

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MADSON BRUNO DA SILVA MONTE

**ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DE INTERVALOS DE
MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM BOMBAS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

RECIFE, 2015

MADSON BRUNO DA SILVA MONTE

**ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DE INTERVALOS DE
MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM BOMBAS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia e
Geociências da UFPE como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Engenharia de Produção
Área de concentração: Pesquisa Operacional
Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho

RECIFE, 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves, CRB-4 / 1260

- M771a Monte, Madson Bruno da Silva.
Abordagem multicritério para definição de intervalos de manutenção preventiva em bombas para abastecimento de água/ Madson Bruno da Silva Monte. - Recife: O Autor, 2015.
106 folhas, Il., Abr., Equa. e Tab.
- Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2015.
Inclui: Referências e Anexo.
1. Engenharia de Produção. 2. Engenharia de manutenção. 3. Confiabilidade. 4. Decisão multicritério. 5. Distribuição de água. 6. Teoria da Utilidade multiatributo. I. Almeida Filho. Adiel Teixeira de. (Orientador). II. Título.
- UFPE
- 658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2015-141



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

MADSON BRUNO DA SILVA MONTE
*"ABORDAGEM MULTICRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DE INTERVALOS DE
MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM BOMBAS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA"*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **MADSON BRUNO DA SILVA MONTE**, **APROVADO**.

Recife, 24 de fevereiro de 2015.

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO, Doutor (UFPE)

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

Prof. LUCIANO FERREIRA, Doutor (UFRN)

AGRADECIMENTOS

Primordialmente, agradeço a Deus por todas as graças que têm sido concebidas em toda a minha vida, inclusive por todas as pessoas que me rodeiam, porque são elas que ajudam a construir quem eu sou.

Os infinitos agradecimentos aos meus pais, Mario e Ianê, e meu irmão, Makson, que desde sempre estão ao meu lado me dando todo o amor, aprendizado e apoio para quaisquer decisões que tenho que tomar. Agradeço sempre à Deus pela união existente em nossa família e por serem exemplos de bondade, idoneidade em tudo o que fazem.

À Paula, minha esposa, a quem tanto tenho imenso amor e admiração. Obrigado por todo esse amor, companheirismo e força que me dá. Compartilhamos todos os eventos dos nossos dias e isso é simplesmente maravilhoso!

Maria Isabel, minha filha, não tens noção de como é bom te ver crescendo sempre linda e feliz, fico orgulhoso de cada pequeno passo dado por você. És o a razão da minha vida.

Agradeço também aos meus amigos, aos de longa data e àqueles que conheci neste mestrado. Bons momentos os que passamos juntos: o apoio nos estudos, as distrações e as conversas sobre os mais diversos temas.

Ao meu orientador, Adiel Filho, pelo apoio acadêmico e pessoal, todo o conhecimento compartilhado e, mais além, obrigado por acreditar em meu potencial e me impulsionar na carreira que escolhi seguir. Também és um amigo que fiz neste período.

Os professores do PPGE, os quais são muitos para citar um por um, que se sintam todos igualmente agradecidos pelo trabalho realizado dentro da Universidade de transmissão de conhecimento, permitindo a transformação da vida de outras pessoas. O que vocês fazem é uma atividade ímpar.

“We must not forget that when radium was discovered no one knew that it would prove useful in hospitals. The work was one of pure science. This is a proof that scientific work must not be considered from the point of view of the direct usefulness of it. It must be done for itself, for the beauty of science, and then there is always the chance that a scientific discovery may become like the radium a benefit for humanity”

Marie Curie

RESUMO

Devido a questões de desenvolvimento urbano, bem como escassez de água potável, um sistema de abastecimento de água pode não ser capaz de atender a todos os consumidores simultaneamente. Algumas regiões urbanas são abastecidas via poços e com necessidade de racionamento contínuo. O racionamento funciona como um rodízio, segundo um calendário predefinido pela empresa de abastecimento. Essa situação é piorada devido à realização de intervenções nos equipamentos para execução de serviços de manutenção. Desta forma, o trabalho propõe a avaliação dos critérios que são comumente considerados nesse ambiente de decisão, com objetivos que podem ser conflitantes, para responder a pergunta de quando devem ser realizadas manutenções preventivas nos equipamentos. Assim, num primeiro momento, é realizada uma análise individual de cada critério envolvido que, posteriormente, são agregados por meio da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). No estudo, aponta-se uma janela de oportunidade para redução dos custos operacionais, bem como para melhorar a situação dos consumidores através do aumento da disponibilidade dos equipamentos.

Palavras-chave: Engenharia de manutenção. Confiabilidade. Distribuição de água. Decisão multicritério. Teoria da utilidade multiatributo.

ABSTRACT

Due to issues of non-planned urban development, as well as shortage of drinking water, a water supply system may not be able to feed all consumers simultaneously. Some urban areas are supplied through wells and requiring continuous rationing. The rationing works according to a preset schedule by the supply company. This situation gets worse due to interventions in implementing equipment maintenance services. Thus, the paper proposes the analysis of criteria that may be considered in this decision-making environment, with goals that may conflict, to answer the question of when preventive maintenance should be performed on the equipment. Thus, at first, was done an individual analysis of each criterion involved, which subsequently are aggregated through Multiattribute Utility Theory (MAUT). The study, points up a window of opportunity to reduce operating costs and to improve the welfare of consumers by increasing the availability of equipment.

Keywords: Maintenance engineering. Reliability. Water supply. Multicriteria decision aid. Multiattribute utility theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Redes em espinha de peixe.....	21
Figura 2.2: Rede em grelha.....	21
Figura 2.3: Rede em malha.....	22
Figura 2.4: Sentido do fluxo da água numa rede malhada.....	22
Figura 2.5: Setorização clássica em sistemas distribuidores de água.....	23
Figura 2.6: Aquífero artesiano e poços.....	24
Figura 2.7: Função densidade de probabilidade normal.....	30
Figura 2.8: Distribuição log normal para vários desvios padrão.....	31
Figura 2.9: Distribuições exponenciais.....	32
Figura 2.10: FDP de Weibull para diferentes parâmetros de forma.....	33
Figura 2.11: Curva da banheira e ciclo de vida dos equipamentos.....	35
Figura 2.12: Espaço de consequências para dois atributos.....	39
Figura 2.13: Loteria [A, p; C, 1-p]	39
Figura 2.14: Loteria para verificação da independência em utilidade.....	40
Figura 4.1: Regiões Político-Administrativas (RPA) da cidade do.....	51
Figura 4.2: região estudada.....	52
Figura 4.3: Localização dos poços e setores.....	54
Figura 4.4: Esquema do conjunto bomba Ebara BSH 517.....	55
Figura 4.5: Identificação dos setores.....	56
Figura 5.1: Gráficos dos ajustes lineares.....	64
Figura 5.2: Distribuições de probabilidade de Weibull para cada poço.....	66
Figura 5.3: Gráfico representando as curvas das funções confiabilidade.....	67
Figura 5.4: Gráfico representando as curvas das funções Taxa de Falha.....	67
Figura 5.5: Curva da função disponibilidade para o CT.....	71
Figura 5.6: Curva da função disponibilidade para CT.....	72
Figura 5.7: Curva da função custo para o CT.....	75
Figura 5.8: Curva da função custo para FM.....	75
Figura 6.1: Representação do espaço de consequências	78
Figura 6.2: Representação da comparação entre valor certo e loteria.....	79
Figura 6.3: Ajuste da função utilidade para o custo CT e FM.....	81

Figura 6.4: Ajuste da função utilidade para a disponibilidade CT e FM.....	81
Figura 6.5: Função utilidade do custo e disponibilidade para o poço Córrego do Tiro.....	82
Figura 6.6: Função utilidade do custo e disponibilidade para o poço Febem-Mangabeira.....	82
Figura 6.7: Representação da independência em utilidade para o custo.....	83
Figura 6.8: $U(A,K)$ para o poço Córrego do Tiro.....	85
Figura 6.9: $U(A,K)$ para o poço Febem Mangabeira.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Identificação dos poços.....	54
Tabela 4.2: Setores e horários de atendimento.....	56
Tabela 4.3: Custos com manutenções.....	59
Tabela 4.4: Custos totais das manutenções	60
Tabela 5.1: Tempo de vida útil dos conjuntos motor-bomba.....	62
Tabela 5.2: Parâmetros de Weibull.....	64
Tabela 5.3: Parâmetros do teste de Kolmogorov-Smirnov.....	65
Tabela 5.4: Funções confiabilidade e Taxa de falha.....	66
Tabela 6.1: Dados da elicitação das funções utilidade CT.....	80
Tabela 6.2: Dados da elicitação das funções utilidade FM.....	80
Tabela 6.3: Matriz de consequências para cada intervalo entre manutenções preventivas.....	86

LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. 2.1: Distribuição normal	30
Eq. 2.2: Distribuição log-normal	30
Eq. 2.3: Distribuição exponencial.....	31
Eq. 2.4: Distribuição de Weibull (3 parâmetros).....	32
Eq. 2.5: Valor esperado de uma variável com distribuição de Weibull	32
Eq. 2.6: Confiabilidade.....	34
Eq. 2.7: Distribuição de Weibull (2 parâmetros).....	34
Eq. 2.8: Função utilidade multiatributo	38
Eq. 2.9: Função utilidade multiatributo para duas variáveis	39
Eq. 2.10: Função utilidade multilinear	40
Eq. 3.1: Função objetivo para custo e volume de água	47
Eq. 3.2: Função objetivo para benefício à população.....	47
Eq. 3.3: Função objetivo de custo ponderado.....	47
Eq. 5.1: Distribuição de Weibull	63
Eq. 5.2: Confiabilidade de Weibull	63
Eq. 5.3: Probabilidade de ocorrência de falha	63
Eq. 5.4: Linearização de R'	63
Eq. 5.5: Regressão linear poço CT	63
Eq. 5.6: Regressão linear poço PT.....	64
Eq. 5.7: Regressão linear poço DL.....	64
Eq. 5.8: Regressão linear poço FM.....	64
Eq. 5.9: Função densidade de probabilidade para CT	65
Eq. 5.10: Função densidade de probabilidade para PT.....	65
Eq. 5.11: Função densidade de probabilidade para DL.....	65
Eq. 5.12: Função densidade de probabilidade para FM	65
Eq. 5.13: Conceito disponibilidade	70
Eq. 5.14: Modelo aplicado para disponibilidade	70
Eq. 5.15: Valor esperado para o custo por ciclo.....	74
Eq. 5.16: Valor esperado para o custo	74

Eq. 5.17: Modelo aplicado de custo por ciclo	74
Eq. 6.1: Função utilidade exponencial para disponibilidade	78
Eq. 6.2: Função utilidade exponencial para o custo	78
Eq. 6.3: Função utilidade para o custo CT	81
Eq. 6.4: Função utilidade para o custo FM.....	81
Eq. 6.5: Função utilidade para a disponibilidade CT	81
Eq. 6.6: Função utilidade para a disponibilidade FM.....	81
Eq. 6.7: Função utilidade multiatributo para CT	84
Eq. 6.8: Função utilidade multiatributo para FM	84

LISTA DE ABREVIações

AHP – Analytic Hierarchical Process

ELECTRE – Elimination et Choix Traduisant la Realité

CT – Poço do Córrego do Tiro

COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento

DL – Poço do Largo Dom Luiz

FM – Poço Febem-Mangabeira

MAUT – Multi Attribute Utility Theory

MCDM – Multi Criteria Decision Making

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PROMETHEE – Preference Ranking Method for Enrichment of Evaluations

PT – Poço da Praça do Trabalho

RPA – Região Político-Administrativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	18
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	18
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	18
2	BASE CONCEITUAL	19
2.1	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	19
2.1.1	<i>Principais componentes de um sistema de distribuição de água</i>	19
2.1.2	<i>Tipos de redes</i>	21
2.1.2.1	Setorização das redes.....	22
2.2	ABASTECIMENTO VIA POÇOS.....	23
2.3	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	25
2.3.1	<i>Gestão da operação</i>	25
2.3.2	<i>Gestão da manutenção</i>	27
2.3.2.1	Manutenção em poços para distribuição de água.....	28
2.4	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE	29
2.5	ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO E CONFIABILIDADE.....	33
2.6	APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO	35
2.6.1	<i>Famílias de métodos</i>	37
2.6.2	<i>Teoria da utilidade multiatributo (MAUT)</i>	38
3	REVISÃO DA LITERATURA	42
4	DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA	51
4.1	LOCALIDADES.....	51
4.2	POÇOS ESTUDADOS	53
4.3	ATUAL SEQUENCIAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	55
4.4	ATUAL GESTÃO DE MANUTENÇÕES	57
5	OTIMIZAÇÃO DAS ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO	61
5.1	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE, CONFIABILIDADE E TAXA DE FALHA DOS EQUIPAMENTOS	61
5.2	INTERVALO ÓTIMO PARA MAXIMIZAÇÃO DA DISPONIBILIDADE	69
5.3	POLÍTICA DE MANUTENÇÃO DE MENOR CUSTO	73
6	ABORDAGEM MULTICRITÉRIO	77
6.1	FUNÇÕES UTILIDADE PARA O CUSTO E A DISPONIBILIDADE	77
6.2	FUNÇÃO UTILIDADE MULTIATRIBUTO E SOLUÇÃO ÓTIMA.....	84

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
7.1	CONCLUSÕES	88
7.2	TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	91
	ANEXOS	103

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de água são divididos em setores que se ramificam a partir de condutos principais em condutos secundários que chegam até os consumidores finais. Cada setor pode ser completamente isolado dos outros setores de forma que é possível definir certamente qual(is) região(ões) do sistema está(ão) sendo abastecida(s) em determinado momento. Em algumas regiões, no entanto, nem todos os setores podem ser abastecidos simultaneamente. Na cidade do Recife, em Pernambuco, isso é decorrente de inúmeras questões, mas cita-se aqui como principais o crescimento urbano sem planejamento principalmente nas áreas do subúrbio, caracterizada pela presença de morros, e a escassez de água na região (Cabral et al, 1999; Pontual, 2001). Nessas regiões, o abastecimento é feito na forma de rodizio, definido pela empresa responsável pelo abastecimento de água, onde é especificado em quais dias do mês um determinado setor irá receber água, em uma quantidade específica de horas. Essa informação é pública e pode ser acessada nos sites das empresas de abastecimento. Uma breve consulta nesses calendários mostra a difícil situação de algumas regiões que têm água disponível nas torneiras durante apenas 48 horas em um mês, por exemplo.

A situação descrita acima pode piorar quando são necessárias interrupções no fornecimento de água para execução de serviços de manutenção. Esses serviços podem ser programados, para execução de manutenções preventivas, ou podem emergenciais, para o caso onde houver uma parada no equipamento resultante de uma quebra, incorrendo em uma manutenção corretiva. Então, dada uma região que tem um abastecimento já limitado, existe ainda uma probabilidade de haver uma manutenção durante o período preestabelecido para o seu fornecimento, obrigando-a a permanecer mais tempo sem água.

Segundo os gestores entrevistados, existe uma grande preocupação ao se definir como e quando serão realizadas as manutenções nas diferentes regiões. O fato de uma região ser abastecida por poços dificulta a manutenção pelo fato de uma parte dos equipamentos estarem submersos no poço. Numa situação de quebra do conjunto motor-bomba, um grande tempo é demandado para a execução de uma ação corretiva, dado que há a necessidade de retirar este equipamento que está instalado a uma profundidade muitas vezes maiores que 50 metros, além de ter que instalá-lo novamente. O serviço pode então deixar o poço indisponível por várias horas, prejudicando os consumidores. Além disso, manutenções corretivas têm implicações não só na disponibilidade dos equipamentos, mas também no custo para tal: para o serviço de troca

de uma bomba, são demandados grandes volumes de mão-de-obra e equipamentos. Segundo os gestores, uma manutenção corretiva pode custar mais de cem vezes o valor de uma atividade de prevenção. Além disso, as atividades de manutenção preventiva podem ser realizadas de tal forma que seja evitada ao máximo a ocorrência de uma quebra.

Do parágrafo anterior surge a seguinte questão: como programar a execução dos serviços de manutenção preventiva? Se as manutenções forem realizadas com um espaço muito curto de tempo, ou seja, muito frequentemente, haverá sérias implicações em relação à disponibilidade do equipamento para o fornecimento de água, além de sair mais caro que deixar o equipamento funcionar até que pare por completo. Caso se deixe o equipamento por muito tempo sem uma prevenção, é esperado que a probabilidade de uma quebra ocorrer aumente, levando então a uma maior chance de haver um custo elevado. Essas características conferem o aspecto de conflito entre essas duas questões, daqui para frente chamadas de critérios. Conclui-se então que faz-se necessário definir um intervalo de tempo entre as manutenções preventivas de tal forma que se atinja níveis desejáveis, na medida do possível, de uma relação entre o custo da empresa de abastecimento com as manutenções e a disponibilidade do poço para fornecimento de água.

A forma como esses critérios podem ser avaliados dependem do tipo de política de manutenção adotada e, obviamente, da percepção da pessoa responsável sobre o assunto. Neste trabalho, a política de manutenção escolhida da literatura foi a mais próxima possível da realidade vivida pela empresa de abastecimento: O equipamento segue uma distribuição de tempos de falha, cuja função é determinada a partir dos dados fornecidos pela própria empresa, e eventualmente será realizada uma manutenção preventiva que retornará o equipamento para um estado de tão bom quanto novo. Assim, entende-se esse processo como um ciclo que se reinicia a cada ocorrência de uma atividade de manutenção (Cavalcante e Almeida, 2007; Cassady e Kutanoglu, 2003)

Em relação às preferências do decisor, este trabalho a estuda com base na Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). No contexto de atividades de manutenção, o MAUT já foi trabalhado em (Almeida, 2012; Ferreira et al, 2013). No entanto, o contexto e os critérios considerados nos trabalhos anteriores são diferentes dos abordados no presente trabalho. Um outro motivo para escolha dessa metodologia é o fato do MAUT ser bastante específico para análise em situações de risco, ou seja, com eventos probabilísticos. (Keeney e Raiffa, 1976).

Baseando-se na situação descrita anteriormente, o capítulo 2 traz a base conceitual do trabalho, com o entendimento suficiente para compreensão de todo o texto e para localizar o leitor dentro do contexto e dos termos relacionados ao abastecimento de água. O capítulo 3 traz

a revisão bibliográfica do assunto específico tratado aqui, trazendo desde textos mais antigos até o Estado da Arte da problemática de engenharia de manutenção. No capítulo 4 é realizada uma descrição sucinta da problemática, desde a localização até o atual funcionamento da gestão local. No capítulo 5 são realizados os ajustes necessários às distribuições de probabilidade de falha, bem como as medidas de confiabilidade e taxa de falha, onde são traçados comentários acerca do comportamento dos equipamentos. O capítulo 6 realiza a abordagem multicritério do assunto, baseada no MAUT, realizando a elicitação de funções utilidade para cada um dos critérios, bem como sua agregação e a otimização para então obter o intervalo ótimo entre as manutenções. As considerações finais são dadas no capítulo 7.

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar o intervalo ótimo para realização de manutenções preventivas em bombas para abastecimento de água através da Teoria da utilidade Multiatributo, considerando os critérios e preferências de um gestor de manutenção.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Entrevistar os gestores de manutenção para compreender a forma como tomam decisões em relação a equipamentos para abastecimento de água e estabelecer os critérios a serem considerados;
- Determinar os intervalos entre manutenções definidos a partir dos diferentes critérios individualmente;
- Elicitar as preferências dos gestores considerando situações de risco para definir as funções utilidade;
- Agregar funções utilidade numa única função e maximizá-la para encontrar um calendário ótimo de manutenções;
- Comparar os intervalos obtidos com aqueles praticados pela companhia de abastecimento de água.

2 BASE CONCEITUAL

2.1 Sistemas de distribuição de água

As funções básicas dos operadores dos sistemas de abastecimento de água são as atividades que compreendem os serviços de captação, adução e tratamento de água bruta, além da adução, reserva e distribuição de água tratada aos usuários. No Brasil, as empresas responsáveis pela distribuição de água realizam também a coleta, transporte e tratamento de esgoto sanitário, inclusive a sua disposição final no corpo receptor.

Distribuição de água é um tema tradicional e abordado em diferentes áreas de estudo. As definições de um sistema de distribuição de água são bem consistentes na literatura. Segundo Martins (1987), um sistema de distribuição de água é constituído por um conjunto de condutos assentes nas vias públicas, junto aos edifícios, com a função de conduzir a água para os prédios e os pontos de consumo público. Dantas (1999) define como um conjunto funcional de obras, instalações, tubulações, equipamentos, acessórios e serviços, destinados a fornecer água potável, em condições de regularidade e segurança. Guerra (2013) se refere como um sistema de tubulações e elementos acessórios instalados em via pública, terrenos da própria entidade ou em outros sob concessão especial, cuja utilização interessa ao serviço público de abastecimento de água potável.

2.1.1 Principais componentes de um sistema de distribuição de água

Um sistema é composto de vários componentes. Os principais são as estações de captação localizadas em mananciais e barragens, os reservatórios, as estações de tratamento, as estações de bombeamento ou estações elevatórias, as adutoras e as redes de distribuição. Segundo a NBR 12218, rede de distribuição é a parte do sistema de abastecimento formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas. As redes possuem subcomponentes que são a base dos sistemas de distribuição de água. São as construções civis, equipamentos elétricos e eletromecânicos, acessórios, instrumentação e equipamentos de automação e controle (Souza, 2001). São exemplos desses subcomponentes tubulações, válvulas, bombas, tanques, hidrômetros, dentre outros equipamentos.

As tubulações e suas interligações são os elementos mais abundantes numa rede e apresentam-se como o maior investimento em capital de uma rede de distribuição de água

(Mays, 1999). Os tubos são cilíndricos e possuem diâmetro constante em sua extensão. Podem ser fabricados em diferentes comprimentos e diâmetros além de serem constituídos de diferentes materiais como ferro fundido, aço carbono, concreto reforçado, fibrocimento, policloreto de vinila (PVC), polietileno ou fibra de vidro. As NBRs 12218 e 12215 estabelecem os padrões para elaboração de projetos hidráulicos de redes de distribuição e de adução de água potável para abastecimento público. As tubulações ou condutos que formam a rede de distribuição podem ser classificadas em condutos principais, que são os de maior diâmetro e responsáveis pela alimentação dos condutos secundários. Enquanto que os condutos secundários são os de menor diâmetro e abastecem diretamente os pontos de consumo.

As válvulas possuem a função de estabelecer as condições de projeto das redes de distribuição pelo controle da vazão e da pressão, conseqüentemente. Há diversos tipos de válvulas aplicáveis a estes sistemas. O tipo mais comum são as válvulas reguladoras de pressão ou redutoras de pressão (VRP) que têm a função de reduzir a pressão d'água em sua saída. As VRPs são reguláveis e servem para manter constante a pressão da rede, ajustando-se ao consumo. A regulação pode ser feita mecanicamente (manual) ou eletronicamente. No entanto, este tipo de válvula permite a passagem nos dois sentidos. Caso exista uma condição que favoreça um fluxo reverso na rede, ou seja, uma pressão maior à jusante que à montante atuarão as válvulas de retenção. Além de evitar o fluxo reverso, as válvulas de retenção evitam o conhecido golpe de aríete, um fenômeno causador de pressões momentâneas extremas devido a alguma perturbação que pode levar a falhas nos componentes da rede, inclusive rupturas nas tubulações (Twyman e Twyman, 2009). Outro importante tipo de válvula são as válvulas de fechamento ou de bloqueio. Estas possuem apenas duas configurações: aberta ou fechada. Este tipo de válvula é utilizado para realização de manobras na rede com interrupção do serviço como serviços de manutenção ou desvio do fluxo da água para diferentes localidades.

O armazenamento de água em sistemas de distribuição é necessário para equalizar a descarga das bombas para o mais próximo possível do ponto ótimo em eficiência (Walski, 1996). Os tanques ou reservatórios permitem armazenar água para atender às variações de demanda, atender às demandas de emergência e manter a pressão mínima ou constante na rede. O reservatório pode ser posicionado de forma a suprir as horas de maior consumo e ainda contribuir para diminuir os custos com a rede de distribuição. E ainda permitem a continuidade do abastecimento quando é necessário interrompê-lo para manutenção em unidades como captação, adução e estações de tratamento de água. Podem também ser dimensionados para permitir o combate a incêndios, em situações especiais, em locais onde o patrimônio e

segurança da população estejam ameaçados. Os reservatórios podem ser construídos em diversos materiais: alvenaria, concreto, aço, fibra de vidro, madeira. O mais frequente no Brasil ainda é o emprego de concreto armado. No entanto, é importante salientar, que é sempre possível buscar uma solução simplificada que atenda às orientações técnicas e que ao mesmo tempo diminua os custos com a construção de um reservatório (Sanesul).

As bombas são utilizadas para aumentar a energia nos sistemas de distribuição de água, pelo aumento da pressão em sua jusante. Há diferentes tipos de bombas: cinéticas, de deslocamento positivo, tipo turbina, centrifugas, horizontais e verticais. O tipo de bomba utilizado mais comumente na distribuição de água é a bomba centrífuga.

2.1.2 Tipos de redes

O traçado dos condutos principais devem levar em consideração vários fatores, dando preferência às suas instalações em ruas sem pavimentação ou com pavimentação menos onerosas, ruas com menor intensidade de trânsito, proximidade de grandes consumidores bem como de edificações que devem ser protegidas contra incêndios (Martins, 1987).

Em geral, podem ser definidos três tipos de redes de distribuição conforme a disposição dos condutos principais:

- 1) Redes em espinha de peixe: condutos traçados como uma ramificação a partir de um eixo central.

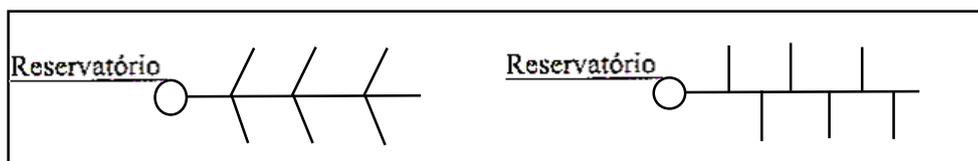


Figura 2.1 Redes em espinha de peixe (Adaptado de Martins, 1987)

- 2) Redes em grelha: os condutos principais são interligados em uma extremidade por outro conduto principal, seguindo um caminho aproximadamente paralelo

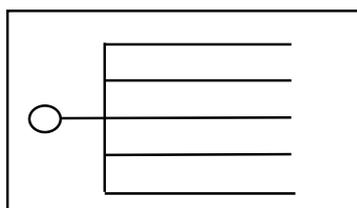


Figura 2.2 – Rede em grelha (Martins, 1987)

- 3) Redes malhadas: são aquelas em que os condutos formam circuitos ou anéis lembrando a disposição de uma malha. Segundo Martins (1987), é um tipo de rede que geralmente apresenta uma eficiência superior, comparando-se com os tipos anteriores.

