



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO**
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**Modelo para o Apoio à Decisão Multicritério
para o Planejamento da Manutenção Preventiva
no Setor Elétrico**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR**

FERNANDA ALVES FIGUEIREDO

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, DEZEMBRO / 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Modelo para o Apoio à Decisão Multicritério
para o Planejamento da Manutenção Preventiva
no Setor Elétrico**

**Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso
de Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Pernambuco – UFPE – como
requisito parcial para obtenção de Grau em
Engenharia de Produção.**

RECIFE, DEZEMBRO / 2009

F475m Figueiredo, Fernanda Alves.

Modelo para o apoio à decisão multicritério para o planejamento da manutenção preventiva no setor elétrico / Fernanda Alves Figueiredo. - Recife: O Autor, 2009.
ix, 73 folhas.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia da Produção, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia da Produção. 2. Manutenção Preventiva. 3. Método Multicritério. 4. Análise de Cenários. 5. PROMETHEE. I. Título.

UFPE

658.5

CDD (22. ed.)

BCTG/2008-237

*“Imaginação é mais importante que conhecimento.
Conhecimento é limitado. Imaginação envolve o mundo.”*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço todos, família, amigos e colegas, que me acompanharam pela minha formação acadêmica e sempre me apoiaram e me incentivaram.

Diversas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho, as quais agradeço ao apoio e a ajuda. Porém, não quero deixar de agradecer a algumas delas em particular.

Aos meus pais e padrinhos que sempre acreditaram que conhecimento é o bem mais valioso e, portanto, nunca deixaram de investir para minha formação como pessoa e profissional. Sou eternamente grata a todos vocês!

Ao Prof. Adiel Teixeira de Almeida que orientou e acompanhou todo o trabalho desde do seu início durante a iniciação científica. A sua orientação, paciência, disponibilidade e apoio, em todos os momentos, concedidos a mim na realização do presente trabalho.

Ao Prof. Cristiano Cavalcante que também acompanhou e orientou parte do meu trabalho durante graduação, inclusive do artigo no qual este trabalho foi baseado.

RESUMO

O planejamento da manutenção preventiva é um dos problemas mais comuns e significantes enfrentados pela indústria. Ele consiste em um conjunto de ações técnicas, administrativas e gerenciais para reduzir o desgaste do componente de forma a melhorar a disponibilidade do sistema. Muitos estudos já foram conduzidos nessa área usando diferentes métodos para otimizar a manutenção através de uma programação de manutenção ótima. Esse trabalho, então, procura estruturar o problema do planejamento da manutenção preventiva considerando custo e confiabilidade como objetivos a serem atingidos por uma tomada de decisão multicritério. Ao modelo proposto para o problema, foi utilizado o método PROMETHEE para encontrar o intervalo ótimo para a manutenção preventiva com base em dados reais do contexto elétrico extraídos da literatura. As considerações para o modelo são apresentadas e justificam o procedimento e modelo proposto. Finalmente, uma aplicação numérica foi feita para ilustrar o modelo. Entretanto, podem existir diferentes cenários de acordo com os decisores e suas inclinações a determinados critérios. Para isso, adicionalmente, foi feita uma análise de diferentes cenários com variações dos parâmetros da distribuição de probabilidade de falhas e dos pesos atribuídos a cada critério.

Palavras-chave: *manutenção preventiva, método multicritério, PROMETHEE, análise de cenários.*

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	Estrutura do trabalho.....	4
2	Base Conceitual e Revisão Bibliográfica	5
2.1	Base Conceitual	5
2.1.1	Visão geral do planejamento da manutenção.....	5
2.1.2	Manutenção Preventiva.....	8
2.1.3	Métodos para problemas de planejamento de manutenção preventiva	10
2.2	Revisão Bibliográfica	16
2.2.1	Métodos Heurísticos	16
2.2.2	Métodos de Apoio Multicritério a Decisão	24
2.3	A manutenção preventiva no setor elétrico	29
3	Modelo de Decisão.....	29
3.1	Método de Decisão	29
3.2	Descrição do modelo utilizado	32
4	Aplicação Numérica	38
4.1	Aplicação e Resultados	38
4.2	Discussão dos Resultados	41
5	Conclusão e sugestões para trabalhos futuros	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Custo por cada tipo de manutenção.....	7
Tabela 2.2 Relações de preferência, indiferença e incomparabilidade entre duas ações...	15
Tabela 2.3 Quadro geral do setor elétrico brasileiro.....	25
Tabela 4.1 Parâmetros da função custo.....	38
Tabela 4.2 Parâmetros da distribuição de probabilidade de falhas.....	38
Tabela 4.3 Matriz de avaliação.....	39
Tabela 4.4 Função Preferência para cada critério e seus pesos.....	39
Tabela 4.5 Fluxo das alternativas.....	40
Tabela 4.6 Ranking das Alternativas.....	40
Tabela 4.7 Variação de pesos para o cenário 01.....	41
Tabela 4.8 Ranking das alternativas para o cenário 01.....	42
Tabela 4.9 Variação de pesos para o cenário 02.....	43
Tabela 4.10 Ranking das alternativas para o cenário 02.....	43
Tabela 4.11 Variação de pesos para o cenário 03.....	44
Tabela 4.12 Ranking das alternativas para o cenário 03.....	45
Tabela 4.13 Variação do parâmetro Beta para o cenário 04.....	46
Tabela 4.14 Matriz das alternativas para o cenário 04.....	46
Tabela 4.15 Ranking das alternativas para o cenário 04.....	47
Tabela 4.16 Variação do parâmetro Beta para o cenário 05.....	48
Tabela 4.17 Matriz das alternativas para o cenário 05.....	48
Tabela 4.18 Ranking das alternativas para o cenário 05.....	49
Tabela 4.18 Variação do parâmetro Beta para o cenário 06.....	50
Tabela 4.19 Matriz das alternativas para o cenário 06.....	50
Tabela 4.20 Ranking das alternativas para o cenário 06.....	51
Tabela 4.21 Variação do parâmetro Beta para o cenário 07.....	52
Tabela 4.22 Matriz das alternativas para o cenário 07.....	52
Tabela 4.23 Ranking das alternativas para o cenário 07.....	53
Tabela 4.24 Variação do parâmetro Neta para o cenário 08.....	54
Tabela 4.25 Matriz das alternativas para o cenário 08.....	54
Tabela 4.26 Ranking das alternativas para o cenário 08.....	55

Tabela 4.27 Variação do parâmetro Neta para o cenário 09.....	56
Tabela 4.28 Matriz das alternativas para o cenário 09.....	56
Tabela 4.29 Ranking das alternativas para o cenário 09.....	57
Tabela 4.30 Variação do parâmetro Neta para o cenário 10.....	58
Tabela 4.31 Matriz das alternativas para o cenário 10.....	58
Tabela 4.32 Ranking das alternativas para o cenário 10.....	59
Tabela 4.33 Comparação do ranking dos cenários 01 a 10.....	60
Tabela 4.34 Variação do parâmetro Neta para o cenário 11.....	60
Tabela 4.35 Matriz das alternativas para o cenário 11.....	61
Tabela 4.36 Ranking das alternativas para o cenário 11.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema da Manutenção Preventiva	9
Figura 2.2 Exemplo de hierarquia de um problema de decisão.....	17
Figura 2.3 Exemplo de hierarquia de um problema de decisão.....	19
Figura 2. 4 Distribuição de energia elétrica.....	25
Figura 3.1 Tabela das funções preferência.....	30
Figura 3.2 Curva da Banheira.....	34
Figura 3.3 Gráfico de relação entre custo e tp.....	35
Figura 3.4 Gráfico da confiabilidade e tp.....	36
Figura 3.5 Conflito entre critérios.....	36
Figura 4.1 Comparação dos fluxos do cenário 01 com o padrão.....	42
Figura 4.2 Comparação dos fluxos do cenário 02 com o padrão.....	44
Figura 4.3 Comparação dos fluxos do cenário 03 com o padrão.....	45
Figura 4.4 Comparação dos fluxos do cenário 04 com o padrão.....	47
Figura 4.5 Comparação dos fluxos do cenário 05 com o padrão.....	49
Figura 4.6 Comparação dos fluxos do cenário 06 com o padrão.....	51
Figura 4.7 Comparação dos fluxos do cenário 07 com o padrão.....	53
Figura 4.8 Comparação dos fluxos do cenário 08 com o padrão.....	55
Figura 4.9 Comparação dos fluxos do cenário 09 com o padrão.....	57
Figura 4.10 Comparação dos fluxos do cenário 10 com o padrão.....	59
Figura 4.11 Comparação dos fluxos do cenário 11 com o padrão.....	62
Figura 4.12 Comportamento de falhas cenário-padrão.....	62
Figura 4.13 Comportamento de falhas cenário 04.....	63
Figura 4.14 Comportamento de falhas cenário 05.....	63
Figura 4.15 Comportamento de falhas cenário 06.....	64
Figura 4.16 Comportamento de falhas cenário 07.....	64
Figura 4.17 Comportamento de falhas cenário 08.....	65
Figura 4.18 Comportamento de falhas cenário 09.....	65
Figura 4.19 Comportamento de falhas cenário 10.....	66
Figura 4.20 Comportamento de falhas cenário 11.....	66

1. Introdução

Para se consolidar no mercado e garantir sua sobrevivência, as empresas devem obter vantagem competitiva. Esse cenário está se agravando cada vez mais com o passar do tempo e a perspectiva é que seja mais agravado ainda no futuro pela entrada de novas empresas, pela internacionalização dos mercados e por consumidores gradativamente mais exigentes. Para alcançar tal patamar a empresa precisa desenvolver um planejamento estratégico para definir sua posição do mercado pela avaliação de suas fraquezas, forças, oportunidades e ameaças. A partir disso, a empresa poderá criar estratégias internas com objetivos de longo prazo, programas de ação e priorização de atividades.

A manutenção desempenha um papel estratégico nas organizações competitivas, proporcionando a confiabilidade e a disponibilidade dos processos produtivos, evitando a deterioração e as falhas através da preservação dos equipamentos. A razão de ser da manutenção está em gerar condições operacionais para que equipamentos, instalações e serviços funcionem adequadamente, visando atingir objetivos e metas da empresa e, dessa forma, satisfazendo aos clientes, ao mais baixo custo, com segurança e sem perda da qualidade.

Segundo Levitt (1997), a manutenção procura a otimização da utilização dos bens durante sua vida útil, o que significa a preservação dos bens ou a preservação da capacidade de produzirem algo de maneira segura e econômica. Nas últimas décadas, o gerenciamento da manutenção evoluiu e, hoje em dia, deixou de ser uma simples atividade e tornou-se uma função complexa e importante, devido a inserção da automação. A manutenção é executada com o propósito de manter o nível de performance dos sistemas de acordo com os padrões desejados, reduzir paradas não planejadas e os custos provenientes dessas interrupções. Os custos devido à falha representam: atrasos de produção, retrabalho, ineficiência dentre vários outros prejuízos (CAVALCANTE *et al*, 2005).

As paradas não programadas da linha de produção geram a queda na receita, se convertendo em prejuízos significativos. Com a ocorrência de paradas, eleva-se o custo da produção, diminuindo a produtividade, o lucro e comprometendo a qualidade dos produtos em processo. Por isso, a competitividade de uma empresa está diretamente ligada à qualidade dos serviços prestados pelas equipes de manutenção e, logo, a decisão do tipo de manutenção e do método aplicado para determinar o planejamento da mesma será de fundamental importância para o negócio da empresa.

Entretanto, qualquer período sem fornecimento para população acarreta também em danos que não podem ou não são facilmente quantificáveis.

Recentemente, por exemplo, ocorreu um apagão no Brasil que atingiu 18 dos 26 estados brasileiros e fez o mundo questionar sobre a confiabilidade do nosso sistema elétrico. Além do Brasil, onde a região Sudeste foi mais afetada, o Paraguai também sofreu falta de fornecimento de energia elétrica na noite do dia 10 de novembro. Algumas partes do país foram indiretamente afetadas, apesar do seu fornecimento não vir diretamente de Itaipu, devido ao efeito dominó, como por exemplo o desligamento automático de Angra I e Angra II. Os prejuízos foram muito além das perdas financeiras. Pessoas ficaram presas em elevadores, prontos-socorros sem geradores não puderam atender pacientes, hospitais tiveram que acionar os seus geradores para continuar cirurgias, os principais cruzamentos das cidades foram fechados para prevenir acidentes de trânsito, os metrô e ônibus elétricos pararam no meio das linhas e a polícia teve que reforçar seu efetivo chamando mais policiais para o turno da noite para reforçar a segurança nas ruas (G1 Notícias, 2008).

A explicação fornecida pelo MME (Ministério de Minas e Energia) estabeleceu que o apagão teria sido provocado por condições meteorológicas que teriam afetado três linhas de transmissão no Paraná e São Paulo. Independente da causa, se foi sabotagem, problemas nos equipamentos por falta de manutenção, problemas meteorológicos, falta de energia devido a falta de investimento no setor elétrico, como o apagão de 2001, o importante é considerar que qualquer falha para um setor de serviços como é o setor elétrico causa distúrbios para a sociedade além de perdas financeiras e, portanto, desenvolver um método melhor para evitar essa interrupção no suprimento de energia é sempre válido (G1 Notícias, 2008).

1.1 Justificativa

A importância da manutenção se deve principalmente ao grande número de custos operacionais e de suporte do sistema e equipamentos. Os Estados Unidos, por exemplo, gasta aproximadamente 300 bilhões de dólares todo ano com manutenção e operação da planta (LEVITT, 1997).

De acordo com a ABRAMAN, os investimentos com manutenção no Brasil em diversos setores, tais como os de máquinas e equipamentos, petróleo e petroquímico, siderúrgico, aeronáutico, energia elétrica, transportes e serviços, em 2002 somaram cerca de US\$ 19,26 bilhões (R\$ 60,1 bilhões). O índice obtido equivaleu a 4,27% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional do mesmo ano, que foi da ordem de US\$ 451 bilhões (R\$ 1,4 trilhão).

Esse percentual ainda é superior aquele alcançado pelas empresas européias, 4,12% do PIB europeu no mesmo ano. Essa diferença é explicada pela utilização de sistemas de manutenção, que são contínuos, enquanto no Brasil as empresas ainda adotam programas de manutenção, que possuem um tempo determinado de duração.

No ambiente do sistema elétrico, cuja operação atende a toda a população, a manutenção torna-se essencial para que o serviço de fornecimento de energia elétrica ocorra de forma ininterrupta. Esse sistema é formado por um conjunto de usinas, subestações, linhas de transmissão e outros equipamentos que possibilitam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em uma área específica.

A demanda global por energia está crescendo a uma taxa de, aproximadamente, três por cento por ano devido ao crescimento populacional, maiores expectativas de vida e aceleração do processo de urbanização. Para alcançar este desafio, deve-se utilizar tecnologias inovadoras para expandir, atualizar e realizar a manutenção das redes elétricas (SIEMENS, 2008).

Portanto, fica evidente a necessidade de se estabelecer um modelo de manutenção preventiva adequado, que interrompa o mínimo possível a atividade produtiva do sistema elétrico evitando maiores custos operacionais e interrupções do serviço, o que poderia comprometer as atividades produtivas de outras empresas e, também, o cotidiano social da população.

Como a manutenção possui variáveis com comportamentos conflitantes, confiabilidade e custo de manutenção por exemplo, pode se justificar a adoção de uma abordagem multicritério para o problema para o tratamento simultâneo dos critérios. Além disso, para definição da periodicidade é necessário obter dados históricos do comportamento das falhas, que em muitos casos não estão disponíveis (CAVALCANTE *et al*, 2005).

1.2 Objetivos

Nesta seção, são apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

- Estruturar um método para a tomada de decisão multicritério quanto à periodicidade da manutenção preventiva no contexto do setor elétrico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar a Gestão da Manutenção, mostrando sua importância para a atividade produção e seus diversos aspectos;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a manutenção preventiva e as diferentes metodologias utilizadas para a tomada de decisão;
- Desenvolver estudos de aplicação de modelo de apoio à decisão para determinar a periodicidade da manutenção preventiva.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está descrito em 05 capítulos como se mostra a seguir:

Capítulo 1: É apresentada uma visão geral do problema de planejamento da manutenção preventiva, especificando os objetivos e justificativa do trabalho.

Capítulo 2: Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica para dar base conceitual ao problema de planejamento da manutenção preventiva, detalhando aspectos deste tipo de manutenção e os métodos já apresentados na literatura para a tomada de decisão de problemas típicos relacionados a manutenção preventiva. Além disso, é enfatizada a aplicação da manutenção preventiva no setor elétrico.

Capítulo 3: É proposta a metodologia para dar suporte a decisão do problema com base em um método multicritério, o PROMETHEE II. Ainda é discutida e descrita a teoria do método para a aplicação do mesmo.

Capítulo 4: Neste capítulo é feita uma aplicação numérica do método proposto e uma análise de cenários de acordo com variações nos parâmetros do problema.

Capítulo 5: Finaliza-se este trabalho com uma análise dos resultados obtidos a partir da aplicação do modelo descrito na metodologia e se conclui com recomendações para pesquisas futuras que incrementariam esta proposição

2. Base Conceitual e Revisão Bibliográfica

Como o desenvolvimento e planejamento da manutenção são cruciais, é de grande importância essa prática em qualquer indústria. O impacto potencial dessa atividade ao nível de operações e logística, em termos de flexibilidade, lead time e qualidade, é considerável e, além disso, as implicações financeiras da manutenção são apreciáveis. Entretanto, a conscientização da importância da manutenção como um gerador potencial de ganhos é recente.

Neste capítulo serão abordadas: de uma forma geral, a base teórica da manutenção, item 2.1, uma descrição mais detalhada da manutenção preventiva no item 2.2, uma descrição de alguns métodos utilizados no planejamento da manutenção preventiva no item 2.3, e, finalmente, no item 2.4 um levantamento geral da atividade de manutenção no setor elétrico.

2.1 Base Conceitual

2.1.1 Visão geral do planejamento da manutenção

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), manutenção é definida como:

a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (NBR 5462, 1994).

A atividade de manutenção tem uma profunda relação com os custos de fabricação, visto que elevam o desempenho e a disponibilidade dos equipamentos para a produção. Portanto, é muito importante que a manutenção tenha como objetivo equilibrar a disponibilidade e os custos, dentre os quais existe uma relação de *trade-off* (KELLY *et al*, 1978).

Pelas últimas décadas, a manutenção passou por vários avanços devido a maior demanda por manutenção. O crescimento da demanda teve vários fatores como o aumento de equipamentos em número e diversidade, projetos mais complexos, novas técnicas e enfoques de manutenção e, principalmente, maior conscientização do homem da relação entre manutenção e: qualidade, redução de custos e segurança do homem e meio ambiente (PINTO *et al*, 1998).

Apesar de todos os avanços no campo tecnológico e todas as novas técnicas de

manutenção, os equipamentos ainda têm um período de vida útil limitado, portanto a otimização dessa atividade é tão importante para o prolongamento e recuperação dos equipamentos.

Logo, a manutenção deve ser não só eficiente, mas eficaz. A partir daí, surge a necessidade da manutenção ser considerada como função estratégica da empresa, onde o seu planejamento adequado contribui para o faturamento e lucro da empresa, segurança da instalação e das pessoas, preservação ambiental e, além disso, é fundamental que as pessoas envolvidas conheçam seus dados e tenham motivação (PINTO *et al*, 1998).

Hoje, as empresas podem utilizar muitas abordagens diferentes de manutenção, as quais variam basicamente de acordo com o modo de intervenção mais adequado para o sistema produtivo em casos de ocorrência ou previsão de falhas (GONÇALVES *et al*, 2008).

Os tipos de manutenção mais encontrados na literatura são a manutenção corretiva, preventiva e preditiva.

A manutenção corretiva é caracterizada por um conjunto de ações não-planejadas realizadas após a ocorrência de uma falha, de forma a recuperar a capacidade funcional de um equipamento retornando o sistema do estado de falha para um estado disponível. Logo, não é possível eliminá-la ou planejá-la visto que nunca uma falha será prevista de maneira exata. Por essa razão, a manutenção corretiva é considerada a abordagem mais primária, cara, aleatória e inevitável (SANTOS *et al*, 2007).

Segundo Lindley (1995) *apud* Gonçalves *et al* (2007), o objetivo desta técnica de manutenção é “eliminar avarias, desvios da condição ótima da operação e otimizar a eficácia de todos os sistemas críticos da planta”. Além disso, esta abordagem é a intervenção necessária para evitar graves consequências ao sistema de produção, à segurança dos trabalhadores ou ao meio ambiente. Ainda de acordo com Gonçalves *et al* (2007), a frequência da manutenção corretiva será definida pela confiabilidade do equipamento.

Segundo Santos *et al* (2007), ao contrário da manutenção corretiva, a preventiva é caracterizada pela execução de ações previamente planejadas com o propósito de manter o equipamento, ainda em funcionamento, em condições satisfatórias de operação. As intervenções são determinadas com base em certos critérios recomendados que diminuem as probabilidades de falha e degradação do desempenho. A manutenção preventiva pode ser feita por meio de inspeções sistemáticas, controles ou serviços de naturezas diferentes como: limpeza, lubrificação, calibração, detecção de defeitos.

Diferentemente da corretiva, a preventiva pode ser planejada e medida pelo tempo requerido para executá-la e pela sua frequência (GONÇALVES *et al*, 2008).

Já a manutenção preditiva, pode ser descrita na literatura como um ramo da manutenção preventiva que é focada na condição ou ainda como uma estratégia de manutenção capaz de prever a tendência temporária do desempenho da degradação e predizer falhas em máquinas pela análise dos dados dos parâmetros monitorados (WANG *et al*, 2007).

Segundo Gonçalves *et al* (2008), a capacidade da manutenção preditiva de realizar o monitoramento e medição dos equipamentos verificando as tendências de modificação por controle estatístico de parâmetros permite definir o momento de intervenção de uma forma mais exata evitando interrupções e desmontagens desnecessárias dos equipamentos. Além disso, concilia suas necessidades com as necessidades das atividades de produção, como disponibilidade de funcionários e *set-up* (GONÇALVES *et al*, 2008).

De acordo com Wang *et al* (2007), com o avanço de sistemas inteligentes de manutenção, essa estratégia poderá focar-se nas técnicas de prognóstico de falha e buscar o desempenho do equipamento com quase um tempo de parada nulo.

