow	baixa
R11	Média	\wedge	alta	\wedge	baixa	\Rightarrow	média
R12	Média	\wedge	baixa	\wedge	alta	\Rightarrow	média
R13	Média	\wedge	média	\wedge	media	\Rightarrow	média
R14	Média	\wedge	média	\wedge	alta	\Rightarrow	média
R15	Média	\wedge	baixa	\wedge	media	\Rightarrow	média
R16	Média	\wedge	média	\wedge	baixa	\Rightarrow	médio alta
R17	Baixa	\wedge	média	\wedge	alta	\Rightarrow	médio alta
R18	Baixa	\wedge	alta	\wedge	media	\Rightarrow	médio alta
R19	Baixa	\wedge	alta	\wedge	alta	\Rightarrow	médio alta
R20	Média	\wedge	baixa	\wedge	baixa	\Rightarrow	médio alta
R21	Alta	\wedge	baixa	\wedge	baixa	\Rightarrow	médio baixa
R22	Alta	\wedge	baixa	\wedge	media	\Rightarrow	médio baixa
R23	Alta	\wedge	média	\wedge	baixa	\Rightarrow	médio baixa
R24	Média	\wedge	alta	\wedge	media	\Rightarrow	médio baixa
R25	Média	\wedge	alta	\wedge	alta	\Rightarrow	médio baixa
R26	Baixa	\wedge	baixa	\wedge	baixa	\Rightarrow	muito alta
R27	Alta	\wedge	alta	\wedge	alta	\Rightarrow	muito baixa

Fonte: Piasson (2014).

Tabela 41- Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade das chaves

Se	Probabilidade de falha	e	Num. de operações	e	Idade	Então	Confiabilidade
R1	baixa	∧	baixa	∧	media	⇒	alta
R2	baixa	∧	média	∧	baixa	⇒	alta
R3	baixa	∧	média	∧	media	⇒	alta
R4	baixa	∧	alta	∧	baixa	⇒	alta
R5	baixa	∧	baixa	∧	alta	⇒	alta
R6	alta	∧	alta	∧	baixa	⇒	baixa
R7	alta	∧	alta	∧	media	⇒	baixa
R8	alta	∧	baixa	∧	alta	⇒	baixa
R9	alta	∧	média	∧	alta	⇒	baixa
R10	alta	∧	média	∧	media	⇒	baixa
R11	média	∧	alta	∧	baixa	⇒	média
R12	média	∧	baixa	∧	alta	⇒	média
R13	média	∧	média	∧	media	⇒	média
R14	média	∧	média	∧	alta	⇒	média
R15	média	∧	baixa	∧	media	⇒	média
R16	média	∧	média	∧	baixa	⇒	médio alta
R17	baixa	∧	média	∧	alta	⇒	médio alta
R18	baixa	∧	alta	∧	media	⇒	médio alta
R19	baixa	∧	alta	∧	alta	⇒	médio alta
R20	média	∧	baixa	∧	baixa	⇒	médio alta
R21	alta	∧	baixa	∧	baixa	⇒	médio baixa
R22	alta	∧	baixa	∧	media	⇒	médio baixa
R23	alta	∧	média	∧	baixa	⇒	médio baixa
R24	média	∧	alta	∧	media	⇒	médio baixa
R25	média	∧	alta	∧	alta	⇒	médio baixa
R26	baixa	∧	baixa	∧	baixa	⇒	muito alta
R27	alta	∧	alta	∧	alta	⇒	muito baixa

Fonte: Piasson (2014).