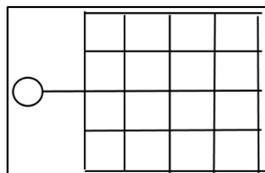


Figura 2.3 – Rede em malha (Martins, 1987)

Nas redes espinha de peixe e ramificadas, a circulação de água nos condutos ocorre em um único sentido, partindo do reservatório para as extremidades. Uma interrupção acidental ou programada em um conduto mestre prejudica sensivelmente as áreas à jusante deste ponto, ou seja, ficam sem abastecimento. Ao passo que, nas redes malhadas, devido a formação dos circuitos, a eventual interrupção não ocasionará tais transtornos. Neste caso, a água pode efetuar diferentes caminhos para outros condutos como visualizado na Figura 2.4.

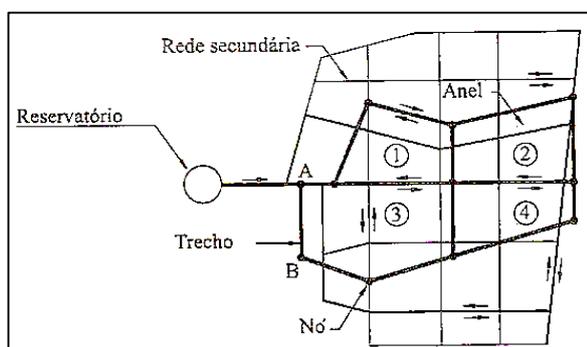


Figura 2.4 – Sentido do fluxo da água numa rede malhada (CESEC, 2010)

Redes mistas podem surgir pela união das características dos tipos de redes citados.

2.1.2.1 Setorização das redes

A grande extensão das redes de distribuição de água com suas numerosas derivações e conexões necessita de uma setorização, ou seja, a sua divisão em setores e subsetores com a finalidade de se ter um melhor gerenciamento do sistema de distribuição (Gonçalves e Lima, 2007). A setorização trata-se de subdivisões das regiões que recebem a água da mesma unidade de produção, criando-se microrregiões que têm sistemas de abastecimentos independentes, ou

seja, um setor é uma região onde é possível isolar o abastecimento sem afetar outras áreas da rede. Segundo a NBR 12218, um setor deve abranger de 600 a 3.000 pontos consumidores numa área de 40.000m² a 200.000m². A extensão da rede deve ser de 7.000m a 35.000m. Além disso, a norma estabelece que o isolamento do setor de manobra deve ser feito pelo acionamento do menor número de válvulas, para facilitar a manutenção e diminuir a região atingida por interrupção do serviço, no caso da manutenção.

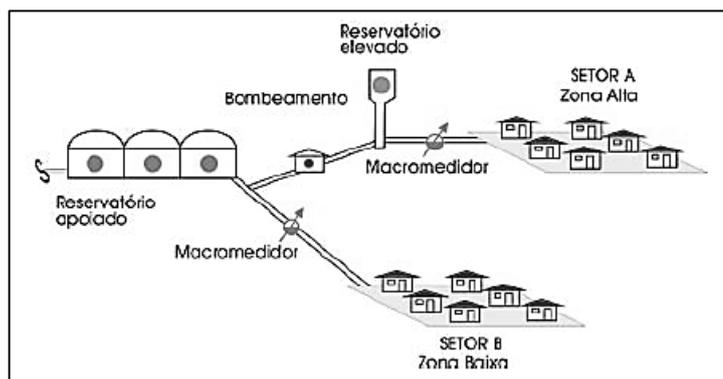


Figura 2.5 – Setorização clássica em sistemas distribuidores de água
(Gonçalves e Lima, 2007)

A setorização representada na Figura 2.5 atende a dois setores (A e B). O primeiro é abastecido pelo reservatório elevado (zona alta) e o segundo pelo reservatório apoiado (zona baixa). Os dois setores devem ter macromedidores na entrada assim como hidrômetros para os consumidores finais, viabilizando assim a compatibilização entre a macromedição e a micromedição e, por consequência, índices de perdas confiáveis e o próprio gerenciamento.

2.2 Abastecimento via poços

Um aquífero é definido como sendo uma unidade geológica permeável e saturada que pode transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos ordinários, de forma a suprir diversos poços (Diniz & Michaluate, 2002). Existem três tipos básicos de aquíferos de acordo com a formação rochosa na qual está contido:

- Aquíferos granulares ou porosos: aqueles em que a água está armazenada e flui nos espaços entre os grãos em sedimentos e rochas sedimentares de estrutura granular;
- Aquíferos fissurais: aqueles nos quais a água está presente nas fraturas e fendas das rochas cristalinas;

- Aquíferos cavernosos: aqueles nos quais a água se faz presente em cavidades produzidas pela dissolução causada pela água.

Quando a superfície que limita a zona saturada dos aquíferos coincide com o lençol freático eles são chamados aquíferos livres. Quando o aquífero encontra-se entre duas camadas impermeáveis, diz-se que está confinado. Nessa condição, a água está sob pressão superior à pressão atmosférica. O aquífero nesse caso é denominado aquífero confinado ou artesiano. O poço que capta esses tipos de aquífero é chamado poço artesiano porque o seu nível d'água está acima do lençol freático. Esse nível d'água é denominado nível artesiano. Quando o nível artesiano eleva-se acima da superfície do solo o poço é chamado surgente ou jorrante (Capucci et al, 2001). A Figura 2.6 esquematiza os poços que podem ser perfurados em aquíferos artesianos, em função da posição relativa entre o nível artesiano e o nível do solo.

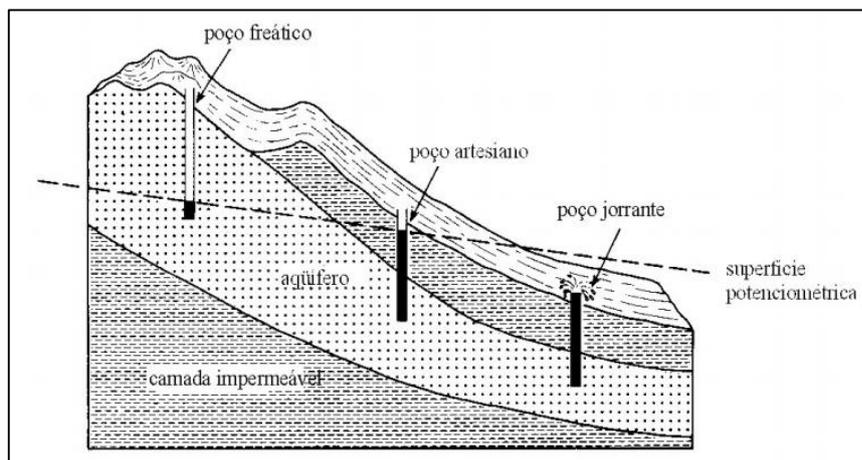


Figura 2.6: Aquífero artesiano e poços (Diniz e Michaluate, 2002)

Desta forma, quanto o poço é do tipo freático ou artesiano, há a necessidade do uso de bombas para a captação de água, cujas especificações dependerão das características do poço, em especial a profundidade e o volume de água captado (Diniz & Michaluate, 2002). Com o uso de bombas, a água retirada pode ser elevada até um reservatório, para então ser distribuído ou ainda ser injetado diretamente na rede de abastecimento, seguindo direto para os consumidores.

A obtenção de água de poços é um dos meios pelos quais se é possível obter água para o abastecimento de áreas urbanas e rurais não servidas por sistemas públicos de abastecimento. No entanto, segundo a Superintendência de Manutenção e Produção da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa), dentro da Região Metropolitana do Recife (RMR), há bastante tempo esta opção faz parte do sistema público de abastecimento, de forma que,

atualmente, somam-se cerca de 200 poços apenas nesta região, fazendo com que a água chegue em áreas não contempladas pela rede proveniente dos principais reservatórios que servem a região. Estes poços têm uma participação estimada em 15% de todo o sistema de abastecimento da região (Montenegro et al, 2009). Além disso, Costa et al apud Montenegro et al (2009) avaliaram em cerca de 12.000 o número de poços públicos e privados existentes só na região de Recife. Assim, os poços surgem como uma opção para abastecimento urbano em regiões onde os aquíferos subterrâneos são volumosos.

2.3 Operação e manutenção em sistemas de distribuição de água

Como todo sistema complexo, a distribuição de água deve ser operada de tal forma que sejam alcançados os requisitos mínimos do serviço. No Brasil, as agências reguladoras fiscalizam a prestação de serviços públicos praticados pela iniciativa privada e estabelece regras para o setor. No caso da distribuição de água, a Agência Nacional de Águas (ANA), vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) é a responsável pela implementação e coordenação da gestão dos recursos hídricos, além da regulação do acesso à água (ANA-Agencia Nacional de Águas). Os estados brasileiros também possuem agências reguladoras. Tão logo, as empresas de saneamento devem realizar sua operação tanto de distribuição de água como de esgotamento sanitário de maneira que sejam atendidas as exigências do poder que lhe concedeu a operação do serviço. Segundo a Agência, a empresa responsável pela distribuição de água pode ser autuada caso seja omissa com a realização das atividades que lhe são delegadas.

2.3.1 Gestão da operação

Os transtornos causados aos usuários pela falta de água são bastante desagradáveis. A situação piora quando a falta no abastecimento se dá em regiões com maior presença de prestadores de serviços essenciais como hospitais e escolas. No entanto, além de ficar atenta ao resultado do serviço prestado ao consumidor, a empresa possui várias outras variáveis importantes cujos valores são cruciais para um bom desempenho do sistema. Walski (1996) apontou três objetivos da operação de um sistema de abastecimento de água:

- 1) Maximizar a confiança do sistema, que é alcançada mantendo-se a máxima quantidade possível de água armazenada para casos de emergência como quebras de tubulações e incêndios;

- 2) Minimizar o custo de energia, obtido pela operação de bombas o mais próximo possível do ponto ótimo de eficiência da bomba;
- 3) Manter o padrão de qualidade da água, que envolve principalmente o tempo que a água passa dentro dos reservatórios. Quanto maior a flutuação do volume dos tanques melhor, pois a água do tanque mantém-se sempre renovada.

Segundo Chase (1999), para operar um sistema de distribuição de água é necessário ficar atento às medidas de performance do sistema, em geral, expressas em termos de pressão, vazão ou níveis dos tanques. Para isso são instalados sensores em pontos estratégicos da rede cujos sinais são enviados às salas de controle. Se for percebido que uma dessas variáveis não está dentro de seus limites aceitáveis, uma ação apropriada deve ser tomada. Porém, há problemas que compreendem várias zonas de pressão, cada uma com múltiplos reservatórios e estações de bombeamento. Deve-se considerar também que as zonas de pressão podem ser conectadas hidráulicamente, onde ações tomadas em uma zona de pressão podem afetar as outras zonas. E finalmente, as operações de distribuição de água são dependentes do tempo, ou seja, há um espaço de tempo desde quando uma ação é tomada até que esta surta efeito. Com base nisto, é necessária muita perícia para operar um sistema, especialmente em grandes e complexas redes.

Ressalta-se também que o acionamento de alguns equipamentos é feito manualmente e outros automaticamente. No controle manual, os componentes do sistema são manobrados por operadores locais, que possuem pouca ou nenhuma informação sobre o restante do sistema. O controle automático possui a mesma simplicidade, muitas vezes sem a necessidade do operador humano (reservatórios controlados por boias, estações elevatórias operadas por pressostatos, etc.). O controle automático programado é baseado em Controladores Lógicos Programados (PLC). Quando o controle é centralizado, o processo de operação fica a cargo de uma central de controle, que se baseia em dados obtidos do sistema através de rádio, telefone ou telemetria. O controle pode ser exercido diretamente por operadores locais que recebem ordens da central ou por um operador central que controla remotamente os elementos do sistema. No entanto, independente da forma de operação utilizada, o que acontece na maioria dos sistemas é que as regras de operação são estabelecidas de maneira empírica e visam, primordialmente, à garantia da continuidade do abastecimento público e a minimização dos custos fica como segundo plano. (Cunha, 2009).

Buzeti (2000) relatou que no Brasil ainda faltam modelos de gerenciamento nas empresas de distribuição, que em muitos casos assumem um papel restrito e passivo de intervir no sistema apenas quando há falha. O autor apresenta um modelo de gestão baseado na Gestão pela

Qualidade Total (GQT). Sob esta mesma visão, Dalbem (2000) mostrou que a introdução de um modelo de gerenciamento da rotina da operação calcada na introdução de um software de gerenciamento no controle central da operação do sistema leva a resultados bastante positivos, dentre os quais:

- Melhoria na qualidade do abastecimento;
- Redução de custos operacionais;
- Preservação ambiental;
- Redução dos índices de perdas d'água;
- Melhoria na qualidade do produto final;
- Aumento do faturamento.

Todos os itens listados acima são de grande importância para aqueles que gerenciam a distribuição de água. São critérios que precisam ser pensados e as decisões tomadas com cautela, pois alguns deles são altamente correlacionados. Melhorar a qualidade do abastecimento pode implicar no aumento dos custos operacionais. Isto decorre da necessidade de mais operadores, custo com energia elétrica, obras para ter uma maior setorização da rede, etc. Da mesma forma, as perdas de água são um grave problema tanto no âmbito financeiro quanto no ambiental, mas os investimentos para redução deste índice são elevados, portanto precisam de planejamento adequado (Fontana, 2012).

A equipe de planejamento da operação geralmente define as regras de controle ou de operação dos sistemas baseada em informações e experiências anteriores e no conhecimento do estado atual do sistema. Verifica-se que o trabalho no setor de operações em um sistema de abastecimento requer decisões eficientes em tempo real. Segundo Zahed (1990 *apud* Cunha, 2009), para que se possa otimizar as regras operacionais de um sistema de distribuição de água são necessárias a definição clara dos objetivos a serem alcançados, o conhecimento do sistema e de dados para previsão e a disponibilidade de um modelo para otimização dessas regras.

2.3.2 Gestão da manutenção

A gestão ineficiente da manutenção em sistemas de abastecimento de água pode levar ao mal funcionamento dos equipamentos, acarretando excesso de manutenção em alguns casos bem como na falta de manutenção em outros. No entanto, os estudos e investimentos neste tipo de serviço público têm geralmente focado na expansão e no aumento da qualidade dos serviços oferecidos. A pressão para fornecer água para mais pessoas é particularmente intensa no setor

de abastecimento de água (Trojan, 2012). Como resultado, novas instalações tendem a receber maior prioridade em termos de orçamento, de operação e de manutenção.

Segundo Fontana (2012), para realizar uma manutenção adequada, a empresa abastecedora de água precisa formular seu plano de manutenção no qual são estabelecidas as possíveis ações a serem tomadas quando for realizar o serviço de acordo com as não conformidades encontradas, assim como devem ser estabelecidos os procedimentos legais necessários.

Num contexto geral, a manutenção é geralmente dividida em manutenção corretiva, preventiva e preditiva. Em redes de distribuição de água, dificilmente encontra-se a manutenção preditiva. World Bank (2001) aponta os principais tipos de manutenção encontradas:

- *Manutenção preventiva ou de rotina*: inclui inspeção para detecção de vazamentos, pesquisa para detecção de ligações clandestinas, substituição de medidores de consumo, troca de tubulações ultrapassadas, dentre outras atividades. São realizadas de forma contínua em tempos preestabelecidos, de acordo com as considerações racionais e estudos realizados sobre o sistema.
- *Manutenção corretiva*: é necessária quando a manutenção preventiva não foi suficiente, após acidentes decorrentes do envelhecimento e degradação do sistema. Todas as intervenções são analisadas e as causas de mau funcionamento ou quebra registradas, de forma a orientar as decisões para aquisições futuras e ajudar a decidir se parte ou a totalidade de uma rede deve ser reabilitada ou totalmente substituída.

2.3.2.1 Manutenção em poços para distribuição de água

Os problemas que um poço para distribuição de água pode enfrentar podem ser de diversas naturezas. De modo geral, para efeito de análise, os problemas que ocorrem em poços podem ser classificados como de origem mecânica, hidráulica e de qualidade da água. Na prática esses processos atuam de forma combinada, tornando difícil a identificação do fator predominante (Jorba & Rocha, 2007). Os problemas de natureza mecânica são as obstruções dos filtros, a produção de areia, a deterioração da estrutura do poço e defeitos no equipamento de bombeamento. Os defeitos na bomba, podem ter sua causa elétrica também.

Os problemas de natureza hidráulica são entendidos como aqueles associados à queda de produção de água e à diminuição da vazão de bombeamento. A queda de produção de um poço tem, em geral, as seguintes causas (Jorba & Rocha, 2007):

- Taxa de bombeamento superior à taxa de recarga do aquífero;

- Taxa de bombeamento superior ao limite de produção do poço (superbombeamento);
- Interferências provocadas por poços vizinhos;

Segundo a equipe de manutenção de poços da Compesa, os problemas hidráulicos detectados nos poços estão diretamente relacionados ao estado da rede de distribuição. Segundo eles, a detecção de problemas na rede, como estouro de tubulações e outros vazamentos, também é proveniente da análise do estado da bomba. Pois, quando há uma grande perda de água na rede, a pressão na saída da bomba cai drasticamente.

Por fim, durante a exploração podem surgir problemas de corrosão ou de incrustação no poço, no aquífero e no sistema de bombeamento, geralmente causados por mudanças nas características físico-químicas e bacteriológicas da água. Estas modificações podem estar associadas aos seguintes fatores (Jorba & Rocha, 2007):

- Influência das condições de bombeamento da água, alterando o estado natural de equilíbrio físico-químico;
- Expansão do cone de rebaixamento, atingindo zonas com água de composição físico-química diferente;
- Incrementos acentuados de recarga no aquífero;
- Contaminações produzidas durante a operação e manutenção do poço.

Considerando os itens listados, independente da natureza do problema, é necessário que seja criado um programa de manutenção preventiva ou de rotina que inclua a inspeção dos fatores ou índices indicativos de problemas.

2.4 Distribuições de probabilidade

Uma função cujo valor é um número real determinado por cada elemento em um espaço amostral é chamado de variável aleatória (VA). Isso equivale a descrever os resultados de um experimento com esses números, que possibilita um melhor tratamento matemático, inclusive com o uso de parâmetros específicos (Bussab e Morettin, 1987). Quando se trata de modelos de taxas de falhas dependentes do tempo, o modelo de falhas devido ao desgaste, ou seja, devido à idade, deve considerar a influência do tempo nesse processo (Cavalcante, 2011). Ou seja, deseja-se estudar como estão distribuídas as frequências dos tempos de vida dos equipamentos em função do tempo.

Chama-se função densidade de probabilidade de uma variável aleatória X a função $f(x)$ que atenda às seguintes condições (O'Connor, 1985):

- a) $f(x) \geq 0$ para $a < x < b$;
 b) $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

A seguir são mostradas algumas das distribuições mais utilizadas para essas situações:

- Distribuição Normal

É empiricamente utilizada para ajustar muitos tipos de dados como dimensões, aspectos físicos e naturais, além de dados sobre a vida de equipamentos. Essa função pode ser aplicada quando cada valor de seus dados corresponde a uma soma de contribuições randômicas (Montgomery e Runger, 2012). É aplicada para produtos cujo fim de vida se dá predominantemente devido às falhas por desgaste ou idade. A função de densidade de probabilidade é definida na equação 2.1.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde os parâmetros desta distribuição são a média μ e o desvio padrão σ , que devem ter as mesmas unidades que t . O gráfico desta função pode ser visualizado na Figura 2.7:

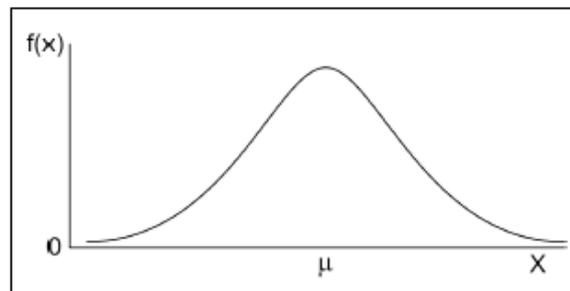


Figura 2.7: Função densidade de probabilidade normal

Numa outra ocasião, os logaritmos dos tempos de falhas podem estar distribuídos normalmente. Nesta situação pode-se afirmar que os tempos de falha estão distribuídos numa log-normal. Segundo (Martz & Walter, 1982), esta curva é apropriada para a situação em que as falhas se dão predominantemente muito cedo, ou seja, corresponde a primeira parte da curva da banheira, conhecida como a etapa de mortalidade infantil. A sua distribuição de densidade pode ser dada pela equação 2.2.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\ln t - \xi)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde $\xi = E(\ln t)$ e $\sigma^2 = \text{var}(\ln t)$. A Figura 2.8 mostra o gráfico desta função.

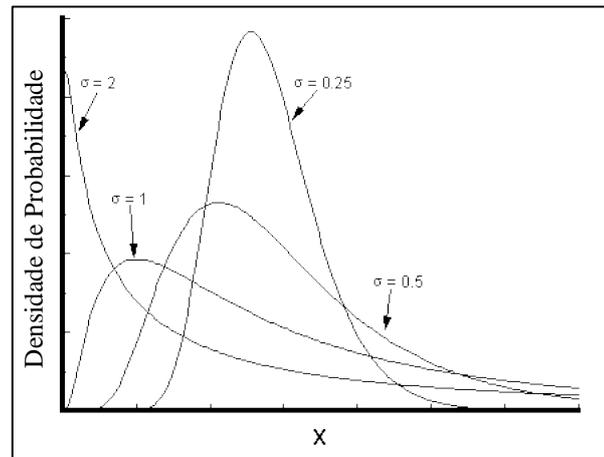


Figura 2.8: Distribuição log normal para vários desvios padrão

- Distribuição exponencial

A distribuição exponencial descreve sistemas com taxas de falhas constantes. Na equação 2.3 tem-se a função distribuição de probabilidade (Lewis, 1994 apud Sellitto, 2005).

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Na qual λ representa a taxa de falha e t indica o tempo até a falha. A distribuição exponencial geralmente é aplicada em sistemas complexos não redundantes ou sistemas complexos com taxas de falhas independentes. Também pode ser aplicada em sistemas com dados de falhas mostrando causas muito heterogêneas, sistemas de vários componentes ou ainda sistemas de vários componentes com substituições antes de falhas devido à manutenção preventiva (Sellitto, 2008). A Figura 2.9 mostra distribuições exponenciais para diferentes valores de λ .

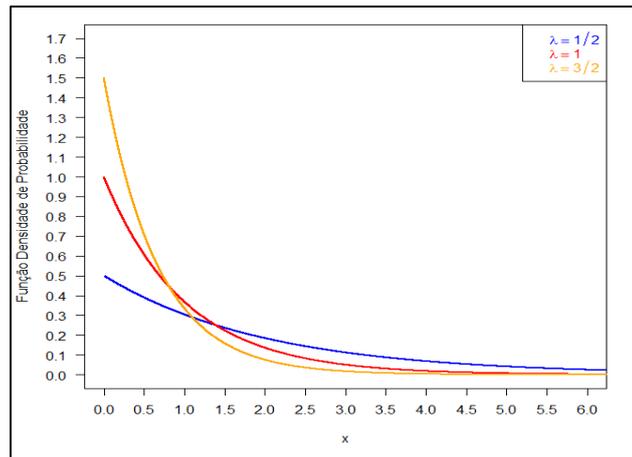


Figura 2.9: Distribuições exponenciais

- Distribuição de Weibull

Apresentada por Weibull em 1951, é uma distribuição de probabilidade flexível a qual permite descrever taxas de falha constantes, crescentes e decrescentes, sendo uma das mais empregadas em engenharia de confiabilidade. Ajustar dados de uma variável aleatória contínua a uma distribuição Weibull consiste em determinar os parâmetros de forma (β), adimensional, e de escala (η), que possui a mesma unidade da variável independente. A forma mais geral de parametrizar essa distribuição é a partir de 3 parâmetros, mas como em geral se introduz sempre novas peças ao sistema, retornando a idade para 0, na maioria dos casos se admite $\gamma=0$ (Hallinan, 1993 apud Simonetti et al), obtendo a equação 2.4.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad \text{Eq. 2.4}$$

O valor esperado de uma variável aleatória que segue uma distribuição de Weibull é dado pela Equação 2.5, onde $\Gamma(x)$ é a função gamma, com $\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{x-1} e^{-y} dy$.

$$E(t) = \eta \Gamma(1 + 1/\beta) \quad \text{Eq. 2.5}$$

Como dito, a distribuição de Weibull é especial para a engenharia de manutenção e cálculo de confiabilidade devido a sua flexibilidade em modelar diversos tipos de comportamento de taxa de falha. Isto ocorre por conta da influência do parâmetro de forma, que recebe esse nome por alterar justamente a forma como a distribuição se apresenta. A Figura

2.10 apresenta de maneira genérica o formato de diversas funções Weibull para diferentes parâmetros de forma.

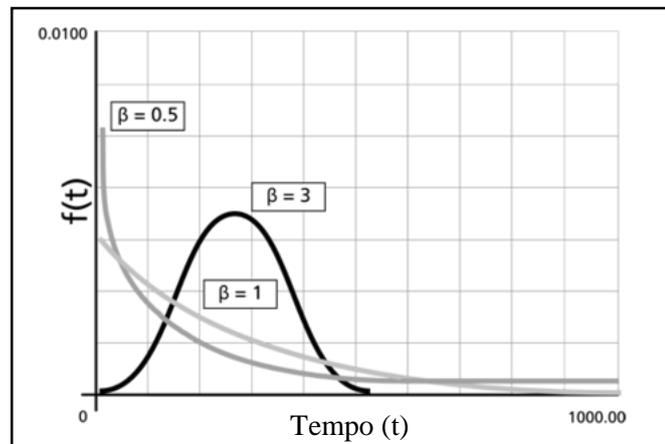


Figura 2.10: FDP de Weibull para diferentes parâmetros de forma

2.5 Engenharia de manutenção e confiabilidade

Segundo a ISO 14224 (2011), o objetivo principal da engenharia de manutenção é o de manter ou restaurar o sistema a um estado no qual seja possível executar a função requerida. Logo, a função manutenção dentro de uma organização consiste de uma forma clara em um sistema de produção cujo produto se caracteriza como um serviço, geralmente fornecido à função produção, e portanto, assim deve ser gerenciada (Almeida e Souza, 2001). No início, as atividades de manutenção eram apenas intervenções corretivas, atuando somente em sistemas falhos. A manutenção era considerada um mal necessário, que não agregava valor ao sistema produtivo. Com a inclusão de técnicas preventivas e de novos modelos de gestão, a manutenção passou a ser vista como uma atividade de agregação de valor (Ben-Daya & Duffuaa, 1995).