A tabela 2.1 abaixo, obtida na *National Manufacturing Week Conference* de 1998, mostra uma comparação de custos entre os tipos mais usuais de manutenção, de acordo com Pinto & Xavier (1998):

Tabela 2.1 Custo por cada tipo de manutenção

Tipo de Manutenção	Custo US\$/Horse Power/ano
Corretiva não planejada	17 a 18
Preventiva	11 a 13
Preditiva e monitoramento de condição/ Corretiva Planejada	7 a 9

Fonte: Pinto & Xavier (1998)

Pinto & Xavier (1998) ainda apresentam a situação do Brasil em relação aos países do primeiro mundo, em termos de utilização de certas estratégias. Foi observado, que a manutenção preditiva é mais aplicada nos países mais desenvolvidos e a corretiva, menos aplicada, em relação ao Brasil. Já a manutenção preventiva apresentou-se aproximadamente igual.

Dentre as várias abordagens descritas, a preventiva será o foco deste trabalho.

2.1.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva tem sido feita desde a Idade Antiga, sendo utilizada pelos egípcios na construção das pirâmides, apesar de seu termo só ter surgido em meados de 1950. Esse tipo de manutenção não é caracterizado como prática de manutenção dominante por duas razões. A primeira se deve a natureza humana, pois o homem reluta em gastar esforços em algo que talvez aconteça, e a segunda é a resposta da seguinte pergunta: “O que a gerência espera da função manutenção?” (LEVITT, 2003).

A manutenção preventiva consiste em ações que são realizadas durante a operação do sistema, como já mencionado, incluindo reparos e substituição de itens, com o intuito de prolongar a vida do equipamento e detectar falhas inevitáveis de maneira a evitar interrupções no sistema maximizando, assim, a disponibilidade do equipamento. Entretanto, para criar um programa de manutenção preventiva, é necessário determinar com que frequência o mesmo será feito e quando serão feitas suas atividades (TSAI *et al*, 2001).

Há duas situações onde a manutenção preventiva é importante: quando reduz a probabilidade ou o risco de morte, ferimentos ou danos ambientais ou quando o custo da atividade é menor que o custo das conseqüências. O único problema é a quantidade e periodicidade de requerimentos em relação a custos e mão-de-obra.

São inúmeras as razões para a implementação de um programa de manutenção preventiva (WORSHAM, 2000):

- Aumento de automação;
- Perdas administrativas devido a atrasos na produção;
- Redução de estoques reserva;
- Produção de um produto de maior qualidade;
- Manufatura just-in-time;
- Redução em equipamentos redundantes;
- Dependência entre células;
- Minimizar consumo de energia;
- Necessidade de um ambiente mais organizado e planejado.

A manutenção preventiva pode ser esquematizada da seguinte forma:

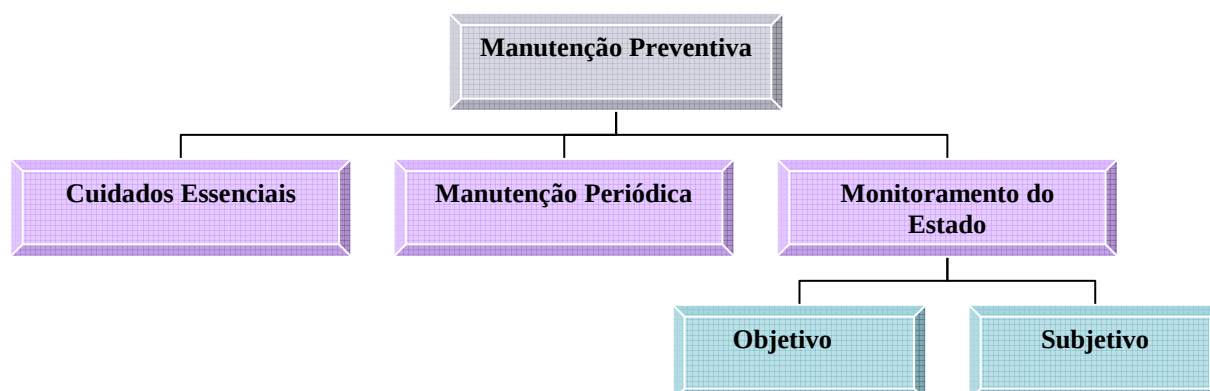


Figura 2.1 Esquema da Manutenção Preventiva

Fonte: Worsham (2000)

Onde os cuidados essenciais incluem prevenção de falhas por meio de tarefas do tipo lubrificação, limpeza, alinhamento, balanceamento, ajuste e procedimentos de instalação e operação. A manutenção periódica refere-se a todas as reposições feitas baseada em uma programação independente da condição atual como reposições programadas e reparos. Já o monitoramento do estado é composto de todas as inspeções desde inspeções subjetivas baseadas nos sentidos realizadas pelos operadores a inspeções objetivas como análise de vibração, coleta de amostras, checagem de pressão...

Existem muitas vantagens em possuir um programa de manutenção preventiva. Essas vantagens dependem do tipo e tamanho da planta. Quanto maior o valor dos bens da planta por metro quadrado, maior será o retorno do programa de manutenção preventiva. Entretanto existem certos riscos, como surgimento de defeitos de vários tipos durante a realização das atividades de manutenção, ou seja, erros humanos. Esses erros podem danificar equipamentos adjacentes, o próprio equipamento que recebe a manutenção durante reparos, inspeções, instalações ou ajustes (WORSHAM, 2000).

O programa de manutenção preventiva irá determinar que tipos de atividades de manutenção deverão ser feitas e em quais itens de cada equipamento, que recursos serão necessários e qual deverá ser a periodicidade dos intervalos de manutenção (QUAN *et al*, 2007).

Além disso, durante o planejamento da manutenção a produção deverá ser considerada, porque a programação da produção pode ser interrompida por falhas ou atividades de manutenção. Portanto, é necessário balancear quantas interrupções serão feitas na produção de forma a interromper o mínimo possível para atividades de manutenção e, ainda sim, continuar com um sistema saudável com pequena necessidade de reparos ou manutenção corretiva. (SORTRAKUL *et al*, 2005).

Em muitas plantas, a produção ocorre 24 horas por dia, 7 dias por semana ao longo de todas as 52 semanas do ano, com exceção de uma ou duas semanas, nas quais são realizadas paradas nas linhas de produção para manutenção. A manutenção, então, precisa, sob essas circunstâncias, planejar quais atividades devem ser realizadas ao longo do ano durante o funcionamento das máquinas e quais devem ser executadas no período em que não há produção. Por isso, a programação da produção guia as decisões de manutenção.

Muitas reclamações surgem da equipe de manutenção, pois a produção não permite disponibilidade das máquinas suficiente para todas as atividades de manutenção. De certa forma, isso de fato acontece, pois a empresa não deseja interromper a produção o que comprometeria seus lucros, entretanto, as equipes de manutenção podem fazer várias coisas para atingir suas metas de confiabilidade e disponibilidade das máquinas para a operação. Uma solução é a criação de um planejamento e programação de manutenção eficiente, aproveitando os intervalos de manutenção preventiva ditados pela produção e pelas paradas inesperadas, para aplicar ferramentas de software que proporcionam o status operacional atual das máquinas, planejamento de trabalho dinâmico e etc.

Para evitar mudanças na programação da produção para realização de manutenção, é necessário mudar o jeito que são feitas as manutenções nas máquinas. O ponto inicial da mudança está no próprio projeto e instalação das máquinas. Isso significa projetar máquinas e instalá-las de forma que certas atividades de manutenção possam ser executadas sem acesso intrusivo ao sistema. Logo, a manutenibilidade precisa ser planejada a partir do projeto, pois mudanças posteriores irão requerer mais esforço, tempo e dinheiro.

Outro elemento a ser considerado como alternativa a não interrupção da produção, é a seleção de acessórios e lubrificantes, que sejam mais eficientes e cujos resultados sejam mais duradouros, como lubrificantes Premium (sintéticos), lacres mecânicos e filtros maiores.

2.1.3 Métodos para problema de planejamento de manutenção preventiva

Os métodos mais comumente encontrados na literatura aplicados à problemas de manutenção preventiva são os métodos heurísticos e os multicritérios, sendo a determinação do intervalo ótimo de manutenção uma das principais variáveis dentre as quais se deseja solucionar.

Através da matemática é possível calcular um suposto melhor caminho através de buscas de diversas maneiras. Visando problemas diferentes, foram elaborados vários métodos matemáticos para tais contextos, chamados métodos heurísticos, que são utilizados nos algoritmos de busca de caminho.

Esses métodos são desenvolvidos constantemente e apresentam a vantagem em relação aos métodos tradicionais, os métodos multicritério, pois, normalmente, são capazes de encontrar soluções próximas da ótima em menos tempo e com menos esforço computacional. Além do que possibilitam a utilização de funções muito complexas matematicamente que não poderiam ser avaliadas por outros métodos.

Entre os diversos métodos heurísticos criados até hoje, os algoritmos evolucionários, em especial os algoritmos genéticos, e a colônia das formigas são os exemplos mais populares e utilizados atualmente.

De acordo com Quan *et al* (2007), os algoritmos evolucionários realizam buscas em espaços de solução com várias dimensões seguindo princípios biológicos de adaptação encontrados na natureza. No caso desses algoritmos, a filosofia Neo-Darwiniana é adotada. Essa filosofia afirma que os processos estocásticos como reprodução e seleção são responsáveis pela vida como conhecemos. Já os algoritmos genéticos, segundo Goldberg (1997), são um sub-tipo dos evolucionários e tem como objetivo abstrair e explicar rigorosamente o processo adaptativo de sistemas naturais; e projetar artificialmente sistemas de software que retenham os importantes mecanismos de seleção natural. A pesquisa desses algoritmos busca robustez, isto é, o balanço entre eficiência e eficácia necessária para sobrevivência em ambientes diferentes. Segundo Haupt & Haupt (2004), conceitualmente, os algoritmos genéticos são uma técnica de busca e otimização baseada nos princípios da genética e seleção natural de acordo com as teorias Darwinianas, e, assim segue a idéia da sobrevivência dos mais fortes. Podem contribuir para a solução do problema de diversas formas, dentre algumas vantagens apresentadas por Haupt & Haupt (2004): otimização com variáveis contínuas ou discretas, lida com um grande número de variáveis, fornece uma lista de variáveis ótimas e não apenas uma única solução, otimiza variáveis com superfícies de custo

extremamente complexas...

Entretanto, os algoritmos genéticos nem sempre serão o melhor método para todos os problemas. Em alguns casos, os métodos tradicionais poderão encontrar a solução mais rapidamente e caberá ao decisor ou analista decidir com base em seu conhecimento e experiência quais seriam os melhores métodos a serem aplicados para cada tipo de problema. Porém, a maioria dos problemas reais não são classificados como ideais para aplicação dos métodos tradicionais (HAUPT *et al*, 2004).

A otimização por colônia de formigas estuda sistemas artificiais que se inspiram no comportamento de uma colônia real de formigas na busca por comida. Essa metodologia foi proposta, inicialmente, para resolver problemas de otimização combinatórios, como programação e rotas para veículos. Muitas aplicações foram feitas com esse método heurístico provando ser um sistema eficiente em termos de qualidade de soluções e esforço computacional (SOCHA *et al*, 2006).

Já os métodos de apoio multicritério a decisão não apresentam uma solução única e ótima para um problema. O objetivo desses métodos é dar apoio a decisão, definido por Roy (1996) como uma atividade exercida por uma pessoa, que através do uso de modelos ajuda a obter uma resposta para os problemas estabelecidos pelos *stakeholders* de um processo decisório. Os elementos dessa resposta obtida esclarecem a decisão, a qual geralmente é recomendada ou favorecida de acordo com a consistência do seu resultado e os objetivos dos *stakeholders*.

Os *stakeholders* são atores que tem interesses no processo decisório e cujas preferências são consideradas na decisão. Dentre os *stakeholders* um deve ser identificado como o decisor do problema. Porém, ainda existe um grupo de terceiros que apesar de não participarem ativamente no problema, devem ter suas preferências também analisadas. Entretanto, nem sempre o decisor possui o conhecimento apropriado para tomar a decisão, por isso, muitas vezes, a apoio a decisão é realizado por um analista. O analista é geralmente um especialista ou expert, cujo papel principal é explicar, justificar, recomendar e tentar procurar manter-se neutro (ROY, 1996).

De acordo com Gomes *et al* (2006), foi apenas por volta de 1970 que surgiram os primeiros métodos voltados para problemas com vários critérios, já que muitos pesquisadores estavam se tornando mais conscientes da presença de problemas reais com múltiplos critérios.

Os métodos multicritério têm como finalidade apoiar e conduzir os decisores na

avaliação de soluções num espaço determinado pelas restrições do problema, cujos critérios ou pontos de vista podem ser contraditórios. Segundo Vincke (1992), é preciso perceber que esses métodos, entretanto, não visam apresentar uma solução, mas, sim, apoiar o processo decisório, por isso que a qualidade dos resultados dependerá da qualidade das informações. Resolver esse tipo de problema então, não é encontrar uma verdade escondida, mas dar suporte ao decisor para entender os dados complexos em direção a uma solução. Portanto, pode-se deduzir que o resultado final será variável de acordo com: a personalidade do decisor, as circunstâncias em que o processo ocorre, a forma em que o problema é apresentado e o método utilizado. Logo, essa se torna a principal diferença entre esses métodos e os tradicionais da pesquisa operacional. Além disso, o apoio multicritério a decisão tem maior grau de incorporação dos valores do decisor na avaliação, aceitando a subjetividade no processo de decisão (GOMES *et al*, 2006).

Os métodos são classificados em três, entretanto cada família ou classificação não tem limites bem definidos (VINCKE, 1992):

1. Teoria da utilidade multiatributo:

Também chamada de escola americana, consiste na agregação de diferentes pontos de vista em uma função única a qual deve ser otimizada. Durante a evolução desses métodos, muito foi discutido sobre a agregação de critérios para tratar o problema como um problema de otimização, portanto, desde então tem sido substituído por métodos mais flexíveis e menos matemáticos.

2. Métodos de sobreclassificação:

A segunda família ou escola francesa visa construir uma relação, chamada de sobreclassificação, que representa as preferências estabelecidas pelo decisor com base em informações existentes. Portanto, a relação de sobreclassificação não é completa ou transitiva. Em seguida, essa relação será explorada para apoiar a decisão na solução do problema.

3. Métodos de interação:

É a família mais recente e sua proposta é uma alternância de cálculos e diálogo. Seu maior desenvolvimento foi no campo de programação matemática de múltiplos objetivos.

De acordo com Almeida *et al* (2003), a escolha dos métodos multicritério de apoio a decisão deve considerar: o problema analisado, o contexto, a estrutura de preferências do decisor e a problemática.

A problemática é dividida em quatro tipos (ROY, 1996):

- Problemática de escolha ($P\alpha$): tem como objetivo apoiar o decisor na escolha de uma única solução de um subconjunto, que contem as “melhores” ou satisfatórias ações. Logo, o resultado esperado é uma escolha ou um procedimento para escolha.
- Problemática de classificação ($P\beta$): tem como objetivo apoiar o decisor na alocação de uma ação para cada categoria. As categorias foram definidas previamente como função de certas normas aplicáveis ao conjunto de ações. Logo, o resultado esperado é uma classificação ou procedimento de alocação.
- Problemática de ordenação ($P\gamma$): tem como objetivo apoiar o decisor na ordenação de ações em classes que foram ordenadas completamente ou parcialmente de acordo com preferências. Logo, o resultado é uma ordenação ou procedimento para ordenação.
- Problemática de descrição ($P\delta$): tem como objetivo apoiar o decisor no desenvolvimento de uma descrição de ações e suas conseqüências em termos apropriados. Logo, o resultado é uma descrição ou procedimento cognitivo.

As perspectivas para o apoio multicritério a decisão são promissoras, principalmente em termos práticos, com o crescente uso de softwares para aplicações em tais problemas (VINCKE, 1992).

Para a aplicação dos métodos multicritérios é necessário modelar as preferências através da comparação de duas ações potenciais. A estruturas das preferências é caracterizada pela comparação de duas ações a e b , pertencentes ao conjunto de ações A , as quais irão assumir apenas uma de três propriedades: preferências por uma ação, indiferença entre ambas e rejeição ou impossibilidade de comparação entre elas (VINCKE, 1992). Essas relações são representadas na tabela 2.2 (GOMES *et al*, 2006).

A escolha do método multicritério corresponde a escolha do tipo de relação entre os critérios. Os métodos são classificados em dois tipos: métodos compensatórios e não-compensatórios.

Tabela 2.2 Relações de preferência, indiferença e incomparabilidade entre duas ações

Situação	Definição	Exemplo
Indiferença (I)	Existem razões claras e positivas que justificam uma equivalência entre duas ações.	$a I b$, se a é preferível a b
Preferência estrita (P)	Existem razões claras e positivas que justificam uma preferência significativa em favor de uma (bem identificada) das duas ações.	$a P b$ se a é estritamente preferível a b , ($b P a$ para o caso contrário)
Preferência fraca (Q)	Existem razões claras e positivas que não implicam uma preferência estrita em favor de uma (bem identificada) das duas ações, mas essas razões são insuficientes para se deduzir seja uma preferência estrita em favor da outra, seja uma indiferença entre essas duas ações.	$a Q b$ se a tem preferência fraca em relação a b , ($b Q a$ para o caso contrário)
Incomparabilidade (R)	Não existem razões claras e positivas que justifiquem uma das três situações precedentes.	$a J b$ para incomparabilidade

Fonte: adaptado de Roy (1996)

Os métodos compensatórios tem como modelo de preferência global um critério único de síntese (g), que é o resultado da agregação de todos os outros critérios. Nos métodos compensatórios, a diminuição no desempenho de uma alternativa em um critério pode ser compensada com a melhoria do desempenho da mesma alternativa em outro critério. Estes modelos podem favorecer ações não balanceadas: a performance de uma ação pode ser excelente em alguns critérios e péssima em outros. O MAUT, AHP e o SMART são mecanismos compensatórios.

Já os métodos não-compensatórios favorecem ações mais balanceadas e possuem uma melhor performance média. ELECTRE, PROMETHEE são mecanismos não-compensatórios. Nos modelos não-compensatórios, não há, portanto, um critério único de síntese, mas, sim, baseiam-se na relação de superação ou sobreclassificação (S).

A maior dificuldade num problema multicritério é o fato que ele é um problema matemático definido de forma “doente”. Isso significa que o problema não possui uma solução objetiva e, portanto, não existe um ótimo para todos os critérios. Por essa razão que muitos pesquisadores não consideravam esse ramo da pesquisa operacional como sério ou rigoroso.

Entretanto, como já visto a maioria dos problemas reais são multicritérios e tentar adequá-lo a problemas matemáticos bem definidos traz riscos de deformação do problema (VINCKE, 1992).

De acordo com Gomes *et al* (2006), após o uso do método multicritério, é ideal a realização de uma análise de sensibilidade para checar como as variações dos parâmetros introduzidas afetam os resultados obtidos. Logo, o objetivo é checar a estabilidade e robustez do modelo aplicado.

Para maior aprofundamento em métodos multicritérios, suas propriedades e relações, é sugerido a leitura dos trabalhos citados nessa seção.

2.2 Revisão Bibliográfica

2.2.1 Aplicação de métodos no planejamento da manutenção preventiva

- **AHP (Analytic Hierarchy Process)**

Método desenvolvido por Thomas Saaty que fornece um meio efetivo para lidar com tomadas de decisão complexas que envolvem múltiplos critérios. Sua principal característica tem como base a decomposição hierárquica do problema, criando-se uma hierarquia de critérios (SAATY, 1991) e convertendo avaliações subjetivas de importância relativa em um conjunto de pontuações ou pesos gerais. A sua importância deve-se ao auxílio na obtenção de avaliação subjetiva e objetiva de medidas oferecendo um mecanismo útil para checar consistência de medidas de avaliação e alternativas sugeridas pela equipe para reduzir o viés na tomada de decisão (TCHEMRA, 2009).

É constituído basicamente de quatro etapas: organização do problema hierarquicamente, desenvolvimento de matrizes de julgamento por comparações par a par, cálculo de prioridades locais a partir de matrizes de julgamento e classificação das alternativas. Primeiramente, o problema é representado como uma árvore (Figura 2.2), onde o topo representa o objetivo e na base estão o conjunto de alternativas. Em seguida, são criadas as matrizes de julgamento de critérios ou alternativas, as quais podem ser definidas pela comparação de critérios de mesmo nível da árvore ou entre todas as alternativas, onde a comparação par a par é baseada por uma escala, onde 9 representa importância absoluta e o

extremo 1 indica igual importância. O terceiro passo é a escolha de um de vários métodos para

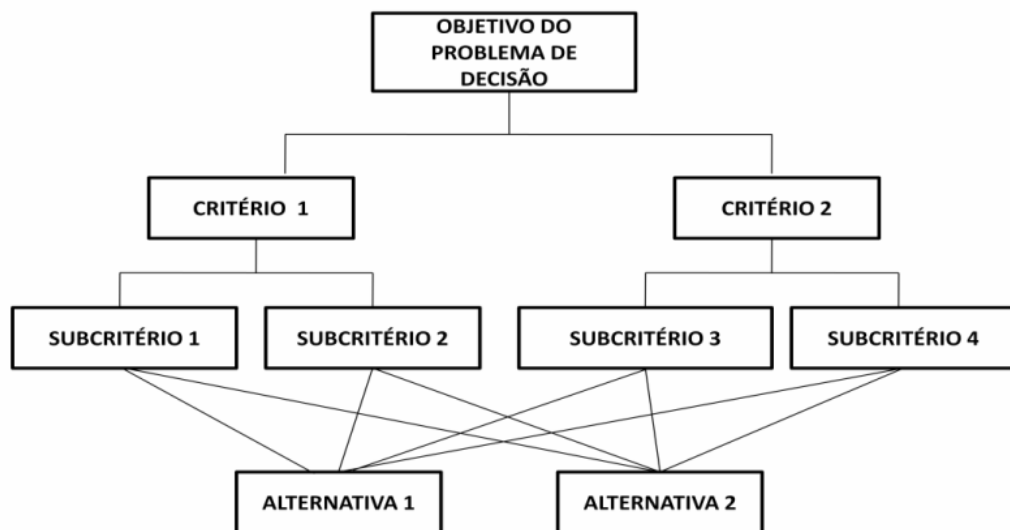


Figura 2.2 Exemplo de hierarquia de um problema de decisão

encontrar as prioridades locais, ou seja, os pesos locais dos critérios e os resultados (*scores*) locais das alternativas. Depois de checar a consistência da matriz de julgamento obtida, é que chega-se a etapa final da obtenção das prioridades globais. Essas prioridades são obtidas pela agregação das prioridades locais através de uma simples soma ponderada. Com base nessa soma final das prioridades globais, as alternativas são ordenadas (WANG *et al*, 2007).