Tabela 42 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos Disjuntores

Se	Número de operações	e	Tempo entre manutenções	e	Probabilidade de falhas	e	Idade do equipamento	Então	Confiabilidade
R1	baixo	∧	Médio	∧	baixa	∧	média	⇒	alta
R2	baixo	∧	Médio	∧	média	∧	média	⇒	alta
R3	baixo	∧	Alto	∧	baixa	∧	média	⇒	alta
R4	médio	∧	Baixo	∧	baixa	∧	média	⇒	alta
R5	baixo	∧	Alto	∧	média	∧	baixa	⇒	alta
R6	médio	∧	Baixo	∧	média	∧	baixa	⇒	alta
R7	médio	∧	Médio	∧	baixa	∧	baixa	⇒	alta
R8	baixo	∧	Baixo	∧	baixa	∧	alta	⇒	alta
R9	baixo	∧	Baixo	∧	média	∧	alta	⇒	alta
R10	baixo	∧	Baixo	∧	alta	∧	baixa	⇒	alta
R11	baixo	∧	Alto	∧	baixa	∧	baixa	⇒	alta
R12	baixo	∧	Médio	∧	média	∧	baixa	⇒	alta

R13	alto	∧	Alto	∧	baixa	∧	média	⇒	baixa
R14	médio	∧	Médio	∧	alta	∧	média	⇒	baixa
R15	médio	∧	Alto	∧	alta	∧	média	⇒	baixa
R16	alto	∧	Médio	∧	média	∧	média	⇒	baixa
R17	alto	∧	Médio	∧	alta	∧	média	⇒	baixa
R18	alto	∧	Baixo	∧	alta	∧	média	⇒	baixa
R19	médio	∧	Alto	∧	média	∧	alta	⇒	baixa
R20	alto	∧	Baixo	∧	média	∧	alta	⇒	baixa
R21	alto	∧	Médio	∧	baixa	∧	alta	⇒	baixa
R22	alto	∧	Alto	∧	média	∧	baixa	⇒	baixa
R23	alto	∧	Alto	∧	alta	∧	baixa	⇒	baixa
R24	baixo	∧	Alto	∧	alta	∧	alta	⇒	baixa
R25	alto	∧	Alto	∧	baixa	∧	alta	⇒	baixa
R26	médio	∧	Médio	∧	alta	∧	alta	⇒	baixa
R27	alto	∧	Médio	∧	média	∧	alta	⇒	baixa
R28	alto	∧	Baixo	∧	alta	∧	alta	⇒	baixa
R29	alto	∧	Alto	∧	média	∧	média	⇒	baixa
R30	baixo	∧	Médio	∧	alta	∧	média	⇒	média
R31	baixo	∧	Alto	∧	alta	∧	média	⇒	média
R32	médio	∧	Baixo	∧	alta	∧	média	⇒	média
R33	médio	∧	Médio	∧	média	∧	média	⇒	média
R34	médio	∧	Alto	∧	baixa	∧	média	⇒	média
R35	alto	∧	Baixo	∧	baixa	∧	média	⇒	média
R36	baixo	∧	Alto	∧	média	∧	alta	⇒	média
R37	médio	∧	Baixo	∧	média	∧	alta	⇒	média
R38	médio	∧	Médio	∧	baixa	∧	alta	⇒	média
R39	médio	∧	Alto	∧	média	∧	baixa	⇒	média
R40	alto	∧	Baixo	∧	média	∧	baixa	⇒	média
R41	alto	∧	Médio	∧	baixa	∧	baixa	⇒	média
R42	baixo	∧	Baixo	∧	alta	∧	alta	⇒	média alta
R43	baixo	∧	Médio	∧	baixa	∧	alta	⇒	média alta
R44	baixo	∧	Médio	∧	média	∧	alta	⇒	média alta
R45	baixo	∧	Alto	∧	baixa	∧	alta	⇒	média alta
R46	médio	∧	Baixo	∧	baixa	∧	alta	⇒	média alta
R47	baixo	∧	Médio	∧	alta	∧	baixa	⇒	média alta
R48	baixo	∧	Alto	∧	alta	∧	baixa	⇒	média alta
R49	médio	∧	Baixo	∧	alta	∧	baixa	⇒	média alta
R50	médio	∧	Médio	∧	média	∧	baixa	⇒	média alta
R51	médio	∧	Alto	∧	baixa	∧	baixa	⇒	média alta
R52	alto	∧	Baixo	∧	baixa	∧	baixa	⇒	média alta
R53	baixo	∧	Alto	∧	média	∧	média	⇒	média alta
R54	médio	∧	Baixo	∧	média	∧	média	⇒	média alta
R55	médio	∧	Médio	∧	baixa	∧	média	⇒	média alta
R56	alto	∧	Alto	∧	baixa	∧	baixa	⇒	média baixa
R57	médio	∧	Médio	∧	alta	∧	baixa	⇒	média baixa
R58	médio	∧	Alto	∧	alta	∧	baixa	⇒	média baixa
R59	alto	∧	Médio	∧	média	∧	baixa	⇒	média baixa