Atualmente é objetivo da engenharia de manutenção contribuir para os lucros de uma organização, alinhados aos objetivos da empresa. Por conta disso, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de otimizar as atividades de manutenção, destacando-se decisões sobre intervalos de manutenção preventiva, políticas de substituição, quantidade de sobressalentes, alocação e utilização de recursos, dentre outros (Sharma e Ydava, 2011). A engenharia de manutenção é o ramo da engenharia direcionado para a aplicação dos conceitos de otimização de processos e recursos de modo a alcançar uma melhor manutenibilidade, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos (Azevedo, 2007).

Sob o enfoque da manutenção preventiva mostra-se indispensável a utilização de ferramentas quantitativas capazes de mensurar o risco de falha de um dado componente. Confiabilidade pode ser definida como sendo “a probabilidade de um item desempenhar

satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo predeterminado” (Freitas e Colossimo, 1997 apud Simonetti et al). Uma vez que a confiabilidade e o tempo de falha de um dado componente são eventos complementares, fica evidente a relação entre o estudo de confiabilidade e o sucesso da manutenção preventiva.

Matematicamente, a confiabilidade é descrita conforma a Equação 2.6:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad \text{Eq. 2.6}$$

Onde $R(t)$ é a confiabilidade; $f(t)$ é a função da densidade de probabilidade (f.d.p.) e t é o período de vida útil. Dentre as funções de densidade de probabilidade existentes, a distribuição Weibull é a mais utilizada em estudos de confiabilidade, análise de sobrevivência e em outras áreas devido a sua versatilidade. Uma distribuição é definida matematicamente por sua equação de função de densidade de probabilidade (f.d.p.).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Sendo a Equação 2.7 uma função de distribuição de Weibull, onde $t > 0$; $\beta > 0$ e $\eta > 0$. t é a variável que define o período de vida útil podendo ser expresso em distância percorrida (km), em número de ciclos (n) ou em tempo de funcionamento (h); β é o parâmetro de forma e η é o parâmetro de escala. O termo $\frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1}$ é chamado de taxa de falha de Weibull ou função risco de Weibull.

A adaptabilidade da distribuição de Weibull é a sua principal característica e o que a torna preferida nos estudos de engenharia de manutenção (Nelson, 1982). Com a modelagem do ambiente através do modelo de Weibull é possível fazer uma descrição do comportamento das peças instaladas (Sellito, 2005).

- $0 < \beta < 1$: indica que as falhas estão acontecendo prematuramente. Pode ser devido à falha de projeto;
- $\beta = 1$: taxa de falha constante. Significa que as falhas devem estar ocorrendo por causas aleatórias. Neste caso a distribuição de Weibull adapta-se a uma distribuição exponencial;
- $\beta > 1$ taxa de falhas crescente com o tempo. Nesta situação, as falhas podem ser atribuídas ao envelhecimento do equipamento, que é mais acentuado quanto maior for o valor de β .

A análise do comportamento da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo pode ser representada por uma curva que possui a forma de uma banheira, a curva da banheira, como na Figura 2.11. A curva representa as fases da vida características de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil. As fases estão associadas ao fator de forma β de uma distribuição de Weibull que descreva a confiabilidade do item (Sellitto, 2008).

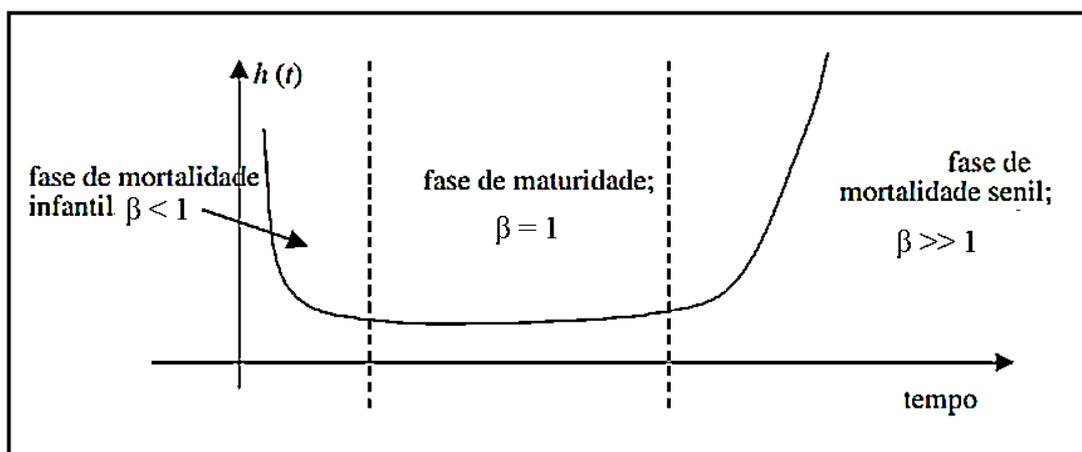


Figura 2.11: Curva da banheira e ciclo de vida dos equipamentos, onde β = parâmetro de forma (Adaptado de Sellitto, 2008)

2.6 Apoio multicritério à decisão

Segundo Almeida (2011), pode-se dizer que um problema de decisão multicritério consiste numa situação onde há pelo menos duas alternativas de ação para se escolher e esta escolha é conduzida pelo desejo de se atender a múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes entre si. Estas situações são muitas vezes representadas a partir de modelos de decisão que utilizam métodos de apoio à decisão (MCDA). Ainda de acordo com Almeida, a aplicação de qualquer método MCDA pressupõe a necessidade de se estabelecer quais os objetivos o decisor pretende alcançar, estabelecendo a representação desses múltiplos objetivos através do uso de vários critérios, também chamados de atributos.

Os métodos multicritério surgiram, diante da necessidade de resolver problemas decisórios com as seguintes características (Almeida, 2011):

- Os critérios de resolução do problema são conflitantes e em número de pelo menos dois;
- Tanto os critérios como as alternativas de solução não são claramente definidas e as consequências da escolha de uma dada alternativa não são claramente compreendidas;

- Os critérios e as alternativas que não são mutuamente exclusivas podem estar interligados de tal forma que um dado critério parece refletir parcialmente em outro critério, ao passo que a eficácia da escolha de uma dada alternativa depende da escolha de outra alternativa;
- A solução do problema depende de um conjunto de pessoas, cada uma das quais tem seu próprio ponto de vista, muitas conflitantes com os demais;
- Indefinição ou falta de clareza nas restrições do problema, podendo mesmo haver alguma dúvida a respeito do que é critério e do que é restrição;
- Alguns dos critérios são quantificáveis ao passo que outros só podem ser se for realizado um julgamento de valor com base em uma escala qualitativa.

Segundo Roy (1996), o contexto da decisão influencia na escolha do método a ser utilizado. Deve-se então considerar que tipo de problema se está tratando, classificando-o dentro de uma das quatro categorias:

- Problemática de escolha: quando se deseja decidir sobre a escolha de uma ação ou um subconjunto de ações dentre todo o espaço de ações possíveis. Segundo Almeida (2011), o problema de otimização é um caso particular deste tipo de problemática;
- Problemática de classificação: consiste na alocação de cada ação dentro de uma classe ou categoria;
- Problemática de ordenação: quando se tem o objetivo de ordenar as ações;
- Problemática de descrição: Apoiar a decisão no sentido de descrever as ações bem como o espaço de consequências.

Com base no descrito, percebe-se que os problemas de decisão sempre têm um conjunto ou um espaço de ações possíveis de serem escolhidas ou julgadas pelo decisor, um conjunto de critérios que são utilizados para avaliar as ações e um conjunto ou espaço de consequências, que representam todos os resultados possíveis da escolha do decisor. Almeida (2011) também cita outros itens que compõem os elementos básicos de qualquer método de apoio à decisão, e que devem ser levados em consideração para definição do método abordar:

- Situações de preferência: são importantes pois é a partir disto que se constrói a estrutura de preferencias do decisor em relação às alternativas. São representações formais sobre o julgamento do decisor na comparação de elementos. Relações de indiferença, preferencia estrita, incomparabilidade e sobreclassificação são alguns exemplos de relações ente elementos;
- Tipos de escala: a avaliação das ações ou alternativas pode ser dada a partir de uma escala numérica ou verbal. Medias de peso, altura, temperatura e financeiras são exemplos que

podem ser classificados a partir de uma escala numérica. No entanto, avaliações sobre gosto, qualidade de um produto e opiniões pessoais são, em geral, tratadas a partir de escalas verbais. Cada tipo de escala possui suas características e recebem tratamentos de dados diferenciados;

- Procedimentos de normalização: é uma transformação na escala de avaliação que em geral passa a utilizar o intervalo de 0 (pior avaliação) a 1 (melhor avaliação). São importantes principalmente quando se deseja agregar preferências que originalmente têm unidades diferentes;
- Família de critérios: os critérios utilizados devem ser capazes de representar todos os aspectos do problema (exaustividade) sem que haja redundâncias.

2.6.1 Famílias de métodos

Roy (1996) propõe uma classificação dos métodos que é bastante utilizada na literatura. Os métodos são divididos em três classes:

- Métodos de agregação em único critério de síntese;
- Métodos de sobreclassificação;
- Métodos interativos.

O primeiro método recebe este nome pois, para avaliação de cada alternativa ou ação, todos os critérios definidos são agrupados, seguindo regras específicas, para a construção de um único critério. Cada critério recebe, então, uma constante de escala, que, mais além de representar o grau de importância de cada critério dentro do contexto da decisão, representam o trade-off entre as situações, dando a oportunidade de pensar o quanto se deseja perder em um critério para ter um ganho em outro. Isto dependerá do julgamento de valores do decisor (Kenney e Raiffa, 1976) e confere a característica compensatória do método. Entre os vários métodos deste grupo se destacam o MAUT (Multiple Attribute Utility Theory), o VIP Analysis (Variable Interdependent Parameters) e AHP (Analytic Hierarchy Process).

Os métodos de sobreclassificação, cujo nome em textos interacionais é *Outranking methods*, podem também ser chamados de métodos de superação ou subordinação (Almeida, 2011). Segundo Vincke (1992), os métodos dessa classe utilizam a relação de preferência de sobreclassificação, que é explorada na comparação par a par das alternativas. Para tal avaliação, cada critério passa a ter um peso, que assumem a noção de grau de importância. Neste caso, os métodos são caracterizados por apresentarem avaliações não-compensatórias, além de poderem

assumir a possibilidade de incomparabilidade na estrutura de preferência do decisor através das propriedades da relação de sobreclassificação (Almeida, 2011). Nesta classe de métodos estão as famílias ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité) e PROMETHEE (Preference Ranking Organizations Method for Enrichment Evaluations).

Os métodos interativos consistem em alternar passos computacionais e diálogos com o decisor para modelagem de suas preferências. Segundo Vincke (1992), o decisor traz uma contribuição direta para a elaboração de uma solução pois este intervém no processo, dado que o diálogo é a principal ferramenta de investigação.

2.6.2 Teoria da utilidade multiatributo (MAUT)

A Teoria da Utilidade é considerada como a representação das preferências relativas de um indivíduo entre os elementos de um conjunto, usando-se números reais para representá-los. A utilidade é um modo de quantificar a satisfação de um indivíduo associado a um resultado. Para Keeney e Raiffa (1976), o objetivo da Teoria da Utilidade é o de desenvolver um modelo matemático que permita representar a desejabilidade do decisor pelos bens que poderá obter.

A Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) surgiu como uma derivação natural da teoria da utilidade, onde utilidade é uma unidade para medir preferencias. MAUT incorpora a questão do tratamento de problemas com múltiplos objetivos, podendo verificar que vários aspectos influenciam na escolha de alternativas de uma situação problema por meio da modelagem de preferencias que envolvem mais de um atributo (Almeida, 2011).

O problema do decisor consiste em escolher uma alternativa que o deixe o mais satisfeito possível com o resultado. Cada alternativa pode ser expressa na forma de um vetor (X_1, X_2, \dots, X_n) , em que cada valor de X representa a grandeza de cada um dos atributos avaliados na problemática. Como cada um desses atributos contribui de forma diferente para o resultado, devem ser consideradas as funções utilidade de cada atributo individualmente para posteriormente agregar em um único critério de utilidade. As alternativas são comparadas através do resultado gerado pelo conjunto desses atributos que, no contexto da MAUT é a função utilidade. Desta forma, para cada alternativa têm-se uma utilidade associada, que é função dos atributos ou critérios associados (Almeida, 2011), representado na Equação 2.8.

$$U(X_1, X_2, \dots, X_n) = f[U_1(X_1), U_2(X_2), \dots, U_n(X_n)] \quad \text{Eq. 2.8}$$

Desta forma, para o caso de dois atributos, x e y , ter-se-ia Equação 2.9:

$$U(x, y) = f[U_1(x), U_2(y)]$$

Eq. 2.9

A Figura 2.12 representa o espaço de consequências para o caso de dois atributos x e y . Os valores de x^* e y^* representam os valores mais desejáveis de cada atributo, enquanto que x^0 e y^0 representam os valores menos desejáveis. A utilidade no ponto mais desejável é igual a 1, ou seja $U(x^*, y^*) = 1$, dentro de uma escala de utilidade de 0 a 1, ao passo que $U(x^0, y^0) = 0$.

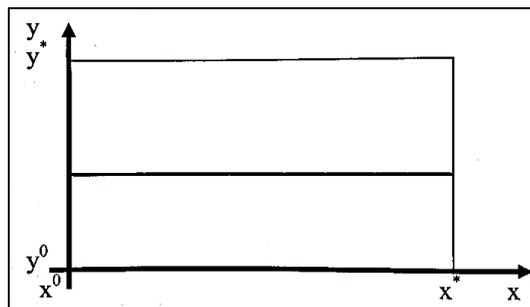


Figura 2.12: Espaço de consequências para dois atributos (Almeida, 2011)

A função utilidade é obtida através de um protocolo estruturado e fundamentado na estrutura axiomática da Teoria da Utilidade, incluindo a questão probabilística sobre a avaliação das escolhas entre diferentes consequências (Keeney e Raiffa, 1976). Um conceito importante, relacionado ao contexto probabilístico é o de loterias. $[A, p; C, 1-p]$ representa uma loteria entre as consequências A e C , onde p é a probabilidade de obter a consequência A e $1-p$ é a probabilidade de se obter a consequência C . Uma loteria pode ser representada como na Figura 2.13.

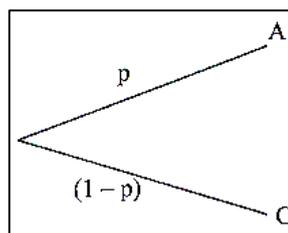


Figura 2.13: Loteria $[A, p; C, 1-p]$
(Adaptado de Keeney e Raiffa, 1976)

Considere-se uma loteria entre as consequências de maior e de menor preferência x_n e x_l : $[x_n, p; x_l, 1-p]$. Se o decisor tiver que declarar suas preferências entre esta loteria e cada consequência x_i , então é oferecida ao decisor duas opções: x_i , que é uma opção de certeza, e a

outra opção é a loteria, chamada de opção de risco. O valor de x_i para o qual existe uma indiferença com a loteria é chamado de equivalente certo.

Pra cada loteria fornecida, o decisor é estimulado a apontar um valor de equivalente certo. Esse valor, dentro da escala de valores possíveis para esta variável é associado a um valor de utilidade, dentro da escala de 0 a 1. Esses pares de pontos (equivalente certo; utilidade) gerados para várias loterias podem ser ajustados à alguma função específica, como linear ou exponencial. A função obtida pelo ajuste é, portanto, a estimação da função utilidade. Este procedimento é sugerido por Keeney e Raiffa (1976) para obtenção da função utilidade.

Para a obtenção da função utilidade multiatributo $U(x,y)$, deve-se considerar os estudos de independência em utilidade. Para cada condição de independência há uma forma analítica para função de utilidade multiatributo. A mútua independência em utilidade entre as variáveis x e y é a condição para o uso da forma analítica multilinear para esta função. Para verificar se existe a independência em utilidade, deve-se verificar se os valores dos equivalentes certos para a loterias de uma das variáveis, x por exemplo, não se alteram em relação à outra variável. Assim, pode-se descrever como na Figura 2.14, onde verifica-se valor do equivalente certo X desta loteria em relação a vários valores de y^0 .

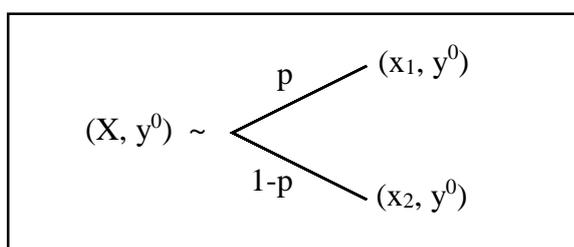


Figura 2.14: Loteria para verificação da independência em utilidade
(Adaptado de Keeney e Raiffa, 1976)

Keeney e Raiffa (1976) sugere que este processo seja feito na forma de questionamento ao decisor da seguinte forma: “se o valor da variável y é fixo em y^0 , qual é o seu equivalente certo para a loteria de probabilidades p e $1-p$, considerando os valores associados de x_1 e x_2 ?”. Supondo que a resposta seja X , pergunta-se: “o valor de X se alteraria se o valor de y se alterasse para y^* ?” Sendo a resposta positiva, verifica-se que o valor do equivalente certo X é dependente apenas do valor de x_1 e x_2 e não de y . Em outras palavras, a utilidade de x é independente do valor de y . Havendo a independência em utilidade a função utilidade multiatributo pode ser escrita como na Equação 2.10:

$$U(x, y) = k_x U_x(x) + k_y U_y(y) + k_{xy} U_x(x) U_y(y) \quad \text{Eq. 2.10}$$

Esta função $U(x,y)$ pode, então, ser trabalhada para encontrar a alternativa com o maior valor possível em utilidade, resultando conseqüentemente em um valor ou um conjunto de valores para as variáveis x e y do problema. Keeney e Raiffa (1976) apontam outras funções que possíveis de serem aplicadas quando a independência em utilidade não é encontrada.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Uma boa gestão da manutenção gera um conjunto de expectativas que podem ser utilizadas em dois sentidos: primeiramente para argumentar com os gestores da empresa sobre os investimentos em manutenção e posteriormente para ajudar no estabelecimento das metas e objetivos práticos em resultado do esforço da manutenção (Trojan, 2012). Decorrentes destas visões gerais surgem expectativas econômicas direcionadas a menores custos, menores volumes de estoques com peças reservas, economia de energia, enriquecimento da empresa e redução de perdas intangíveis. Ainda em decorrência disso, existem as expectativas de qualidade, pois a manutenção é fator indissociável da qualidade.

O que foi descrito acima também serve como base para o entendimento de como são elaboradas as funções objetivos dos problemas de otimização das atividades de manutenção. E não é particularidade dos sistemas de abastecimento de água. Sabe-se, por exemplo, que uma certificação de qualidade só é conquistada se o setor de manutenção também estiver dentro dos conformes, assim como toda a linha de produção e setores externos. Vê-se a seguir que estas visões são em geral colocadas como problema a ser otimizado. E, não diferente da otimização do sequenciamento das atividades de operação, o custo da manutenção é uma variável presente em praticamente todos os trabalhos esta área.

As pesquisas nesta área seguem duas abordagens: a primeira é o uso de modelos multicritério de auxílio à tomada de decisão, com o objetivo de escolher uma alternativa apropriada, que seja o melhor compromisso dos pontos de vista dos atores envolvidos no problema de decisão. Já a segunda linha é a simulação matemática onde busca-se o ponto ótimo que resultará numa política de manutenção baseada na minimização do custo, maximização da confiança do sistema, dentre outras variáveis constantes nas funções objetivo.

Lopes et al (2011) estimaram os riscos de falha que podem levar a uma manutenção de substituição das peças. Foi utilizada a metodologia de análise hierárquica (AHP). Os critérios escolhidos foram pressão estática da rede, coeficiente de perda de carga, velocidade, reclamação dos usuários e carga de tráfego. A avaliação dos critérios foi realiza com a opinião de especialistas, que também ponderaram os critérios selecionados. Com isso foi possível a identificação e priorização das áreas. O trabalho de Lopes mostra-se interessante para identificação dos locais para as futuras intervenções e conferir maior racionalidade, e eventual redução, na aplicação dos investimentos.

Farias et al (2013) seguem esta mesma linha de raciocínio afirmando que as decisões sobre reabilitação de redes de distribuição são complexas, não apenas pela sua importância, mas pelo elevado número de possíveis alternativas e dos critérios que podem ser usados na sua avaliação, bem como os conflitos existentes, tais como o custo das alternativas *versus* seu benefício. Com base nisso, Farias et al vão mais além, propondo um modelo de sistema de informação e decisão, que além de coletar dados e fornecer informações relevantes ao problema, auxilia o decisor, efetivamente, na tomada de decisão sobre qual alternativa de reabilitação adotar para cada problema diagnosticado, considerando os múltiplos critérios de avaliação envolvidos.

Trojan e Morais (2012) trazem uma abordagem de decisão em grupo para o problema da priorização das alternativas de manutenção em redes de distribuição de água. Este estudo incidiu sobre o uso racional dos recursos hídricos e redução de perdas de água, com base no pressuposto de que é muito mais econômico desenvolver e melhorar os sistemas existentes em vez de construir novos sistemas em paralelo com o atual. É proposto um modelo que consiste em duas fases, que agrega as preferências individuais para alcançar uma decisão de grupo. A primeira fase é baseada no método ELECTRE II, analisando as preferências individuais, enquanto que a segunda baseia-se no método de Copeland para agregar as preferências individuais. A abordagem multicritério pode não apresentar uma solução ideal para os problemas, mas, entre todas as alternativas possíveis para uma decisão, ele aponta para ao menos aquela alternativa que melhor representa as preferências das partes envolvidas.

Modelos multicritério tem sido cada vez mais utilizados nas diversas áreas de pesquisa. No assunto aqui tratado, os usos desses modelos são explorados em relação à priorização de alternativas e métodos de manutenção, identificação de áreas críticas, definição de políticas de manutenção bem como o sequenciamento de atividades, por exemplo (Morais e Almeida, 2010; Morais et al 2007, 2010; Trojan e Morais, 2012; Cunha et al, 2010; Li et al, 2011). Um dos trabalhos seminais aplicando MAUT em problemas de manutenção tratava sobre um problema na área de telecomunicações (ALMEIDA, 1993). Desde então, surgiram diversos trabalhos associando esses dois assuntos (Almeida 2001, 2002, 2005, Brito et al 2010, Baker 2010, Lin e Lin 2011). Almeida (2012) apresenta um modelo de decisão multicritério para apoiar os tomadores de decisão na escolha do melhor intervalo de serviço com base na combinação de critérios conflitantes, como confiabilidade e custo. O procedimento proposto baseia-se na Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Além disso, uma aplicação numérica ilustra a utilização do processo, com base em um estudo de caso real, obtendo resultados importantes no

que diz respeito a combinação de métodos de apoio à decisão e a engenharia de manutenção e confiabilidade.

Na literatura encontram-se alguns modelos que aplicam modelos multicritério de apoio à decisão para ajuste de uma política de manutenção definida. É o caso de Chareonsuk et al (1997). Nesse artigo são definidos rankings de alternativas possíveis para o intervalo entre manutenções preventivas em equipamentos de uma indústria de papel, sendo desenvolvido a partir do método PROMETHEE II utilizando o custo das manutenções e a confiabilidade do sistema como critérios. Cavalcante e Almeida (2007) e Cavalcante et al (2010), utilizaram a dois diferentes métodos da família PROMETHEE para ordenar as alternativas, realizando um estudo de caso numa empresa de distribuição de energia. Segundo Cavalcante e Almeida, com o PROMETHEE III a noção de indiferença entre alternativas fica mais clara para o decisor. Este trabalho ainda trata das situações as quais não se dispõe de todos os dados sobre o equipamento, apenas informações subjetivas, impossibilitando o cálculo dos parâmetros de Weibull. Este problema é solucionado com uma abordagem bayesiana.

Também com o uso do PROMETHEE II, Cavalcante e Costa (2006) detalharam a importância do uso de métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA) no contexto da definição de um intervalo entre manutenções preventivas. Este trabalho exemplifica o *tradeoff* entre os três critérios custo por unidade de tempo, confiabilidade do sistema e o tempo no qual o equipamento fica parado por conta de falhas ou intervenções programadas. Em relação a este último o paradoxo é bastante claro: se os intervalos forem curtos, o tempo gasto com as manutenções preventivas passa a ser muito dispendioso, ao passo que, se o intervalo for longo, aumenta-se consideravelmente o risco de haver uma quebra. Corriqueiramente as manutenções corretivas são mais caras e demandam mais tempo. Outras variações dos modelos podem surgir como em Cavalcante et al (2011) e no texto de Scarf e Cavalcante (2010) onde são considerados que os tempos e vida dos equipamentos têm uma distribuição dos tempos de vida não homogênea. Scarf e Cavalcante (2010) propõem um modelo em que a qualidade do serviço de manutenção é estudada, considerando a probabilidade de que defeitos também podem ser induzidos no equipamento durante a intervenção

Nafi et al (2009) trazem uma abordagem de decisão que combina o uso de modelos multicritério, algoritmos genéticos e um software hidráulico como intuito de desenvolver um modelo de suporte a decisão para renovação de condutos. O modelo foi baseado na identificação de tubulações críticas quanto ao seu estado e na inferência dos custos de manutenção. O resultado foi uma série de soluções ótimas (fronteira de Pareto) onde a escolha dentre estas soluções cabia ao gestor.

Estudos que realizam a busca do melhor sequenciamento com base em características do sistema de distribuição de água são bem mais antigos que os modelos multicritério. Em 1979, num trabalho de Shamir e Howard, foi realizada a análise de regressão para encontrar a relação da frequência de quebra das tubulações com a idade das mesmas. Da mesma forma procura-se uma relação do custo de manutenção com a idade da tubulação e assim encontra-se uma idade ótima para realização da manutenção com base na minimização dos custos. Este trabalho foi pouco robusto devido às limitações como poucos dados, negligenciamento da diferença de custos antes e após as falhas e também não levava em consideração características da rede. Ainda assim, alguns pesquisadores aprimoraram este tipo de estudo com o passar dos anos. Kleiner (1997) traz uma revisão bibliográfica bastante completa sobre esse desenvolvimento.

A estratégia de priorizar as atividades de manutenção de um sistema de distribuição de água com base na confiabilidade foi desenvolvida por Quimpo e Shamsi (1991). Usando componentes de confiabilidade da rede com base em variáveis dependentes do tempo, as probabilidades de que a água estivesse disponível em pontos de demanda no sistema foram calculadas para determinar uma “superfície de confiabilidade”. Esta superfície é utilizada para localizar áreas de baixa confiabilidade, que identificam partes do sistema que necessitam de prioridade de manutenção. Os componentes específicos que devem ser reparadas ou substituídas são determinadas usando um critério importante componente que mede o efeito global de manutenção de componentes sobre a confiabilidade do sistema. Os resultados obtidos não foram muito conclusivos mas serviram de base para outros estudos.