Dentre as vantagens do método podem ser citadas (WANG *et al*, 2007):

- é o único modelo conhecido de tomada de decisão que pode medir a consistência do julgamento dos decisores;
- pode ajudar os decisores a organizar os aspectos críticos de um problema em uma estrutura hierárquica facilitando, assim, o processo de decisão;
- faz comparações par a par que são preferidas pelos decisores.

Além dessas vantagens, possui alguns aspectos relevantes que incluem a possibilidade de conduzir uma análise de sensibilidade, tem suporte de softwares, pode usar informações quantitativas e qualitativas e não toma a decisão, mas, sim, guia o analista na tomada de decisão (BEVILACQUA *et al*, 2000).

Esse método foi utilizado por Wang *et al* (2007) para definir a melhor estratégia de manutenção para cada equipamento de uma planta de energia térmica que fornece eletricidade

e calor continuamente na China. As alternativas consideradas foram manutenções corretiva, preventiva baseada no tempo, preventiva baseada na condição e preditiva. Os critérios considerados, nesse caso, obtidos a partir de entrevistas com a equipe de manutenção e gerentes da empresa, foram: segurança, valor agregado, viabilidade e custo, em ordem decrescente de importância. Como método para definição das prioridades locais foi escolhido a comparação *fuzzy* das matrizes de julgamentos, pois era necessário lidar com as incertezas do julgamento dos decisores. O resultado obtido foi a indicação da manutenção preditiva como melhor estratégia de manutenção para as caldeiras sendo corroborada pelo método AHP padrão na ordem de todas as alternativas.

▪ Processos Markovianos

Um processo de Markov consiste num conjunto de objetos e num conjunto de estados tais que :

a) Em qualquer instante cada objeto deve estar num estado (objetos distintos não estão necessariamente em estados diferentes),

b) A probabilidade de que um objeto passe de um estado para outro (que pode ser o mesmo que o inicial) num período de tempo depende apenas desses dois estados.

O número inteiro de períodos de tempo passados desde o início do processo é o estágio do processo. Esse número pode ser finito ou infinito. Se o número de estados é finito ou infinito numerável, o processo Markov é uma cadeia de Markov. Uma cadeia de Markov com um número finito de estados diz-se uma cadeia de Markov finita. Designa-se por p_{ij} como a probabilidade de passar do estado i para o estado j num certo período de tempo.

Para uma cadeia de Markov de n estados (sendo n um número inteiro fixo), a matriz $n \times n$ (quadrada de ordem n) $P = [p_{ij}]$ é a matriz de transição ou estocástica associada ao processo.

Como primeiras propriedades de P temos:

a) A soma de todos os elementos de cada linha da matriz P é 1;

b) Toda a matriz estocástica tem 1 como valor próprio (possivelmente com multiplicidade superior a 1) e nenhum dos seus valores próprios excede 1 em valor absoluto.

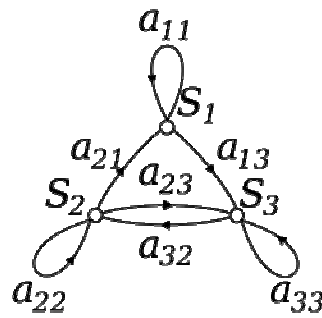


Figura 2.3 Exemplo de hierarquia de um problema de decisão

Seja X um vetor com n coordenadas (neste caso uma linha com n elementos), os valores próprios de P verificam a igualdade: $XP = \lambda X$, sendo λ um valor próprio e, como $XP = \lambda X \Leftrightarrow X(P - \lambda I) = 0$ (sendo I a matriz identidade de ordem n), eles determinam-se resolvendo a equação $|P - \lambda I| = 0$. Resulta, imediatamente, da segunda propriedade de P vista anteriormente que existe um vetor $X \neq 0$, tal que $XP = X$ que se designa por ponto fixo de P .

O método considera que o equipamento é reparável, onde o tempo para reparo é definido de acordo com o tipo de falha. Os equipamentos ou componentes são geralmente modelado com deterioração com estágios discretos, onde a manutenção periódica melhora o estágio para mais longe do estágio de deterioração. Nesses problemas as alternativas disponíveis são: reparo (regressa ao estado 1), inspeção (regressa ao estado 0) ou não tomar nenhuma ação (CHAN *et al*, 2006).

Chan & Asgarpour (2006), aplicaram um método para encontrar a política ótima de manutenção para um componente, considerando falhas aleatórias devido a deterioração. A aplicação de um política com princípios probabilísticos iria na visão dos autores refletir melhor a natureza aleatória do equipamentos em momentos de operação e, conseqüentemente, contribuir para economias no custo com manutenção. O método aplica processos markovianos para calcular as probabilidades de estado do componente e, assim é possível definir o valor ótimo do tempo médio para manutenção preventiva de forma a maximizar a disponibilidade do componente. Problemas de reposição e inspeção de equipamentos que deterioram com o uso é uma aplicação típica dos processos markovianos.

▪ Algoritmos evolucionários

Vários trabalhos já utilizaram algoritmos evolucionários e genéticos para solucionar diferentes problemas de manutenção preventiva. Porém, nem todos aplicaram os algoritmos com situações com múltiplos objetivos.

Quan *et al* (2007), aplicaram os algoritmos evolucionários para realizar a programação das atividades da manutenção preventiva de forma a minimizar os tempos para término da atividade e também minimizar o tempo ocioso da força de trabalho. O problema é mais complexo, pois possui múltiplos objetivos e existe claramente um *trade-off* entre o número de trabalhadores e o tempo de manutenção total. A definição do problema como múltiplo objetivo foi justificada, pois apesar da natureza e número de atividades de manutenção ser conhecida, é muito improvável saber quantos funcionários contratar para a manutenção. Os autores empregaram, para realizar a agregação dos objetivos diferentes, a abordagem do ótimo de Pareto, a qual tem como propósito identificar aquelas soluções preferidas por outras, ao invés da dominância, comumente mais utilizada. Junto ao ótimo de Pareto, foi aplicado também o método ISMAUT (*incompletely specified mutiple attribute utility theory*) ou teoria de utilidade multiatributo especificada incompletamente, que elimina a necessidade de especificar pesos precisamente e ainda foca em um subconjunto do ótimo de Pareto com base nas preferências do decisor. O resultado mostrou que a aplicação do modelo, principalmente em termos de seleção quanto a preferência, apresenta resultados mais satisfatórios com as expectativas dos gerentes.

▪ Algoritmos genéticos

Muitos artigos encontrados na literatura abordam diferentes tipos problemas de manutenção preventiva com o uso de algoritmos genéticos. Lapa *et al* (2006), aplicaram uma metodologia original com base em algoritmos genéticos para determinar a política de manutenção em uma planta de energia nuclear com um modelo com critérios de custo e confiabilidade. A escolha do algoritmo genético foi justificada pela sua capacidade de lidar com muitos parâmetros e interdependências não-lineares simultaneamente.

O algoritmo criado por Lapa *et al* (2006) buscaram a política ótima de manutenção considerando várias características relevantes como: a probabilidade de necessidade de manutenção corretiva, o custo do reparo, tempos de interrupção, custos de manutenção preventiva, impacto da manutenção na confiabilidade do sistema como um todo, a

probabilidade de manutenção imperfeita. Nesse caso os autores consideraram dois estados para o equipamento, em manutenção ou ativo, e escolheram a distribuição Weibull para representar da melhor forma o efeito de envelhecimento dos componentes. Quanto aos critérios de parada, foram especificados o melhor *fitness* e valores mínimo para confiabilidade e máximo para os custos. O resultado encontrado foi satisfatório, sendo alcançada uma política de manutenção com alto nível de confiabilidade e baixo custo.

Já Sortrakul *et al* (2005), desenvolveram um trabalho que buscou tomar uma decisão conciliando tanto a programação da produção como o planejamento da manutenção preventiva, o que geralmente é feito independentemente. O modelo foi aplicado a uma máquina e tinha como objetivo minimizar o tempo total de realização da produção para a máquina através da regra do menor tempo de processamento ponderado, onde os tempos para término das atividades de produção foram tratadas estocasticamente. Já em termos, de manutenção preventiva, o modelo almejava determinar dentro da melhor seqüência de tarefas a ser realizada pela máquina, a necessidade de realizar manutenção preventiva antes de cada tarefa. A manutenção preventiva do modelo, assim como Lapa *et al* (2006), também usaram a distribuição de probabilidade Weibull para representar o tempo de falha da máquina e sua performance era modelada por um processo de renovação de acordo com um processo não homogêneo de Poisson, cujos pontos de renovação indicavam a realização da manutenção preventiva. O procedimento foi bem-sucedido provando que não só a problema integrado de produção e manutenção pode ser tratado conjuntamente, mas também o uso de algoritmos genéticos foi adequado para solucionar o problema integrado.

Volkanovski *et al* (2008), também desenvolveram um estudo aplicando algoritmos genéticos para otimização da programação de manutenção de unidades de geração de energia para minimização de riscos, conseqüentemente, pela minimização de um indicador de confiabilidade de sistemas de energia, o LOLE ou valor de perda da expectativa de carga anual. O modelo aplicado mostrou-se também como em todos os casos apresentados o esperado aumento da confiabilidade do sistema.

▪ Colônia de formigas

Samrout *et al* (2005), utilizaram a técnica de otimização por colônia de formigas para minimizar o custo da manutenção preventiva em sistemas série-paralelo, pela determinação dos

tempos de inspeção, baseado em um outro estudo dos próprios autores, onde previamente foi aplicada a técnica de algoritmos genéticos. O objetivo do estudo era buscar melhorias dos resultados com a aplicação da nova técnica.

No estudo de Samrout *et al* (2005), três algoritmos foram propostos para substituir os algoritmos genéticos do estudo anterior, cuja diferença se dava no número de etapas do algoritmo realizadas. De uma forma geral, o modelo desenvolvido é descrito a seguir.

Cada componente ou formiga iniciava com informações sobre tempos de inspeção possíveis gerados aleatoriamente de acordo com uma distribuição uniforme. As formigas então buscavam a solução indo de em várias listas com possíveis tempos de intervenção e escolhiam os tempos com base em uma regra de transição de estados. Aqueles tempos selecionados, que possuem mais feromônio associado, são colocados numa lista de *taboo* ou memória da formiga para evitar que outras formigas também escolham a mesma alternativa. Em cada iteração a formiga definirá um *tour*, que é o vetor das possíveis inspeções, cuja escolha depende de vários critérios. Todos os *tours* construídos pelas formigas serão avaliados em termos de restrições de viabilidade, custo e disponibilidade. Assim, o critério de parada é definido como um número de iterações N em que a solução não melhora. O resultado obtido foi comparado ao resultado onde se empregaram algoritmos genéticos e conclui-se a necessidade para mais estudos de sistemas semelhantes mais complexos, principalmente em termos de parâmetros mais adequados para esse problema (SAMROUT *et al*, 2005).

▪ PROMETHEE

A aplicação de métodos multicritério em problemas reais é algo relativamente recente, já que o próprio desenvolvimento dos mesmos começou em meados do século XX.

Entre os estudos encontrados, está o de Chaeronsuk *et al* (1997). Os autores buscavam aplicar um método para determinar o intervalo ótimo de manutenção preventiva para componentes em sistemas de produção, nesse caso uma planta de produção de papel. O objetivo era incorporar mais critérios para o problema de manutenção, visto que a abordagem de um problema com único objetivo era pobre e desvantajosa. O modelo então proposto consistia em dois critérios, confiabilidade e custo, para definir o intervalo ótimo de manutenção com a aplicação do método multicritério PROMETHEE. E, como na maioria dos problemas de manutenção, a distribuição Weibull foi escolhida para modelar os tempos de falha.

Entretanto, foram apresentados em trabalhos posteriores de Cavalcante (2007) e Cavalcante & Almeida (2005) a necessidade de reestruturação do modelo de Chaeronsuk *et al* (1997). Segundo os autores, haveria uma região de conflito entre os critérios de custo e confiabilidade que não foram percebidos por Chaeronsuk *et al*. Portanto, Cavalcante & Almeida (2005) apresentaram um modelo semelhante em essência com os mesmos critérios, método multicritério e modelagem da distribuição dos tempos de falha. Porém, adicionalmente a correção feita, os autores também adicionaram ao modelo a possibilidade de ausência ou insuficiência do histórico de falhas dos componentes. Essa ausência dos dados foi tratada então com a aplicação da análise Bayesiana para obter os parâmetros de distribuição Weibull com base em conhecimento de especialista, que se espera ter uma idéia razoável sobre a distribuição de probabilidade subjetiva de variáveis aleatórias ou não.

▪ ELECTRE

O ELECTRE é outro método multicritério da mesma família que o PROMETHEE, mas diferentes em termos de problemática.

O ELECTRE foi aplicado por Helmann *et al* (2007), como auxílio a Gestão da Manutenção, para determinar os equipamentos críticos para o processo produtivo evitando, assim, danos humanos, financeiros e ambientais à empresa, aos colaboradores e à sociedade. O problema foi modelado como um problema de seleção ($P\alpha$), logo foi aplicado o método ELECTRE I, que procura esclarecer a decisão por intermédio da escolha de um subconjunto que seja restrito o máximo possível e que contenha as melhores alternativas. No estudo de caso, o método deveria escolher quais equipamentos seriam críticos entre seis alternativas de equipamentos de uma fabricação de embalagens de polpa, de acordo com os critérios: riscos de segurança ao ser humano e às instalações, riscos ao meio-ambiente e perdas de produção. Após definir e normalizar os pesos para cada critério e calcular os índices de concordância e discordância e suas respectivas matrizes, foi concluído o sucesso da aplicação do método multicritério para problemas de manutenção.

▪ MAUT

Nesse trabalho de Almeida (2005) o autor aplicou como método multicritério na

determinação da periodicidade o MAUT, método da escola americana, cujos objetivos de custo e confiabilidade deveriam ser considerados simultaneamente. A distribuição Weibull foi utilizada no modelo para modelar o comportamento de falhas num sistema que deteriora com o tempo, como foi assumido o modelo. Na aplicação do MAUT (*Multi-attribute utility function*) deve-se encontrar a função utilidade multiatributo, que incorpora as estruturas de preferência do decisor. Primeiramente, as funções utilidades de cada critérios, $U(C)$ e $U(R)$, são determinadas e, só então, a função utilidade multiatributo $U(C,R)$ é encontrada. Esta pode ser aditiva, quando há independência aditiva entre C e R , ou multilinear, quando se encontra condição de independência em utilidade entre C e R , como indicado abaixo.

$$U(C,R) = K_1U(C) + K_2U(R) \quad (\text{Aditiva}) \quad (2.1)$$

$$U(C,R) = K_1U(C) + K_2U(R) + K_3U(C)U(R) \quad (\text{Multilinear}) \quad (2.2)$$

Adicionalmente ao modelo, foi introduzido a noção de incerteza sobre certos parâmetros pela ausência de dados de falha, logo a função multiatributo fica definida como:

$$U(a_i, \theta) = \int_R \int_C U(C,R) \Pr(C,R | a_i, \theta) dC dR \quad (2.3)$$

O trabalho de Almeida (2005) mostrou a importância da utilização de mais de um critério para o problema do planejamento da manutenção preventiva, em especial no setor de serviços, quando muitas vezes são empregados métodos monocritérios. Foi concluído que a introdução do critério confiabilidade no modelo de decisão recomenda um intervalo menor para intervenção preventiva, de modo a atender ao cliente com uma confiabilidade maior, embora compensado com certo aumento nos custos, em quantidade compatível com as preferências do decisor, expressas na função utilidade.

2.3 A manutenção preventiva no setor elétrico

Com a industrialização, a urbanização impulsionou um maior consumo de energia elétrica. Como o Brasil apresenta abundância de bacias hidrográficas, inclusive várias de planalto, o natural foi que a base energética nacional se tornasse hidroelétrica. A Tabela 2.3 apresenta alguns dados do setor elétrico.

Devido a motivos de segurança para a população, condições naturais e instalações físicas, estas usinas muitas vezes não podem estar localizadas próximas às regiões consumidoras da energia gerada. Portanto, é necessária a interligação entre as usinas e os consumidores, chamada de sistema de transmissão, para que a energia elétrica possa ser usada.

O sistema de transmissão foi construído de tal forma que além desta ligação existem também diversas usinas ligadas a outras, e vários centros consumidores ligados a diferentes usinas. Caso a linha de atendimento ao centro de consumo seja interrompida, este será atendido por uma outra sem que haja interrupção no fornecimento.

Tabela 2.3 Quadro geral do setor elétrico brasileiro

Número de consumidores	63,5 milhões
Capacidade Nominal Instalada em 2008 (milhões de kW)	103 milhões de kW
Geração hidroelétrica	73%
Geração Térmica	25%
Energia elétrica disponível em 2008	541 bilhões de kWh
Consumo Nacional de Energia Elétrica em 2008	418 bilhões de kWh

Fonte: Paulino (2009)

As empresas de energia elétrica são divididas em três níveis: a geração, onde certo tipo de energia é transformada em energia elétrica; a transmissão, onde a energia elétrica é transportada em altas tensões; e a distribuição, onde a energia é distribuída ao consumidor final em baixas tensões. Por isso, é necessário que a energia seja transmitida por longas distâncias das usinas até o consumidor, indo de um ponto de elevada tensão para valores mais do que o gerado de forma a obter transmissões mais econômicas e com menores perdas. A energia percorre as linhas de transmissão até outras subestações de empresas distribuidoras que, por sua vez, reduzem o nível de tensão ao necessário pra o consumo, no caso das indústrias a tensão é até 15 kV, enquanto residências, até 600 Volts. (SANTOS, [2005]).

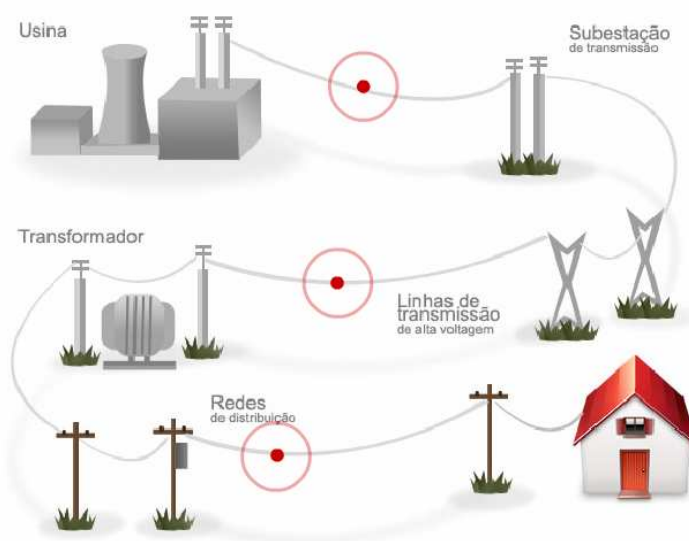


Figura 2. 4 Distribuição de energia elétrica

Fonte: G1 Notícias (2009)

Um das desvantagens na geração de energia deve-se a própria natureza da energia elétrica, que é uma forma de energia que não pode ser armazenada em grandes quantidades. Assim, ela tem que ser produzida no momento em que se deseja utilizá-la. Esta característica, então, limita as possibilidades tecnológicas para seu fornecimento. Para ultrapassar essa limitação, as usinas geradoras acumulam o combustível, e de acordo com a necessidade, utilizam-no. No Brasil o principal é a água, utilizada para geração, que é armazenada nos reservatórios para produzir a energia elétrica, quando for necessário.

Isto justifica a relevância do processo de manutenção da produção para estas organizações. As conseqüências de falhas na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica envolvem não somente custos com reparos e multas, mas também causam transtornos e inviabilizam grande parte das atividades dos seus consumidores, pondo em risco, inclusive, a saúde e vidas humanas.

De acordo com Martins *et al* (2006), o desempenho da continuidade de serviço das concessionárias de energia elétrica, é medido pela ANEEL com base em indicadores específicos. Com base nesses indicadores pode-se traçar uma estratégia mais adequada para a manutenção e também a necessidade de investimento para a atividade. Entretanto, muitas vezes os investimentos e estratégias são definidos de acordo com demandas baseadas em reclamações de clientes, exigências de órgãos reguladores, segurança operacional e de terceiros e também ordens judiciais, provocando em alocação de recursos incorreta.

O ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) é uma entidade de direito privado, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). A produção é feita por um sistema de múltiplos proprietários, dos quais 96,6% da produção é controlada pelo ONS. Os 3,4% restantes encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados, principalmente, na região amazônica (ONS, 2009).

A manutenção preventiva de qualquer equipamento elétrico pode ser considerada como um dos ramos da técnica que mais evolui nos dias de hoje, constituindo-se em uma poderosa ferramenta para garantir o funcionamento contínuo das instalações responsáveis pelo suprimento de energia elétrica.

No caso da ocorrência de um defeito, que poderia ou não ser detectado por uma manutenção preventiva, ocorre um prejuízo financeiro de acordo com o volume de carga

interrompida. Os prejuízos para as unidades fabris podem atingir elevados valores e, dependendo do caso, resultar em grande dano à imagem institucional das empresas. A avaliação dos custos envolvidos em qualquer tipo de interrupção de energia resulta na necessidade de implantação de programas de manutenção preventiva. Nesse caso, o objetivo principal é permitir a avaliação da instalação e dos seus equipamentos utilizando novas técnicas e ferramentas capazes de detectar uma possível falha o quanto antes, principalmente porque em termos de manutenção das linhas de transmissão, pode ser ter um tempo razoável até chegar ao item que falhou (PAULINO, 2009).

De acordo com Paulino (2009), as equipes envolvidas com o comissionamento e manutenção têm sofrido crescente pressão para reduzir custos. Os equipamentos elétricos instalados em subestações podem ser solicitados a operar sob condições adversas, como: altas temperaturas, chuvas, poluição, sobrecarga...Por isso que, apesar da existência de operação e manutenção de qualidade, pode haver falhas, das quais algumas podem indisponibilizar a transmissão e distribuição de energia elétrica. Logo, conclui-se que é imprescindível que o monitoramento regule e aplique procedimentos e ferramentas que forneçam dados das instalações de forma rápida e precisa.