R60	alto	∧	Médio	∧	alta	∧	baixa	⇒	média baixa
R61	alto	∧	Baixo	∧	alta	∧	baixa	⇒	média baixa
R62	baixo	∧	Médio	∧	alta	∧	alta	⇒	média baixa
R63	médio	∧	Baixo	∧	alta	∧	alta	⇒	média baixa
R64	médio	∧	Médio	∧	média	∧	alta	⇒	média baixa
R65	médio	∧	Alto	∧	baixa	∧	alta	⇒	média baixa
R66	alto	∧	Baixo	∧	baixa	∧	alta	⇒	média baixa
R67	médio	∧	Alto	∧	média	∧	média	⇒	média baixa
R68	alto	∧	Baixo	∧	média	∧	média	⇒	média baixa
R69	alto	∧	Médio	∧	baixa	∧	média	⇒	média baixa
R70	baixo	∧	Médio	∧	baixa	∧	baixa	⇒	muito alta
R71	médio	∧	Baixo	∧	baixa	∧	baixa	⇒	muito alta
R72	baixo	∧	Baixo	∧	baixa	∧	baixa	⇒	muito alta
R73	baixo	∧	Baixo	∧	baixa	∧	média	⇒	muito alta
R74	baixo	∧	Baixo	∧	média	∧	baixa	⇒	muito alta
R75	baixo	∧	Baixo	∧	média	∧	média	⇒	muito alta
R76	alto	∧	Médio	∧	alta	∧	alta	⇒	muito baixa
R77	alto	∧	Alto	∧	média	∧	alta	⇒	muito baixa
R78	alto	∧	Alto	∧	alta	∧	média	⇒	muito baixa
R79	alto	∧	Alto	∧	alta	∧	alta	⇒	muito baixa
R80	médio	∧	Alto	∧	alta	∧	alta	⇒	muito baixa
R81	baixo	∧	Baixo	∧	alta	∧	média	⇒	alta

Fonte: Piasson (2014).

Tabela 43 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos reguladores de tensão

Se	Probabilidade de falha	e	Esforço	e	Idade	Então	Confiabilidade
R1	baixa	∧	baixa	∧	media	⇒	alta
R2	baixa	∧	média	∧	baixa	⇒	alta
R3	baixa	∧	média	∧	media	⇒	alta
R4	baixa	∧	alta	∧	baixa	⇒	alta
R5	baixa	∧	baixa	∧	alta	⇒	alta
R6	alta	∧	alta	∧	baixa	⇒	baixa
R7	alta	∧	alta	∧	media	⇒	baixa
R8	alta	∧	baixa	∧	alta	⇒	baixa
R9	alta	∧	média	∧	alta	⇒	baixa
R10	alta	∧	média	∧	media	⇒	baixa
R11	média	∧	alta	∧	baixa	⇒	média
R12	média	∧	baixa	∧	alta	⇒	média
R13	média	∧	média	∧	media	⇒	média
R14	média	∧	média	∧	alta	⇒	média
R15	média	∧	baixa	∧	media	⇒	média
R16	média	∧	média	∧	baixa	⇒	médio alta
R17	baixa	∧	média	∧	alta	⇒	médio alta
R18	baixa	∧	alta	∧	media	⇒	médio alta
R19	baixa	∧	alta	∧	alta	⇒	médio alta
R20	média	∧	baixa	∧	baixa	⇒	médio alta
R21	alta	∧	baixa	∧	baixa	⇒	médio baixa
R22	alta	∧	baixa	∧	media	⇒	médio baixa
R23	alta	∧	média	∧	baixa	⇒	médio baixa

R24	média	∧	alta	∧	media	⇒	médio baixa
R25	média	∧	alta	∧	alta	⇒	médio baixa
R26	baixa	∧	baixa	∧	baixa	⇒	muito alta
R27	alta	∧	alta	∧	alta	⇒	muito baixa

Fonte: Piasson (2014).