De suma importância é um modelo de custos que visa minimizar os custos suportados pela empresa de água. A estratégia deve assegurar que o desempenho hidráulico do sistema de reabilitação está dentro estipulações normativas. Além disso, a água entregue ao cliente deve satisfazer as diretrizes de qualidade que são colocadas sobre o produto final. O serviço também deve ser confiável, com um mínimo de interrupções, daí a necessidade de um componente de confiabilidade para o modelo de decisão (Engelhardt et al 2000).

Segundo Kwietniewski (2004), do ponto de vista das empresas que lidam com a operação e manutenção de redes de água, o parâmetro de avaliação da confiabilidade é um dos mais básicos para a avaliação da qualidade dos serviços de abastecimento de água oferecidas pelas empresas. O parâmetro básico do modelo desenvolvido foi a probabilidade de um desempenho satisfatório do sistema como uma função da sua confiabilidade. Outros parâmetros, não menos importantes, que caracterizam o modelo são a probabilidade de estado de falha, a intensidade de ocorrência de estados de falha parcial (ou aparecimento de defeito),

tempo médio de desempenho em estado satisfatório e tempo médio de o sistema em estado de falha. Este estudo encontrou resultados bastante positivos pois permitiu estabelecer em quais condições o sistema opera em estado mais satisfatório, de acordo com o desempenho verificado sob o ponto de vista dos consumidores.

Kim e Mays (1994) descreveram um método para selecionar os tubos a serem reabilitados e/ou substituídos em um sistema de distribuição de água existente e determinar o aumento da capacidade de bombeamento para que a demanda de água e requisitos de pressão em todos os nós de demanda fossem satisfeitos. Enquanto isso, são minimizados os custos totais de reabilitação e de energia. Quatro funções de custo são consideradas: o custo de substituição da tubulação, o custo de reabilitação da tubulação, custo de reparação da tubulação, e de bombeamento. A abordagem considera os *tradeoffs* entre as decisões relativas a cada tubo: substituir canos, realizar alguma manutenção no tubo antigo, ou deixar como está. A formulação matemática é um problema de programação linear inteira mista, solucionado através de do método *branch and bound*. No entanto, neste caso, o ótimo global não pode ser garantido.

Uma forma de analisar o problema em questão é com o uso de meta-heurísticas. Vários trabalhos já foram publicados com esta ferramenta. Reconhecendo a natureza multi-objetivo do processo de decisão para a reabilitação dos sistemas de distribuição de abastecimento de água, Cheung et al (2003) apresentam um estudo comparativo de dois métodos evolucionários multi-objetivo, o algoritmo genético multi-objetivo (MOGA) e o algoritmo evolutivo da força de Pareto (SPEA). As análises foram realizadas em uma rede hipotética simples para minimização de custos e exigência mínima de pressão, tratada como um problema de dois objetivos. Para o exemplo de aplicação estudado, SPEA supera MOGA em termos das frentes de Pareto produzido e o tempo de processamento exigido. No entanto, na literatura vê-se que o algoritmo genético e suas variações são de longe os algoritmos evolucionários mais utilizados (Dandy et al, 1996; Lavric et al, 2005; Hunçal et al, 2011).

O sequenciamento das atividades de manutenção e reabilitação de redes de distribuição de água foi realizado por Alvisi e Franchini (2009). As variáveis de decisão foram as intervenções a serem programadas, isto é quais tubulações e quando realizar a intervenção, bem como onde e quando realizar a busca por vazamentos. Os objetivos deste trabalho foram o de minimizar o volume de água perdido em vazamentos ao passo que também se minimizavam os custos de reparo das tubulações. Para tal foi utilizado o algoritmo genético multiobjetivo chamado de NSGA II. Neste caso, a otimização retornou como resposta não apenas uma solução, mas uma série de soluções não dominadas, chamada de Fronteira de Pareto. Em 2006,

os mesmos autores já haviam realizado um trabalho bastante similar, porem com outro algoritmo genético e realizando a otimização das funções objetivos constantes em Eq. 3.1.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N C_i \quad e \quad \text{Min } \sum_{i=1}^N V_i \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde C_i e V_i são os custos incorridos e o volume de água não distribuído, ou seja, o volume de água que ficou abaixo da demanda esperada naquele período i para todos os períodos N , sob a restrição de que o custo total deve ficar abaixo de orçamento.

Halhal et al (1999) utiliza a mesma ferramenta de Walters et al (1999) para buscar o sequenciamento ótimo das atividades de reabilitação de uma rede de distribuição de água: *Structured Messy Genetic Algorithm*. O problema também foi formulado numa análise multiobjetivo segundo as Equações 3.2 e 3.3.

$$\text{Max } f(i) = \sum_{t=1}^{\text{periodo}} w(t). \text{Beneficio}(i, t) \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$\text{Min } F(i) = \sum_{t=1}^{\text{periodo}} PV(\text{custo}(i, t)) \quad \text{Eq. 3.2}$$

Halhal et al consideram pesos relacionados às áreas onde as intervenções irão ocorrer. A definição desses pesos leva em consideração aspectos econômicos e sociais. O benefício é uma composta que leva em consideração diversos fatores. A deficiência no atendimento é o principal deles onde são descontados do benefício os períodos de tempo onde a pressão na rede de abastecimento estava acima ou abaixo da recomendada. A função do custo representa o total de custos envolvidos nas atividades de renovação, substituição, limpeza e outras atividades executadas na rede. A principal restrição deste problema foi a de que os custos não podem ultrapassar o orçamento anual. Assim como em outros casos, a otimização resultou em uma série de soluções que permitem flexibilidade na escolha da mais conveniente.

Outros trabalhos utilizando algoritmos genéticos já foram publicados. Em suma a estruturação do problema é bastante similar em termos de restrições e funções objetivo. O sequenciamento ótimo para substituição de tubos foi realizado por Dandy e Engelhardt (2001). Jin et al (2008) realiza a otimização com algoritmos genéticos não dominados, incluindo uma operação de mutação artificial induzida que acelera o tempo de convergência do solver. Já Djebedjian et al (2006) vai mais além aplicando algoritmo genético para otimizar um sistema de grande escala. Devido à complexidade do problema, houve a necessidade de simplificações, mas ainda assim permitiu que o modelo desenvolvido alcançasse resultados satisfatórios.

A forma de analisar o problema em questão nesta pesquisa trata da otimização do sequenciamento integrado da manutenção e operação das redes de distribuição de água. Desta mesma maneira assim fizeram Rebai et al (2010) cujo objetivo foi encontrar uma programação composta de postos de trabalho e as tarefas de manutenção em que a soma total dos tempos de conclusão ponderada do trabalho e os custos de manutenção preventiva fossem minimizados simultaneamente. Os autores dividiram o problema em dois subproblemas: o primeiro concerne o plano de manutenção para o qual o custo da manutenção preventiva deve ser minimizado considerando os custo de realizar a manutenção precocemente ($h_i E_i$) e tardiamente ($w_i T_i$) numa single machine ($I // \sum h_i E_i + w_i T_i$). Com isso, as disponibilidades das máquinas são obtidas, sendo possível realizar o sequenciamento da operação com base apenas no tempo em que a máquina está disponível. Assim, basta aplicar o sequenciamento de uma máquina para minimizar o tempo total de execução considerando o tempo indisponível como restrição. Este procedimento pode não ser aplicável em alguns casos. Além disso, a forma com que se realiza a divisão do problema dá a impressão que a atividades de manutenção sobrepõe a produção.

Ao contrário disto, Benbouzid-Sitayeb et (2012) executa a estratégia sequencial consistindo em duas etapas: primeiro agendando os trabalhos de produção, em seguida, inserindo operações de manutenção, tendo o cronograma de produção como uma restrição forte. Segundo os autores, as restrições impostas pelos clientes aos seus fornecedores são muitas vezes expressas em termos de tempo, o que leva naturalmente para a minimização do *makespan* (tempo desde o início da primeira até o término da última tarefa). Um fato interessante deste trabalho é que ele é um dos poucos que não otimiza os custos, leva em consideração apenas o tempo de execução.

Mamabolo e Beichelt (2004) trazem em seu texto uma revisão bibliográfica de diversos modelos de políticas de manutenção que podem ser aplicadas envolvendo o conceito de mínimos reparos. O texto traz um total de 7 políticas de manutenção, considerando outros tipos de função para descrever a distribuição dos tempos de falha além da Weibull, bem como, considerando modelos nos quais mais de um tipo de falha pode ocorrer e, conseqüentemente, havendo diferentes níveis de reparo para os equipamentos.

Aghezzaf e Najid (2008) abordam o problema da integração da produção e manutenção preventiva em um sistema composto de linhas de produção paralelas sujeito a falhas. Supõe-se que, quando uma linha de produção falha, uma reparação mínima é efetuada para restaurá-la a um estado "tão ruim quanto qualquer um desta idade". A manutenção preventiva é realizada, periodicamente, a critério do tomador de decisão, para restaurar a linha de produção para um status de "tão bom como novo". Supõe ainda que qualquer operação de manutenção, realizada

numa linha de produção de um determinado período de tempo, reduz a capacidade de produção disponível na linha durante esse período. O planejamento da produção e o planejamento da manutenção como um problema integrado é resolvido através de programação inteira mista não linear em que cada linha de produção implementa uma política de manutenção preventiva cíclica. Um procedimento heurístico baseado em Lagrangeanos é proposto para a solução do modelo.

Nesta mesma linha, Najid et al (2009) resolvem o problema da integração da produção e manutenção afirmando que o problema da produção aborda a questão da determinação dos tamanhos de lotes de produção de diversos itens. Enquanto isso, a manutenção preventiva é realizada em janelas de tempo para reestabelecer a linha de produção para um estado "tão boa como nova", e, quando uma linha de produção falha, uma reparação mínima é efetuada para restaurá-lo para um status de "tão quanto qualquer um desta idade" da mesma forma que o artigo anterior. Simulações mostraram uma maior efetividade neste modelo comparando-se com modelos que avaliam a questão da manutenção e da operação separadamente.

Mirabendini et al (2012) incluiu uma função objetivo de 5 itens: minimizando os custos de manutenção, makespan, tempo total de conclusão ponderado dos postos de trabalho, o atraso total ponderado, e maximizando a disponibilidade da máquina. Isto tudo é considerado simultaneamente para otimizar o problema integrado de manutenção preventiva e programação da produção. Os autores utilizaram pesos em cada um desses objetivos. Esses pesos seriam aplicados pelos gestores a fim de que seus objetivos fossem respeitados, assim o que os autores propuseram foi um modelo mais geral, adaptável a mais situações. Algoritmos genéticos foram utilizados para ajudar a resolver esse modelo e encontrar uma solução ideal para este problema local. Seguindo a linha de raciocínio da integração das atividades de manutenção e produção pode-se relatar os trabalhos de Sortrakul e Cassady (2007) para minimização do atraso total ponderado numa single machine, Yulan et al (2008) utilizando o algoritmo *branch and bound* e Wand e Liu (2013).

Ferreira et al (2013) tiveram como função objetivo a minimização do atraso esperado ponderado e do custo de manutenção. Como o espaço de soluções deste problema é elevado, um algoritmo genético multi-objetivo foi proposto para encontrar soluções da fronteira de Pareto. A modelagem proposta por Ferreira et al foi a seguinte: Supõe-se que existe um certo número de atividades a serem programadas em uma única máquina em um sistema de produção. Cada atividade tem um tempo de processamento, prazo e uma importância relativa que é medida por um peso. Além da programação de produção, supõe-se que este equipamento pode não estar disponível devido a manutenção preventiva ou reparos devido a falhas. Estas características

implicam em conflito entre os objetivos de produção e manutenção. O modelo presume que a distribuição das falhas segue uma função Weibull e que a taxa de falha aumenta com o passar do tempo. Para este caso, o algoritmo genético encontrou 18 soluções de pareto. Um número pequeno se comparado com as 271 soluções encontradas pelo modelo exaustivo. No entanto, o desvio médio das soluções pelo algoritmo genético em relação ao modelo exaustivo foi de apenas 0,97%, demonstrando desempenho satisfatório.

Através dos trabalhos estudados verifica-se que assuntos relacionados à distribuição de água e a manutenção desses sistemas tem sido extensivamente estudados sob diversas óticas, bem como com metodologias bem distintas. É interessante perceber que os problemas de otimização, principalmente quando se refere à manutenção, possuem critérios bastante comuns: custo, confiabilidade e/ou alguma forma de relacionar o benefício à alguma parte envolvida (empresa de distribuição ou consumidores). Nas duas principais linhas de pesquisa apresentadas (MCDM e otimização multiobjetivo), os problemas são tratados com êxito, no entanto, os métodos possuem características bastante distintas. Através de otimização multiobjetivo, é possível encontrar as melhores soluções para as diversas variáveis constantes no sistema, mas, apenas com o uso de métodos MCDM, estas são relacionadas com critérios definidos pelos decisores. Desta forma, MCDM apresenta-se como uma melhor opção para solucionar problemas quando trata-se da gestão de sistemas. Esta característica o torna ainda mais viável quando os diferentes critérios são conflitantes e apresentam importâncias diferentes para o decisor, pois os métodos MCDM tornam possível sua valoração.

4 DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA

4.1 Localidades

A cidade do Recife está dividida em seis Regiões Político-Administrativas: RPA 1 – Centro, 2- Norte, 3 – Noroeste, 4 – Oeste, 5 – Sudoeste e 6 – Sul. Cada RPA é subdividida em três Microrregiões que reúnem um ou mais dos seus 94 bairros – (Prefeitura do Recife). A disposição física dessas regiões está exibida na Figura 4.1.

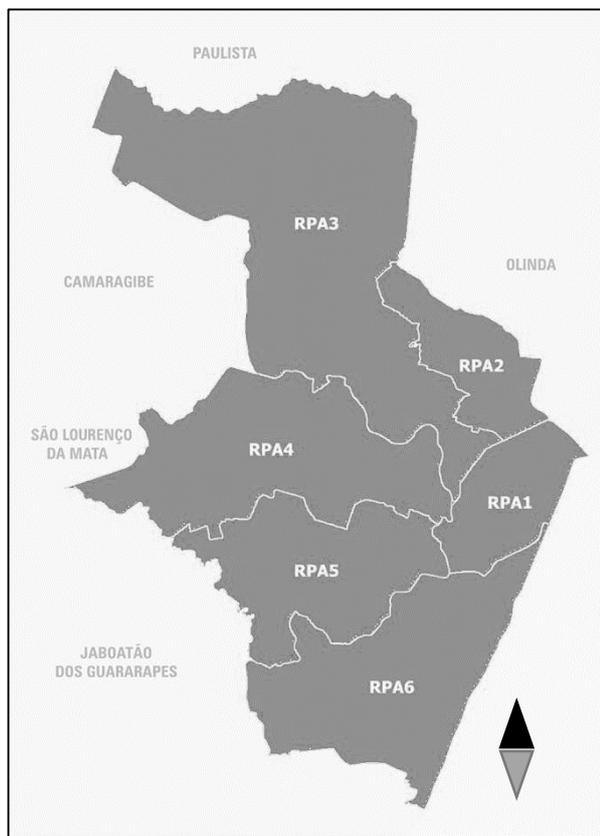


Figura 4.1: Regiões Político-Administrativas (RPA) da cidade do Recife (Prefeitura do Recife)

Os bairros do Morro da Conceição, Alto José do Pinho e Mangabeira estão localizados na RPA 3 – Noroeste. Os bairros ficam às margens de uma das principais avenidas do Recife: a Avenida Norte Miguel Arraes de Alencar, e este é o principal acesso da região, interligando-a com o Centro da cidade do Recife numa distância de 6,76 km a partir do Morro da Conceição, de 6,05 km a partir do Alto José do Pinho e de 5,61 km a partir da Mangabeira. No total, a região estudada ocupa uma área de 1,08 quilômetros quadrados (km²), sendo 0,38 km² do Morro

da Conceição, 0,41 km² compondo o Alto José do Pinho e os outros 0,29 km² constituindo o bairro da Mangabeira. (ATLAS do desenvolvimento humano no Recife, 2005). Os bairros estão em destaque na Figura 4.2.



Figura 4.2: região estudada (Adaptado de Google)

Segundo o Censo Demográfico mais recente (IBGE, 2010), o bairro do Morro da Conceição possui uma população residente de 10.182 habitantes, aumentando a uma taxa média anual de 0,04%. São 2.955 domicílios, resultando numa média de 3,40 habitantes por domicílio e numa densidade demográfica de 26.794,74 hab/km². O valor do Rendimento Nominal Médio Mensal dos domicílios nesta localidade é de R\$1.127,11

Segundo a mesma fonte, o bairro do Alto José do Pinho possui uma população de 12.334 habitantes, distribuídos em 3.510 domicílios, resultando numa média de 3,51 habitantes por domicílio e numa densidade demográfica de 30.082,93 hab/km². Em relação ao Censo anterior, houve uma sensível redução na população do bairro a uma taxa média anual de 0,08%. Além disso, o valor do Rendimento Nominal Médio Mensal dos domicílios é de R\$1.101,22.

Por fim, o bairro da Mangabeira possui uma população de 6.950 habitantes, com taxa decrescente de 0,52% anuais. Havendo 2.116 domicílios, a Mangabeira possui uma média de 3,3 habitantes por domicílio e uma densidade demográfica de 23.965,52 hab/km². A renda mensal média dos domicílios é sensivelmente mais alta que a dos outros bairros estudados: R\$1.317,08.

Com essas informações, percebe-se que as áreas são densamente povoadas, de tal forma que suas densidades demográficas se encontram num patamar muito acima da média da cidade do Recife, que possui uma densidade demográfica de 7.037,55 hab/km² (IBGE, 2010). Adicionalmente, os três bairros possuem a característica de serem predominantemente residenciais, com pequenos pontos comerciais distribuídos pela região. Não há nenhum grande centro de referência à saúde ou educação nem órgãos que fazem parte da administração pública. Há, no entanto, pequenas escolas, totalizando 7 unidades, e postos de saúde, totalizando 3 unidades (Prefeitura do Recife).

O motivo que justifica a escolha desta região é o fato de ela ser abastecida apenas por poços que injetam água diretamente na rede, bem como por ser possível isolar completamente este sistema de outros na cidade. Outras áreas são abastecidas por uma combinação de poços e caixas d'águas e os horários de abastecimento são totalmente dependentes de outras regiões também. Além disso, não se sabe exatamente a toda a extensão da rede e suas ramificações, o que impossibilita a determinação dos limites de um setor. Este problema é fruto de uma expansão não planejada da cidade, onde redes foram criadas sem a realização de um cadastro nem qualquer outro tipo de documento que tornasse possível a localização exata de seu traçado. Na cidade do Recife estão ocorrendo diversas obras do projeto de setorização das redes de abastecimento. Isso possibilitará a realização de manobras com maior precisão de sua abrangência, e também reduzir a dimensão de áreas afetadas por problemas que frequentemente ocorrem nas redes como o estouro de tubulações (Fontana, 2012).

4.2 Poços estudados

A água que abastece a região estudada é proveniente de 4 poços semiartesianos: Poço Largo Dom Luiz (DL), Poço Praça do Trabalho (PT), Poço Córrego do Tiro (CT) e Poço FEBEM-Mangabeira (FM). A localização destes poços é exibida na Figura 4.3. A Compesa dividiu a área em 10 setores. Na Figura 4.5, a representação dos setores é aproximada, visto que, devido ao problema de setorização descrito anteriormente, a divisão exata não é conhecida.

Até 2012, outro poço compunha o conjunto de poços para abastecer a região, o Poço Córrego Jose Grande, mas este foi fechado por conta de contaminação da água.

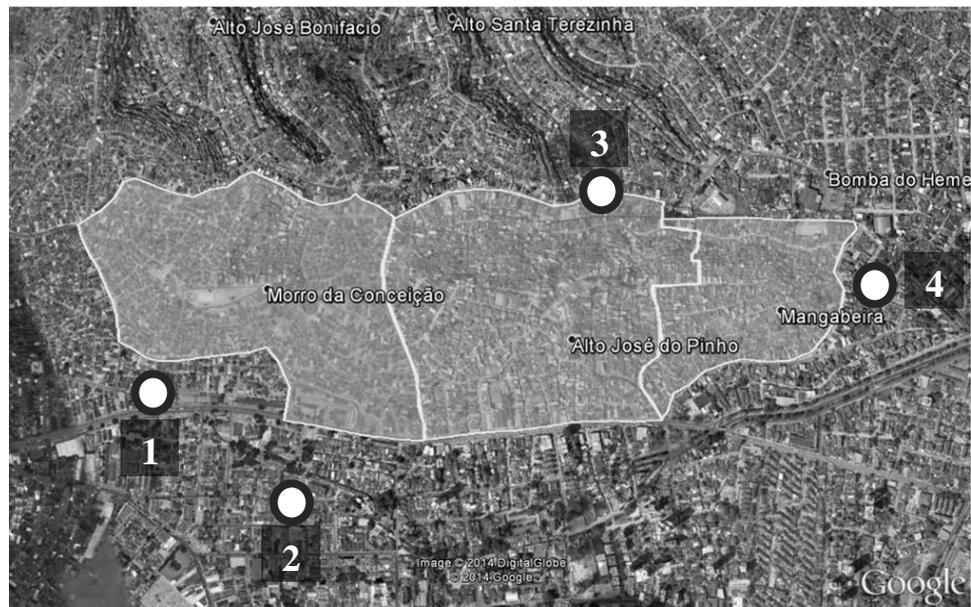


Figura 4.3: Localização dos poços e setores (Adaptado de Google)

Tabela 4.1: Identificação dos poços

Identificação	Poço	Equipamento (Conjunto bomba)	Profundidade do poço (metros)	Capacidade (litros/segundo)
1	Largo Dom Luiz	Ebara BHS 517 – 14	140	18,85
2	Praça do Trabalho	Ebara BHS 517 – 14	120	21,20
3	Córrego do Tiro	Ebara BHS 517 – 11	80	21,58
4	FEBEM-Mangabeira	Ebara BHS 517 - 11	120	14,58

Todos os conjuntos de bomba utilizados são do mesmo tipo. São bombas submersas, ou seja, ficam localizadas no fundo do poço, na profundidade indicada na Tabela 4.1. Chama-se conjunto bomba porque o equipamento é constituído por várias bombas ligadas em série com um motor em sua base, como esquematizado na Figura 4.4. No caso da Ebara BHS 517, são 6 bombas ligadas em série, podendo ser aplicado motores de diferentes potências. Dos conjuntos utilizados, a BHS 517 – 14 possui um motor de 50 HP e a BHS 517 – 11 possui um motor de 40 HP (Ebara). Um dos maiores custos dentro de uma empresa de distribuição de água é com o bombeio e elevação de água. Bombas são equipamentos de alto consumo de energia. Considerando suas potências e o preço da energia elétrica (R\$/kWh), o custo para a empresa é de R\$16,83 por hora em funcionamento com a bomba BSH 17-14 e de R\$13,47 por hora com a bomba BSH 17-11.

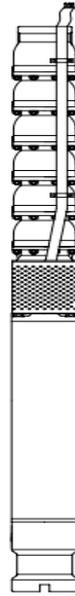


Figura 4.4: Esquema do conjunto bomba Ebara BSH 517 (EBARA)

4.3 Atual sequenciamento da distribuição de água

A dividiu a região em dez áreas para distribuição de água. No entanto, o estudo para definição dessas áreas, bem como o estabelecimento do calendário foi totalmente empírico, segundo a Superintendência de Operação e Manutenção da empresa. O ponto crítico é o local da rede de abastecimento que está mais distante do ponto onde a água é injetada, ou o ponto mais alto da rede. A empresa, então, segue o padrão de que a pressão no ponto crítico deve se manter em 60 kPa (6 metros de coluna d'água). Apesar de a Norma Técnica NBR 12218/1994 estabelecer que a pressão dinâmica mínima deve ser de 100 kPa (100 metros de coluna d'água), um valor abaixo deste padrão pode ser aceito desde que justificado tecnicamente e/ou economicamente. Tão logo, para definir o atual calendário de abastecimento, foi-se abrindo e fechando as diversas válvulas que compõem o sistema na tentativa de acertar a pressão no ponto crítico, o que garante que todo o resto da rede possua uma pressão superior ou, pelo menos, igual a essa.

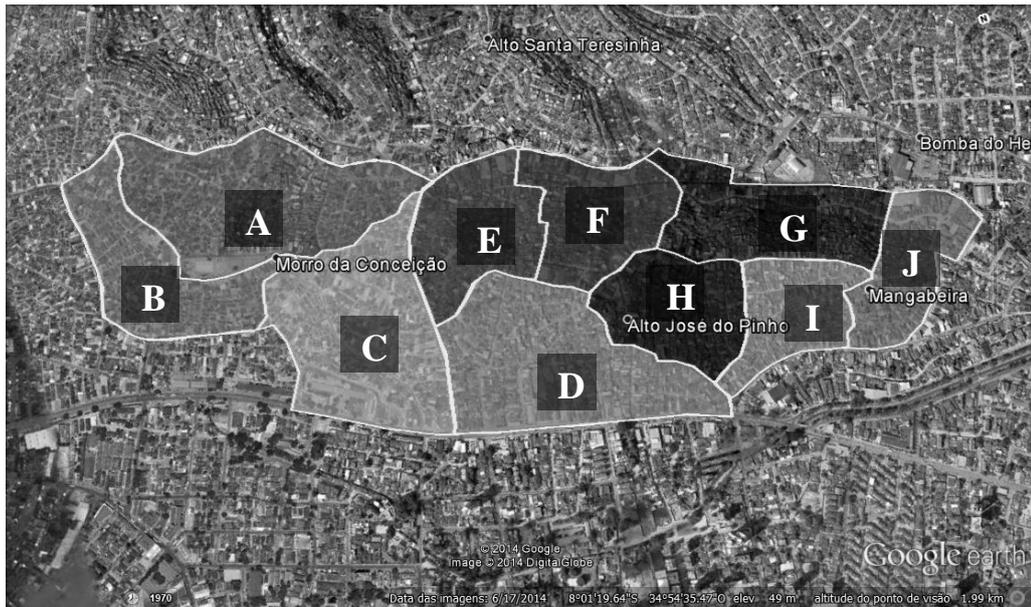


Figura 4.5: Identificação dos setores

Tabela 4.2: Setores e horários de atendimento

Poço	Setor	Horário previsto
Largo Dom Luiz	A	Das 12:00 às 18:00 do mesmo dia
Largo Dom Luiz +	B	Das 18:00 às 12:00 do dia seguinte
Praça do Trabalho	C	
Córrego do Tiro	D	Das 12:00 às 12:00 do dia seguinte
	E	
	F	
FEBEM-Mangabeira	G	
	H	
	I	
	J	

Como há uma indisponibilidade de dados para que se conheça a dimensão dos setores, bem como da forma com os quais os consumidores estão distribuídos, além de razões hidráulicas que fogem do escopo deste trabalho, o calendário de abastecimento na região não será considerado como uma variável neste estudo. Em outras palavras, não será otimizado o sequenciamento das tarefas de operação da rede. Estas serão tratadas como atividades já sequenciadas, com datas fixas de início e fim e um determinado tempo de processamento.