A manutenção das linhas de distribuição é realizada através da identificação dos pontos críticos, programação da manutenção e manutenção da rede de distribuição. Inicialmente, os pontos críticos são identificados através dos históricos de interrupções pelo seu número de falhas, o que ocasiona em uma prioridade de atendimento. Essa prioridade é repassada para as equipes de campo para inspeções, que emite as anomalias encontradas. Assim, a programação das manutenções nas linhas são anualmente determinadas para cada mês com base na experiência adquirida, nos relatórios de inspeção de campo e nos relatórios de interrupção. Dentre as atividades realizadas estão a troca de condutores, troca de isoladores, troca de equipamentos de proteção (chaves, pára-raios, elos fusíveis), troca de postes, substituição de peças corroídas e retensionamento de estais (tirantes de aço que sustentam certos tipos de torres) (MARTINS *et al*, 2006).

Geralmente, o procedimento utilizado por empresas dos ramos de geração, transmissão e distribuição é baseado em documentação técnica, normalmente cedida juntamente com a compra do equipamento pelo fornecedor, a qual recomenda como e quando realizar a manutenção, e também conta com a experiência adquirida pela equipe, que proporciona uma tomada de decisão mais rápida e precisa em situações de inesperadas. Além disso, são

necessárias engenharia de manutenção, para gerenciar as ferramentas, equipes, equipamentos..., informatização e planejamento da manutenção, que envolve todos os fatores citados anteriormente e treinamento, ou aprimoramento técnico dos funcionários, como resposta às contínuas mudanças tecnológicas (FABRON, 2003).

Entretanto, dentre as diversas estratégias de manutenção existentes, a consulta ao fornecedor ou consulta aos *handbooks* cedidos juntamente ao equipamento são ainda retrógradas, quando poderiam ser complementadas por análises mais robustas e completas como a consideração de outros aspectos além dos técnicos, como o impacto para a população durante o tempo sem fornecimento de energia, o custo total da manutenção associando reparos e substituições...

Segundo o ONS (2009), a manutenção de linhas de transmissão é regulamentada pelo próprio ONS de acordo com os níveis e padrões de qualidade e confiabilidade requeridos pelos consumidores e aprovados pela ANEEL. Já os agentes de geração e os agentes de transmissão, por serem os proprietários dos equipamentos e instalações integrantes do sistema físico, são os responsáveis pela manutenção dos mesmos.

Neste contexto, o ONS acompanha a manutenção pelas seguintes ações (ONS, 2009):

- a) Analisar os dados obtidos em ensaio operacional conduzido pelo ONS, para a certificação da capacidade de geração de unidade geradora declarada pelo Agente de Geração;
- b) Empenhar para que haja a liberação de equipamentos e instalações da Rede de Operação para a execução das atividades mínimas de manutenção previstas pelos Agentes de Geração e Agentes de Transmissão;
- c) Verificar, através do acompanhamento dos Programas Mensais e do Plano Anual de Manutenção da Rede de Operação, se as atividades mínimas de manutenção estão sendo executadas e analisar os indicadores de realização e cancelamento das programações;
- d) Acompanhar o desempenho da manutenção da Rede de Operação através da análise dos indicadores de desempenho de linhas de transmissão, de equipamentos de subestações e usinas despachadas pelo ONS;
- e) Atuar nos casos em que os indicadores de desempenho estejam situados dentro da faixa de alerta definida pela ANEEL, solicitando ao Agente um Plano de Ação para a recuperação desses indicadores e acompanhando os resultados dele decorrentes.

3. Modelo de Decisão

Uma das ferramentas para realizar o planejamento da manutenção preventiva é a criação de um modelo de decisão multicritério como mostrado na seção anterior. Nas seções seguintes será apresentado o método escolhido, o PROMETHEE, para aplicação no modelo do planejamento da manutenção preventiva, o qual auxilia no processo da tomada de decisão.

3.1 Método de Decisão

O PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) é um método multicritério, cujo objetivo é construir uma relação de sobreclassificação para posterior exploração das relações de valores de sobreclassificação (ALMEIDA, 2002)

Assim como em métodos da Escola Americana, o PROMETHEE é aplicado para problemas multicritério do tipo:

$$\text{Max} \{ f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x) \mid x \in A \}, \quad (3.1)$$

onde A representa um conjunto de alternativas de decisão e $f_i(x)$, para $i = 1, 2, \dots, k$, representa um conjunto de k critérios para avaliação de cada alternativa de A (BRANS *et al*, 1985).

A ordenação entre as alternativas do conjunto A pode ser realizada com a ajuda dos conceitos de dominância e eficiência. Uma alternativa domina a outra, a domina b , se $f_j(a) \geq f_j(b)$, para $j = 1, 2, \dots, n$ ($f_j(a)$ representa a avaliação da alternativa a , de acordo com o critério j). Uma alternativa será, então, eficiente quando não é dominada por nenhuma outra alternativa de A . Pela comparação entre alternativas, o decisor poderá expressar preferência P , quando prefere uma ação à outra; indiferença I , quando não há preferência entre as duas; e incomparabilidade J , quando o decisor tem dificuldade em compará-las, não expressando nem preferência nem indiferença (ALMEIDA *et al*, 2002).

Com base no comportamento de preferência do decisor, será determinada uma função $P_j(a, b)$, a qual assume valores entre 0 e 1, onde a e b são alternativas. Para determinar essa função, são feitas comparações entre alternativas usando funções preferência, representada por (BRANS *et al*, 1985):

$$P(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(a) \leq f(b), \\ p[f(a), f(b)] & \text{se } f(a) > f(b), \end{cases} \quad (3.2)$$

onde: $p_j(a,b)=p_j[d_j(a,b)]$, sendo $d_j(a,b)= f_j(a)- f_j(b)$, que proporciona a diferença da medida do critério j .

Para melhor determinar a intensidade da preferência do decisor, o PROMETHEE proporciona seis critérios gerais para serem escolhidos em cada função preferência, os quais estão listados na tabela abaixo (ALMEIDA *et al*, 2002):

1 – Critério usual não há parâmetro a ser definido	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
2 – Quase-critério define-se o parâmetro q (limite de indiferença)	$g_j(a) - g_j(b) > q$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
3 – Limite de preferência define-se o parâmetro p (limite de preferência)	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p}$ $F(a,b) = 0$
4 – Pseudocritério definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 1/2$ $F(a,b) = 0$
5 – Área de indiferença definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = (g_j(a) - g_j(b) - q)/(p - q)$ $F(a,b) = 0$
6 – Critério Gaussiano O desvio-padrão deve ser fixado	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	A preferência aumenta segundo uma distribuição normal $F(a,b) = 0$

Figura 3.1 Tabela das funções preferência (adaptado de: <http://youmustbfromaway.blogspot.com/>)

Fonte: Almeida *et al* (2002)

Dependendo da função preferência escolhida pelo decisor, será necessária a definição de certos parâmetros como q , p e s . Na tabela apresentada acima, q representa um limite de indiferença, abaixo do qual há uma indiferença e p representa um limite de preferência, o qual indica que uma pequena variação é suficiente para gerar preferência. Já o parâmetro s , é aplicado no critério Gaussiano e o mesmo define um ponto de inflexão da função preferência. Quando aplicado o critério Gaussiano, é recomendado definir primeiro os parâmetros q e p , para escolher o valor de s do intervalo definido por q e p (BRANS, 1985).

Ainda de acordo com Brans (1985), o decisor deverá ainda atribuir pesos w_j aos diversos critérios, os quais aumentam com a importância dos mesmos. Os pesos devem

também estar normalizados de forma que o seu somatório seja igual a um.

Para definir a função preferência $P_j(a, b) = d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b)$, a qual assume valores entre 0 e 1, será avaliado como a preferência do decisor muda com a diferença entre as performances das alternativas para critério j , como indicado abaixo (ALMEIDA *et al*, 2002):

$$\begin{aligned} P_j(a, b) &= 0 && \text{Preferência por } a \text{ ou } b \text{ é indiferente} \\ P_j(a, b) &\approx 0 && \text{Fracca Preferência por } a \text{ em relação a } b \\ P_j(a, b) &\approx 1 && \text{Forte preferência por } a \text{ em relação a } b \\ P_j(a, b) &= 1 && \text{Preferência estrita por } a \text{ em relação a } b \end{aligned} \quad (3.3)$$

Uma vez determinadas as funções preferências e os pesos de cada critério, o ranking agregado ou preferência de duas alternativas será determinado somando os valores dos pesos das funções de preferência do conjunto completo de critérios. Logo, esse índice de preferência ou ranking agregado mede a preferência de a sobre b para todos os critérios. O grau de sobreclassificação é representado por (BRANS *et al*, 1985):

$$\begin{aligned} \pi(a, b) &= \frac{1}{W} \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b) \\ \text{onde } W &= \sum_{j=1}^n w_j \end{aligned} \quad (3.4)$$

A sobreclassificação entre todas as alternativas do conjunto A deverá ser feita par a par para todas as alternativas. E apenas com a sobreclassificação calculada é que os fluxos de entrada e saída poderão ser obtidos.

Fluxo de saída:

$$\Phi^+(a) = \sum_{b \in A} \frac{\pi(a, b)}{n-1} \quad \text{dominante (quanto maior melhor será a alternativa } a) \quad (3.5)$$

Fluxo de entrada:

$$\Phi^-(a) = \sum_{b \in A} \frac{\pi(b, a)}{n-1} \quad \text{dominado (quanto menor melhor será a alternativa } a) \quad (3.6)$$

A partir dos valores dos fluxos é que o PROMETHEE poderá apresentar os seus

resultados para apoio a tomada de decisão. Com base somente nos valores dos fluxos de entrada e saída, poderá obter-se o PROMETHEE I, que é um dos métodos da família PROMETHEE. O PROMETHEE I proporcionará como resultado uma escolha, sendo apenas uma sobreclassificação parcial, que pode ou não fornecer conclusões.

A diferença entre o fluxo de saída e entrada fornecerá o fluxo líquido, o que possibilitará o cálculo do PROMETHEE II. Este método estabelece uma ordem completa entre as alternativas de maneira decrescente, portanto proporciona uma ordem. Quanto maior o fluxo líquido, melhor será a alternativa.

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (3.7)$$

Após obter o fluxo líquido, será possível aplicar o método PROMETHEE II, cujo resultado é um pré-ordem total, como segue (BRANS, 1985):

$$\begin{aligned} aPb \text{ (a sobreclassifica b)} & \text{ ss } \Phi(a) > \Phi(b), \\ aIb \text{ (a é indiferente a b)} & \text{ ss } \Phi(a) = \Phi(b). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Existem também outros métodos da família PROMETHEE. O PROMETHEE III e IV são aplicados para tratamentos de problemas de decisão mais sofisticados, em particular com um componente estocástico. O PROMETHEE V, o qual parte do PROMETHEE II, adiciona novas restrições adotando uma filosofia de otimização inteira. E o PROMETHEE VI é usado quando o decisor não está apto a decidir e atribuir pesos aos critérios, sendo atribuído possíveis valores em substituição a um peso específico (ALMEIDA *et al*, 2002).

Para o problema a ser apresentado a seguir, o uso do método não-compensatório foi indicado como a solução mais adequada. Portanto, favorece as alternativas com a melhor performance média. O método PROMETHEE foi escolhido devido a suas várias vantagens, como a facilidade e rapidez de compreensão do método em si e seus conceitos e parâmetros envolvidos, pois eles possuem significados mais importantes para os decisores se relacionarem, como valores econômicos e físicos (CAVALCANTE *et al*, 2005).

3.2 Descrição do Modelo Utilizado

Na construção do modelo para o problema descrito, será utilizada uma política de substituição por idade utilizando dois critérios como objetivos, o custo total da manutenção e a confiabilidade.

As hipóteses para a estruturação do modelo são:

- A existência de um conjunto de alternativas discreto, que consiste em um conjunto de ações representadas por datas ou intervalos para manutenção;
- A suscetibilidade do equipamento ao desgaste;
- A restauração do sistema para um estado tão bom quanto novo pela substituição;
- A modelagem dos tempos de falha por uma distribuição de probabilidade;

O foco de interesse da manutenção são os conjuntos de partes que formam sistemas reparáveis, o qual pode ser plenamente restaurado após uma perda de desempenho em uma das suas funções se forem feitas trocas parciais ou reparos em partes com defeito. Logo, para o modelo utilizado a intervenção no sistema poderia restaurá-lo para o seu desempenho normal antes da falha ter ocorrido (MARTINS *et al*, 2006).

Foi assumida uma distribuição Weibull para os equipamentos que deterioram com o tempo de forma a modelar o comportamento da função intensidade de falhas. Além de muito utilizada, a distribuição Weibull também é flexível e, logo, é provada como boa adequação para muitos casos. Nesse modelo, a distribuição utiliza dois parâmetros: β , η , os quais são parâmetros de forma e escala, respectivamente. Ao adotar esse tipo de distribuição de probabilidade, a função de densidade de probabilidade, $f(t)$, e função de confiabilidade, $R(t)$, assumirão a forma indicada abaixo (FIGUEIREDO *et al*, 2008):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.9)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.10)$$

Como o modelo assume a suscetibilidade do equipamento ao desgaste, deve-se utilizar um valor para o parâmetro de forma, β , que seja compatível com a curva da banheira apresentada abaixo. A curva da banheira é um gráfico que mostra o comportamento da ocorrência de falhas ao longo da vida do produto. Seu início é marcado pela mortalidade infantil ou alta taxa de falhas ($\beta < 1$), cuja ocorrência decresce com o tempo mantendo um patamar onde a taxa de falhas é constante ($\beta = 1$). Após esse patamar, a taxa de falha volta a aumentar com o tempo de uso do item, o que indica desgaste ($\beta > 1$). Portanto, para o modelo aplicado o parâmetro deverá ser maior que 1.

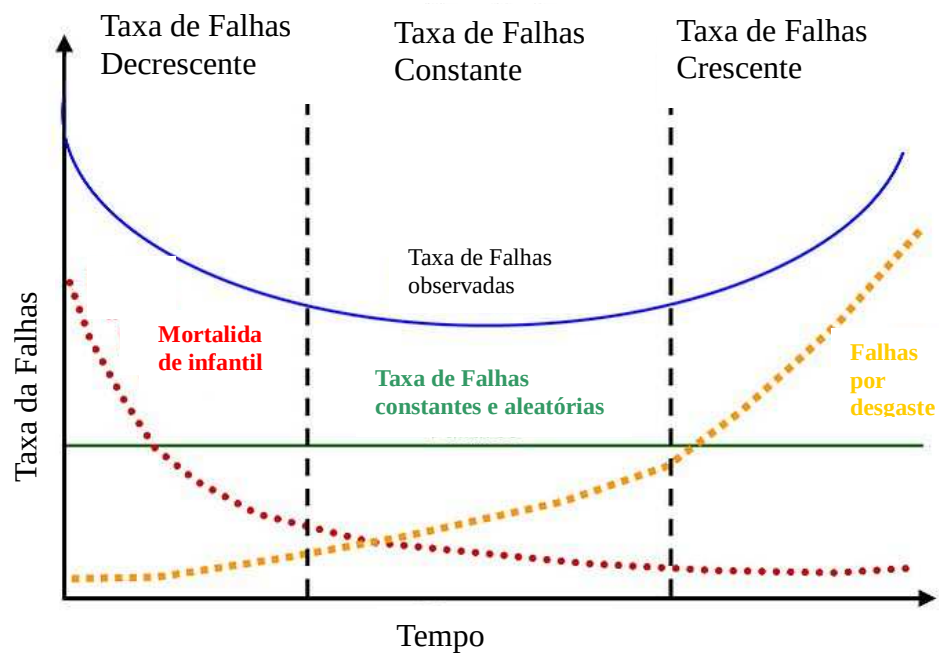


Figura 3.2 Curva da Banheira

Além disso, foi considerado para o problema uma política de substituição por idade, pois as políticas de substituição garantem custos menores nas substituições realizadas. Nessa política de substituição, os itens são substituídos ou pela ocorrência de falhas ou de acordo com certo intervalo fixo, o que acontecer primeiro. Entretanto, esse tipo de política só é eficiente quando os custos antes da falha são menores que após a falha, pois os custos adicionais com manutenção preventiva não compensariam os custos adicionais com o tempo parado. Logo, o objetivo para um problema que adota uma política de manutenção por substituição por idade é determinar a periodicidade ou intervalo t , no qual seriam realizadas as atividades de manutenção preventiva com menor custo por unidade de tempo (CAVALCANTE *et al*, 2005).

Uma vez que o modelo foi especificado quanto a suas particularidades, deve-se seguir para a etapa seguinte, que é o levantamento do conjunto de alternativas, que é dado de forma direta. Após a definição das alternativas, será necessário avaliá-las de acordo com os critérios definidos para o modelo proposto: custo total da manutenção e confiabilidade.

O custo esperado por unidade de tempo $Cm(t)$, é representado abaixo, e envolve os custos ca e cb , que indicam o custo de substituição após a falha e o custo de substituição antes da falha. Foi assumido que o intervalo entre substituições é curto o suficiente para ignorar o

valor monetário no tempo. Para expressar corretamente o custo esperado por unidade de tempo, $Cm(t)$, é necessário definir os parâmetro de forma e escala, respectivamente, β e η .

$$Cm(t) = \frac{ca(1 - R(t)) + cbR(t)}{\int_0^t xf(x)dx + tR(t)} \quad (3.11)$$

onde t = intervalo entre manutenções preventivas.

Pode ser observado, pelo gráfico abaixo, a relação entre o custo e o os valores de t , onde quanto maior o t , menor o custo associado:

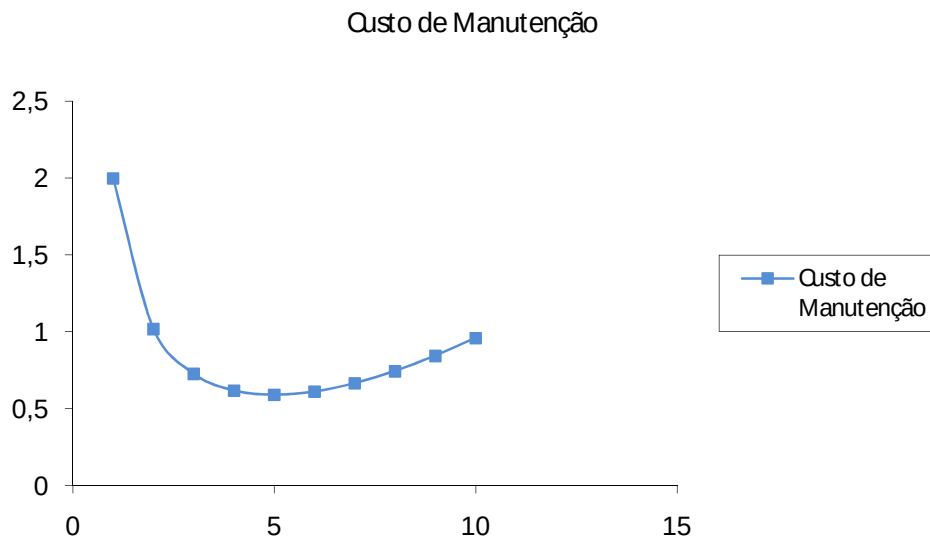


Figura 3.3 Gráfico de relação entre custo e tp

Já a confiabilidade do modelo, representada abaixo, possui comportamento de uma função monotonicamente decrescente, pois quando este critério tende a 1, o t tende a zero, e a mesma decresce na medida que o tempo, t , aumenta. Ou seja, quanto menor o tempo entre as manutenções preventivas, mais confiável será o sistema. O gráfico da curva de confiabilidade está indicado na Figura xxx.

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]} \quad (3.10)$$

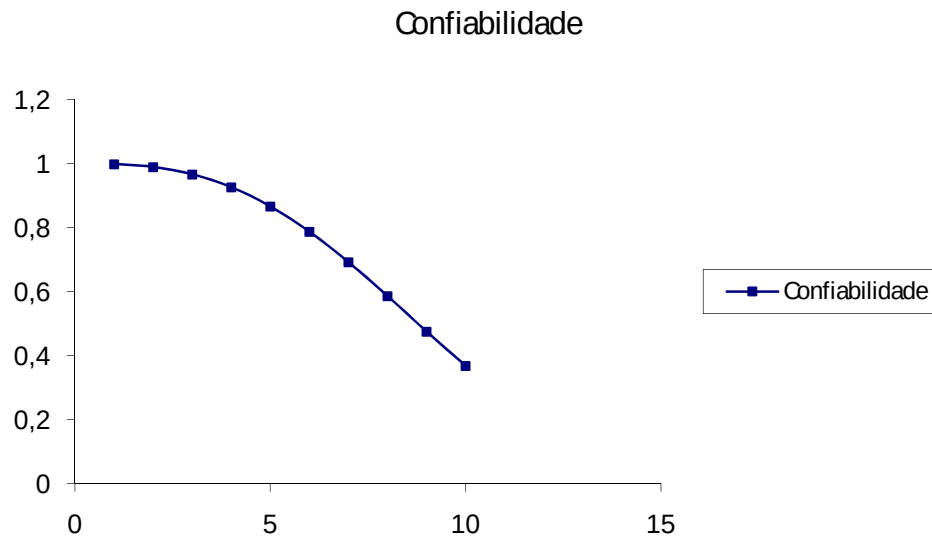


Figura 3.4 Gráfico da confiabilidade e t_p

Entretanto, esses critérios são conflitantes, pois quanto maior a confiabilidade desejada para o sistema, o que significa menor t , maior será o custo. Porém, nesse problema multicritério, o objetivo é maximizar a confiabilidade e minimizar os custos simultaneamente. Portanto, uma região de conflito poderá ser observada, ao analisar-se o comportamento de ambas os gráficos plotados nas figuras 3.3 e 3.4. A região de conflito é apresentada na figura 3.5:

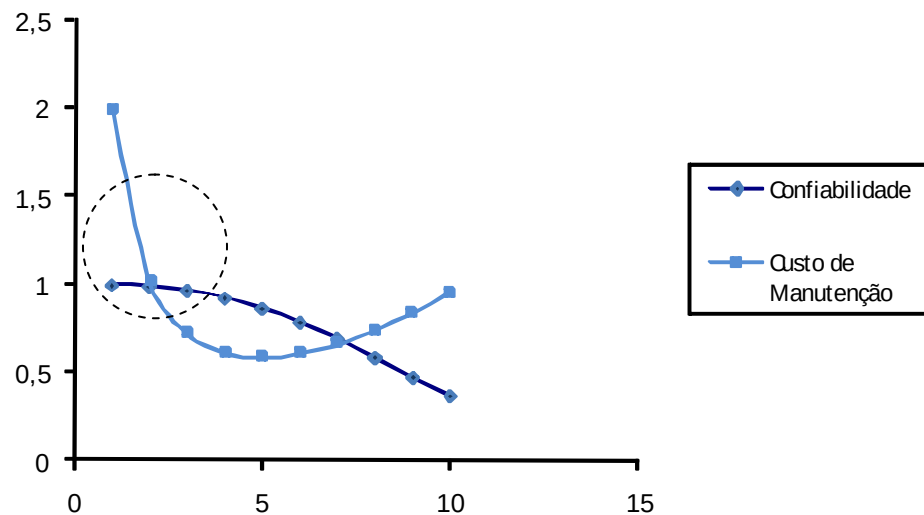


Figura 3.5 Conflito entre critérios

A figura acima mostra na região circulada as piores soluções para o problema, onde se pode obter máxima confiabilidade e, entretanto, as piores situações de custo. Outro aspecto importante é uma tendência de dominação das alternativas que se encontram fora da região conflitante.