Tabela 44 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade dos transformadores

Se	Probabilidade de falhas	e	Idade do equipamento	e	Esforço do equipamento	e	Desequilíbrio entre fases	Então	Confiabilidade
R1	baixa	∧	Baixa	∧	baixo	∧	baixo	⇒	muito alto
R2	baixa	∧	Baixa	∧	baixo	∧	médio	⇒	muito alto
R3	baixa	∧	Média	∧	baixo	∧	baixo	⇒	muito alto
R4	baixa	∧	Baixa	∧	médio	∧	baixo	⇒	muito alto
R5	média	∧	Baixa	∧	baixo	∧	baixo	⇒	muito alto
R6	baixa	∧	Baixa	∧	baixo	∧	alto	⇒	alto
R7	baixa	∧	Alta	∧	baixo	∧	baixo	⇒	alto
R8	baixa	∧	Baixa	∧	alto	∧	baixo	⇒	alto
R9	alta	∧	Baixa	∧	baixo	∧	baixo	⇒	alto
R10	baixa	∧	Média	∧	baixo	∧	médio	⇒	alto
R11	média	∧	Baixa	∧	baixo	∧	médio	⇒	alto
R12	média	∧	Baixa	∧	médio	∧	baixo	⇒	alto
R13	baixa	∧	Baixa	∧	médio	∧	médio	⇒	alto
R14	média	∧	Média	∧	baixo	∧	baixo	⇒	alto
R15	baixa	∧	Média	∧	médio	∧	baixo	⇒	alto
R16	média	∧	Média	∧	médio	∧	baixo	⇒	médio alto
R17	média	∧	Baixa	∧	médio	∧	médio	⇒	médio alto
R18	média	∧	Média	∧	baixo	∧	médio	⇒	médio alto
R19	baixa	∧	Média	∧	médio	∧	médio	⇒	médio alto
R20	baixa	∧	Média	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio alto
R21	baixa	∧	Alta	∧	baixo	∧	médio	⇒	médio alto
R22	média	∧	Alta	∧	alto	∧	alto	⇒	muito baixo
R23	média	∧	Baixa	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio alto
R24	alta	∧	Baixa	∧	baixo	∧	médio	⇒	médio alto
R25	média	∧	Baixa	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio alto
R26	alta	∧	Baixa	∧	médio	∧	baixo	⇒	médio alto
R27	alta	∧	Média	∧	baixo	∧	baixo	⇒	médio alto
R28	média	∧	Alta	∧	baixo	∧	baixo	⇒	médio alto
R29	baixa	∧	Alta	∧	médio	∧	baixo	⇒	médio alto
R30	baixa	∧	Média	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio alto
R31	baixa	∧	Baixa	∧	médio	∧	alto	⇒	médio alto
R32	baixa	∧	Baixa	∧	alto	∧	médio	⇒	médio alto
R33	baixa	∧	Alta	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio
R34	alta	∧	Baixa	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio
R35	alta	∧	Baixa	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio
R36	alta	∧	Alta	∧	baixo	∧	baixo	⇒	médio
R37	baixa	∧	Baixa	∧	alto	∧	alto	⇒	médio
R38	baixa	∧	Alta	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio
R39	média	∧	Média	∧	médio	∧	médio	⇒	médio
R40	média	∧	Alta	∧	médio	∧	baixo	⇒	médio
R41	média	∧	Baixa	∧	médio	∧	alto	⇒	médio
R42	alta	∧	Média	∧	médio	∧	baixo	⇒	médio
R43	baixa	∧	Média	∧	médio	∧	alto	⇒	médio
R44	alta	∧	Média	∧	baixo	∧	médio	⇒	médio
R45	baixa	∧	Média	∧	alto	∧	médio	⇒	médio