Desta forma, segundo o calendário acima, por exemplo, o abastecimento no dia 1 será configurado como 4 tarefas, sendo a primeira, região A, tendo seu início às 12 horas e fim às 18 horas, ou seja, com tempo de processamento de 6 horas, sendo executada pelo poço Dom Luiz. Paralela a esta atividade terá início a distribuição da região H, porém com tempo de processamento de 24 horas, executada pelo poço Febem-Mangabeira. O abastecimento das regiões B e C são outras tarefas que iniciam neste mesmo dia, tendo seu início às 18 horas, ao término do abastecimento de A. Por sua vez, estas possuem um tempo de processamento de 18 horas e são executadas simultaneamente pelos poços Dom Luiz e Praça do Trabalho, devido às necessidades dessas regiões serem maiores. Desta mesma forma trabalha-se com todo o calendário, transformando-o em uma série de tarefas com hora de início, fim e um tempo de processamento.

Neste trabalho, então, esta matriz de dados é dada como fixa, devendo ser obedecida. As circunstâncias que podem impedir a realização destas atividades são justamente as atividades de manutenção, sejam elas de caráter preventivo ou corretivo. Considerando isto, a questão levantada nessa situação não é mais a forma como a distribuição de água é realizada, mas como devem ser administradas as atividades de manutenção.

A região estudada, como foi dito anteriormente, é primordialmente residencial, tão logo para a Compesa não há prioridades em relação ao abastecimento de uma área específica, percebido também pela forma como foi realizada a definição dos setores e seu abastecimento. Para tal, levou-se em consideração apenas aspectos e restrições de natureza técnica ou física. No entanto, para a realização das atividades de manutenção, a empresa visa realizá-las de forma que seja gasta a menor quantia possível, em termos financeiros, bem como reduzir ao mínimo a quantidade de interrupções na rede, segundo a Coordenação de Poços. Desta forma, neste trabalho, estas considerações são tomadas como critérios para a otimização: custo das atividades de manutenção e quantidade de tarefas não executadas devido às manutenções.

4.4 Atual gestão de manutenções

A gestão da coordenação de poços esquematizou recentemente um padrão para a realização das manutenções preventivas, porém sem fundamentações. Foi fixado que cada poço na qual a empresa administra deve passar por uma manutenção preventiva ao menos uma vez no mês. Esta manutenção inclui pequenos reparos elétricos e mecânicos, que restauram a condição do poço para que seja tão bom quanto novo. Esses reparos incluem a substituição de

componentes elétricos como partes da fiação, quadros elétricos, disjuntores, relés, dentre outros. Em relação à parte mecânica podem ser trocadas válvulas, reparos de problemas de cavitação (retirada de ar do sistema) e desobstrução das tubulações, por exemplo. O reparo a ser feito em cada ocasião dependerá das condições de funcionamento do poço, através da verificação de uma série de itens como vazão, pressão na bomba e na rede, corrente elétrica e tensão, além da temperatura do rotor da bomba, por exemplo. A empresa não forneceu um checklist sobre o que deve ser verificado, no entanto uma mesma equipe de manutenção é capaz de realizar estas verificações, definir como será executada a manutenção e realizar o reparo. Segundo a coordenação de poços, a tempo para realização destas atividades de prevenção em cada em poço é de aproximadamente 4 horas.

Para a realização da manutenção preventiva, a Compesa dispõe de 4 equipes de manutenção composta por um técnico mecânico, um técnico eletricitista e dois ajudantes. Estas equipes deslocam-se de um poço a outro em veículos tipo caminhonete.

No entanto quando há a necessidade da manutenção corretiva, ou seja, pela completa parada de funcionamento do equipamento instalado no poço, necessita-se de grande demanda de mão-de-obra, equipamentos e tempo. Nestas situações é necessária a retirada do conjunto de bombas e rotor para sua troca, que estão instalados a uma grande profundidade. Para realização de uma atividade deste tipo, são despendidas cerca de 16 horas de trabalho. É necessário também o deslocamento de mais de uma equipe de manutenção. São necessários pelo menos, um técnico eletricitista, um técnico mecânico e 5 ajudantes. Pela grande quantidade de pessoas, além da caminhonete é também utilizado um veículo de passeio com motorista. A retirada do equipamento do poço é feita com o uso de um caminhão do tipo munck (com guincho), o qual a empresa não dispõe, sendo necessário o aluguel cuja diária, mais o operador, custa R\$ 2.200,00. Soma-se a isso o valor do conjunto de bombas a ser trocada cujo valor custa em torno de R\$ 15.000,00. Pela descrição, percebe-se que o custo da manutenção corretiva é muito superior ao custo da manutenção preventiva. E deve ser considerado também o fato de que, quanto mais tempo a manutenção demora, menos água está sendo fornecida aos usuários, ou seja, a Compesa está deixando de vender o seu produto.

A Tabela 4.3 exhibe os custos para realização das atividades de manutenção. Os valores contidos nela foram estabelecidos com base no salário dos funcionários e o tempo gasto na manutenção, além do combustível utilizado pelos veículos com base no consumo mensal. Todos esses dados foram fornecidos pela Compesa.

Tabela 4.3: Custos por evento de manutenção

Manutenção preventiva		Manutenção corretiva	
Item	Custo (R\$ / manut.)	Item	Custo total (R\$ / manut.)
Mecânico	48,96	Mecânico	195,80
Eletricista	48,96	Eletricista	195,80
Ajudantes	30,00	Ajudantes	120,00
Veículo	20,00	Motorista	19,95
		Veículos	50,00
		Munck	2.200,00
		Bomba	15.000,00
TOTAL	147,92	TOTAL	17.781,55

Existem ainda outros custos que poderiam ser considerados como depreciação dos veículos, gastos com ferramentas e produtos consumíveis utilizados nas manutenções. No entanto, há uma grande dificuldade para conseguir dados pelo fato de as informações estarem bastante dispersas em diversos setores ou pessoas dentro da empresa, muitas vezes pouco acessíveis. Além disso, pode-se considerar que a inclusão destes valores não causaria alterações a ponto de desfigurar a interpretação de que a magnitude dos custos da manutenção corretiva é imensamente maior que os custos da manutenção preventiva. Desta forma, analisando o valor do total destes custos, vê-se que o gasto envolvido na manutenção corretiva é de aproximadamente 120 vezes superior à manutenção preventiva. Esta diferença no custo para a empresa pode ter sido a causa da definição de um calendário de manutenções preventivas tão cheio de forma que nem a própria coordenação de poços consegue cumprir, dada as limitações de mão-de-obra. Segundo a coordenação de poços, o maior problema enfrentado pelo setor de poços é a indisponibilidade de pessoal. O quantitativo de funcionários da manutenção não é suficiente para atender a demanda de todos os 200 poços administrados, visto que foi estabelecido que cada poço recebe uma visita ao mês. Salienta-se que as atividades de perfuração de novos poços, bem como a desativação, também são de responsabilidade destas equipes, apesar de serem atividades pouco comuns.

No entanto, uma medida que o setor de manutenção deve também considerar é o custo que uma atividade de manutenção ocasiona pela parada de seu equipamento. Em alguns casos, esta medida é muito relevante e neste contexto não é diferente: durante uma atividade de manutenção preventiva, a quantia que deixa de ser captada pela empresa pelo fato de não estar

abastecendo supera os custos a manutenção propriamente dita. A consideração desta variável, portanto, pode gerar resultados mais significativos para a empresa como um todo e não apenas para o setor de manutenção. Assim, com um simples cálculo baseado na vazão dos poços, o tempo gasto nas manutenções e o preço da água comercializado na localidade é possível determinar o quanto custa um equipamento ficar parado. Desta forma, a Tabela 4.4 possui em detalhes qual o custo de cada atividade de manutenção para cada poço, considerando as 4 horas e as 16 horas demandadas por cada intervenção preventiva e corretiva, respectivamente.

Tabela 4.4: Custos totais das manutenções

Poço – Tipo de manutenção	Custos			
	Manutenção	Água	Energia	Total
PT – Prev.	147,92	1.050,16	67,32	1.130,76
PT – Corr.	17.781,55	4.200,64	269,28	21.712,91
DL – Prev.	147,92	933,75	67,32	1.014,35
DL – Corr.	17.781,55	3735	269,28	21.267,27
CT – Prev.	147,92	1.068,99	53,87	1.163,04
CT – Corr.	17.781,55	4.275,96	215,49	21.842,02
FM – Prev.	147,92	722,23	53,87	816,28
FM – Corr.	17.781,55	2.888,92	215,49	20.454,98

Esses dados são cruciais e, mais a frente, serão utilizados na otimização dos custos para a empresa.

5 OTIMIZAÇÃO DAS ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO

Este capítulo trata da obtenção dos intervalos ótimos entre intervenções preventivas (τ) segundo os critérios considerados pelo gestor. Desta forma, são obtidos dois valores de τ para cada poço cuja distribuição de Weibull possui um valor de $\beta > 1$: um que maximiza a disponibilidade da bomba, e outro que minimiza o custo por unidade de tempo, chamado de custo por ciclo. Para tal, são realizados os seguintes passos:

- 1) Adequação dos tempos de vida das bombas à função de distribuição de probabilidade de Weibull;
- 2) Análise dos parâmetros de forma β ;
- 3) Modelagem matemática para relacionar a disponibilidade do equipamento com τ e otimização da função disponibilidade;
- 4) Modelagem matemática para relacionar o custo por ciclo com τ e otimização da função custo por ciclo.

5.1 Distribuição de probabilidade, confiabilidade e taxa de falha dos equipamentos

Até o ano de 2012, a empresa não havia adotado um programa de manutenção preventiva. Trabalhava-se apenas com a manutenção corretiva. Desta forma, os serviços de manutenção eram requisitados apenas quando ocorria a completa parada do funcionamento do conjunto motor bomba. Sendo assim, os intervalos entre as manutenções que ocorreram antes de 2012 correspondem a tempo de vida útil do equipamento. A Compesa cedeu esses dados desde quando eles passaram a ser registrados, em meados de 2003. A Tabela 5.1 contém os dados que foram retirados desse histórico de manutenções, no entanto com as diferenças entre as datas sendo convertidas em horas. Ou seja, a diferença entre as datas de instalação e de retirada do equipamento correspondem ao tempo de vida útil do mesmo.

Ao analisar os dados, percebeu-se que algumas vezes o equipamento foi instalado e em poucas horas teve que ser retirado e colocado outro. Essas ocasiões foram desconsideradas deste estudo, pois é provável que nessas situações tenham ocorrido algum erro na instalação do equipamento, seja de natureza elétrica ou mecânica, de forma que o tempo de vida útil fosse reduzido para um valor muito abaixo da expectativa de vida de um equipamento deste tipo. Além disso, no poço córrego do tiro, por 5 vezes foram utilizadas bombas de modelos

diferentes, a SP46/10 ou SP46/14. Essas bombas são de outro fabricante, porém com características bastante similares ao modelo aqui estudado. Coincidentemente ou não, nessas vezes o tempo de vida foi substancialmente menor se comparados com os períodos onde a bomba BSH 517-11, que compreende a maioria das vezes. No entanto, a quantidade de dados é insuficiente para se traçar conclusões. Para não comprometer o estudo em questão, bem como para manter consistência no trabalho pelo estudo sempre do mesmo equipamento, optou-se por eliminar os dados dos tempos de vida útil de quando bombas diferentes foram utilizadas. O mesmo ocorreu no poço Febem-Mangabeira, porém com apenas um ponto, quando foi utilizada a bomba modelo S65/11 também de outro fabricante. A atitude em relação a esse dado foi a mesma que descrita anteriormente.

Tabela 5.1: Tempo de vida útil dos conjuntos motor-bomba

Tempo de vida do equipamento em horas			
CT	PT	DL	FM
5760	17376	3864	4152
7056	25632	5472	5448
16896	12456	3552	3744
7632	2352	12120	3144
3504	3720	17616	8952
4464	1848	5880	3504
8280	480	864	4032
7248	15888	360	7560
8040	2952	1248	
	1008	13152	
	552	3576	
	2712	9000	
		1008	
		6312	
		3240	

Com as devidas considerações, a distribuição dos tempos de vida dos equipamentos torna, então possível o cálculo da distribuição de probabilidade que rege o comportamento das falhas do sistema. Dada a flexibilidade que a função de distribuição de probabilidades de Weibull tem de se assimilar aos diversos outros formatos de distribuições, em função de seus parâmetros, o ajuste dos dados da foi realizado para esta função. Em outras palavras, foram calculados os parâmetros de forma (β) e de escala (η) de Weibull para cada um dos equipamentos dos poços. O procedimento para este cálculo é mostrado a seguir (Weibull, 1951):

Seja a função de distribuição de Weibull representada na Equação 5.1,

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Eq. 5.1}$$

A função chamada de confiabilidade é a probabilidade de um equipamento não falhar até um valor de tempo determinado. Na distribuição de Weibull ela é dada pela parcela da função correspondente à Equação 5.2

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Sendo a confiabilidade a probabilidade de não haver falha num intervalo de tempo de 0 a t , o cálculo de $(1 - R(t))$ resultará na probabilidade de este equipamento falhar neste mesmo intervalo, o que pode ser obtido pelas frequências de ocorrência de falhas em cada valor de tempo. Neste trabalho, essas frequências são obtidas pela vida útil dos conjuntos motor-bomba, fornecidos pela coordenação de poços. Para tal, define-se

$$R'(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Eq. 5.3}$$

A linearização desta equação é realizada pela aplicação de dois logaritmos neperianos, obtendo-se

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - R'(t)} \right) \right] = \beta * \ln(t) - \beta * \ln(\eta) \quad \text{Eq. 5.4}$$

Desta equação, pode-se realizar o ajuste à $Y(x) = Ax + b$, se for considerado que $Y(x) = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - R'(t)} \right) \right]$, $A = \beta$ e $B = -\beta \ln \eta$. As tabelas presentes no anexo A1 possuem os dados referentes ao valor do tempo (t) a função do tempo acumulada $F(t)$, bem como $\ln(t)$ e o valor de $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - R'(t)} \right) \right]$ para cada ponto. A relação aos pares dessas últimas permitiu a realização da regressão linear para todos os 4 poços estudados, como pode ser visualizado na Figura 5.1.

Desta forma, obteve-se as seguintes equações, onde o valor de R^2 corresponde ao coeficiente de determinação do ajuste:

- Poço Córrego do Tiro: $Y(x) = 3,007 x - 26,678$; $R^2 = 0,9313$ Eq. 5.5

- Poço Praça do Trabalho: $Y(x) = 0,7799 x - 6,7158$; $R^2 = 0,9238$ Eq. 5.6
- Poço Largo Dom Luiz: $Y(x) = 0,9711 x - 8,3778$; $R^2 = 0,9727$ Eq. 5.7
- Poço Febem-Mangabeira: $Y(x) = 2,330 x - 20,339$; $R^2 = 0,8193$ Eq. 5.8

Os coeficientes de R^2 maiores que 0,8 indicam bons níveis de correlação. Com os coeficientes lineares e angulares das retas é possível obter os valores dos parâmetros de Weibull, representados na Tabela 5.2.

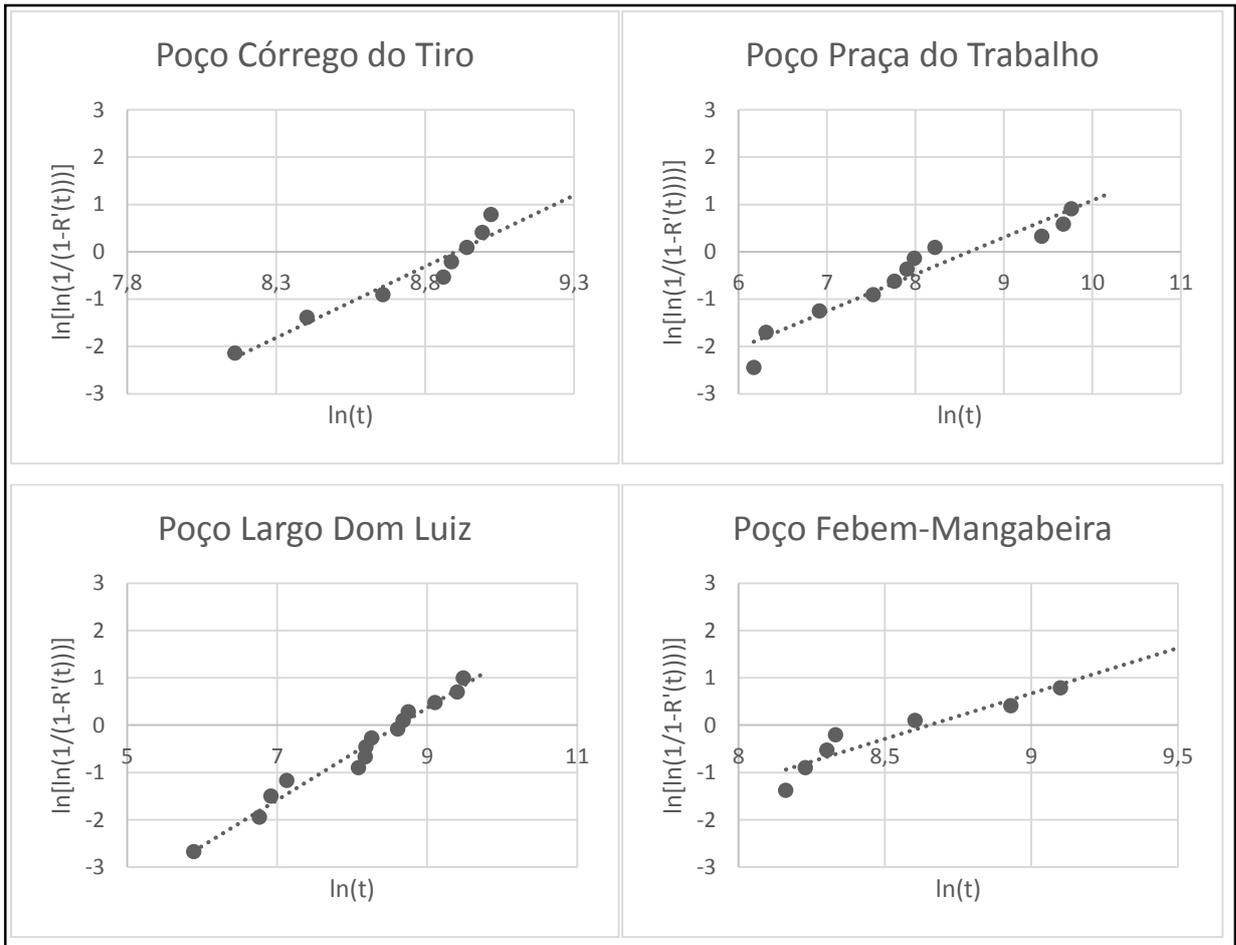


Figura 5.1: Gráficos dos ajustes lineares

Tabela 5.2: Parâmetros de Weibull

Poço	Parâmetro de forma (β)	Parâmetro de escala (η)
Córrego do Tiro	3,0070	7345,885
Praça do Trabalho	0,7799	5492,309
Largo Dom Luiz	0,9711	5581,004
Febem-Mangabeira	2,3306	6166,812

Então, pode-se definir a função de distribuição de probabilidades de cada poço como:

- Poço Córrego do tiro

$$f_{CT}(t) = 4,093 * 10^{-4} \left[\frac{t}{7345,885} \right]^{2,0070} e^{-\left(\frac{t}{7345,885}\right)^{3,0070}} \quad Eq. 5.9$$

- Poço Praça do Trabalho

$$f_{PT}(t) = 1,420 * 10^{-4} \left[\frac{t}{5492,309} \right]^{-0,2201} e^{-\left(\frac{t}{5492,309}\right)^{0,7799}} \quad Eq. 5.10$$

- Poço Largo Dom Luiz

$$f_{DL}(t) = 1,740 * 10^{-4} \left[\frac{t}{5581,004} \right]^{-0,0289} e^{-\left(\frac{t}{5581,004}\right)^{0,9711}} \quad Eq. 5.11$$

- Poço Febem-Mangabeira

$$f_{FM}(t) = 3,779 * 10^{-4} \left[\frac{t}{6166,812} \right]^{1,3306} e^{-\left(\frac{t}{6166,812}\right)^{2,3306}} \quad Eq. 5.12$$

Para confirmação do obtido, o teste de hipótese não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov pode ser aplicado. Esse teste é aplicado para verificar se uma amostra é proveniente de uma dada distribuição ou se duas amostras são retiradas de uma mesma distribuição (Montgomery e Runger, 2012). Dessa forma, as hipóteses são formuladas tal que a hipótese nula afirma que os dados seguem a distribuição desejada, neste caso a de Weibull, e a hipótese alternativa afirma que os dados não a seguem. O teste é realizado ao nível de significância de 0,05. O parâmetro do teste D_n é comparado ao D crítico do teste (tabela padrão do teste), como na Tabela 5.3. A hipótese nula é rejeitada se $D_n > D$ crítico.

Tabela 5.3: Parâmetros do teste de Kolmogorov-Smirnov

	CT	PT	DL	FM
D_n	0,254	0,183	0,179	0,223
D crítico	0,430	0,375	0,338	0,454

Observe que para todos os poços estudados, o valor do parâmetro do teste é inferior ao crítico. Desta forma, não há suporte estatístico para rejeitar a hipótese de que os dados seguem

as distribuições de Weibull obtidas. Esta afirmação valida o uso do modelo de distribuição de probabilidades aplicado, sendo representadas graficamente na Figura 5.2.

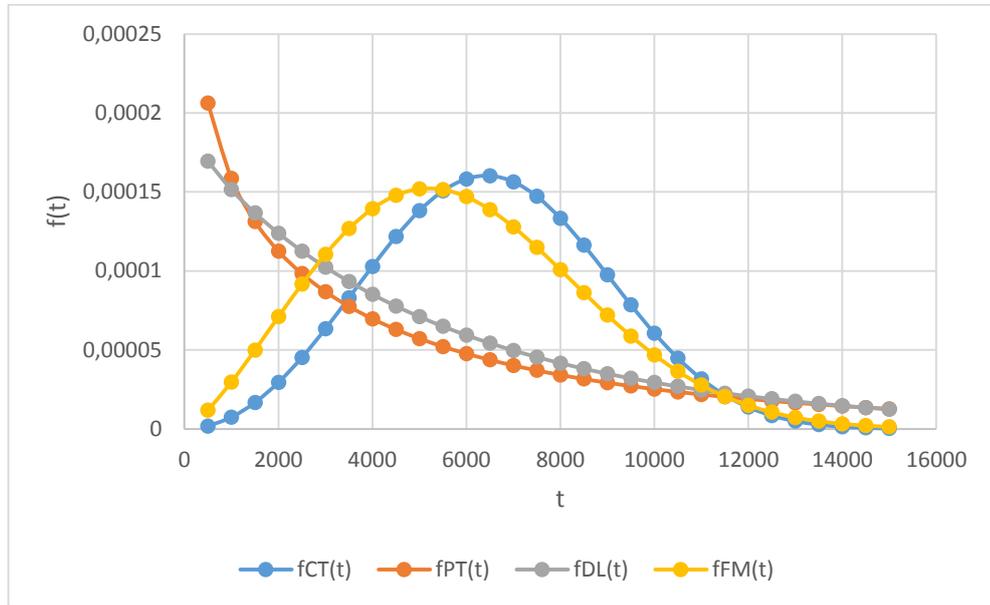


Figura 5.2: Distribuições de probabilidade de Weibull para cada poço

A partir da análise dos valores dos parâmetros de escala (β), é possível realizar algumas inferências sobre o comportamento das falhas dos equipamentos estudados. A Tabela 5.3 contém as funções confiabilidade e taxa de falha dos quatro equipamentos. E as Figuras 5.3 e 5.4 são os respectivos gráficos dessas funções.

Tabela 5.4: Funções confiabilidade e Taxa de falha

Poço	Confiabilidade R(t)	Taxa de Falha
CT	$R_{CT}(t) = e^{-\left(\frac{t}{7345,885}\right)^{3,0070}}$	$\lambda_{CT}(t) = 4,093 * 10^{-4} \left[\frac{t}{7345,885}\right]^{2,0070}$
PT	$R_{PT}(t) = e^{-\left(\frac{t}{5492,309}\right)^{0,7799}}$	$\lambda_{PT}(t) = 1,420 * 10^{-4} \left[\frac{t}{5492,309}\right]^{-0,2201}$
DL	$R_{DL}(t) = e^{-\left(\frac{t}{5581,004}\right)^{0,9711}}$	$\lambda_{DL}(t) = 1,740 * 10^{-4} \left[\frac{t}{5581,004}\right]^{-0,0289}$
FM	$R_{FM}(t) = e^{-\left(\frac{t}{6166,812}\right)^{2,3306}}$	$\lambda_{FM}(t) = 3,779 * 10^{-4} \left[\frac{t}{6166,812}\right]^{1,3306}$

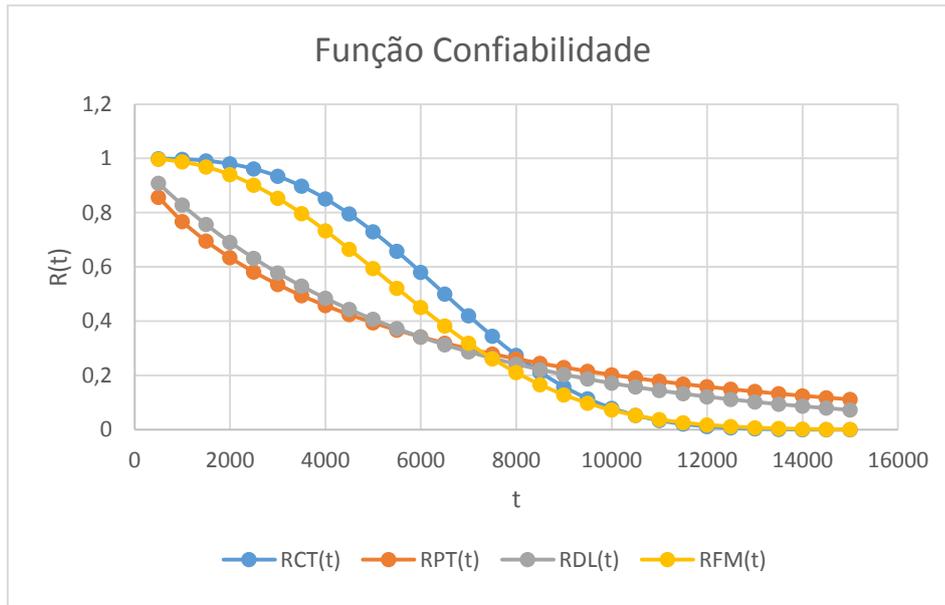


Figura 5.3: Gráfico representando as curvas das funções confiabilidade

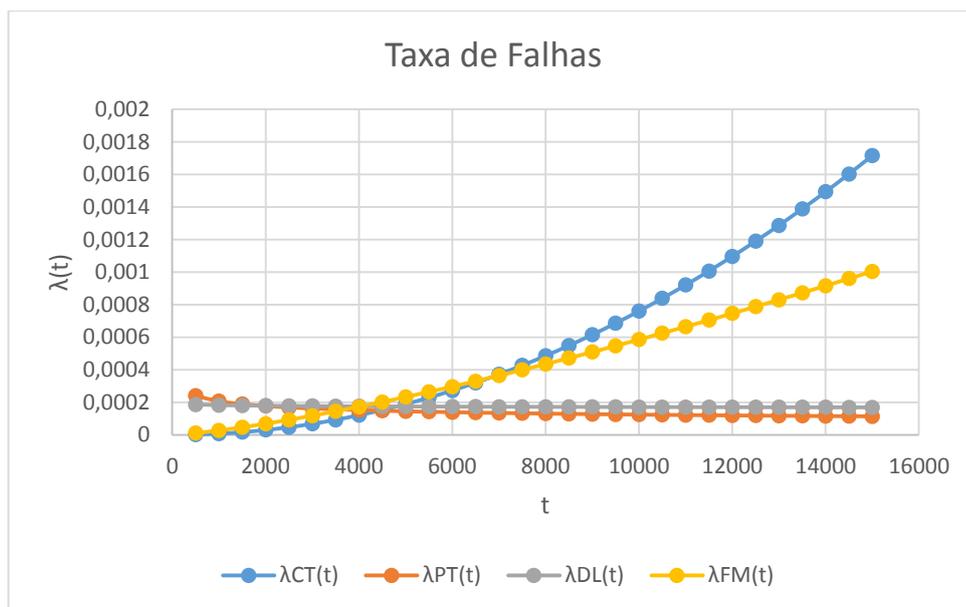


Figura 5.4: Gráfico representando as curvas das funções Taxa de Falha

O comportamento que as funções confiabilidade e taxa de falha apresentam estão intimamente relacionados com o valor do parâmetro β da distribuição de Weibull. Isto pode ser percebido claramente comparando-se as distribuições dos poços Córrego do Tiro e Febem-Mangabeira, que possuem o valor de β maiores que a unidade, com os outros dois poços, cujos parâmetros de forma assumem valores próximos de 1.