Em certas situações, o problema poderá apresentar incerteza em relação ao parâmetros que modelam o comportamento de falhas do problema. Nesses casos pode ser aplicada a análise Bayesiana, a qual é usada quando os parâmetros de distribuição do modelo não puderam ser obtidos devido à ausência ou insuficiência de dados (CAVALCANTE *et al*, 2007).

Segundo Moura *et al* (2007), a utilização da metodologia Bayesiana em confiabilidade permitirá que o analista use informações de fontes alternativas de dados de falha, tais como handbooks e opiniões de especialistas na formulação de uma função de probabilidade para algum parâmetro desconhecido.

É muito importante, entretanto, estar atento às diferenças de informações que podem ser obtidas através do questionamento de especialistas, já que eles podem ser de negócios, departamentos e terem *backgrounds* diferentes, logo a sensibilidade para problemas mais específicos não será exatamente igual. Assim, modelos que baseiam-se em conhecimentos *a priori* de especialistas, assumem que os especialistas têm uma noção razoável sobre a densidade de probabilidade de uma variável θ aleatória com uma distribuição *a priori* $\Pi(\theta)$ (PROCACCIA *et al*, 1997).

Quando há incertezas na definição dos parâmetros, o que não é o caso do modelo acima, a distribuição *a priori* desses parâmetros deverá ser considerada nas funções objetivos de cada critério.

4. Aplicação Numérica

Nesta seção, será apresentada uma aplicação numérica do método de apoio à decisão, PROMETHEE II, para determinar o intervalo ótimo para a manutenção preventiva baseado em um modelo que considera custo e confiabilidade como objetivos.

4.1 Aplicação e Resultados

Para o modelo descrito na seção 03, foram definidos dois critérios, para os quais foram atribuídos pesos, em termos de importância, e definidos o comportamento de preferência do decisor. Essa função preferência, que traz em uma função o comportamento do decisor, deve estabelecer limites de preferência e/ou limites de indiferença.

Os dados da aplicação numérica são reais e foram extraídos da literatura de Figueiredo *et al* (2008) e Costa (2003). A partir de Figueiredo *et al* (2008), os parâmetros dos custos depois e antes da substituição, C_a e C_b respectivamente foram adotados para o modelo e estão representados abaixo:

Tabela 4.1 Parâmetros da função custo

C_a	10
C_b	2

Para os parâmetros da distribuição de probabilidade de falhas, foi observado em Costa (2003) que para linhas de transmissão de 500kV de tensão, como as de Itaipu, a taxa de falhas é de 1 a cada 100km por ano, logo sendo a cada 8760 horas. Além disso, sem informações sobre a distribuição de probabilidade, foi assumida uma distribuição Weibull com diferentes valores do parâmetro de forma, β , onde o cenário padrão foi adotado 3 e na análise de cenários outros valores foram utilizados para contemplar outras situações.

Tabela 4.2 Parâmetros da distribuição de probabilidade de falhas

β	3,0
η	8760

Na aplicação numérica, foram consideradas vinte alternativas para a realização da manutenção preventiva, que representam um período de 20 meses, entre os quais a cada mês é considerada a possibilidade da intervenção. Essas alternativas foram, então, avaliadas, em termos de desempenho, de acordo com os dois critérios considerados no modelo: custo total de

manutenção (C_m) e confiabilidade (R). O resultado da performance de cada alternativa para os critério custo e confiabilidade estão indicados na tabela 4.3:

Tabela 4.3 Matriz de avaliação

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99944491	0,002784332
A2	2,0	0,99556789	0,001415081
A3	3,0	0,98512018	0,000984711
A4	4,0	0,96508826	0,000798443
A5	5,0	0,93294810	0,000716754
A6	6,0	0,88697981	0,000692326
A7	7,0	0,82658770	0,00070385
A8	8,0	0,75255155	0,000739454
A9	9,0	0,66712751	0,000791212
A10	10,0	0,57393125	0,000853006
A11	11,0	0,47757600	0,000919667
A12	12,0	0,38309798	0,000986694
A13	13,0	0,29526716	0,00105025
A14	14,0	0,21792723	0,001107307
A15	15,0	0,15351545	0,001155813
A16	16,0	0,10287031	0,001194797
A17	17,0	0,06535496	0,001224337
A18	18,0	0,03923474	0,001245374
A19	19,0	0,02218298	0,001259409
A20	20,0	0,01177278	0,001268153

Adicionalmente, em Figueiredo *et al* (2008), a função preferência definida para este tipo de problema foi a do tipo V, logo são necessários tanto limites de preferência (p) como indiferença (q). Neste artigo ainda foram definidos os pesos para cada critério. Tais parâmetros estão apresentados na tabela 4.4:

Tabela 4.4 Função Preferência para cada critério e seus pesos

Característica	R	Cm
Max/Min	Max	Min
Peso	0,55	0,45
Função Preferência	Tipo V	Tipo I
* Limite de Indiferença	0,02	-
*Limite de Preferência	0,05	-

Uma vez que todos os parâmetros foram definidos e as matrizes de avaliação foram obtidas, o processo de agregação é realizado. Nesse processo as alternativas são avaliadas em termos de todos os critérios e preferências do decisor. O método irá definir assim um índice de preferência multicritério e, em seguida, os fluxos de entrada (ϕ^+), saída (ϕ^-) e líquido (ϕ). Os três fluxos estão listados na tabela 4.5 abaixo para cada alternativa.

Tabela 4.5 Fluxo das alternativas

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A1	0,47701	0,45	0,02701
A2	0,49695	0,42632	0,07064
A3	0,72372	0,18947	0,53424
A4	0,7775	0,14242	0,63509
A5	0,83295	0,14592	0,68703
A6	0,85526	0,14085	0,71442
A7	0,80263	0,19737	0,60526
A8	0,72632	0,27368	0,45263
A9	0,67368	0,32632	0,34737
A10	0,59737	0,40263	0,19474
A11	0,54474	0,45526	0,08947
A12	0,46842	0,53158	-0,0632
A13	0,41579	0,58421	-0,1684
A14	0,36316	0,63684	-0,2737
A15	0,31053	0,68947	-0,3789
A16	0,24585	0,74211	-0,4963
A17	0,17563	0,78269	-0,6071
A18	0,10194	0,82433	-0,7224
A19	0,07105	0,86446	-0,7934
A20	0,04737	0,90194	-0,8546

Com base nesses resultados, pode-se obter uma ordem de preferência para as alternativas, como pode ser visualizado na tabela 4.6.

Tabela 4.6 Ranking das Alternativas

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A6	0,85526	0,14085	0,71442
A5	0,83295	0,14592	0,68703
A4	0,7775	0,14242	0,63509
A7	0,80263	0,19737	0,60526
A3	0,72372	0,18947	0,53424
A8	0,72632	0,27368	0,45263
A9	0,67368	0,32632	0,34737
A10	0,59737	0,40263	0,19474
A11	0,54474	0,45526	0,08947
A2	0,49695	0,42632	0,07064
A1	0,47701	0,45	0,02701
A12	0,46842	0,53158	-0,0632
A13	0,41579	0,58421	-0,1684
A14	0,36316	0,63684	-0,2737
A15	0,31053	0,68947	-0,3789
A16	0,24585	0,74211	-0,4963
A17	0,17563	0,78269	-0,6071
A18	0,10194	0,82433	-0,7224
A19	0,07105	0,86446	-0,7934
A20	0,04737	0,90194	-0,8546

Portanto o ranking ou pré-ordem completa é:

$A6 > A5 > A4 > A7 > A3 > A8 > A9 > A10 > A11 > A2 > A1 > A12 > A13 > A14 > A15 > A16 > A17 > A18 > A19 > A20$

Logo, a melhor alternativa é a A6, pois teve o maior valor do fluxo líquido, o que indica que a substituição do item ou equipamento da análise deve ser feita a cada 6 meses para um bom nível de confiabilidade com menor custo.

Para verificar a robustez de dos parâmetros deste cenário padrão, foi feita uma análise de sensibilidade, a partir da qual é possível obter resultados mais interpretativos que enfatizam a compreensão do decisor sobre o problema de manutenção. Foram verificados que variações até 15% no valor de β não resultaram em mudanças das duas primeira alternativas do ranking. Já para variações em η , até 5% foi observado que as quatro primeiro alternativas do ranking mantiveram-se entre as cinco primeiras do ranking com variação de 5% permutando apenas sua ordem.

4.2 Discussão dos Resultados

Para a avaliação dos resultados, foram realizadas análises para diferentes situações com mudanças significativas nos valores dos parâmetros da distribuição Weibull e também dos pesos para os critérios, de forma a apresentar diferentes perfis de decisor. Ao final de cada cenário um gráfico apresenta a comparação do fluxo do cenário em questão com o padrão.

▪ Cenário 01:

Os pesos dos critérios foi variado como explicitado na Tabela 4.7, o que indica um decisor com maior preocupação ao custo de manutenção total do que na confiabilidade do sistema, ou seja, no fornecimento mais seguro de energia para a população.

Tabela 4.7 Variação de pesos para o cenário 01

Característica	<i>R</i>	<i>Cm</i>
Max/Min	Max	Min
Peso	0,3	0,7

Dessa forma, o ranking das alternativas a partir do fluxo líquido é apresentado pelas tabelas 4.8, respectivamente.

Tabela 4.8 Ranking das alternativas para o cenário 01

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A6	0,92105	0,07683	0,84423
A7	0,86842	0,13158	0,73684
A5	0,86104	0,12744	0,73359
A4	0,75902	0,1973	0,56172
A8	0,77895	0,22105	0,55789
A9	0,72632	0,27368	0,45263
A3	0,65791	0,29474	0,36317
A10	0,63684	0,36316	0,27368
A11	0,58421	0,41579	0,16842
A12	0,49474	0,50526	-0,0105
A13	0,44211	0,55789	-0,1158
A14	0,38947	0,61053	-0,2211
A15	0,33684	0,66316	-0,3263
A2	0,29499	0,66316	-0,3682
A1	0,26019	0,7	-0,4398
A16	0,27764	0,71579	-0,4381
A17	0,21542	0,76185	-0,5464
A18	0,1513	0,80848	-0,6572
A19	0,11053	0,8543	-0,7438
A20	0,07368	0,89866	-0,825

A partir do ranking do cenário 01 pode-se observar a melhor alternativa continua sendo a A6, ou seja, 6 meses de intervalo de manutenção preventiva. As alternativas conseguintes como a A7, A5 e A4 ainda mantiveram-se entre as quatro primeiras, apenas com ordens diferentes.

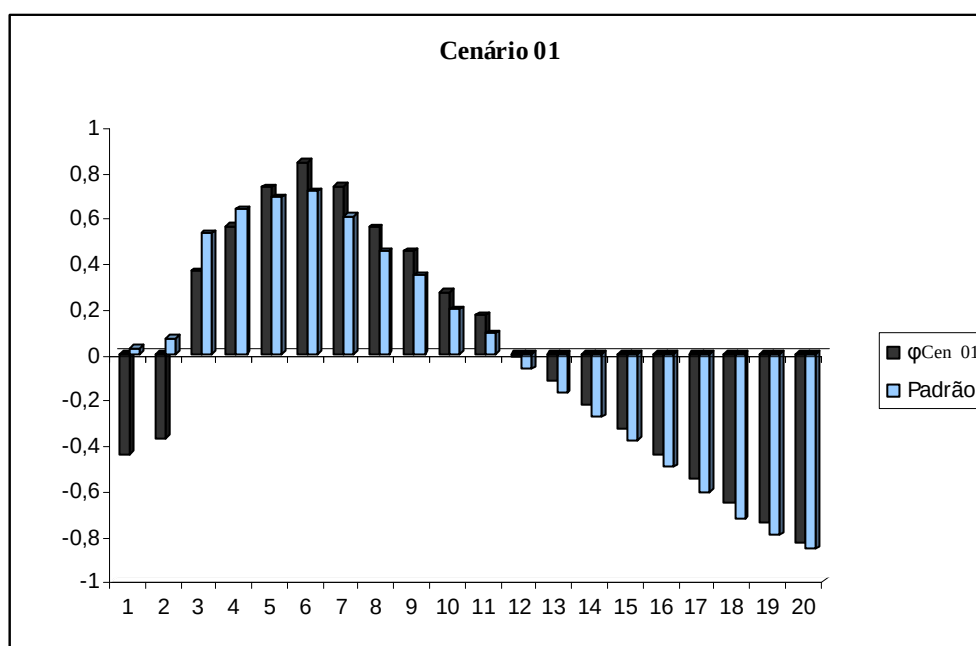


Figura 4.1 Comparação dos fluxos do cenário 01 com o padrão

▪ Cenário 02:

Na Tabela 4.10, tem-se a variação de pesos para os critérios para um decisor semelhante ao do cenário 01, com maior preocupação relativa à confiabilidade do que ao custo de manutenção total.

Tabela 4.9 Variação de pesos para o cenário 02

Característica	R	Cm
Max/Min	Max	Min
Peso	0,4	0,6

Tabela 4.10 Ranking das alternativas para o cenário 02

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A6	0,89474	0,10243	0,7923
A5	0,8498	0,13484	0,71497
A7	0,84211	0,15789	0,68421
A4	0,76641	0,17535	0,59107
A8	0,75789	0,24211	0,51579
A3	0,68423	0,25263	0,4316
A9	0,70526	0,29474	0,41053
A10	0,62105	0,37895	0,24211
A11	0,56842	0,43158	0,13684
A12	0,48421	0,51579	-0,0316
A13	0,43158	0,56842	-0,1368
A2	0,37578	0,56842	-0,1926
A1	0,34692	0,6	-0,2531
A14	0,37895	0,62105	-0,2421
A15	0,32632	0,67368	-0,3474
A16	0,26492	0,72632	-0,4614
A17	0,1995	0,77019	-0,5707
A18	0,13155	0,81482	-0,6833
A19	0,09474	0,85837	-0,7636
A20	0,06316	0,89997	-0,8368

Como seria possível esperar, em relação ao cenário 01, o cenário 02 teve também como melhor alternativa a alternativa de 6 meses de intervenção. E, ainda, manteve as quatro primeiras alternativas iguais exceto pela ordem no ranking.

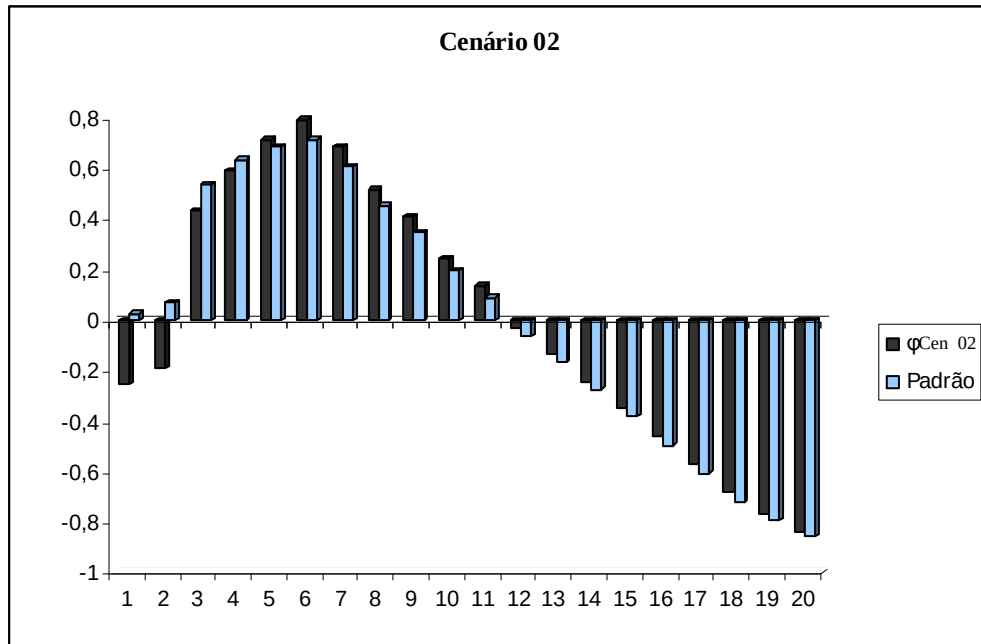


Figura 4.2 Comparação dos fluxos do cenário 02 com o padrão

▪ Cenário 03:

Na Tabela 4.11, tem-se a variação de pesos para os critérios para um decisor mais preocupado com confiabilidade do sistema do que ao custo de manutenção total, logo, um decisor com uma política mais rígida de manutenção para garantir o funcionamento do sistema mesmo pagando um preço maior.

Tabela 4.11 Variação de pesos para o cenário 03

Característica	<i>R</i>	<i>Cm</i>
Max/Min	Max	Min
Peso	0,4	0,6

Como observado na Tabela 4.12, a melhor alternativa muda para a A4, devido a uma maior necessidade de confiabilidade para o sistema. Três das quatro primeiras alternativas, A4, A6 e A5, ainda continuam nos primeiros lugares com permutação de suas ordens.

Tabela 4.12 Ranking das alternativas para o cenário 03

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A4	0,79599	0,08753	0,70845
A3	0,78952	0,08421	0,70531
A5	0,80487	0,16441	0,64046
A6	0,78947	0,20487	0,58461
A2	0,69892	0,18947	0,50945
A1	0,69383	0,2	0,49383
A7	0,73684	0,26316	0,47368
A8	0,67368	0,32632	0,34737
A9	0,62105	0,37895	0,24211
A10	0,55789	0,44211	0,11579
A11	0,50526	0,49474	0,01053
A12	0,44211	0,55789	-0,1158
A13	0,38947	0,61053	-0,2211
A14	0,33684	0,66316	-0,3263
A15	0,28421	0,71579	-0,4316
A16	0,21406	0,76842	-0,5544
A17	0,13585	0,80353	-0,6677
A18	0,05258	0,84017	-0,7876
A19	0,03158	0,87463	-0,843
A20	0,02105	0,90521	-0,8842

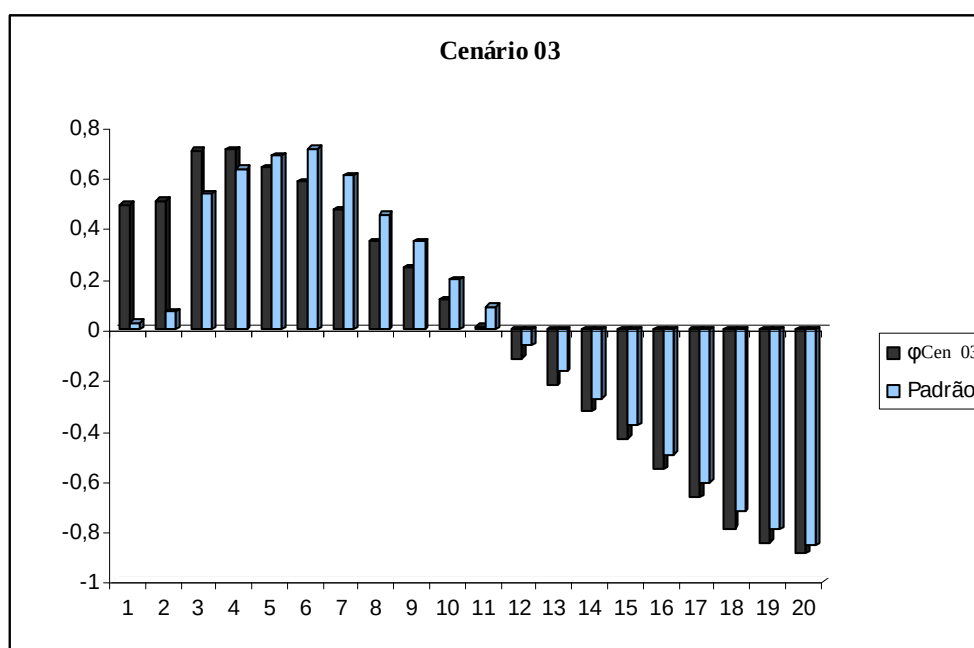


Figura 4.3 Comparação dos fluxos do cenário 03 com o padrão

▪ Cenário 04:

Nos casos seguintes, do cenário 04 a 07, a variação ocorrerá para o parâmetro de forma, β . Para este cenário, o β terá valor 1,2, o que significa em uma curva com comportamento de

falha mais ameno. As Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 mostram respectivamente a variação dos parâmetros, matriz de avaliação e ranking das alternativas para este cenário.

Tabela 4.13 Variação do parâmetro Beta para o cenário 04

β	1,2
η	8760

Tabela 4.14 Matriz das alternativas para o cenário 04

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,95135804	0,0033939
A2	2,0	0,89175912	0,002095352
A3	3,0	0,82997943	0,001690518
A4	4,0	0,76859740	0,001502551
A5	5,0	0,70892914	0,001398584
A6	6,0	0,65172674	0,001335167
A7	7,0	0,59742656	0,001294049
A8	8,0	0,54626711	0,001266296
A9	9,0	0,49835520	0,001247052
A10	10,0	0,45370694	0,001233474
A11	11,0	0,41227511	0,001223796
A12	12,0	0,37396830	0,001216873
A13	13,0	0,33866470	0,001211934
A14	14,0	0,30622229	0,001208445
A15	15,0	0,27648651	0,001206027
A16	16,0	0,24929596	0,001204405
A17	17,0	0,22448673	0,001203378
A18	18,0	0,20189571	0,001202796
A19	19,0	0,18136295	0,001202544
A20	20,0	0,16273351	0,001202537

Observa-se pela Tabela 4.15 que as alternativas estão na ordenadas em termos cronológicos, sendo a 1 mês o ideal para a intervenção da manutenção, ao contrário de todos os cenários já apresentados.