R46	baixa	∧	Alta	∧	médio	∧	médio	⇒	médio
R47	alta	∧	Baixa	∧	médio	∧	médio	⇒	médio
R48	média	∧	Baixa	∧	alto	∧	médio	⇒	médio
R49	média	∧	Alta	∧	baixo	∧	médio	⇒	médio
R50	média	∧	Média	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio
R51	média	∧	Média	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio
R52	média	∧	Média	∧	médio	∧	alto	⇒	médio baixo
R53	média	∧	Alta	∧	médio	∧	médio	⇒	médio baixo
R54	média	∧	Média	∧	alto	∧	médio	⇒	médio baixo
R55	alta	∧	Média	∧	médio	∧	médio	⇒	médio baixo
R56	alta	∧	Média	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio baixo
R57	alta	∧	Baixa	∧	alto	∧	médio	⇒	médio baixo
R58	média	∧	Alta	∧	alto	∧	baixo	⇒	médio baixo
R59	baixa	∧	Alta	∧	alto	∧	médio	⇒	médio baixo
R60	média	∧	Alta	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio baixo
R61	baixa	∧	Alta	∧	médio	∧	alto	⇒	médio baixo
R62	baixa	∧	Média	∧	alto	∧	alto	⇒	médio baixo
R63	média	∧	Baixa	∧	alto	∧	alto	⇒	médio baixo
R64	alta	∧	Baixa	∧	médio	∧	alto	⇒	médio baixo
R65	alta	∧	Média	∧	baixo	∧	alto	⇒	médio baixo
R66	alta	∧	Alta	∧	médio	∧	baixo	⇒	médio baixo
R67	alta	∧	Alta	∧	baixo	∧	médio	⇒	médio baixo
R68	alta	∧	Alta	∧	alto	∧	baixo	⇒	baixo
R69	alta	∧	Baixa	∧	alto	∧	alto	⇒	baixo
R70	alta	∧	Alta	∧	baixo	∧	alto	⇒	baixo
R71	baixa	∧	Alta	∧	alto	∧	alto	⇒	baixo
R72	alta	∧	Média	∧	alto	∧	médio	⇒	baixo
R73	média	∧	Alta	∧	alto	∧	médio	⇒	baixo
R74	média	∧	Alta	∧	médio	∧	alto	⇒	baixo
R75	alta	∧	Alta	∧	médio	∧	médio	⇒	baixo
R76	média	∧	Média	∧	alto	∧	alto	⇒	baixo
R77	alta	∧	Média	∧	médio	∧	alto	⇒	baixo
R78	alta	∧	Alta	∧	alto	∧	alto	⇒	muito baixo
R79	alta	∧	Alta	∧	alto	∧	médio	⇒	muito baixo
R80	alta	∧	Média	∧	alto	∧	alto	⇒	muito baixo
R81	alta	∧	Alta	∧	médio	∧	alto	⇒	muito baixo

Fonte: Piasson (2014)

Tabela 45 - Base de regras linguísticas para previsão do índice de confiabilidade das probabilidades de falha

Se	Probabilidade de falha	e	Idade	Então	Confiabilidade
R1	baixa	\wedge	média	\Rightarrow	alta
R2	alta	\wedge	média	\Rightarrow	baixa
R3	média	\wedge	média	\Rightarrow	média
R4	baixa	\wedge	alta	\Rightarrow	média alta
R5	média	\wedge	baixa	\Rightarrow	média alta
R6	alta	\wedge	baixa	\Rightarrow	média baixa
R7	média	\wedge	alta	\Rightarrow	média baixa
R8	baixa	\wedge	baixa	\Rightarrow	muito alta
R9	alta	\wedge	alta	\Rightarrow	muito baixa

Fonte: Piasson (2014).