O valor do parâmetro de forma tem uma implicação importante sobre a taxa de falha e confiabilidade do equipamento, pois havendo valores maiores que 1, significa que as falhas se

dão por um processo de envelhecimento do equipamento. Em outras palavras, quanto maior a idade do equipamento, maior a chance de haver uma pane. Associando ao modelo que considera a vida útil do equipamento como em 3 fases ou curva da banheira, estes valores de β fazem com que a função taxa de falha modele a terceira parte do ciclo de vida do equipamento.

Logo, se a taxa de falha é crescente ao longo do tempo, este fato justifica o uso de manutenções preventivas para que a vida útil do equipamento seja prolongada, pois a intervenção irá restaurar o equipamento através da troca de partes desgastadas, lubrificação e no caso das bombas de poços, corrigindo os problemas listados na seção 2.3.2.1. Seguindo este raciocínio, é justificável a aplicação de manutenções preventivas nos poços Córrego do Tiro ($\beta = 3,007$) e Febem-Mangabeira ($\beta = 2,3306$).

Valores de β iguais ou próximos de 1 implicam que a distribuição de Weibull está bastante próxima do formato de uma distribuição exponencial. O problema neste tipo de distribuição em especial é que a taxa de falha se mantém aproximadamente constante durante toda a vida útil do equipamento. Diz-se, então, que as falhas ocorrem aleatoriamente, não sendo possível associar uma causa específica tampouco vincular o tempo à sua ocorrência. Essa peculiar situação significa também que a taxa de falhas do equipamento permanecerá a mesma independente da realização de uma intervenção, não justificando a implantação de um calendário de manutenções preventivas, visto que essas intervenções em nada beneficiariam o equipamento. Dentre os equipamentos estudados, tem-se aquele do poço Largo Dom Luiz ($\beta = 0,9711$) apresentando esta característica.

E, havendo valores de β consideravelmente menores que 1, a taxa de falha do equipamento é decrescente com o passar do tempo. Neste caso, as falhas estão ocorrendo muito precocemente, enquanto equipamento ainda é novo, ou seja, durante a fase 1 do ciclo de vida do equipamento segundo a curva da banheira. Diversos fatores podem explicar a ocorrência de falhas precoces: defeitos de fabricação, instalação errada do equipamento ou ainda o produto pode não ser adequado às condições de uso. Isto ocorre no poço da Praça do Trabalho ($\beta = 0,7799$).

Para explicar este fato, foi-se em busca do fabricante das bombas utilizadas pela companhia de abastecimento de água. Segundo suas informações, não é possível mensurar a durabilidade de um conjunto motor-bomba, pois existem muitas variáveis que podem afetar sua vida útil. Os principais fatores são:

- Qualidade da perfuração do poço.
- Dimensionamento correto do equipamento.
- Instalação por equipe devidamente capacitada.

- Qualidade de energia.
- Tipo de acionamento, incluindo parametrização correta da chave de partida, para adequada proteção do motor.
- Monitoramento preventivo de energia
- Níveis dinâmico e estático do poço

Desta forma, qualquer um desses fatores, pode antecipar a vida útil do conjunto. Ainda segundo o fabricante, eles têm clientes que os enviam equipamentos para conserto. Alguns deles possuem mais de 5 anos de uso e outros possuem apenas 6 meses devido aos fatores citados acima. Além disso, no manual deste fabricante há um tempo sugestivo entre 1 e 2 anos para a realização de uma inspeção no equipamento caso ele não quebre neste intervalo. Esta inspeção inclui a retirada do conjunto motor-bomba do poço para avaliar o seu condicionamento. Mas, ao mesmo tempo, sabe-se que muitas vezes o custo para manobras de retirada do equipamento e reinstalação é muito elevado, de tal forma que muitos clientes preferem deixá-lo até queimar.

Por conta do que foi relatado, é necessário que haja uma investigação nos poços do Lardo Dom Luiz e Praça do Trabalho para determinar o que pode estar causando o comportamento de suas falhas. Além dos itens anteriormente citados, é preciso analisar as condições físico-químicas da água do poço, verificar se está havendo arraste de areia e outros sedimentos, dentre outros problemas como na seção 2.3.2.1.

5.2 INTERVALO ÓTIMO PARA MAXIMIZAÇÃO DA DISPONIBILIDADE

Esta seção analisa a situação através de um problema de manutenção puro, ou seja, não integrado com a operacionalização das atividades tanto em relação à presença de outras bombas, quanto à consideração do calendário de abastecimento definido pela Compesa. Além disso, não garante que o custo seja minimizado, mas maximiza o tempo do equipamento em estado operante. Em outras palavras, maximiza a sua disponibilidade.

Segundo Cassidy e Kutanoglu (2003), supõe-se que um equipamento, utilizado para o processamento das tarefas, está sujeito a falhas a qualquer momento e é governado por uma função de distribuição de probabilidade de Weibull com parâmetro de forma (β) maior que 1. O fato de o valor de β ser maior que 1, diz que é necessária uma manutenção para que o risco de a máquina parar completamente seja reduzido. Neste trabalho, assume-se que a manutenção preventiva restaura a máquina a um estado de “tão boa quanto nova”, de tal forma que a idade da máquina retorna ao valor de zero. Isto implica que a manutenção preventiva não é apenas

um reparo, é uma atividade muito mais completa que pode corresponder, inclusive, à substituição de itens importantes do sistema. Em termos de generalização do modelo, tem que se observar que tudo isso deve ser considerado dentro dos custos da manutenção preventiva.

É assumida uma política de manutenção baseada na idade da máquina, ou seja, a manutenção preventiva é realizada no equipamento após τ unidades de tempo em operação. Neste caso, o objetivo é de maximizar a disponibilidade do equipamento (Mamabolo & Beichelt, 2004). Sendo a manutenção preventiva uma atividade que conduz o equipamento para um estado de tão bom quanto novo, isso pode ser modelado como um processo cíclico cujo início corresponde ao momento onde a idade do equipamento é $t=0$, correspondendo a dois momentos:

- O início da operação do equipamento, que corresponderá a substituição do mesmo devido a uma falha, e
- O fim de cada atividade de manutenção preventiva

Então, durante a vida útil do equipamento, pode haver três estados: em operação, em manutenção preventiva ou em manutenção corretiva. Assim, sejam τ o tempo em operação do equipamento, t_p o tempo gasto em uma atividade de manutenção preventiva e t_c o tempo gasto em uma manutenção corretiva. Com essas considerações, pode-se afirmar que a proporção do tempo disponível para operação do equipamento, chamado de disponibilidade, é determinado por

$$A(\tau) = \frac{\tau}{\tau + t_c + t_p} \quad \text{Eq. 5.13}$$

A Equação 5.13 é proposta por Cassady & Kutanoglu (2003; 2005). No entanto, deve-se considerar que a manutenção corretiva só ocorre caso haja uma falha no equipamento, o qual está sujeita a uma distribuição de probabilidade. Da mesma forma, existe uma probabilidade de a bomba continuar funcionando normalmente até a próxima intervenção preventiva. Com isso, pode-se exprimir a equação da disponibilidade segundo Jiang & Ji (2002)

$$A(\tau) = \frac{\int_0^\tau R(t)dt}{\int_0^\tau R(t)dt + t_c F(\tau) + t_p R(\tau)} \quad \text{Eq. 5.14}$$

A Equação 5.14 é aquela que deseja-se maximizar, cujo numerador corresponde ao tempo médio entre falhas, o qual é justamente o tempo em funcionamento. $F(\tau)$ e $R(\tau)$ são as funções de probabilidade acumulada e confiabilidade, respectivamente. Neste estudo, a

Compesa demora numa manutenção preventiva o tempo de 4 horas, ao passo que a manutenção corretiva demanda 16 horas. Considerando também os parâmetros de Weibull dos equipamentos dos poços, tem-se para cada um deles o intervalo ótimo, em horas, para se realizar a manutenção preventiva de forma a maximizar a disponibilidade dos poços ou o tempo em operação.

- Poço Córrego do Tiro ($\beta = 3,0070$; $\eta = 7345,885$)
 $\tau^* = 4071,461$ (horas)
- Poço Febem-Mangabeira ($\beta = 2,3306$; $\eta = 6166,812$)
 $\tau^* = 3460,75$ (horas)

Ressalta-se que, para os outros dois poços, não é possível a realização destes cálculos, dado que eles são válidos apenas para valores de β maiores que 1.

Dado que a unidade de τ é em horas, a conversão para dias facilita a análise. Assim, o intervalo ótimo para realização das atividades de manutenção preventiva do Poço Córrego do Tiro é de 170 dias, ao passo que para o Poço Febem-Mangabeira esse intervalo é de 144 dias. Se considerarmos o intervalo definido pela coordenação de poços da Compesa, afirma-se que, pelo menos nesses dois poços, está havendo um excesso de manutenções preventivas, dado que o intervalo que maximiza a disponibilidade desses poços é superior àquele praticado. A disponibilidade ótima esperada é de 0,9985 (99,85%) para o poço Córrego do Tiro e de 0,9979 (99,79%) para o poço Febem-Mangabeira. Nas Figuras 5.5 e 5.6 constam os gráficos das funções $A(t)$ para ambos poços.

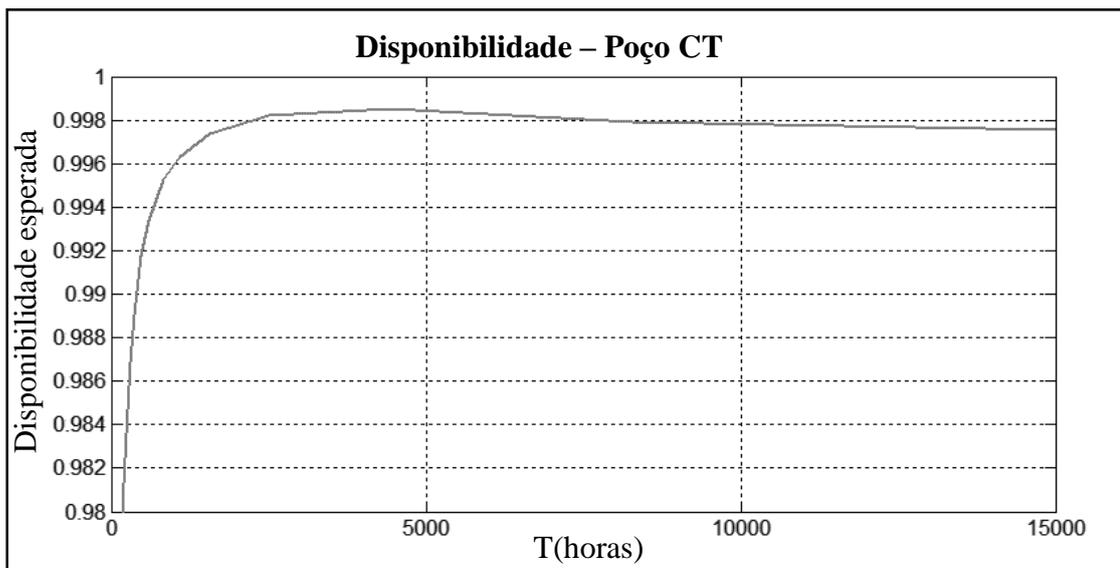


Figura 5.5: Gráficos das funções disponibilidade para CT

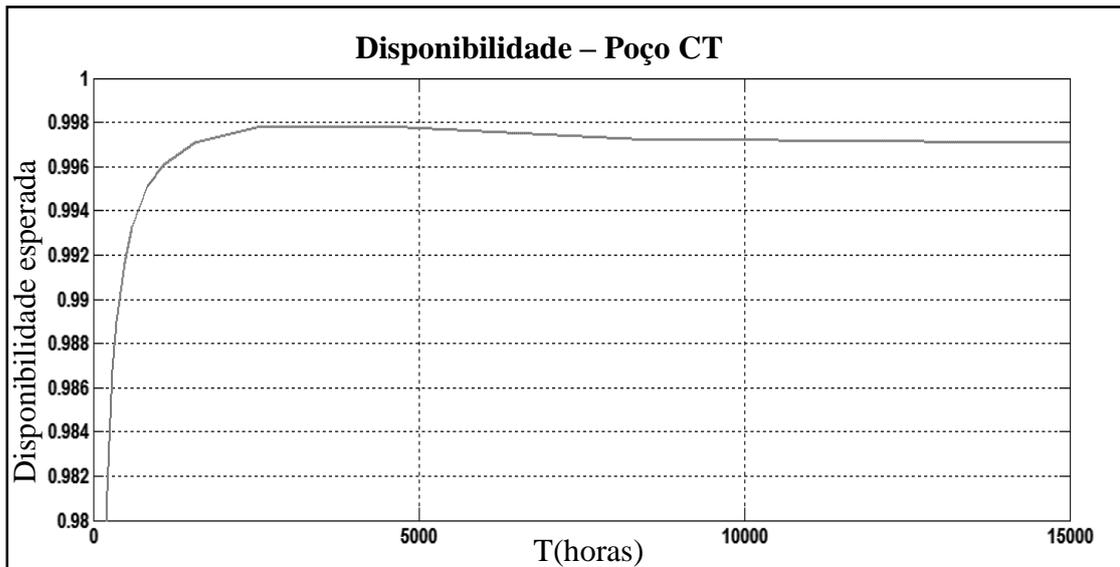


Figura 5.6: Gráficos das funções disponibilidade para FM

A partir dos gráficos pode-se notar que a partir de certo ponto, próximo das 8.000 horas, a disponibilidade é constante para qualquer valor superior. Isto ocorre porque, caso seja designado um intervalo entre manutenções preventivas muito longo, o risco de quebra passa a ser muito alto. Assim, a política de manutenções seria basicamente aquela com a ocorrência de manutenções corretivas apenas.

Considerando apenas o critério disponibilidade, já seria possível melhorar as condições e dois aspectos: o primeiro seria a folga criada no setor. A coordenação de poços afirmou que não possui pessoal suficiente para realização de todas as manutenções. Em contrapartida, a própria coordenação criou um calendário de manutenções preventivas com intervalos muito curtos, de apenas 30 dias. O segundo aspecto é em relação aos consumidores. Sempre que há alguma intervenção no sistema, faz-se necessária a interrupção do abastecimento. Este excesso de manutenções preventivas significa que os consumidores da região têm seu fornecimento de água interrompido algumas vezes desnecessariamente. Considerando o intervalo de manutenções preventivas adotado pela empresa, igual a 720 horas (30 dias), a disponibilidade dos poços reduz para 0,9945 (99,45%) no poço Córrego do Tiro e para 0,9943 (99,43%) no poço Febem-Mangabeira. Apesar de a diferença ser bastante pequena entre o praticado e o ótimo, na prática isto significa que em vez de realizar uma atividade de prevenção por mês, isto ocorrerá apenas a cada quase 6 meses e 5 meses em cada poço respectivamente. O benefício deste singular aumento na disponibilidade esperada é de grande valia para aqueles que recebem água sob racionamento.

A quantidade de poços analisados é pequena frente ao número de poços administrados na RMR. Assim, seria interessante a extensão desta análise para os outros poços. Apenas conhecendo esses dados para todos os outros poços seria possível afirmar o ganho total de tempo para as equipes do setor. Desta forma, esta análise abre uma janela de oportunidade para melhor aproveitamento do pessoal da manutenção dentro da empresa.

Infelizmente para os casos onde $\beta \leq 1$, a análise com base nessa política de manutenção não é possível. Valores de β com essa característica levam a valores de tempo (τ) menores do que 0. Observando este fato com outro ponto de vista, isto parece ser razoável: valores de β iguais a 1 levam a uma distribuição de probabilidade exponencial, implicando numa taxa de falhas constante. Ou seja, a qualquer instante de tempo a probabilidade de haver uma falha é a mesma, independentemente de haver manutenção preventiva (Rausand e Hoyland, 2004). Essa independência torna impossível a determinação de um intervalo para atividades de prevenção. No caso de β menor que 1, há a interpretação de que as falhas ocorrem precocemente. As falhas ocorrendo muito precocemente, impossibilitam a intervenção preventiva, já que não se pode antever às falhas dado que a chance disto ocorrer é muito maior em poucos instantes após o início de seu funcionamento.

5.3 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO DE MENOR CUSTO

Esta seção analisa a situação através de um problema de manutenção adotando outro critério para otimização, que é a minimização dos custos envolvidos nas manutenções. Considera-se que o equipamento opera sob as mesmas considerações da Seção 5.2, onde a manutenção preventiva é um reparo que retorna o equipamento a um estado de “tão bom quanto novo. Segundo Rausand e Høyland (2004), um sistema operando num processo de renovação possui a mesma distribuição dos tempos até a falha de um equipamento novo sempre que um ciclo tem início ($t=0$). Esta consideração justifica o uso do modelo de substituição por idade (Cavalcante e Almeida, 2005) para minimização do custo, como descrito a seguir.

Segundo vários autores, (Beichelt (1976); (Glasser (1969) e Chareonsuk *et al.* (1997)), um critério para a avaliação das políticas de manutenção é o custo por unidade de tempo, aqui denominado por K , também chamado de taxa de custo de manutenção. Este processo é avaliado como se as manutenções ocorressem indefinidamente até o infinito, isto é, por um tempo suficientemente longo. Seja τ uma variável aleatória do tempo de ciclo, isto é, o tempo entre duas substituições, e seja C uma variável aleatória que representa os custos com a manutenção envolvidas num ciclo, então

$$K(t) = \frac{E(C)}{E(t)} \quad \text{Eq. 5.15}$$

Com as mesmas considerações feitas na seção anterior, onde cada intervenção (preventiva ou corretiva) retorna a idade do equipamento para zero ($t=0$), associa-se o modelo de substituição por idade à situação estudada. Esse modelo foi desenvolvido por Barlow & Hunter no ano de 1960, sendo referência na otimização de custos em políticas de manutenção preventiva.

Sendo C_C o custo de manutenção após a falha unitário, ou seja, o custo de uma manutenção corretiva, e C_p o custo unitário da manutenção preventiva, o custo esperado para um ciclo de τ unidades de tempo é:

$$E(C) = C_C[1 - R(\tau)] + C_p R(\tau) \quad \text{Eq. 5.16}$$

Em outras palavras, a expressão do custo esperado reflete o custo de uma falha ocorrer até o tempo τ , associado com a respectiva probabilidade $f(t)$, mais o custo de uma manutenção corretiva associado com a probabilidade de o equipamento estar funcionando até o tempo estabelecido τ . Sendo assim, o custo por ciclo K pode ser expresso pela Equação 5.17 (Barlow & Hunter, 1960; Jiang & Ji, 2002).

$$K(\tau) = \frac{C_C[1 - R(\tau)] + C_p R(\tau)}{\int_0^\tau R(t)dt} \quad \text{Eq. 5.17}$$

O denominador desta expressão representa o tempo de ciclo esperado. Desta forma, deve-se encontrar um valor de τ tal que K deve ser mínimo. No entanto, para várias distribuições, assim como a de Weibull, não é possível recorrer a uma solução analítica. Deve-se utilizar de algum procedimento numérico para encontrar a solução. O problema foi solucionado dentro do ambiente MATLAB através da ferramenta de otimização *optimtool*, onde várias opções de métodos estão disponíveis para esta finalidade. Aplicando o método de busca *fminsearch*, que tem como resposta o valor mínimo da função solicitada dentro do conjunto dos números reais. Considerando as funções confiabilidade da Tabela 5.3 e os custos da Tabela 4.4, foram obtidos os seguintes resultados para os poços cujos valores de β são maiores que 1:

- Poço Córrego do Tiro
 $\tau = 2240,061$ (horas)
 $K = 0,7806$
- Poço Febem Mangabeira
 $\tau = 1396,561$ (horas)
 $K = 1,0268$

Os valores de tempo calculados para os intervalos estão em horas. Convertendo-os para dias, têm-se que o intervalo ótimo que minimiza o custo é de 93,33 dias para o Córrego do Tiro e de 58,19 dias para o Febem-Mangabeira. Os valores esperados do custo por ciclo são de 0,7806 e de 1,0286, respectivamente.

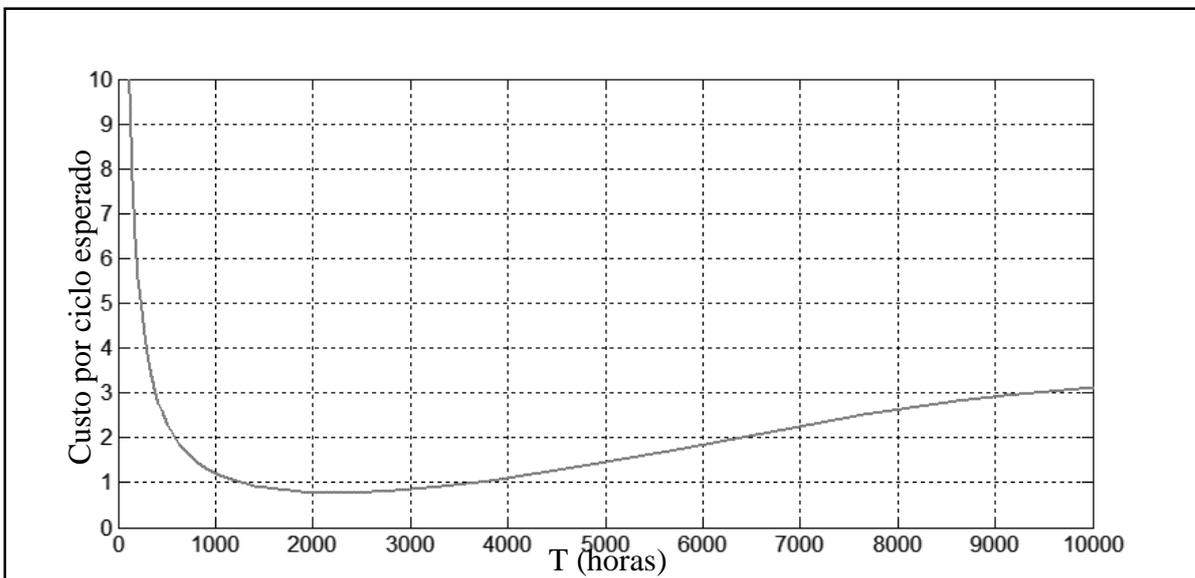


Figura 5.7: Curva da função custo para o Córrego do Tiro

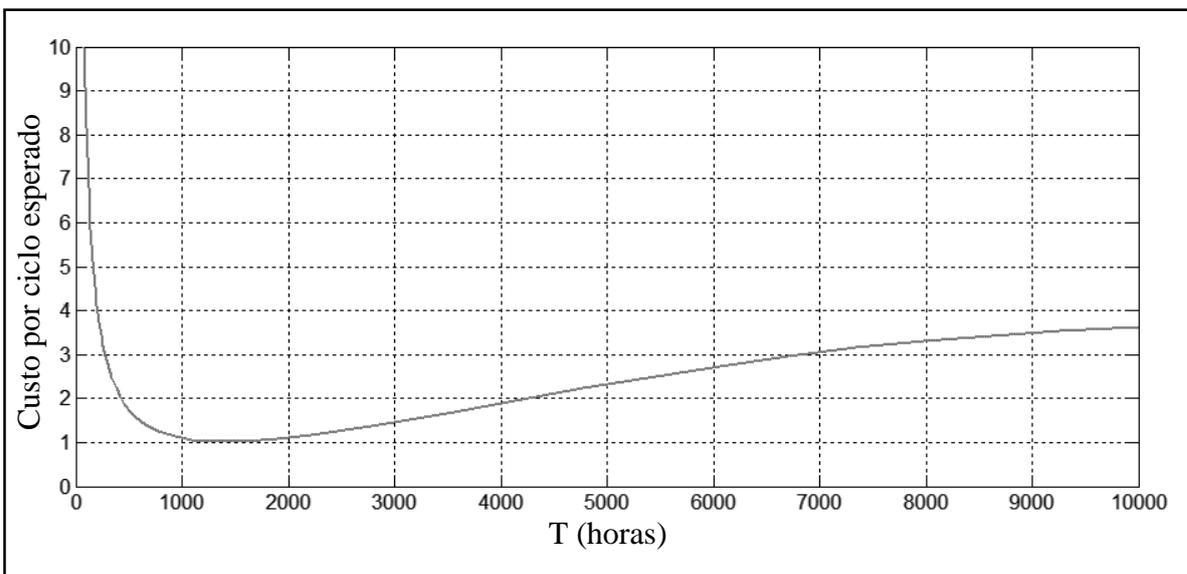


Figura 5.8: Curva da função custo para Febem-Mangabeira

Considerando que atualmente é aplicado o valor de 30 dias como intervalo de manutenção preventiva, vê-se que esta opção, que além de não maximizar a disponibilidade, também não é a mais econômica para as manutenções dos poços. Mais uma vez afirma-se que há um excesso de manutenções preventivas aplicadas nestes poços, tornando este processo mais caro do que deveria ser. Além de tornar o processo caro, existem algumas situações em que o excesso de manutenções preventivas pode prejudicar o sistema. Isto ocorre quando passa-se a inserir defeitos por conta de erro humano, por exemplo, fazendo com que os equipamentos falhem antes do esperado.