Tabela 4.15 Ranking das alternativas para o cenário 04

Alternativas	φ^+	φ^-	φ
A1	0,55	0,45	0,1
A2	0,54474	0,45526	0,08947
A3	0,53947	0,46053	0,07895
A4	0,53421	0,46579	0,06842
A5	0,52895	0,47105	0,05789
A6	0,52368	0,47632	0,04737
A7	0,51842	0,48158	0,03684
A8	0,51114	0,48684	0,0243
A9	0,50273	0,49009	0,01264
A10	0,49436	0,4922	0,00216
A11	0,48609	0,49436	-0,0083
A12	0,47792	0,49661	-0,0187
A13	0,4699	0,49898	-0,0291
A14	0,46203	0,50148	-0,0395
A15	0,45431	0,50413	-0,0498
A16	0,44424	0,50694	-0,0627
A17	0,43271	0,5099	-0,0772
A18	0,42164	0,51052	-0,0889
A19	0,42632	0,50967	-0,0834
A20	0,45	0,5106	-0,0606

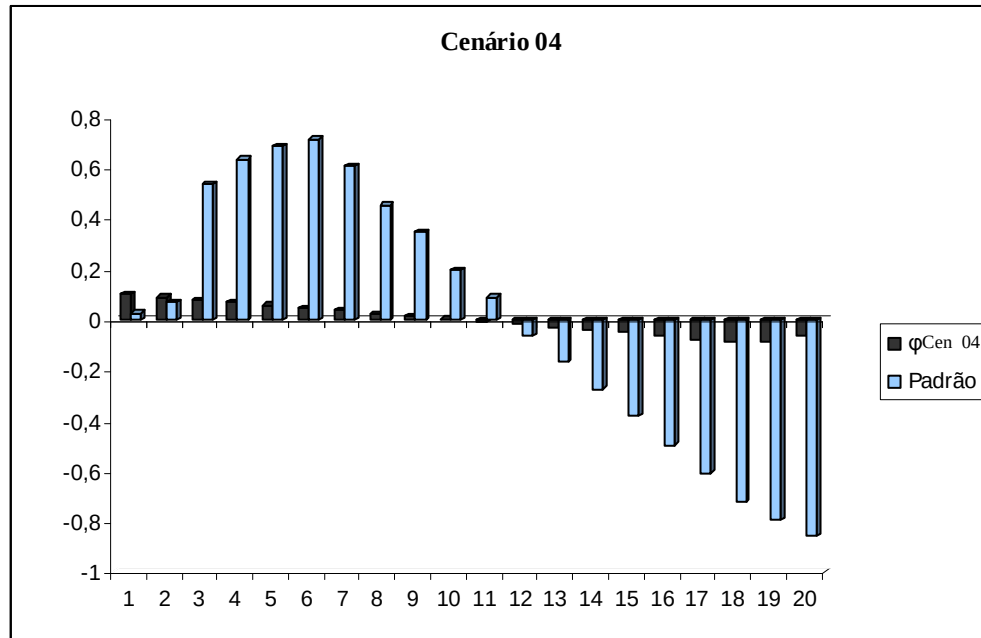


Figura 4.4 Comparação dos fluxos do cenário 04 com o padrão

▪ Cenário 05:

De acordo com a variação de β para 2, os seguintes resultados são obtidos, como

visualizado nas Tabelas de 4.16 a 4.18.

Tabela 4.16 Variação do parâmetro Beta para o cenário 05

β	2,0
η	8760

Tabela 4.17 Matriz das alternativas para o cenário 05

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99326728	0,002859011
A2	2,0	0,97333987	0,001550857
A3	3,0	0,94101199	0,001167638
A4	4,0	0,89754877	0,001014425
A5	5,0	0,84460415	0,000951856
A6	6,0	0,78411656	0,000933182
A7	7,0	0,71819156	0,000938135
A8	8,0	0,64898136	0,0009564
A9	9,0	0,57857066	0,000982111
A10	10,0	0,50887703	0,001011658
A11	11,0	0,44157202	0,00104269
A12	12,0	0,37802672	0,001073623
A13	13,0	0,31928294	0,001103375
A14	14,0	0,26604872	0,001131219
A15	15,0	0,21871517	0,001156688
A16	16,0	0,17738990	0,001179517
A17	17,0	0,14194207	0,001199598
A18	18,0	0,11205355	0,00121695
A19	19,0	0,08727149	0,001231686
A20	20,0	0,06705812	0,001243989

Tabela 4.18 Ranking das alternativas para o cenário 05

Alternativas	φ^+	φ^-	φ
A6	0,85526	0,14474	0,71053
A5	0,83684	0,16316	0,67368
A7	0,80263	0,19737	0,60526
A4	0,77105	0,22264	0,54841
A8	0,72632	0,27368	0,45263
A9	0,67368	0,32632	0,34737
A3	0,65159	0,32505	0,32653
A10	0,62105	0,37895	0,24211
A2	0,52768	0,42632	0,10137
A11	0,54474	0,45526	0,08947
A1	0,52105	0,45	0,07105
A12	0,49211	0,50789	-0,0158
A13	0,43947	0,56053	-0,1211
A14	0,38427	0,61316	-0,2289
A15	0,32584	0,66322	-0,3374
A16	0,24385	0,73373	-0,4899
A17	0,18586	0,7807	-0,5948
A18	0,12347	0,82796	-0,7045
A19	0,07126	0,87567	-0,8044
A20	0,04737	0,91906	-0,8717

A partir da Tabela 4.18, conclui-se que a melhor alternativa volta a ser 6 meses seguida de 5 meses como o cenário padrão. As quatro primeiras alternativas permanecem também as mesmas, mas com ordem inversa de A4 e A7.

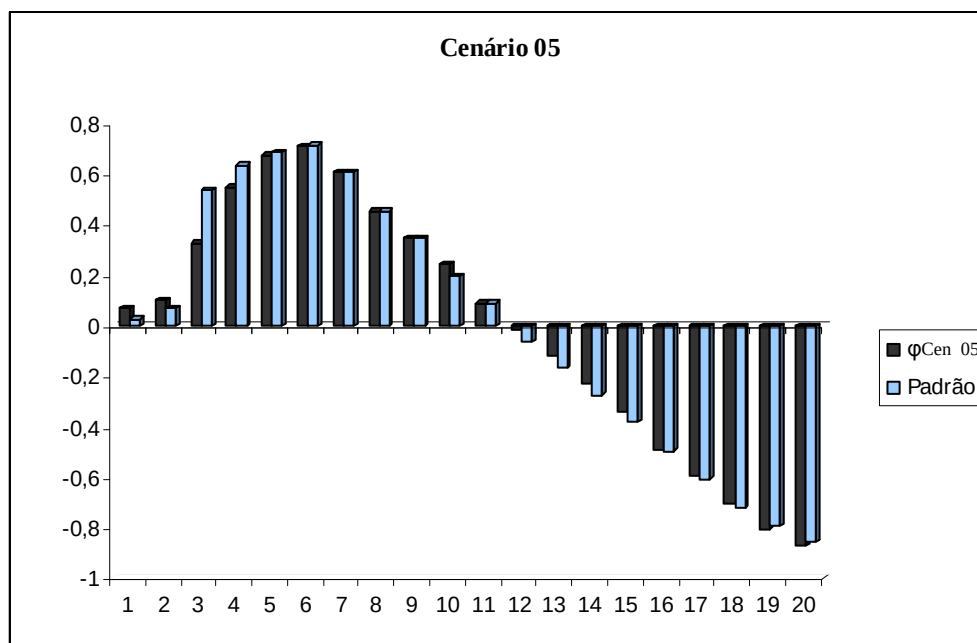


Figura 4.5 Comparação dos fluxos do cenário 05 com o padrão

▪ Cenário 06:

Os resultados da variação no parâmetro são apresentados nas Tabelas 4.18 a 4.20.

Tabela 4.18 Variação do parâmetro Beta para o cenário 06

β	4,0
η	8760

Tabela 4.19 Matriz das alternativas para o cenário 06

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99995436	0,00277831
A2	2,0	0,99927008	0,001393147
A3	3,0	0,99631026	0,000940286
A4	4,0	0,98838500	0,000728405
A5	5,0	0,97188004	0,000621562
A6	6,0	0,94257002	0,000576018
A7	7,0	0,89621625	0,000573762
A8	8,0	0,82950376	0,000605534
A9	9,0	0,74124659	0,000664807
A10	10,0	0,63358172	0,000745133
A11	11,0	0,51264797	0,000838942
A12	12,0	0,38816641	0,000937358
A13	13,0	0,27159922	0,001030963
A14	14,0	0,17322278	0,001111379
A15	15,0	0,09922608	0,001173142
A16	16,0	0,05024511	0,001214963
A17	17,0	0,02211240	0,001239533
A18	18,0	0,00830622	0,001251844
A19	19,0	0,00261260	0,001257014
A20	20,0	0,00067428	0,001258801

Tabela 4.20 Ranking das alternativas para o cenário 06

Alternativas	φ^+	φ^-	φ
A5	0,79319	0,09025	0,70294
A6	0,82806	0,14442	0,68364
A7	0,82632	0,17017	0,65615
A4	0,76175	0,11842	0,64333
A8	0,75	0,25	0,5
A3	0,67533	0,21316	0,46217
A9	0,67368	0,32632	0,34737
A10	0,59737	0,40263	0,19474
A11	0,54474	0,45526	0,08947
A2	0,46503	0,42632	0,03871
A1	0,442	0,45	-0,008
A12	0,49211	0,50789	-0,0158
A13	0,41579	0,58421	-0,1684
A14	0,36316	0,63684	-0,2737
A15	0,30954	0,68947	-0,3799
A16	0,22632	0,74112	-0,5148
A17	0,11981	0,77364	-0,6538
A18	0,09474	0,81064	-0,7159
A19	0,07105	0,83982	-0,7688
A20	0,04737	0,86676	-0,8194

Na Tabela 4.20, tem-se como melhor alternativa a A5 seguida de A6, A7 e A4. Logo, as quatro primeiras alternativas ainda se mantiveram as mesmas apenas em diferentes ordens.

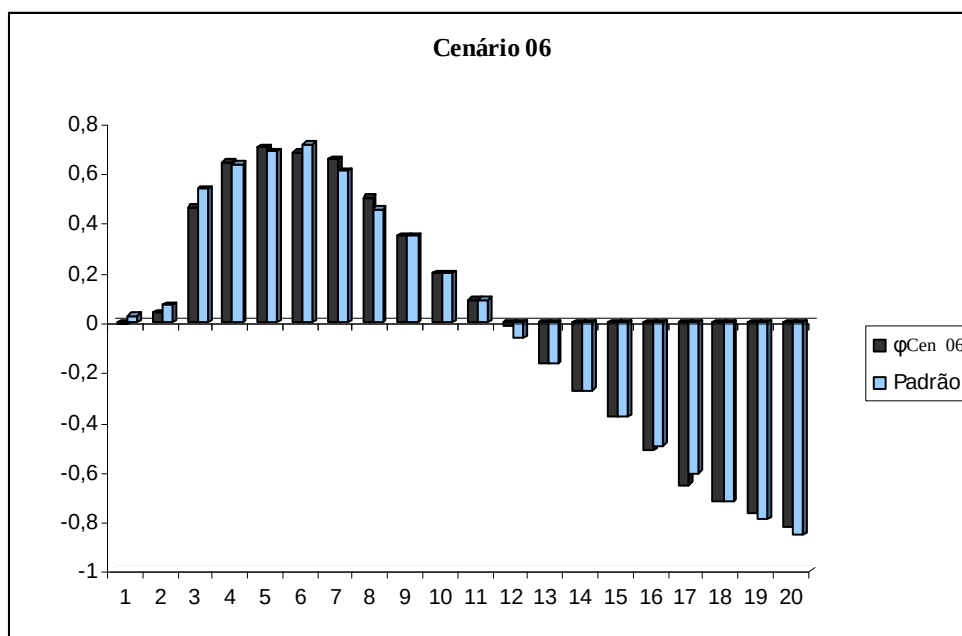


Figura 4.6 Comparação dos fluxos do cenário 06 com o padrão

▪ Cenário 07:

Para este cenário tem-se:

Tabela 4.21 Variação do parâmetro Beta para o cenário 07

β	4,8
η	8760

Tabela 4.22 Matriz das alternativas para o cenário 07

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99999382	0,002777849
A2	2,0	0,99982778	0,001389887
A3	3,0	0,99879470	0,000930583
A4	4,0	0,99521345	0,000708326
A5	5,0	0,98609423	0,000587871
A6	6,0	0,96696098	0,000527172
A7	7,0	0,93200972	0,00051083
A8	8,0	0,87488566	0,000532836
A9	9,0	0,79036866	0,000589913
A10	10,0	0,67698898	0,000677807
A11	11,0	0,53988565	0,000788763
A12	12,0	0,39221849	0,000910358
A13	13,0	0,25299838	0,001026628
A14	14,0	0,14064568	0,001122146
A15	15,0	0,06511616	0,001187763
A16	16,0	0,02414912	0,001224177
A17	17,0	0,00686605	0,001239868
A18	18,0	0,00142488	0,001244898
A19	19,0	0,00020437	0,001246042
A20	20,0	0,00001907	0,001246218

Na Tabela 4.23, tem-se agora, novamente, como melhor alternativa a A6 seguida de A5, A7 e A4. Logo, as quatro primeiras alternativas ainda se mantiveram as mesmas em relação ao padrão apenas em diferentes ordens. Já em termos do cenário 6, o ranking ficou igual, com exceção da permutação entre A5 e A6.

Tabela 4.23 Ranking das alternativas para o cenário 07

Alternativas	φ^+	φ^-	φ
A6	0,81706	0,06806	0,749
A5	0,78421	0,07105	0,71316
A7	0,82632	0,15916	0,66715
A4	0,72112	0,14211	0,57902
A8	0,75	0,25	0,5
A3	0,65352	0,21316	0,44037
A9	0,67368	0,32632	0,34737
A10	0,62105	0,37895	0,24211
A11	0,54474	0,45526	0,08947
A2	0,44136	0,42632	0,01505
A1	0,41784	0,45	-0,0322
A12	0,49211	0,50789	-0,0158
A13	0,41579	0,58421	-0,1684
A14	0,36316	0,63684	-0,2737
A15	0,30181	0,68947	-0,3877
A16	0,15253	0,73339	-0,5809
A17	0,11842	0,76579	-0,6474
A18	0,09474	0,7921	-0,6974
A19	0,07105	0,81696	-0,7459
A20	0,04737	0,84083	-0,7935

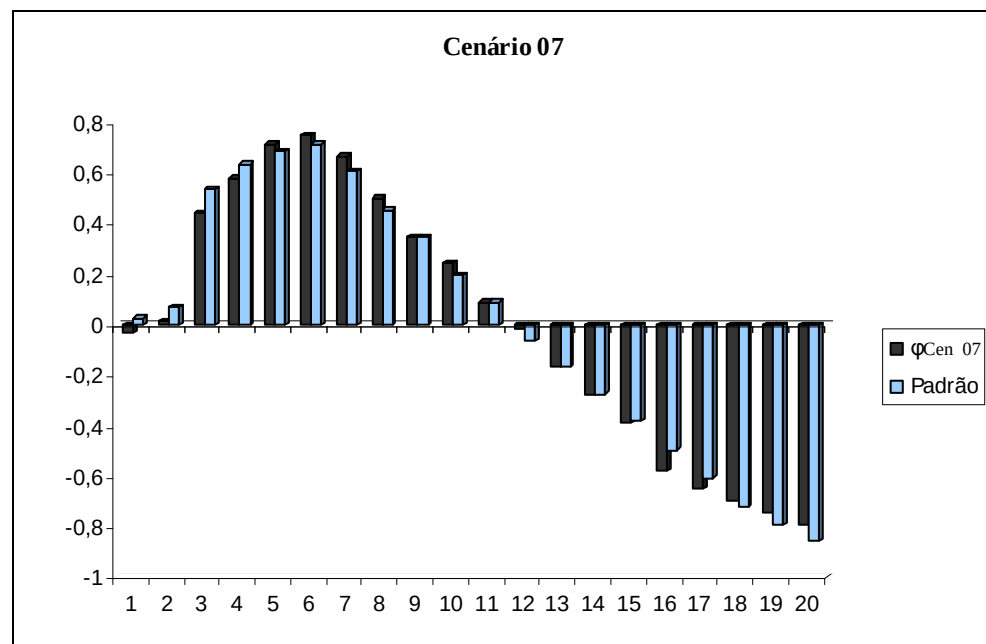


Figura 4.7 Comparação dos fluxos do cenário 07 com o padrão

▪ Cenário 08:

Do cenário 08 a cenário 12, o parâmetro que será testada a variação é o η , parâmetro de escala da distribuição de probabilidade Weibull. Para o cenário 08, os resultados são

apresentados abaixo:

Tabela 4.24 Variação do parâmetro Neta para o cenário 08

β	3
η	2920

Tabela 4.25 Matriz das alternativas para o cenário 08

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,98512018	0,002954134
A2	2,0	0,88697981	0,002076978
A3	3,0	0,66712751	0,002373637
A4	4,0	0,38309798	0,002960082
A5	5,0	0,15351545	0,003467439
A6	6,0	0,03923474	0,003736121
A7	7,0	0,00584523	0,003819672
A8	8,0	0,00046396	0,003833826
A9	9,0	0,00001793	0,003835041
A10	10,0	0,00000031	0,00383509
A11	11,0	0,00000000	0,003835091
A12	12,0	0,00000000	0,003835091
A13	13,0	0,00000000	0,003835091
A14	14,0	0,00000000	0,003835091
A15	15,0	0,00000000	0,003835091
A16	16,0	0,00000000	0,003835091
A17	17,0	0,00000000	0,003835091
A18	18,0	0,00000000	0,003835091
A19	19,0	0,00000000	0,003835091
A20	20,0	0,00000000	0,003835091

Tabela 4.26 Ranking das alternativas para o cenário 08

Alternativas	φ^+	φ^-	φ
A2	0,97105	0,02895	0,94211
A1	0,95263	0,04737	0,90526
A3	0,91842	0,08158	0,83684
A4	0,84211	0,15789	0,68421
A5	0,78947	0,21053	0,57895
A6	0,58531	0,26316	0,32215
A7	0,30789	0,29976	0,00813
A8	0,28421	0,32864	-0,0444
A9	0,26053	0,35275	-0,0922
A10	0,23684	0,37645	-0,1396
A11	0,21316	0,40014	-0,187
A12	0,18947	0,42382	-0,2343
A13	0,16579	0,44751	-0,2817
A14	0,14211	0,47119	-0,3291
A15	0,11842	0,49488	-0,3765
A16	0,09474	0,51856	-0,4238
A17	0,07105	0,54224	-0,4712
A18	0,04737	0,56593	-0,5186
A19	0,02368	0,58961	-0,5659
A20	0	0,6133	-0,6133

Na Tabela 4.26, pode-se observar uma mudança da melhor alternativa para A1 e A2, que normalmente estavam posicionadas bem abaixo do ranking. Isso, se deve, pelo fato da taxa de falhas estar bem menor em torno de 1 falha a cada 4 meses, logo as intervenções ideais seriam previamente a esse período de 2920 horas ou 4 meses.

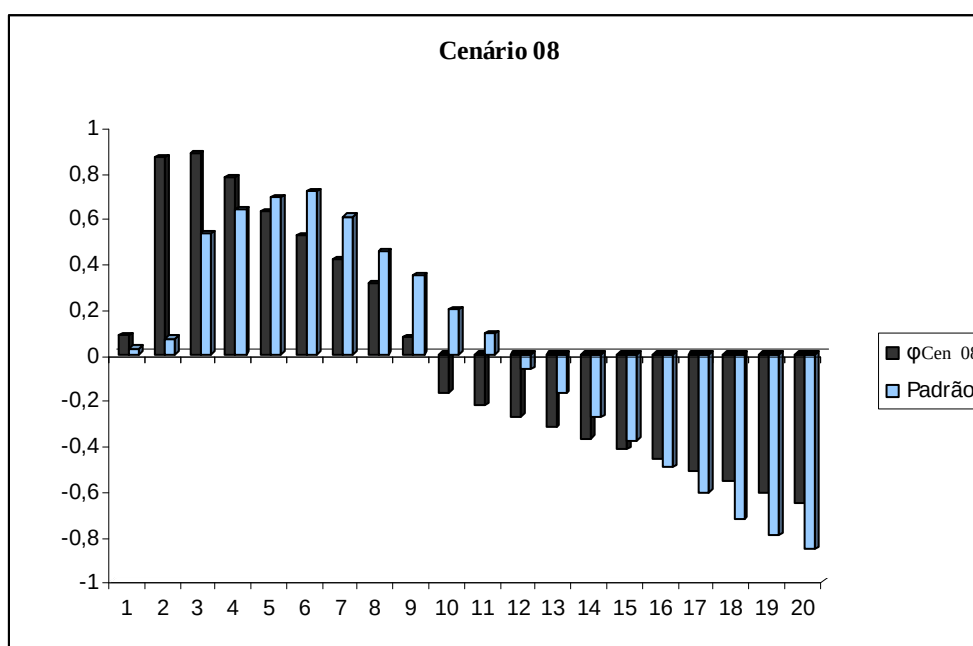


Figura 4.8 Comparação dos fluxos do cenário 08 com o padrão

▪ Cenário 09:

Para o cenário 09, com variação de 50% do valor de neta estipulado para as linhas de Itaipu, tem-se um cenário pessimista, mas não tanto quanto o cenário 08. Nas Tabelas 4.27 a 4.29 os resultados são visualizados.