Para facilitar a comparação do resultado, pode-se calcular o custo esperado com as manutenções para o período de um ano. Para o intervalo atualmente praticado, o valor de K é 1.6423 para CT e 1,3186 para FM. Esses valores resultam num custo anual esperado de R\$14.474,15 e R\$11.550,94. Quando faz-se o mesmo para o custo por ciclo otimizado, espera-se o gasto de R\$6.838,49 e R\$9.010,16 por ano, respectivamente. Somando-se a redução com os custos da manutenção desses dois poços, espera-se um benefício de R\$10.176,44. Então verifica-se que este estudo possui um potencial e sua aplicação em outras instâncias pode trazer um grande benefício financeiro também.

O comportamento desses dados, ao considerar o custo são, até certo ponto, previsíveis, comparando-se com os resultados obtidos na maximização da disponibilidade. Era esperado obter intervalos de manutenção mais curtos dada a diferença entre os custos com manutenção preventiva e corretiva: o custo da manutenção corretiva é muito alto, isto faz com que sejam realizadas manutenções preventivas em intervalos mais curtos para reduzir o risco dessa quantia ser gasta, dado que a confiabilidade do equipamento é monotonamente decrescente com o tempo. Com esta análise, é sugerido que a empresa adote alternativas para reduzir os custos da manutenção corretiva, levando a redução do custo de todas as atividades. Desta forma, espera-se que os intervalos entre manutenções preventivas sejam ainda maiores. Considerando a tabela de custos da empresa, pode-se priorizar os itens mais caros: aluguel de caminhão tipo *munck* e o preço do conjunto motor-bomba.

6 ABORDAGEM MULTICRITÉRIO

Avaliações independentes para minimização de algum critério não refletem a realidade, onde os gestores têm de enfrentar situações onde diversos critérios devem ser atendidos concomitantemente. Uma opção para o problema seria a otimização multiobjetivo, considerando que deve ser procurado um valor ou um conjunto de valores que corresponda ao ótimo de Pareto, ou seja, a região onde não é possível melhorar a solução em um critério sem que isto implique na redução do desempenho no(s) outro(s) critério(s). Assim, foi realizado um estudo de modelagem multiobjetivo para as duas funções, custo e disponibilidade. No entanto, isto tornou-se inviável computacionalmente graças ao montante de iterações a serem realizados para determinação dos intervalos quando simula-se o problema para espaços de tempo maiores que um mês.

Dante disso, uma forma de agregar esses critérios sem recorrer ao gigantesco cálculo de todas as possíveis soluções é através do uso de métodos multicritério de apoio à decisão. Aqui, mais precisamente, foram aplicados os conceitos da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) para agregação das preferências do gestor e, assim, encontrar uma solução que, mesmo não sendo a de Pareto para o problema disponibilidade *versus* custo, refletirá qual a melhor solução para atender às preferências do gestor nessa questão. Os passos envolvidos nesta etapa do trabalho são:

- 1) Para cada poço, a elicitação das funções utilidade para cada critério (custo e disponibilidade), segundo o procedimento proposto por Keeney e Raiffa (1976);
- 2) Verificação da independência em utilidade entre os critérios;
- 3) Obtenção da função utilidade multiatributo e sua otimização para obtenção do τ que maximiza a utilidade para o gestor.

6.1 Funções utilidade para o custo e a disponibilidade

Para elicitação das preferências do decisor, foi utilizado o procedimento proposto por Keeney e Raiffa (1976). As funções utilidade podem ser de vários tipos e, segundo Keeney e Raiffa, funções lineares e exponenciais representam situações frequentemente encontradas em aplicações práticas, no entanto uma função linear é aplicada quando o decisor é neutro em relação ao risco, isto é, nem averso nem propenso ao risco. Por conta disso, optou-se por utilizar a função exponencial, que traz consigo a informação sobre a tendência do decisor em relação

ao risco, tanto em relação ao custo quanto à disponibilidade do equipamento (Keeney e Raiffa, 1976). As funções a seguir representam as funções utilidade para o custo e para a disponibilidade, onde A é a função disponibilidade (Eq. 5.14), K é a equação do custo por ciclo (Eq. 5.22) e P_1, P_2, Q_1 e Q_2 são os parâmetros a serem determinados.

$$U(A) = Q_2 \exp(-P_2 A) \quad \text{Eq. 6.1}$$

$$U(K) = Q_1 \exp(-P_1 K) \quad \text{Eq. 6.2}$$

Para cada poço, as funções dos critérios de disponibilidade e custo otimizadas geram um valor de τ_A que maximiza a disponibilidade e outro, τ_K , que minimiza o custo. Dentro da análise do MAUT, portanto, o espaço de consequências é limitado a esses valores de τ . Desta forma, $U(K) = 1$ e $U(A) = 0$ para o mínimo custo que o sistema pode assumir e $U(K) = 0$ e $U(A) = 1$ para o intervalo entre manutenções que resultar na máxima utilidade. Qualquer alternativa fora desta região corresponde a uma solução dominada, ou seja, uma solução que indubitavelmente é pior para o decisor. A Figura 6.1 representa os limites do espaço de consequências. Note que, dentro desta área, apenas os pontos contidos na curva são viáveis. Isto ocorre porque tanto o custo como a disponibilidade são dependentes da mesma variável τ . Como esses critérios são conflitantes, o ponto (A^*, K^*) é impossível de ser alcançado, no entanto, busca-se com essa metodologia o ponto viável mais próximo desta solução, o que garante a máxima utilidade para o gestor.

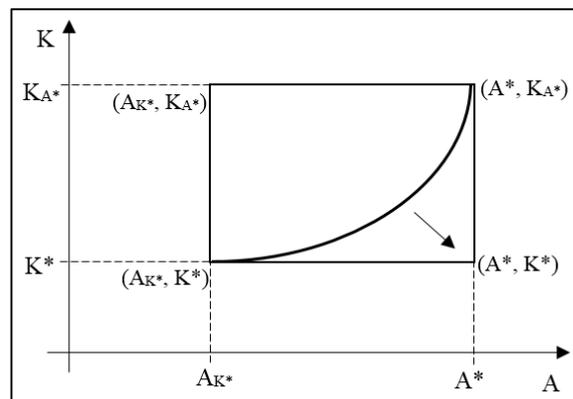


Figura 6.1: Representação do espaço de consequências

Desta forma, foi pedido para o gestor realizar a escolha entre um valor certo e uma loteria numa situação específica, como segue o seguinte exemplo: “suponha que um equipamento tem uma chance de 30% de quebrar em seu funcionamento, causando um custo de R\$ 30.000. Caso

seja realizada uma prevenção, a probabilidade de haver uma quebra durante seu funcionamento cai para 0%.”. Você prefere investir R\$ 1000,00 na prevenção ou correr o risco?” Nesta etapa o decisor responde em favor de uma das opções, o que direciona a próxima alternativa para um valor mais alto caso ele prefira realizar o investimento ou mais baixo caso contrário. Seguindo este procedimento, vários valores de custo para a preventiva foram enunciados até encontrar um valor que o gestor ficasse em dúvida ou demonstrasse indiferença entre aceitar o valor ou correr o risco, o que corresponde ao equivalente certo. Ressalta-se que os equivalentes certos propostos estão contidos no intervalo resultante das situações de custo otimizado e de disponibilidade otimizada. O exemplo do experimento pode ser representado pela Figura 6.2.

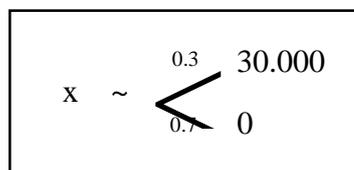


Figura 6.2: Representação da comparação entre valor certo e loteria

Essa mesma pergunta foi realizada para um total de 12 valores esperados de loterias, onde eram mantidos os valores das probabilidades, no entanto, alterando-se apenas o custo da quebra, de tal forma que o valor esperado da loteria sempre estivesse dentro do intervalo determinado pelas utilidades máxima e mínima do custo. De maneira similar este experimento foi realizado para a disponibilidade, onde o gestor era questionado sobre quantas horas ele faria em uma manutenção preventiva para eliminar o risco de uma quebra que demandasse certa quantidade de horas. Do mesmo modo, 12 pontos também foram elicitados para a disponibilidade. O resultado desse procedimento para as duas variáveis são dois conjuntos de pares na forma (equivalente certo, utilidade para o decisor). Os dados da elicitación das utilidades do custo e da disponibilidade estão nas Tabelas 6.1 e 6.2 para os poços CT e FM, respectivamente.

Através de regressão exponencial é possível obter os parâmetros P_1 e Q_1 da função utilidade para custo e P_2 e Q_2 para função utilidade para a disponibilidade. Nas Figura 6.3 e 6.4 estão os gráficos, assim como a representação das curvas ajustadas por meio do método dos mínimos quadrados (MMQ).

Tabela 6.1: Dados da elicitação das funções objetivo para CT

τ	CUSTO				DISPONIBILIDADE		
	Valor esperado (R\$)	Eq. Certo (R\$)	Eq. Certo (R\$/hora)	Utilidade	Valor esperado	Equivalente certo	Utilidade
2240	6838,490	6838,490	0,780649543	1	0,9981	0,9981	0
2550	6956,865	6925,713	0,790606566	0,96	0,9982249	0,998366049	0,31225
2730	7190,499	7003,592	0,799496765	0,883	0,9982979	0,998384198	0,49475
2850	7283,953	7034,743	0,803052844	0,852	0,9983382	0,998402346	0,5955
2970	7424,133	7065,894	0,806608924	0,805	0,9983728	0,998411481	0,682
3060	7564,3143	7190,499	0,820833242	0,758	0,9983953	0,998420617	0,73825
3115	7657,768	7283,953	0,83150148	0,727	0,9984077	0,998420617	0,76925
3183	7751,222	7424,134	0,847503838	0,696	0,9984217	0,998438765	0,80425
3250	7891,402	7502,012	0,856394037	0,649	0,9984342	0,998447901	0,8355
3365	8125,037	7657,768	0,874174434	0,571	0,9984526	0,998456914	0,8815
3582	8592,306	7969,281	0,90973523	0,415	0,9984781	0,998475062	0,94525
4071	9838,356	9838,356	1,1231	0	0,9985	0,9985	1

Tabela 6.2: Dados da elicitação das funções objetivo para FM

τ	CUSTO				DISPONIBILIDADE		
	Valor esperado (R\$)	Eq. Certo (R\$)	Eq. Certo (R\$/hora)	Utilidade	Valor esperado	Equivalente certo	Utilidade
1397	9010,160	9010,160	1,028557078	1	0,9969	0,9969	0
1690	9227,013	9169,947	1,046797565	0,96	0,9972616	0,997565123	0,3616
1935	9655,013	9312,613	1,063083714	0,883	0,9974868	0,997610494	0,5868
2010	9826,213	9369,680	1,069598174	0,852	0,9975407	0,997655864	0,6407
2120	10083,013	9426,747	1,076112633	0,805	0,9976096	0,997678704	0,7096
2220	10339,813	9655,013	1,102170472	0,758	0,9976631	0,997701543	0,7631
2285	10511,013	9826,213	1,121713851	0,727	0,9976937	0,997701543	0,7937
2340	10682,213	10083,013	1,151028919	0,696	0,9977173	0,997746914	0,8173
2430	10939,013	10225,680	1,167315068	0,649	0,9977517	0,997769753	0,8517
2570	11367,013	10511,013	1,199887367	0,571	0,997796	0,997792284	0,896
2830	12223,013	11081,680	1,265031963	0,415	0,9978539	0,997837654	0,9539
3460	14505,680	14505,680	1,655899543	0	0,9979	0,9979	1

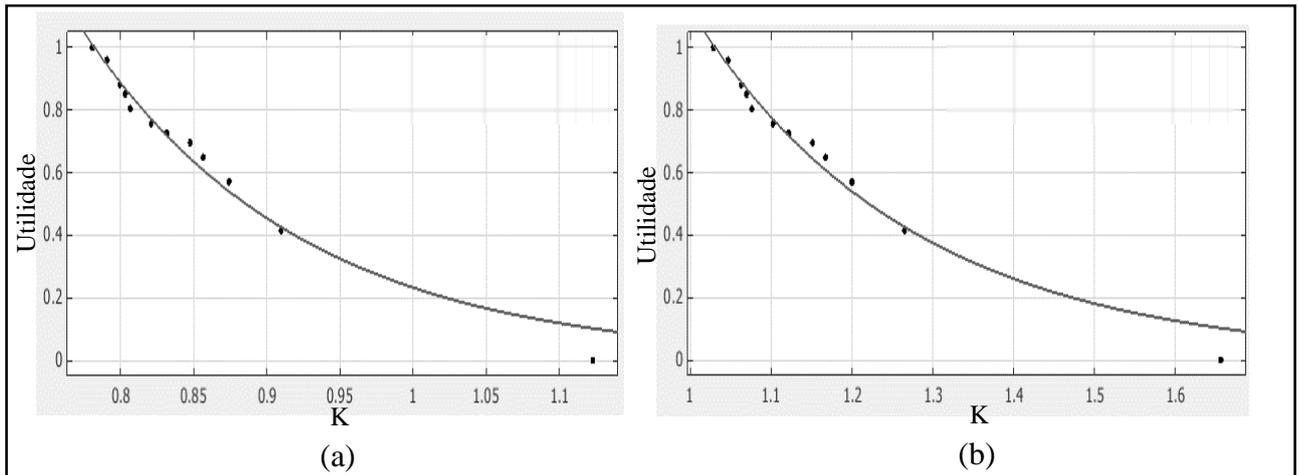


Figura 6.3: Ajuste da função utilidade para o custo para CT (a) e FM (b)

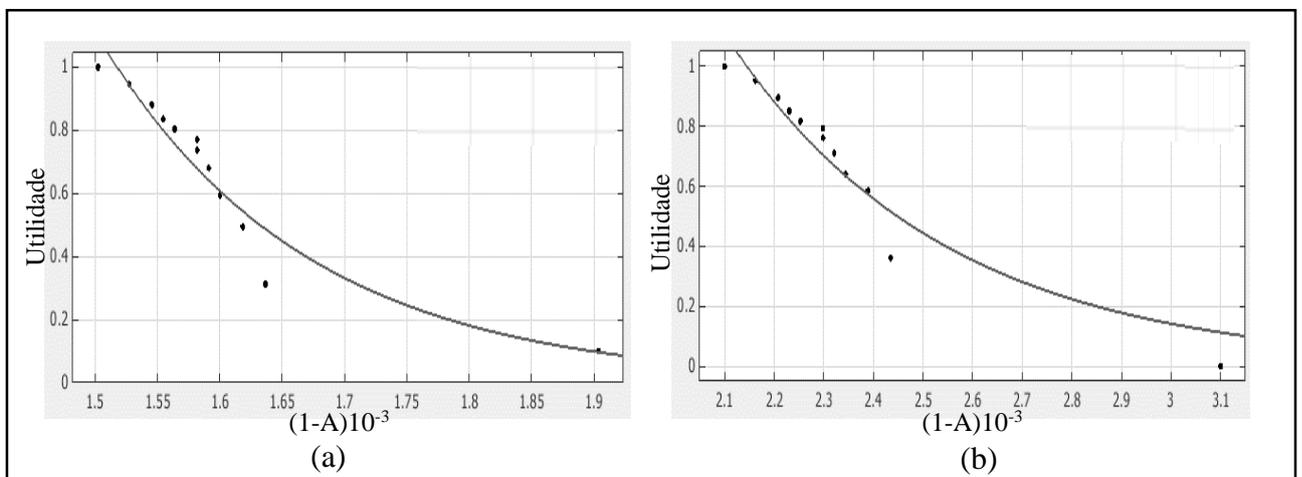


Figura 6.4: Ajuste da função utilidade para a disponibilidade para CT (a) e FM (b)

$$U_1(K) = 185,8 \exp(-6,687 K) \quad (R^2 = 0,986) \quad \text{Eq. 6.4}$$

$$U_2(K) = 43,12 \exp(-3,65 K) \quad (R^2 = 0,994) \quad \text{Eq. 6.3}$$

$$U_1(A) = 9960 \exp(-6135(1 - A)) \quad (R^2 = 0,926) \quad \text{Eq. 6.6}$$

$$U_2(A) = 121,5 \exp(-2285(1 - A)) \quad (R^2 = 0,935) \quad \text{Eq. 6.5}$$

Onde A e K são as funções relativas ao custo por ciclo e a disponibilidade, sendo ambas dependentes do intervalo entre manutenções preventivas (τ) (Equações 5.14 e 5.17, respectivamente). Foi utilizada a quantia $1-A$, que significa a indisponibilidade, para obtenção de uma função utilidade no mesmo formato.

Desta forma, as Figuras 6.5 e 6.6 apresentam as funções utilidade para os dois critérios do poço Córrego do Tiro e Febem-Mangabeira, respectivamente.

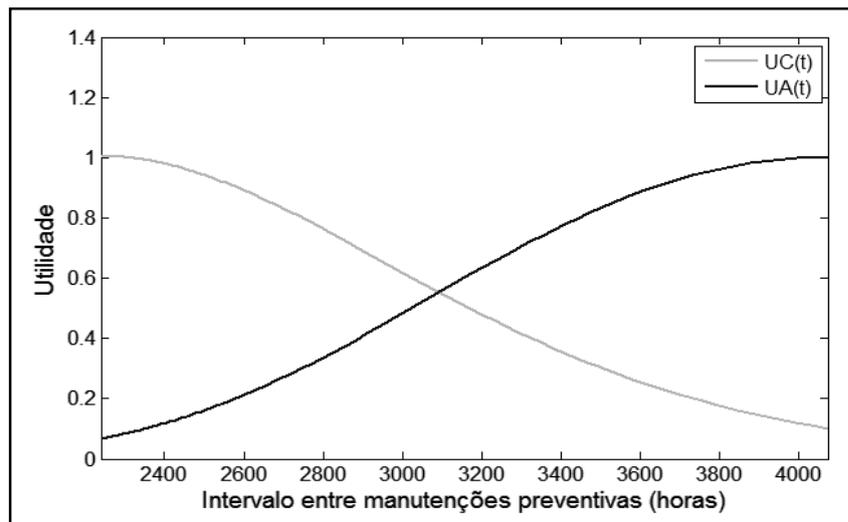


Figura 6.5: Funções utilidade do custo e disponibilidade para o poço Córrego do Tiro

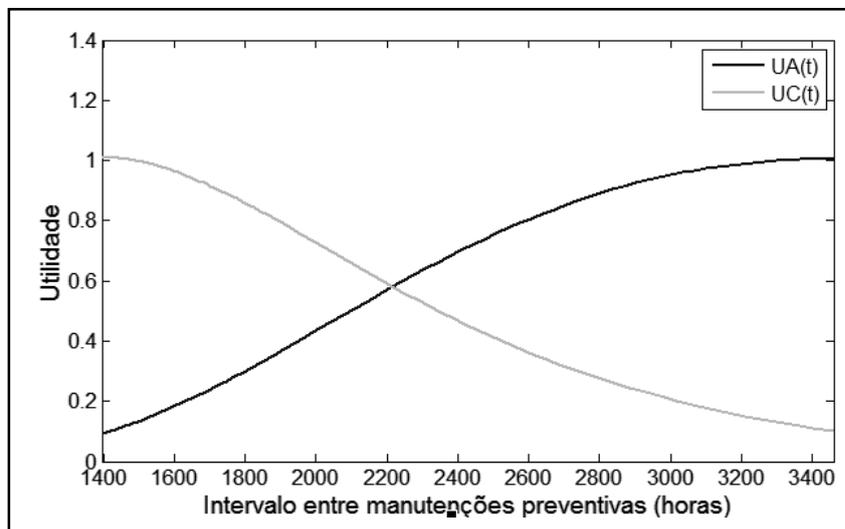


Figura 6.6: Funções utilidade do custo e disponibilidade para o poço Febem-Mangabeira

Para que seja possível compor uma função multiatributo envolvendo essas duas funções utilidade, é necessário que haja independência em utilidade. Tão logo, alguns questionamentos foram realizados ao gestor para verificar se há essa característica. Segundo Keeney e Raiffa (1976), haverá independência em utilidade se a utilidade por um critério não variar em relação a alguma alteração no(s) outro(s) critério(s). Desta forma, a seguinte pergunta foi proferida: “Quanto seria investido, financeiramente, em 10 horas manutenções preventivas para evitar o risco de 30% de haver uma quebra ao custo de R\$30.000?”. Após a resposta, que foi no valor de R\$ 8.000, uma modificação foi feita na pergunta: “Então, quanto seria investido em 15 horas de manutenções preventivas para evitar o mesmo risco de 30% de uma quebra ao custo de R\$30.000?”. O gestor foi bastante claro ao dizer que não gastaria mais dinheiro. Esta resposta implica que os diferentes tempos gastos em manutenções preventivas, que refletem diretamente

na disponibilidade do equipamento, não influenciam no valor esperado da utilidade do custo. Tão logo, uma terceira pergunta: “Essa resposta se modificaria para algum outro valor de tempo para realização das manutenções?” E a resposta foi negativa. A representação desta situação está na Figura 6.7, significando que o valor da utilidade para o custo é independente da utilidade para a disponibilidade.

$$\boxed{(8000, A) \sim \begin{cases} 0.3 & (30.000, A) \\ 0.7 & (0, A) \end{cases} \text{ Para qualquer } A}$$

Figura 6.7: Representação da independência em utilidade para o custo

Da mesma forma foi realizada em relação à disponibilidade: “Se tens R\$7.000 para gastar em manutenções preventivas, quantas horas seriam dedicadas a um equipamento para evitar o risco de 50% de ficar 48 horas paradas por conta de uma quebra?”. A resposta foi 15 horas e complementou dizendo que esse valor também não se alteraria para outras quantias em dinheiro disponíveis.

Além dessas respostas, o gestor afirmou que poderia gastar mais com manutenções se elas aumentassem de alguma forma a qualidade do serviço, como realizando troca de algumas partes por peças mais modernas, com nível mais alto de automatização, ou em peças com maior vida útil esperada. Poderia ser investido também com treinamentos, dado que o pessoal atualmente não realiza nenhum tipo de atividade educacional específica. Por outro lado, também afirmou que o tempo investido em manutenções não se alteraria com o custo dado que, com o mesmo nível tecnológico, não faria sentido passar mais tempo em manutenções somente porque assim ele estaria afetando o principal objetivo da empresa que é o de fornecer água para seus clientes. Em outras palavras, estaria reduzindo a disponibilidade do equipamento.

Então, com base nessas informações, conclui-se que há independência mútua em utilidade para os critérios estudados, o que permite passar para a fase de agregação das funções utilidades, obtendo uma única função utilidade. A partir desta função, encontra-se a melhor solução para definição dos intervalos de manutenção das bombas.

6.2 Função utilidade multiatributo e solução ótima

Um dos teoremas do texto de Keeney e Raiffa (1976), afirma que se Y e Z são mutuamente independentes em utilidade, então a função utilidade de dois atributos é multilinear. Neste caso, em particular, U pode ser escrito na forma da Equação 2.10.

Onde $U(y, z)$ é normalizado de tal forma que $U(y_1, z_1) = 1$ e $U(y_0, z_0) = 0$. U_y e U_z são as funções utilidade de Y e Z normalizadas, $k_y = U(y_1, z_0)$, $k_z = U(y_0, z_1)$, $k_{yz} = 1 - k_y - k_z$. y_1 e z_1 correspondem às melhores situações e y_0 e z_0 correspondem às piores situações para y e z , respectivamente. A exploração do espaço de consequências em forma de loterias, como feito na seção 6.1, também é útil para o estabelecimento das constantes de escala. Quando o decisor compara e quantifica essas situações, especificamente para os extremos do espaço de soluções, o resultado são as constantes de escala do modelo, as quais foram $k_A = 0,6$, $k_K = 0,3$ para ambos poços.