Tabela 4.27 Variação do parâmetro Neta para o cenário 09

β	3
η	4380

Tabela 4.28 Matriz das alternativas para o cenário 09

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99556789	0,002830162
A2	2,0	0,96508826	0,001596887
A3	3,0	0,88697981	0,001384652
A4	4,0	0,75255155	0,001478909
A5	5,0	0,57393125	0,001706011
A6	6,0	0,38309798	0,001973388
A7	7,0	0,21792723	0,002214613
A8	8,0	0,10287031	0,002389594
A9	9,0	0,03923474	0,002490747
A10	10,0	0,01177278	0,002536305
A11	11,0	0,00270608	0,00255191
A12	12,0	0,00046396	0,002555884
A13	13,0	0,00005777	0,00255662
A14	14,0	0,00000509	0,002556718
A15	15,0	0,00000031	0,002556727
A16	16,0	0,00000001	0,002556727
A17	17,0	0,00000000	0,002556727
A18	18,0	0,00000000	0,002556727
A19	19,0	0,00000000	0,002556727
A20	20,0	0,00000000	0,002556727

Tabela 4.29 Ranking das alternativas para o cenário 09

Alternativas	φ^+	φ^-	φ
A3	0,94211	0,05789	0,88421
A2	0,92368	0,05748	0,8662
A4	0,88947	0,11053	0,77895
A5	0,81316	0,18684	0,62632
A6	0,76053	0,23947	0,52105
A7	0,70789	0,29211	0,41579
A8	0,65526	0,34474	0,31053
A1	0,53116	0,45	0,08116
A9	0,47389	0,39737	0,07652
A10	0,26053	0,42825	-0,1677
A11	0,23684	0,46069	-0,2238
A12	0,21316	0,48653	-0,2734
A13	0,18947	0,51061	-0,3211
A14	0,16579	0,53434	-0,3686
A15	0,14211	0,55803	-0,4159
A16	0,11842	0,58172	-0,4633
A17	0,09474	0,6054	-0,5107
A18	0,07105	0,62909	-0,558
A19	0,04737	0,65277	-0,6054
A20	0,02368	0,67645	-0,6528

Assim como no cenário 08, existe uma tendência de realização da manutenção mais cedo, no caso a cada 3 ou 2 meses, devido ao valor ainda baixo para a taxa de falhas (1 a cada 6 meses).

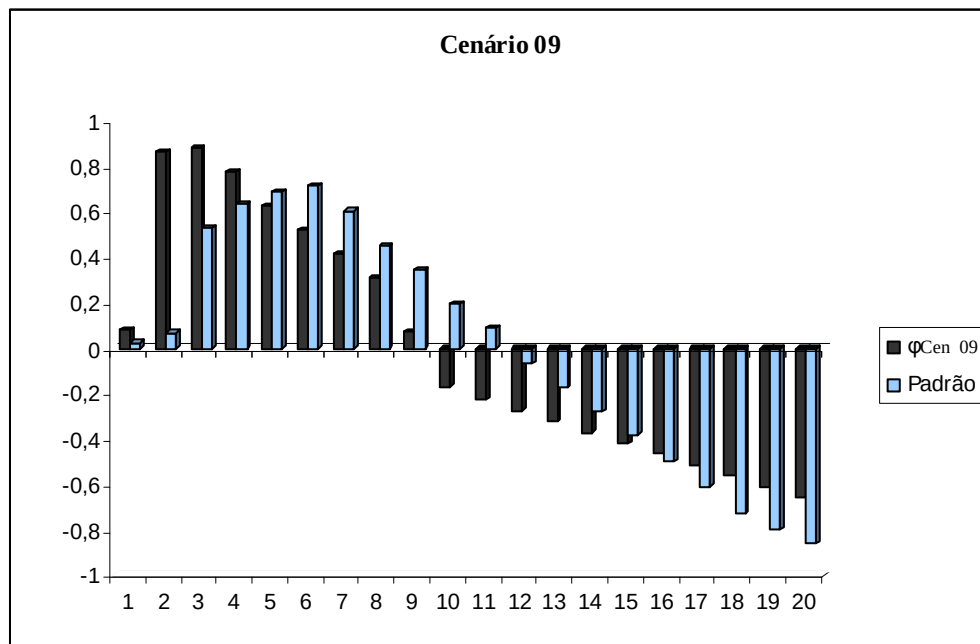


Figura 4.9 Comparação dos fluxos do cenário 09 com o padrão

▪ Cenário 10:

Para o cenário 10, tem-se um cenário mais otimista. Nas Tabelas 4.30 a 4.32 os resultados são apresentados.

Tabela 4.30 Variação do parâmetro Neta para o cenário 10

β	3
η	17520

Tabela 4.31 Matriz das alternativas para o cenário 10

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99993060	0,002778597
A2	2,0	0,99944491	0,001392166
A3	3,0	0,99812780	0,000933297
A4	4,0	0,99556789	0,000707541
A5	5,0	0,99136181	0,000575998
A6	6,0	0,98512018	0,000492356
A7	7,0	0,97647497	0,000436748
A8	8,0	0,96508826	0,000399222
A9	9,0	0,95066194	0,000374219
A10	10,0	0,93294810	0,000358377
A11	11,0	0,91175953	0,000349521
A12	12,0	0,88697981	0,000346163
A13	13,0	0,85857234	0,000347234
A14	14,0	0,82658770	0,000351925
A15	15,0	0,79116854	0,000359598
A16	16,0	0,75255155	0,000369727
A17	17,0	0,71106585	0,000381863
A18	18,0	0,66712751	0,000395606
A19	19,0	0,62123009	0,000410597
A20	20,0	0,57393125	0,000426503

Devido ao aumento da taxa de falhas considerada para as linhas de transmissão, existe uma tendência de realização da manutenção mais tardia ao contrário dos cenários 09 e 08, logo a melhor alternativa será 12 meses.

Tabela 4.32 Ranking das alternativas para o cenário 10

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A12	0,66074	0,2902	0,37055
A11	0,63882	0,29833	0,34049
A10	0,61305	0,30284	0,31021
A13	0,61156	0,35022	0,26135
A9	0,56298	0,31187	0,2511
A8	0,51435	0,29379	0,22055
A7	0,45989	0,31569	0,1442
A6	0,45082	0,33158	0,11924
A14	0,53856	0,42999	0,10858
A5	0,43918	0,35526	0,08392
A4	0,42362	0,37895	0,04467
A3	0,40647	0,40263	0,00384
A2	0,3866	0,42632	-0,0397
A15	0,46533	0,50961	-0,0443
A1	0,36432	0,45	-0,0857
A16	0,41547	0,56533	-0,1499
A17	0,34152	0,64442	-0,3029
A18	0,29078	0,69941	-0,4086
A19	0,21581	0,77762	-0,5618
A20	0,16579	0,8316	-0,6658

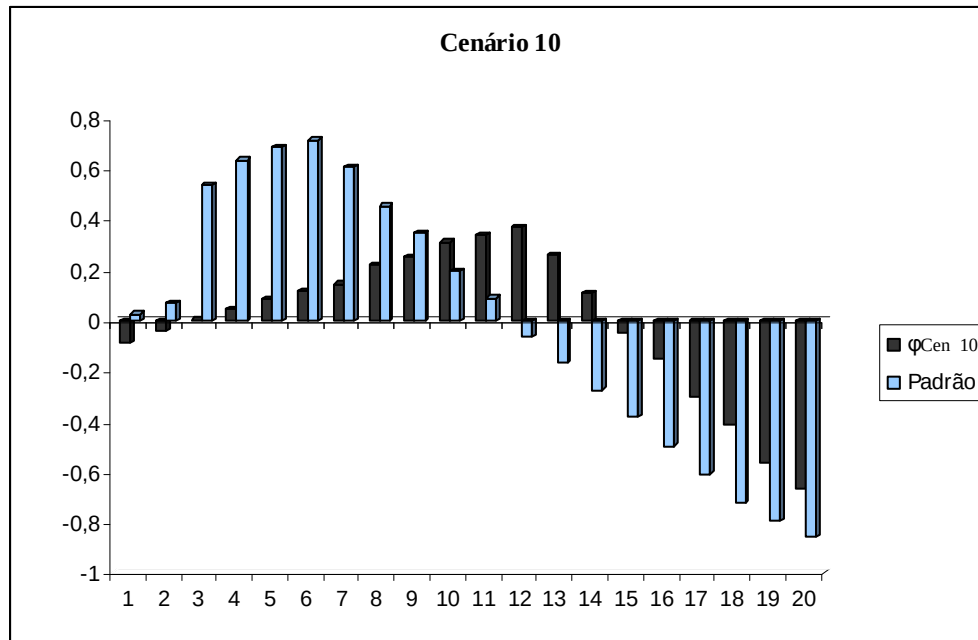


Figura 4.10 Comparação dos fluxos do cenário 10 com o padrão

Até esse cenário, retrospectivamente, pode-se observar que as piores situações são sempre as mesmas, 16 a 20 meses, ou seja, são os períodos de intervenção não indicados para o

planejamento de manutenção preventiva do modelo abordado neste trabalho. A comparação pode ser vista na Tabela 4.33 abaixo.

Tabela 4.33 Comparação do ranking dos cenários 01 a 10

Cenário 10	Cenário 09	Cenário 08	Cenário 07	Cenário 06	Cenário 05	Cenário 04	Cenário 03	Cenário 02	Cenário 01
$\beta=3$ $\eta=17520$	$\beta=3$ $\eta=4380$	$\beta=3$ $\eta=2920$	$\beta=4,8$ $\eta=8760$	$\beta=4$ $\eta=8760$	$\beta=2$ $\eta=8760$	$\beta=1,2$ $\eta=8760$	$R=0,6$ $C=0,4$	$R=0,4$ $C=0,6$	$R=0,3$ $C=0,7$
A12	A12	A2	A6	A5	A6	A1	A4	A6	A6
A11	A11	A1	A5	A6	A5	A2	A3	A5	A7
A10	A10	A3	A7	A7	A7	A3	A5	A7	A5
A13	A13	A4	A4	A4	A4	A4	A6	A4	A4
A9	A9	A5	A8	A8	A8	A5	A2	A8	A8
A8	A8	A6	A3	A3	A9	A6	A1	A3	A9
A7	A7	A7	A9	A9	A3	A7	A7	A9	A3
A6	A6	A8	A10	A10	A10	A8	A8	A10	A10
A14	A14	A9	A11	A11	A2	A9	A9	A11	A11
A5	A5	A10	A2	A2	A11	A10	A10	A12	A12
A4	A4	A11	A1	A1	A1	A11	A11	A13	A13
A3	A3	A12	A12	A12	A12	A12	A12	A2	A14
A2	A2	A13	A13	A13	A13	A13	A13	A1	A15
A15	A15	A14	A14	A14	A14	A14	A14	A14	A2
A1	A1	A15	A15	A15	A15	A15	A15	A15	A1
A16	A16	A16	A16	A16	A16	A16	A16	A16	A16
A17	A17	A17	A17	A17	A17	A17	A17	A17	A17
A18	A18	A18	A18	A18	A18	A18	A18	A18	A18
A19	A19	A19	A19	A19	A19	A19	A19	A19	A19
A20	A20	A20	A20	A20	A20	A20	A20	A20	A20

▪ Cenário 11:

Para o cenário 11, tem-se um cenário mais otimista ainda que o cenário anterior. Nas Tabelas 4.34 a 4.36 os resultados são apresentados.

Tabela 4.34 Variação do parâmetro Neta para o cenário 11

β	3
η	35040

Tabela 4.35 Matriz das alternativas para o cenário 11

Alternativas	tp(meses)	R(tp)	Cm(tp)
A1	1,0	0,99999132	0,00277788
A2	2,0	0,99993060	0,001389299
A3	3,0	0,99976578	0,000926848
A4	4,0	0,99944491	0,000696083
A5	5,0	0,99891612	0,000558115
A6	6,0	0,99812780	0,000466649
A7	7,0	0,99702865	0,000401841
A8	8,0	0,99556789	0,00035377
A9	9,0	0,99369536	0,000316926
A10	10,0	0,99136181	0,000287999
A11	11,0	0,98851904	0,000264884
A12	12,0	0,98512018	0,000246178
A13	13,0	0,98111996	0,000230906
A14	14,0	0,97647497	0,000218374
A15	15,0	0,97114399	0,00020807
A16	16,0	0,96508826	0,000199611
A17	17,0	0,95827184	0,000192701
A18	18,0	0,95066194	0,00018711
A19	19,0	0,94222920	0,000182655
A20	20,0	0,93294810	0,000179188

Tabela 4.36 Ranking das alternativas para o cenário 11

Alternativas	ϕ^+	ϕ^-	ϕ
A14	0,34995	0,15936	0,19059
A15	0,3582	0,17862	0,17958
A13	0,34246	0,16579	0,17667
A16	0,36974	0,21671	0,15302
A12	0,33215	0,18947	0,14268
A17	0,38408	0,2747	0,10938
A11	0,32159	0,21316	0,10843
A10	0,30908	0,23684	0,07224
A18	0,40263	0,35255	0,05008
A9	0,29524	0,26053	0,03472
A19	0,42632	0,40311	0,02321
A20	0,45	0,43166	0,01834
A8	0,27879	0,28421	-0,0054
A7	0,26127	0,30789	-0,0466
A6	0,24289	0,33158	-0,0887
A5	0,22301	0,35526	-0,1323
A4	0,20188	0,37895	-0,1771
A3	0,17974	0,40263	-0,2229
A2	0,15685	0,42632	-0,2695
A1	0,13346	0,45	-0,3165

Nesse cenário mais otimista possível, onde a ocorrência de falhas ocorreria a cada 4

anos, tem-se a situação inversa ao que já observado até agora, onde as piores alternativas são as melhores, e as melhores, como A6, estão em últimos lugares. Entretanto, isso pode ser facilmente justificado pela não necessidade de intervenção precoce em um sistema mais confiável. Assim, a melhor intervenção deverá ocorrer em 14 meses de operação.

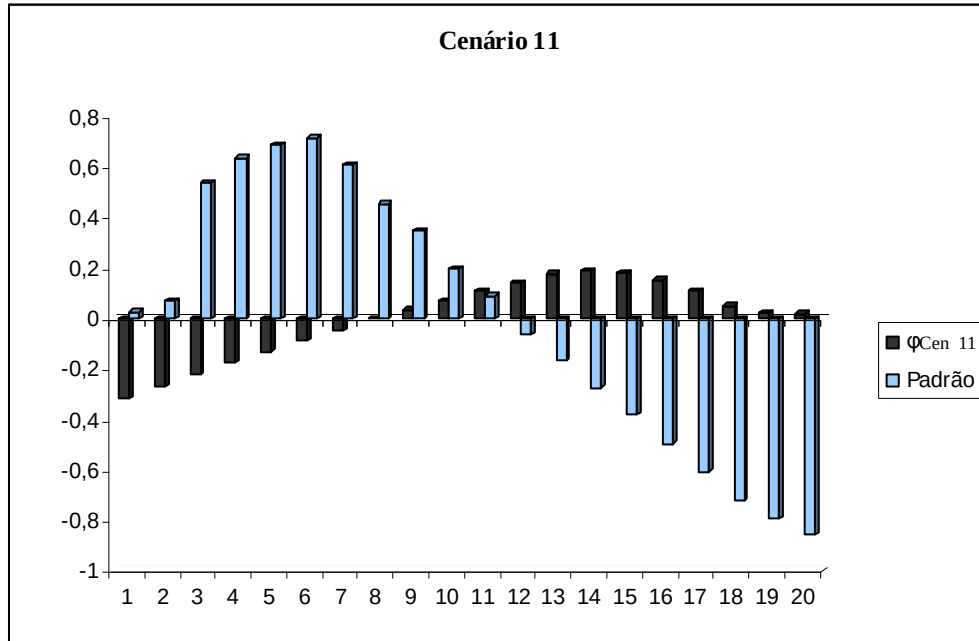


Figura 4.11 Comparação dos fluxos do cenário 11 com o padrão

Para concluir a discussão de resultados, uma comparação entre as curvas de comportamento de falhas para cada cenário para maior ilustração é apresentada pelas Figuras 4.12 a 4.20.

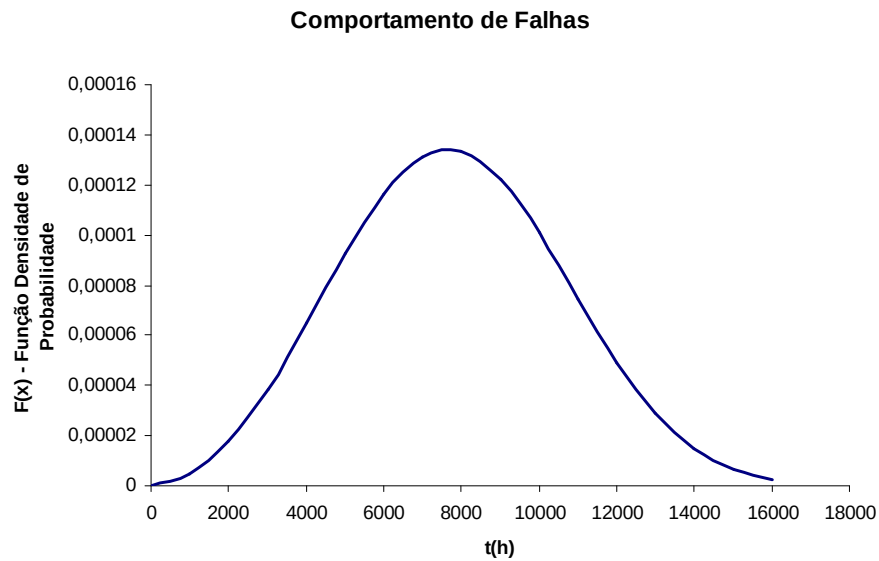


Figura 4.12 Comportamento de falhas cenário-padrão

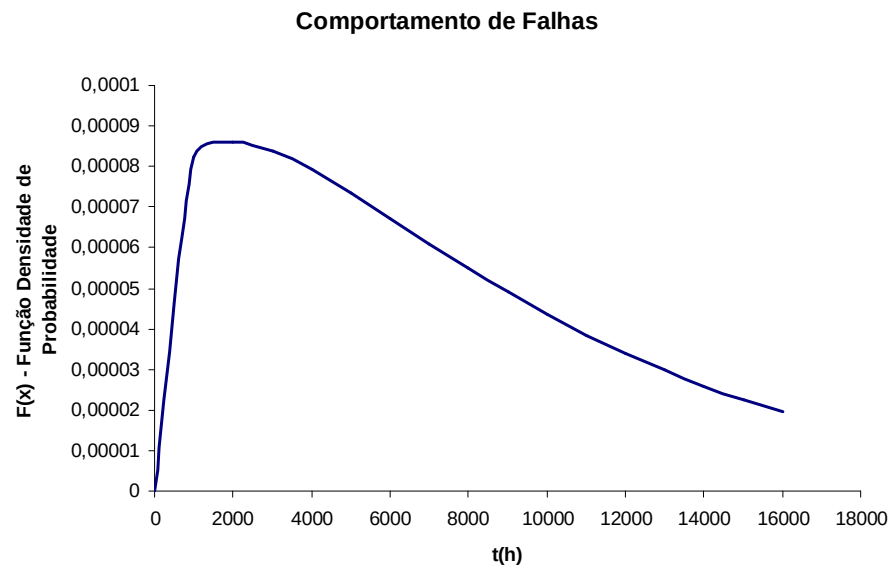


Figura 4.13 Comportamento de falhas cenário 04

Como pode ser observado na Figura 4.13, a curva se tornou mais próxima do eixo y, de forma a se aproximar do tempo de vida médio da linha de transmissão.

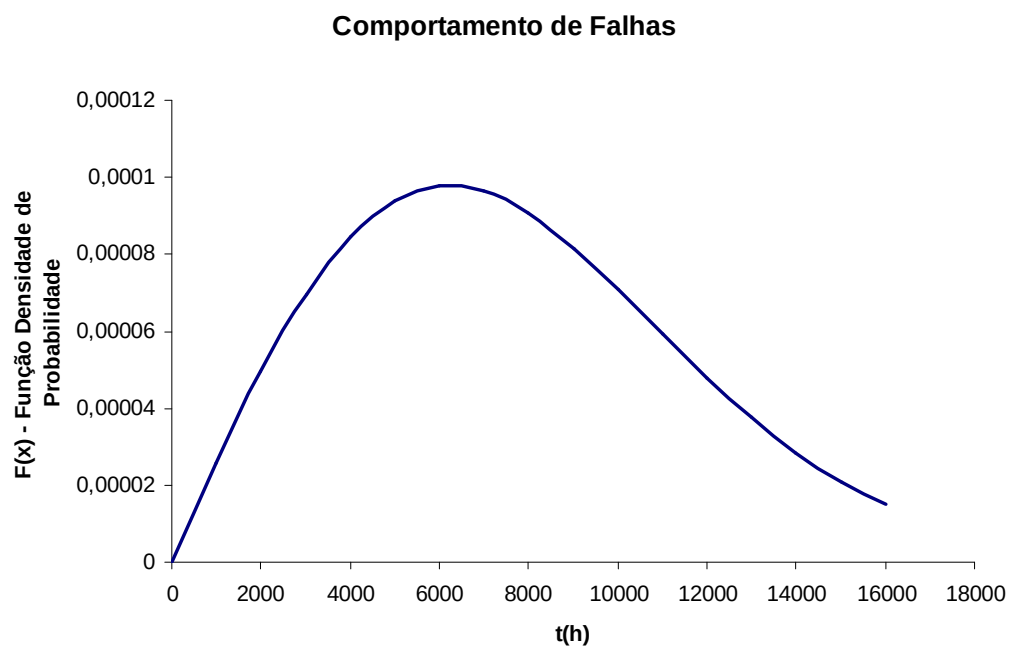


Figura 4.14 Comportamento de falhas cenário 05

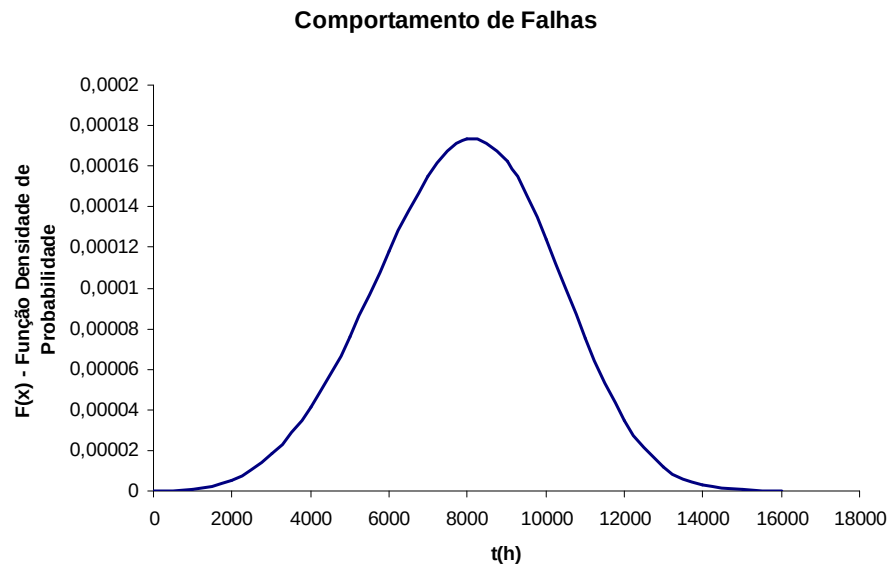


Figura 4.15 Comportamento de falhas cenário 06

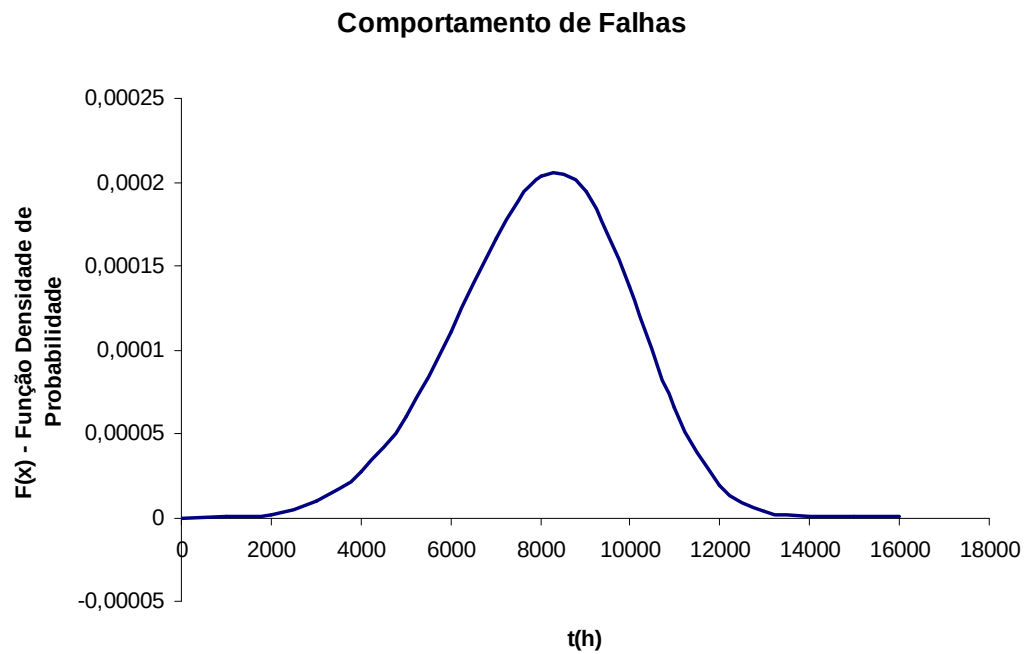


Figura 4.16 Comportamento de falhas cenário 07

Já para as Figuras 4.14 a 4.16, tendem a se aproximar mais de um formato de uma curva de distribuição Normal, a qual se assemelha a um sino, se aproximando assim do cenário-padrão.

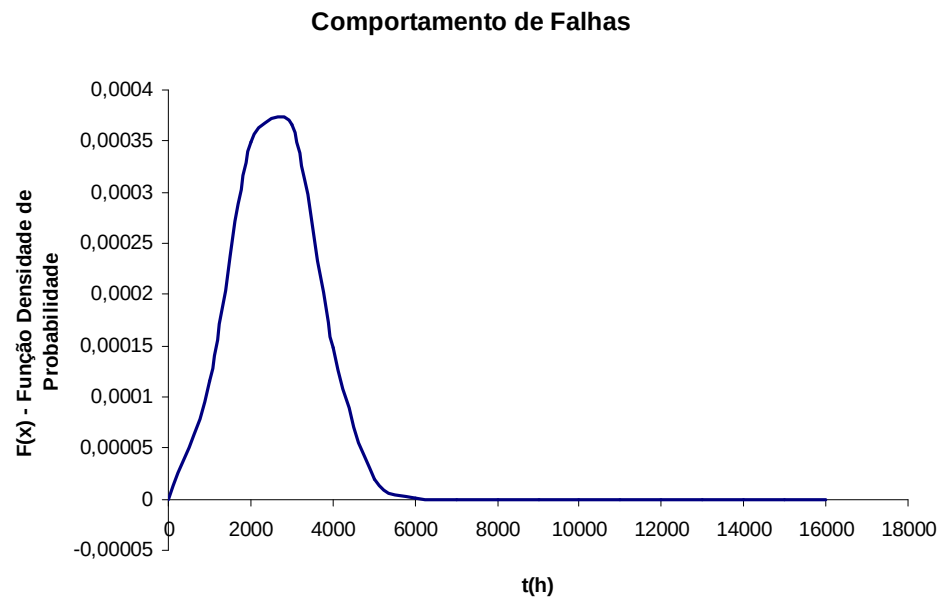


Figura 4.17 Comportamento de falhas cenário 08

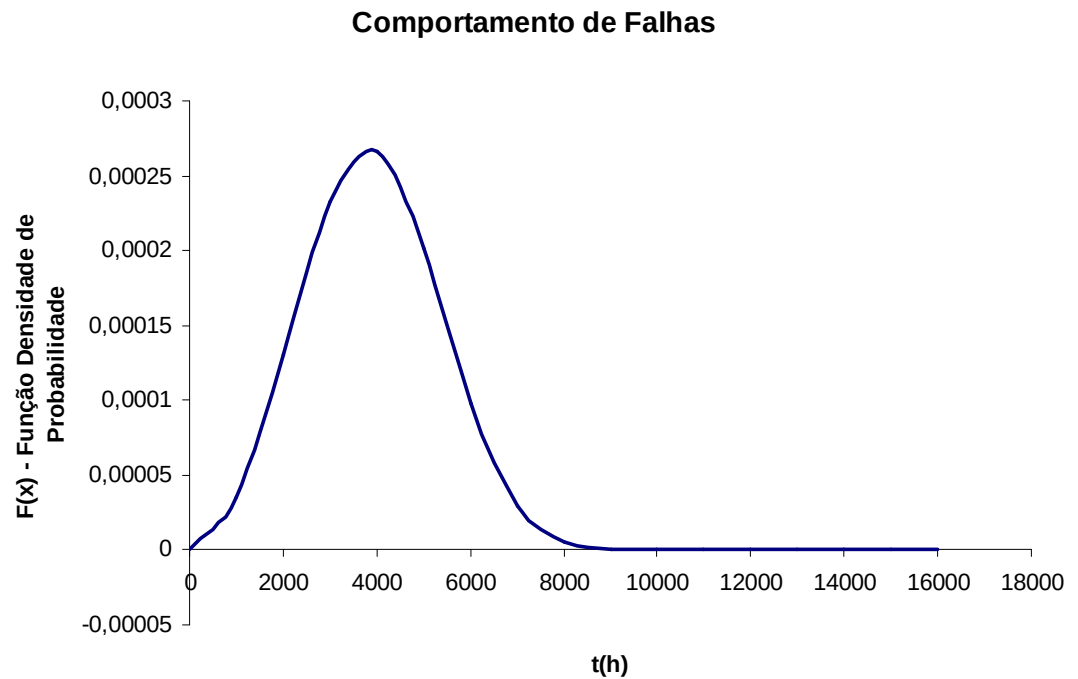


Figura 4.18 Comportamento de falhas cenário 09

Para as últimas Figuras 4.17 e 4.18, o formato de sino permanece, apesar de mais afilado devido a quantidade de valores considerado para a análise da confiabilidade.

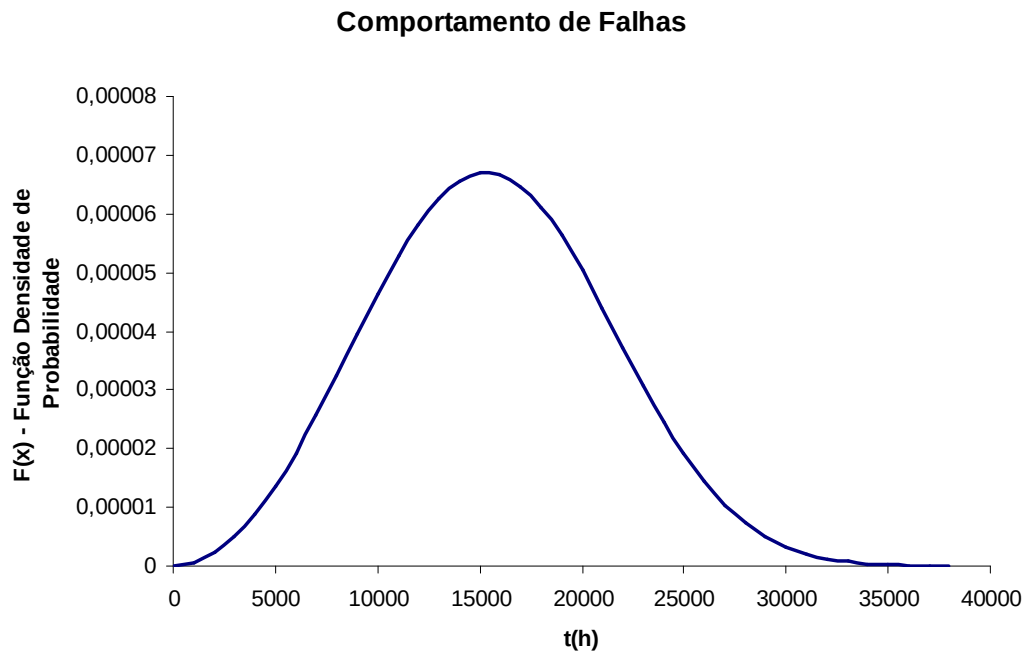


Figura 4.19 Comportamento de falhas cenário 10

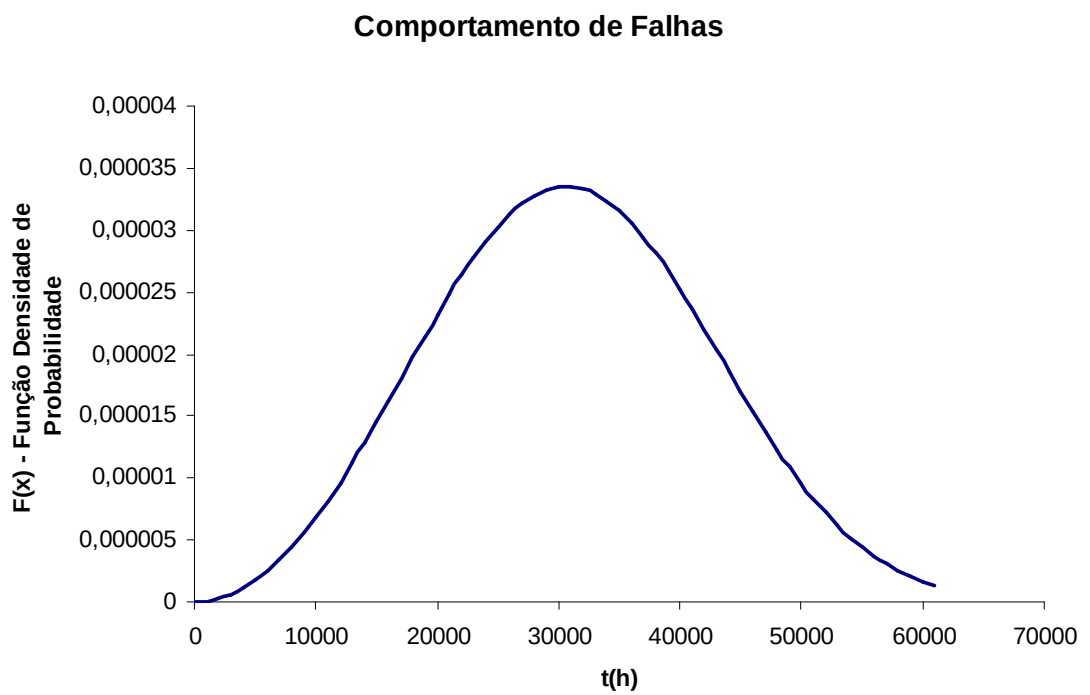


Figura 4.20 Comportamento de falhas cenário 11

Os últimos cenários também mantiveram comportamentos de falha semelhantes, apesar da diferença do tempo de vida útil em cada caso, visto que houveram variações do parâmetro de escala, neta, que se assemelha a média da distribuição de falhas.

Pode-se concluir, a partir desses resultados e dos diversos comportamentos das curvas apresentados, que apesar das variações dos perfis dos decisores, suas experiências e conhecimentos técnicos, a tomada de decisão através do modelo apresentado é eficiente, visto que os resultados e o comportamento de taxa de falhas percebido pelos decisores é bem semelhantes apresentado resultados próximos.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Existem várias razões para aplicar um planejamento de manutenção preventiva estruturado na indústria, dentre as quais a mais importante é melhorar a disponibilidade do equipamento ou item. No caso do setor elétrico, a análise da confiabilidade é uma importante ferramenta nos estágios de planejamento e expansão desse setor. O objetivo é dar suporte a capacidade do sistema para alcançar a futura demanda de energia. O planejamento da manutenção para esse setor pode englobar diversos critérios como custo total, confiabilidade, tempo de reparo e outros objetivos mais subjetivos, por também se tratar de uma atividade de serviço.

Esse trabalho procurou descrever o problema do planejamento da manutenção preventiva buscando através da literatura apresentar as diversas vertentes do problema, suas variáveis e métodos mais citados. Além disso, teve como objetivo mostrar uma visão geral sobre a manutenção do setor elétrico brasileiro. O modelo, então, determinado tinha como propósito determinar a frequência na qual um item específico deveria passar pela manutenção preventiva para diversos cenários com variação de parâmetros, incluindo um cenário padrão, o qual foi baseado em dados reais do setor encontrados em outros artigos. Para esse cenário padrão, ainda foi feita uma análise de sensibilidade para cada parâmetro de forma a identificar como o resultado final seria afetado com a variação dos parâmetros.

Baseado nos resultados da aplicação numérica, é possível concluir que a estrutura do modelo de decisão foi usado efetivamente, fornecendo resultados que podem apoiar a decisão quanto aos períodos de manutenção preventiva, onde o item é substituído, considerando os critérios envolvidos, os quais podem ser conflitantes em certos intervalos. O método multicritério aplicado, PROMETHE II, permite não só um melhor entendimento dos parâmetros, conceitos e método pelos decisores, mas, também, permite uma amplificação da noção de indiferença entre alternativas. Dessa forma, para finalidades práticas, onde não só um critério é importante para o estabelecimento de períodos preventivos, como o contexto do setor elétrico, o decisor pode fazer uso desse modelo e ainda aplicá-lo em situações de ausência de dados após a elicitação de um especialista e alguns ajustes nas fórmulas.

Para trabalhos futuros em planejamento da manutenção preventiva, podem ser destacadas oportunidades: na aplicação do modelo com dados reais de alguma empresa específica do setor elétrico; na aplicação de outros modelos multicritérios ou heurísticos para comparação de resultados; no estudo mais aprofundado do problema de manutenção preventiva

identificando outros critérios que apresentam relações com o custo da manutenção e confiabilidade; e, ainda, na aplicação do modelo para casos de incerteza de um ou todos os parâmetros da distribuição de probabilidade de falhas.

Referências Bibliográficas

ABRAMAN. A Situação da Manutenção do Brasil. *Documento Nacional* 2003.

ALMEIDA, Adiel T. de; CAMPELLO DE SOUZA, Fernando M. *Gestão da Manutenção – Na direção da Competitividade*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2001.

ALMEIDA, A. T. de; COSTA, A. P. C. S. Modelo de Decisão Multicritério para Priorização de Sistemas de Informação Baseado no Método PROMETHEE. São Carlos: *Gestão & Produção*, 2002.

ALMEIDA, A. T. Modelagem Multicritério para Seleção de Intervalos de Manutenção Preventiva Baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo. *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 1, p. 69-81, 2005. Doi: 10.1590/S0101-74382005000100005.

BEVILACQUA, M; BRAGLIA M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000.

BRANS, J. P.; VINCKE, Ph. A preference ranking organization method: (The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making). *Management Science*, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985.

CAVALCANTE, C.A.V; ALMEIDA, A. T. de. Modelo Multicritério de Apoio a Decisão para o Planejamento de Manutenção Preventiva utilizando PROMETHEE II em Situações de Incerteza. *Pesquisa Operacional*, v.25, n.2, p.1-15, 2005. Doi: 10.1590/S0101-74382005000200007.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. A Multicriteria Decision Aiding Model Using Promethee III For Preventive Maintenance Planning Under Uncertain Conditions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 13, p. 385 - 397, 2007.

CHAN, G.K.; ASGARPOOR, S. Optimum maintenance policy with Markov processes. *Electric Power System Research*, 2005.

CHAREONSUK, Chaichan; NAGARUR, Nagen; TABUCANON, Mario T. A multicriteria approach to the selection of preventive maintenance intervals. *International Journal of Production Economics*, 1998.

- COSTA, J. G. da. Avaliação do Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na Indústria. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Fevereiro, 2003.
- DHILLON, B.S. *Maintainability, maintenance and reliability for engineers*. CRC Press, 2006.
- DORIGO, M; BLUM, C. Ant Colony Optimization theory: a survey. *Theoretical Computer Science*, 2005.
- FABRO, E. *Modelo para planejamento de manutenção baseado em indicadores de criticidade de processo*. 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.
- FIGUEIREDO, F. A.; CAVALCANTE, C. A. V. ; ALMEIDA, A T. Preventive maintenance planning using prior expert knowledge and multicriteria method PROMETHEE III. In: *ESR EL Conference 2008*, 2008, Valencia. *Proceedings ESREL Conference 2008*, 2008.
- G1 Notícias <<http://g1.globo.com/>>, acesso em 15 de novembro de 2009.
- GIL, A.C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. SP: Atlas, 2002.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley, 1997.
- GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. *Tomada de decisão gerencial*. São Paulo: Atlas, 2006.
- GONÇALVES, K. H. C.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. F. R. Modelos de Referência para a Gestão da Manutenção no contexto de Sistemas de Informação do Chão de Fábrica. *ENEGEP* - Rio de Janeiro, 2008.
- HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience: New Jersey, 2004.
- HELMANN, K. S.; MARÇAL, R. F. M. Método multicritério de apoio à decisão na gestão da manutenção: aplicação do método ELECTRE I na seleção de equipamentos críticos para processo. *Revista Gestão Industrial*, v. 03, n. 01: p. 123-133, 2007.

- KELLY, A.; HARRIS, M. J. *Administração da Manutenção Industrial*. Butterworth and Company, 1978.
- KENNE, J.P.; NKEUNGOUE, L.J. Simultaneous control of production, preventive and corrective maintenance rates of a failure-prone manufacturing system. *Applied Numerical Mathematics*, 2006.
- LAFRAIA, J. R. B. *Manual da Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Qualitymark: Petrobrás-Rio de Janeiro, 2001.
- LAPA, C. M.; PEREIRA, C.M.N.A.; BARROS, M.P. A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005.
- LEVITT, Joel. *The Handbook of Maintenance Management*. New York: Industrial Press INC, 1997.
- LEVITT, Joel. *The complete guide to preventive and predictive maintenance*. New York: Industrial Press INC, 2003.
- MARTINS, J. C.; SELBITTO, M. A. Análise da estratégia de manutenção de uma concessionária de energia elétrica com base em estudos de confiabilidade. In: *XXVI ENEGEP*, 2006.
- MOREIRA, D. A. *Administração da Produção e Operações*. São Paulo: Thomson Learning, 2002.
- MOURA, M. C.; ROCHA, S. P. V.; DROGUETT, E. L.; JACINTO, C. M. Avaliação Bayesiana da Eficácia da Manutenção via Processo de Renovação Generalizado. *Pesquisa Operacional*, v.27, n.3, p.569-589, 2007.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: . Acesso em: 04 setembro 2009.
- PAULINO, M. E. C. A eficiência dos transformadores. *O setor elétrico*, 2009.

- PINTO, A. K.; XAVIER, J. N. *Manutenção: função estratégica*. Qualitymark: Petrobrás-Rio de Janeiro, 1998.
- PROCACCIA, H.; CORDIER, R.; MULLER, S. Application of Bayseian statistical decision theory for a maintenance optimization problem. *Reliability Engineering and System Safety*, p. 143-149, 1997.
- QUAN, G.; GREENWOOD, G.W; LIU, D.; HU, S. Searching for multiobjective preventive maintenance schedules: Combining preferences with evolutionary algorithms. *European Journal of Operational Research*, 2007.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1996.
- SAMROUT, M.; YALAOUI, F.; CHÂTELET, E.; CHEBBO, N. New methods to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems using ant colony optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 2004.
- SANTOS, S. R. Manutenção das linhas de transmissão de energia elétrica: Um estudo de caso na Cotesa Engenharia. Disponível em <<http://www.artigos.com>> [2005].
- SANTOS, W. B.; COLOSIMO, E. A.; MOTTA, S. B. Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 14, n.1, p. 193-202, 2007.
- SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT. *Power Engineering Guide*. Erlangen: Publicis Pro, 2008.
- SOCHA, K; DORIGO, M. Ant Colony Optimization for continuous domains. *European Journal of Operational Research*, 2006.
- SORTRAKUL, N.; NACHTMANN, H.L.; CASSADY, C.R. Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine. *Computers in Industry*, 2004.
- TCHEMRA, A. H. Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisões multicritério. Ed. rev. --

São Paulo, 2009.

TSAI, Y.-T; WANG, K.-S; TENG, H.-Y. Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001.

VINCKE, P. *Multicriteria Decision-Aid*. John Wiley & Sons: New York, 1992.

VOLKANOVSKI, A.; MAVKO, B.; BOSEVSKI, T.; CAUSEVSKI, A. CEPIN, M. Genetic algorithm optimisation of the maintenance scheduling of generating units in a power system. *Reliability Engineering and System Safety*, n. 93, p. 757–767, 2008.

WANG, L.; CHU, J.; WU, J. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, 2007.

WORSHAM, William C. Is preventive maintenance necessary? *Maintenance Resources On-Line Magazine*, 2000.

YOU MUST BE FROM AWAY. <http://youmustbefromaway.blogspot.com/2008_06_01_archive.html>, acesso em 03 de dezembro de 2009.