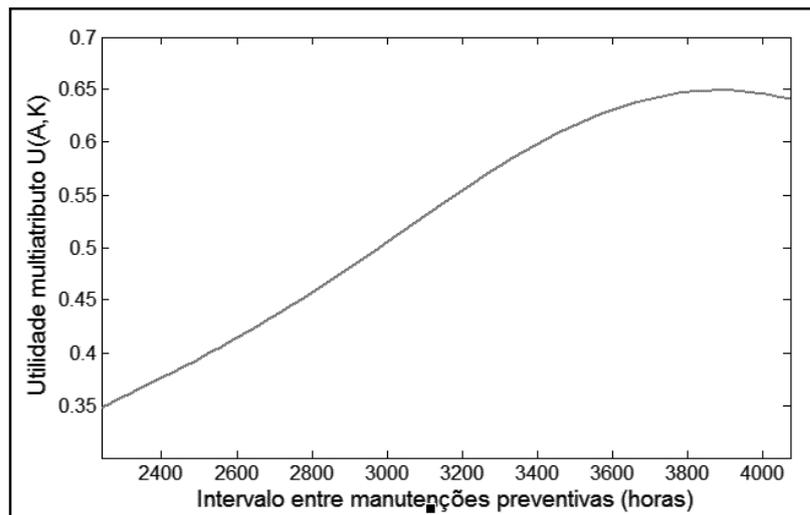
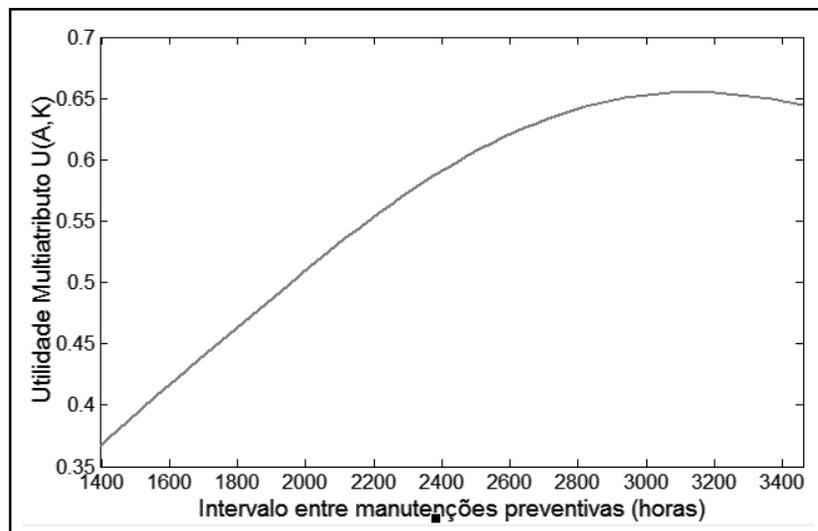
Assim, na problemática estudada, tem-se a Equação 6.7 como a função utilidade multiatributo $U(A, K)$ para CT e Equação 6.8 para FM.

$$U(A, K) = 5976 \exp(-6135(1 - A)) + 55,74 \exp(-6,687 K) + 1,85 \\ * 10^5 \exp(-(6135(1 - A) + 6,687 K)) \quad \text{Eq. 6.7}$$

$$U(A, K) = 72,9 \exp(-2285(1 - A)) + 12,94 \exp(-3,65 K) \\ + 523,91 \exp(-(2285(1 - A) + 3,65 K)) \quad \text{Eq. 6.8}$$

Desta forma, é possível encontrar o valor do intervalo de manutenções preventivas que corresponde à máxima utilidade para o gestor. As Figuras 6.8 e 6.9 são os gráficos das funções utilidade $U(A, K)$ para o poço Córrego do Tiro e o poço Febem-Mangabeira, respectivamente. As utilidades ótimas são encontradas foram

- Poço córrego do Tiro
 $\tau = 3883,313$; $U(A, K) = 0,6493$
- Poço Febem Mangabeira
 $\tau = 3140,904$; $U(A, K) = 0,6550$

Figura 6.8: $U(A,K)$ para o poço Córrego do TiroFigura 6.9: $U(A,K)$ para o poço Febem Mangabeira

Os valores encontrados para τ significam que os intervalos para realização das manutenções preventivas devem ser de 3883,313 horas no Poço 1 e de 3140,904 para o Poço 2. Em unidades de dias, isto corresponde à realização das manutenções preventivas a cada aproximadamente 162 e 131 dias, respectivamente. Isto reflete nos valores de custo por ciclo $K_1=1,0653$ e disponibilidade $A_1=0,998497$ para o Poço 1 e $K_2=1,5211$ com disponibilidade de $A_2=0,997891$ para o Poço 2. A Tabela 6.3 apresenta um comparativo das consequências esperadas para os dois poços, calculadas em termos de valores esperados pelo período de um ano. Além disso, estes resultados mostraram-se pouco sensíveis sobre variações nas constantes de escala da função utilidade multiatributo, desde que seja mantida a preferência do gestor priorizando o critério disponibilidade. No sentido de reduzir a diferença entre as constantes, alterações máximas de 10 dias no intervalo ótimo entre manutenções são obtidas para variações

na razão k_a/k_k (mantendo-se k_{ak} fixo) em 44,12% para o Poço 1 e 33,12% para o Poço 2. Ou seja, mesmo com consideráveis alterações na relação entre as constantes de escala, o significado prático dos resultados exibidos a seguir permanecem inalterados.

Tabela 6.3: Matriz de conseqüências para cada intervalo entre manutenções preventivas

Poço	Máxima disponibilidade			Mínimo custo			Máxima utilidade		
	τ	A	K*	τ	A	K*	τ	A	K*
CT	169,64	99,8499	9838,356	93,33	99,8056	6838,49	161	99,8495	9332,03
FM	144,16	99,7902	14505,68	58,19	99,6851	9010,16	131	99,7891	13324,84

*Para comparação entre os resultados, o valor de K refere-se ao custo esperado com manutenções pelo período de um ano.

O atual intervalo entre intervenções preventivas é de 30 dias e este apresenta algumas vantagens por facilitar a administração do setor manutenções, pois cria um calendário fixo e regular para todos os dias do ano. No entanto, isto pode omitir algumas particularidades de cada poço. A partir deste resultado verifica-se que está havendo um excesso de intervenções preventivas, pois este intervalo está levando o poço para um estado de menor disponibilidade e maior custo. Isto ocorre porque esta é uma solução dominada, ou seja, apresenta desempenhos piores em ambos critérios por estar fora do intervalo entre os ótimos.

Para o Poço 1, por exemplo, a disponibilidade esperada do equipamento segundo o intervalo de 30 dias é de 0,9945. 99,45% aparenta ser bastante satisfatório em termos de operacionalidade. Mas, considerando o prejuízo para os consumidores, esta situação é grave: as áreas abastecidas por poço na cidade do Recife já sofrem racionamento de água pela incapacidade de fornecê-la simultaneamente a todos os consumidores. E, sempre que há a necessidade de manutenção, seja preventiva ou corretiva, alguma área que já é sub abastecida ficará ainda menos tempo com água disponível. Considerando o período de um ano, retratado na Tabela 1, o tempo esperado que se demanda em manutenções cai em 65,5% comparando-se com a política atualmente praticada. Além do aumento na disponibilidade o Poço 1 pode ter seus custos anuais reduzido em R\$5054,52 (35,13%). Ou seja, o intervalo entre manutenções preventivas de 30 dias é uma solução dominada, que não corresponde a uma redução nos custos, tampouco a uma maior disponibilidade.

Já para o Poço 2, esta redução na expectativa de tempo parado é de 62,6% e são válidas as mesmas considerações feitas para o Poço 1 quanto ao benefício à população. Contudo, nesta ocasião o tradeoff entre o custo e a disponibilidade é bastante claro: para aumentar a

disponibilidade de água à população é necessário um aumento nos custos. Neste caso, o intervalo de máxima utilidade (131 dias) é aquele que melhor compatibiliza as consequências em termos de custo e disponibilidade para o gestor. Em outras palavras, o gestor está disposto a pagar R\$1774 a mais em manutenções para que haja o ganho de 31 horas com equipamento disponível para fornecer água à população. É interessante ressaltar que o ganho financeiro possível pelo ajuste de τ no Poço 1 é mais do que o suficiente para investir no Poço 2 para o aumento de sua disponibilidade.

. No entanto, reforça-se que o atual calendário de manutenções preventivas foi elaborado sem a devida quantificação dos critérios envolvidos. Talvez fosse esperado que o resultado da otimização multicritério estivesse mais próximo do que é praticado, mas existe um outro fator que também pode alterar o intervalo de manutenções de um poço: as características dos demais equipamentos, pois, por querer facilitar a administração dessa rotina, foi definido um intervalo idêntico para todos os poços (30 dias). Por conta disso, deve ser interessante realizar o mesmo estudo nos outros poços administrados pela Compesa para identificar as características do funcionamento do sistema como um todo. Além disso, em outro momento, pode-se considerar também as restrições desse sistema como a quantidade disponível de pessoal para execução dos serviços, orçamento do departamento, dentre outras.

Por fim, após as inferências, foi perguntado ao gestor se havia algum outro critério que também é levado em consideração ao tomar decisões neste âmbito. A resposta foi positiva, e esse outro critério é a quantidade de bombas utilizada para abastecer a mesma área, pois existem regiões que são abastecidas por mais de um poço. O próprio Morro da Conceição serve de exemplo, onde os poços da Praça do Trabalho e do Largo Dom Luiz abastecem simultaneamente a duas áreas. Caso haja a necessidade de manutenção preventiva ou ainda uma corretiva em mais de uma bomba ao mesmo tempo, a região com menos poços recebe prioridade, ainda que esta seja uma decisão mais cara. Este fator é outro que também sustenta a ideia de realizar o estudo para os outros poços, possibilitando considerar mais essa condição no estudo, tornando a análise ainda mais realista.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho consistiu em utilizar modelos para otimização das atividades de manutenção, segundo critérios específicos, de um sistema de abastecimento de água realizado através de poços. Tão logo, o equipamento em questão foi o conjunto motor-bomba do poço. A Compesa não tinha um programa de manutenção preventiva desses equipamentos, criado há 2 anos. Até então, o único tipo de manutenção ocorria quando o equipamento parava de funcionar, ou seja, gerando ações corretivas emergenciais. Mais recentemente, foi criado um calendário de manutenções preventivas, cujos intervalos foram estabelecidos de forma que gerasse uma segurança de que não houvesse necessidade de ações corretivas. Isso foi provavelmente devido ao alto custo desse tipo de manutenção. No entanto, sem mensurar o comportamento dos equipamentos e, no intuito de garantir a não necessidade de manutenções corretivas, indefinidamente foi estabelecido que o intervalo entre ações preventivas seria de um mês para cada poço.

Então, nesse trabalho foi realizado um estudo que considerou como critérios os custos de manutenção e a disponibilidade do equipamento para realizar a distribuição de água, de forma que reduzisse os prejuízos aos consumidores. Foram selecionados para este estudo 4 poços, localizados na zona norte do Recife-PE.

Primeiramente, a partir do cálculo dos parâmetros da distribuição de probabilidade de Weibull, verificou-se que, em dois poços, o parâmetro de forma de Weibull é maior que 1, significando que a taxa de falha é crescente com o tempo. Nos outros dois equipamentos, isso não foi encontrado: o parâmetro de forma foi próximo de 1 em um dos poços e no outro esse valor foi consideravelmente menor que 1. Isto implica numa taxa de falha aproximadamente constante e decrescente, respectivamente. Desta maneira, a manutenção preventiva não é justificável nestes casos pois não necessariamente isto trará benefícios em relação à expectativa de vida útil do equipamento.

Então, um estudo mais aprofundado foi realizado nos dois poços cuja manutenção preventiva pode ser viável. O primeiro critério analisado foi a disponibilidade do equipamento para execução de seu serviço. Para tal foram considerados ciclos que se iniciam ao início da operação do equipamento e termina ao ocorrer uma manutenção preventiva ou uma falha. Assim, a modelagem considerou que o tempo esperado desse ciclo seria igual à soma do tempo total disponível para operação, mais o tempo gasto numa manutenção preventiva, mais o tempo

gasto em manutenções corretivas multiplicado pelo valor esperado da quantidade de manutenções corretivas, diretamente relacionado com a taxa de falhas. Com isto foi possível obter um valor ótimo de tempo entre manutenções preventivas de forma que o tempo disponível por ciclo fosse maximizado. Foram encontrados intervalos superiores aos praticados pela empresa, significando que havia um excesso de manutenções preventivas, segundo este critério, reduzindo a disponibilidade de água para os consumidores, bem como reduzindo a disponibilidade de pessoal da equipe para realização de outras atividades.

Em relação ao segundo critério, o custo das manutenções, ainda foi encontrado um intervalo ótimo maior que o praticado para um dos poços. Ou seja, para este poço o intervalo definido não atende de maneira ótima nenhum dos critérios considerados, havendo um excesso de intervenções preventivas, levando a um custo maior que o necessário e a uma maior indisponibilidade do equipamento. Em relação ao segundo poço, o intervalo praticado é bem próximo àquele que retorna um melhor custo.

Uma terceira análise foi realizada, onde foi aplicada a teoria do MAUT para a definição desses intervalos. Logo, foram elicítadas as funções utilidade para o custo e para a disponibilidade do equipamento. Essas funções foram agregadas de tal forma que a utilidade multiatributo fosse dependente apenas do intervalo entre manutenções preventivas, possibilitando a otimização a partir dessa variável. Foram encontrados valores bastante próximos dos encontrados na otimização apenas com o critério disponibilidade, sendo válidas as mesmas considerações, de acordo com a maior valoração deste critério quando a opinião do decisor é consultada. No entanto, a análise multicritério exige que gestor pense mais profundamente sobre o assunto, a partir de vários pontos de vista, revendo seus conceitos, preferências, bem como a forma como as decisões estão sendo tomadas e as consequências disto. Vê-se a partir deste trabalho que existe uma janela de oportunidades para o gestor aumentar a eficiência de suas operações a partir de decisões melhores.

7.2 Trabalhos futuros

Ampliar o estudo para uma quantidade maior de bombas. Isso tornaria o estudo mais realista e permitiria o uso de mais critérios e restrições que são pertinentes a estas decisões: restrições de pessoal, ferramentas/veículos, orçamento, etc.

Uma outra forma de estudar o caso seria através da busca da solução matemática para o problema de otimização custo x disponibilidade com grandes números de tarefas a serem executadas, onde pudessem ser variados não só as atividades de manutenção, mas também o

calendário de abastecimento de água. Desta forma, um modelo pode ainda ser estendido para outras ocasiões, dado que os resultados de modelos de suporte à decisão são válidos apenas para a ocasião estudada e para o mesmo decisor.

Além disso, existem estudos mais recentes de engenharia de manutenção que podem ser incluídos neste contexto como o delay time, e outros modelos de políticas de manutenção.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12215 – Projeto de adutora de água para abastecimento público. Brasil, 1991
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Brasil, 1994
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14224 – Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos, 2011
- AGHEZZAF, E; NAJID, N. M. *Integrated Production Planning And Preventive Maintenance In Deteriorating Production Systems*. Information Sciences, V. 178, N°17. 2008
- ALVISI, S.; FRANCHINI, M. *Multiobjective Optimization Of Rehabilitation And Leakage Detection Scheduling In Water Distribution Systems*. Journal Of Water Resources Planning And Management. Novembro/Dezembro, 2009
- ANA - Agencia Nacional De Águas Disponível Em [Http://Www2.Ana.Gov.Br/Paginas/Institucional/Sobreaana/Default.aspx](http://Www2.Ana.Gov.Br/Paginas/Institucional/Sobreaana/Default.aspx)
- ALMEIDA, A.T. Additive-Veto Models for Choice and Ranking Multicriteria Decision Problems. *Asia-Pacific Journal of Operational Research* 30:1350026-1-1350026-20, 2013
- ALMEIDA, A.T. Multicriteria Model for Selection of Preventive Maintenance Intervals. *Qual. Reliab. Engng. Int.* 28 585–593, 2012
- ALMEIDA, A. T. O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão. 2a. ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2011.
- ALMEIDA, A.T. Multicriteria Decision Making on Maintenance: Spares and Contracts Planning. *European Journal of Operational Research* 129(2):235-241, 2011

- ALMEIDA, A.T. Multicriteria Modelling of Repair Contract Based on Utility and ELECTRE I Method with Dependability and Service Quality Criteria. *Annals of Operations Research* 138:113-126, Netherland, 2005
- ALMEIDA, A.T. Multicriteria Modelling For Repair Contract Problem Based On Utility Function And Electre I Method. *IMA Journal of Management Mathematics* 13(1):29-37, 2002
- ALMEIDA, A.T., SOUZA, F.M.C. Decision Theory In Maintenance Strategy For A Two-Unit Redundant Standby System. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(3):401-407, 2003
- ALMEIDA, A. T.; SOUZA, F. M. C. DE. *Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade*. 1. ed. Recife: Editora Universitária, 2001.
- ALMEIDA, S. Proposta de abordagens para agregação de preferências de stakeholders para definição metodológica da precificação de produtos farmacêuticos. Tese de Doutorado em Engenharia de produção. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-Pernambuco, 2012
- AZEVEDO, C. *Se as máquinas falassem: uma conversa franca sobre a gestão de ativos industriais*. São Paulo: Saraiva, 2007
- BAKER. R, Risk aversion in maintenance: a utility-based approach. *IMA Journal of Management Math* 21(4):319-332, 2010
- BEICHEL, F. A general preventive maintenance policy. *Mathematische Operationsforschung und Statistik*, V. 7, 927-932, 1976
- BEM DAYA, M.; DUFFUAA, S.O. Maintenance and quality: the missing link. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 1 (1), 20-26, 1995
- BENBOUZID-SITAYEB, F.; GUEBLI, S.A.; BESSADI, Y.; VARNIER, C.; ZERHOUNI, N. *Joint Scheduling Of Jobs And Preventive Maintenance Operations In The Flowshop Sequencing Problem: A Resolution With Sequential And Integrated Strategies*. *International Journal Of Manufacturing Research*, V. 6, N°1. 2011

- BRITO, A.J.M.; ALMEIDA FILHO, A.T. ALMEIDA AT. Multi-criteria Decision Model for Selecting Repair Contracts by applying Utility Theory and Variable Interdependent Parameters. IMA Journal of Management Mathematics 21:349-361, 2010
- BUSSAB, W.O., MORETTIN, P.A. *Estatística Básica - Métodos Quantitativos*. Ed. Atual, São Paulo, 1987
- BUZETI, C., CASAGRANDE A. P., BAGGIO, M. A. *Redes De Distribuição De Água: Porquê Não A Operamos?* Anais Do Congresso Interamericano De Engenharia Sanitária E Ambiental, Porto Alegre – RS, 2000
- CABRAL, J. J. S. P. ; SANTOS, S. M. ; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; DEMETRIO, J. G. A. ; CIRILO, J. A. ; MANOEL FILHO, J. ; SANTOS, A. C. ; MONTENEGRO, A. A. . Ferramentas Para O Gerenciamento Integrado Dos Aquíferos Da Região Metropolitana Do Recife. In: Xiii Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 1999
- CAPUCCI, E.; MARTINS A. M.; MANSUR, K.L.; MONSORES, A.L.M. Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas. Projeto PLANAGUA, Secretaria de estado de maio Ambiente e Secretaria de Estado de Energia, Departamento de Recursos Minerais, Rio de Janeiro, 2001
- CASSADY, C.R.; KUTANOGLU, E. "Minimizing Job Tardiness using Integrated Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling," IIE Transactions, Vol. 35, No. 6, 503-513, 2003
- CASSADY, C.R.; KUTANOGLU, E. "Integrating Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling for a Single Machine," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 54, No. 2, 304-309, 2005
- CAVALCANTE, C.A.V. Minuta de Apostila: Engenharia de Manutenção. Universidade Federal de Pernambuco, 2011

- CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. de. 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
- CAVALCANTE, C.A.V.; ALMEIDA, A.T. 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. 279-296, 2005
- 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
- CAVALCANTE, C. A. V.; PIRES FERREIRA, R. J.; de Almeida, A. T. A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 21, p. 333-348, 2010.
- CAVALCANTE, C. A. V.; COSTA, A.P.C.S. MULTICRITERIA MODEL OF PREVENTIVE MAINTENANCE.. *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, v. 3, p. 57-72, 2006
- CAVALCANTE, C. A. V. ; LOPES, R. S. Opportunistic Maintenance Policy for a System with Hidden Failures: A Multicriteria Approach Applied to an Emergency Diesel Generator. *Mathematical Problems in Engineering (Online)*, v. 2014, p. Article ID 1572, 2014
- CAVALCANTE, C.A.V. ; SCARF, P. A. ; de Almeida, A.T. *A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime*. *Reliability Engineering & Systems Safety*, v. 96, p. 627-635, 2011.
- CESEC - Centro De Estudos Em Engenharia Civil Professor Inaldo Ayres Vieira. *Epanet 2.0: Simulações De Comportamentos Hidráulicos*. Grupo Do Programa De Educação Tutorial (PET). Engenharia Civil, Ufpr, 2010

- CHASE, D.V. *Operation Of Water Distribution Systems*. Capitulo 15 De Mays, L.W. Water Distribution Systems Handbook, 1999
- CHEUNG, P.B. *Análise De Reabilitação De Redes De Distribuição De Água De Abastecimento Via Algoritmos Genéticos Multiobjectivos*. Tese De Doutorado Em Hidráulica E Saneamento. Escola De Engenharia De São Carlos, Universidade De São Paulo, São Carlos-Sp, 2004
- COMPESA. *Contrato da Prefeitura da Cidade do Recife com a Compesa*, 29 de Dezembro De 2005
- CUNHA, A. A. R. *Otimização Energética Em Tempo Real Da Operação De Sistemas De Abastecimento De Água*. Dissertação De Mestrado Em Hidráulica E Saneamento. Universidade De São Paulo, São Carlos-Sp, 2009
- CUNHA, P.F.F.D.; TROJAN, F.; MORAIS, D. C. *Apoio À Decisão No Setor De Manutenção Das Redes De Distribuição De Água Aplicando O Electre I*. In: Enegep - Encontro Nacional De Engenharia De Produção, São Carlos-Sp, 2010
- DALBEM J.C., NASCIMENTO, M. G. A., BAGGIO, M. A. *Gerenciando A Operação De Sistema De Abastecimento De Água Em Vitoria-Es*. Anais Do Congresso Interamericano De Engenharia Sanitária E Ambiental, Porto Alegre – Rs, 2000
- DANDY, G.C.; ENGELHARDT, M. *Optimal Scheduling Of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms*. Journal Of Water Resources Planning And Management. V. 127. Julho/Agosto, 2001
- DANDY, G.C., SIMPSON, A. R., MURPHY, L.J. *An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization*. Water Resources Research, V. 32 (2), P. 449-458, 1996
- DANTAS, M. P.; GONÇALVES, E.; MACHADO, M. R. *Setorização De Redes De Distribuição De Água E Controle De Pressão Voltados Para Controle De Perdas*. 20º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, 1999

- DJEBEDJIAN, B.; YASEEN, A.; RAYAN, M.A. *Optimization Of Large-Scale Water Distribution System Design Using Genetic Algorithms*. In: Tenth International Water Technology Conference. Alexandria (Egito), 2006
- DINIZ, H. N.; MICHALUATE, W. J. *Interpretação de testes de vazão em poços tubulares profundos - dimensionamento e especificações de bombas submersas*. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico do Estado de São Paulo, v. 1. 78p, 2002.
- EBARA. *Catálogo de bombas submersas*. Disponível em <http://www.ebara.com.br/ebara/pt/index.php>.
- ENGELHARDT, M.O., SKIPWORTH, P.J., SAVIC, D.A., SAUL, A.J., WALTERS, G.A. *Rehabilitation Strategies For Water Distribution Networks: A Literature Review With A Uk Perspective*. Urban Water, V. 2, 2000
- FARIAS, A.P.S.; FONTANA, M.E.; MORAIS, D.C. *Modelo De Sistema De Informação E Decisão Para Intervenções De Reabilitação Em Redes De Distribuição De Água*. Revista Brasileira De Recursos Hídricos. V. 18, N.2. Abril/Junho, 2013
- FERREIRA, R. J. P.; ALMEIDA, A. T. ; Cavalcante, C. A. V. *Selection of Inspection Intervals Based on Multi-Attribute Utility Theory*. In: EMO 2013, 2013, Sheffield. 7th Internacional Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2013
- FERREIRA, R.J.P.; LIMA FILHO, J.M.S.S.; FREJ, E.A. *Algoritmo Genético Multiobjetivo Para O Sequenciamento Integrado De Atividades De Produção E Manutenção*. In: Enegep – Encontro Nacional De Engenharia De Produção, Salvador-Ba, 2013
- FONTANA, M.E. *Modelo de Setorização para manobra em rede de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras*. Tese de Doutorado Em Engenharia De Produção. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2012
- GONÇALVES, E. & LIMA, C.V. *Controle De Pressões E Operação De Válvulas Reguladoras De Pressão*. Guias Práticos: Técnicas De Operação Em Sistemas De Abastecimento De

- Água. Programa Nacional De Combate Ao Desperdício De Água, Secretaria Nacional De Saneamento Ambiental, Ministério Das Cidades, Brasil, 2007
- GUERRA, A.L.S. *Relatório de avaliação profissional para obtenção do grau de Mestre Em Tecnologia Ambiental*, Instituto Politécnico De Setúbal, Portugal, 2013
- HALHAL, D.; WALTERS, G.A.; SAVIC, D.A.; OUAZAR, D, *Scheduling Of Water Distribution System Rehabilitation Using Structured Messy Genetic Algorithms*. Evolutionary Computation, Vol. 7, No. 3, Pp. 311-329, 1999
- HUNÇAL, O., ALTAN-SAKARYA, B., METIN GER, A. *Optimization of Multireservoir Systems by Genetic Algorithm*. Water Resources Management, V.25, p. 1465-1487, 2011
- IBGE. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br>
- JIANG, R.; JI, P. *Age Replacement Policy: A Multi-Attribute Value model*. Reliability Engineering and System Safety. V. 76. P. 311-318, 2002
- JIN, X.; ZHANG, J.; GAO, J.; WU, W. *Multi-Objective Optimization Of Water Supply Network Rehabilitation With Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II*. Journal Of Zhejiang University Science A. V. 9, N°3. P.391-400, 2008
- JORBA, A.F.; ROCHA, G.A. *Manual de Operação e Manutenção de Poços*, 3ª ed., São Paulo, 2007
- KEENEY, R. L. RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Wiley, New York, 1976
- KIM, J.H.; MAYS, L.W. *Optimal Rehabilitation Model For Water-Distribution Systems*. Journal Of Water Resources Planning And Management. V. 120. 1991

- KWIETNIEWSKI, M. Reliability Modelling Of Water Distribution System (Wds) For Operation And Maintenance Needs. *Hydro-Engineering And Environmental Mechanics*. Vol. 51, 2004
- KLEINER, Y. Water Distribution Network Rehabilitation: Selections And Scheduling Of Pipe Rehabilitation Alternatives. Tese De Doutorado Em Engenharia Civil, Universidade De Toronto, Toronto-On (Canadá), 1997
- LAVRIC, V., LANCU, P., PLENSU, V. *Genetic Algorithm Optimisation of Water and Wastewater Network Topology*. *Journal of Cleaner Production*, V. 13 (15), p. 1405-1415, 2005
- LI, F.; SUN, Y.; MA, L.; MATHEW, J. *A Grouping Model For Distributed Pipeline Assets Maintenance Decision*. In: 2011 International Conference On Quality, Reliability, Risk, Maintenance And Safety Engineering, Xi'na (China), 2011
- LIN, K.L., LIN, C.L. *Applying Utility Theory to Cost Allocation of Pavement Maintenance and Repair*. *J. Pavment. Res. Technol.* 4(4):212-221, 2011
- LOPES, K.G.O.; COELHO, M.M.L.P.; LIBÂNIO, M. *Aplicação Do Método Da Análise Hierárquica Na Priorização Da Reabilitação De Redes De Distribuição De Água*. *Revista Brasileira De Recursos Hídricos*. V. 16, N.4. Outubro/Dezembro, 2011
- MAMABOLO, R.M.; BEICHELT, F.E. Maintenance Policies with minimum Repair. *Economic Quality Control*. Vol 19, No. 2, 143 – 166, 2004
- MARTINS, J. A. *Redes De Distribuição De Água*. Capítulo 13 De Pereira et Al. *Técnica De Abastecimento E Tratamento De Água*, Vol.1, Cetesb, São Paulo, 1987
- MARTZ, H.; WALLER, R. *Bayesian Reliability Analysis*, New York: John Wiley, 1982
- MAYS, L. W. *Water Distribution Systems Handobook*, Mcgrawhill, 1999

- MIRABENDINI, S.N.; MINA, H.; IRANMANESH, S.H. *Multi-Objective Optimization Research On Multi Parallel Machine With Different Preventive Maintenance Planning And Scheduling With Genetic Algorithm*. International Journal Of Academic Research In Business And Social Sciences. V.2, N°12. 2012
- MONTENEGRO, S.M.G.L.; CABRAL, J.J.S.P; PAIVA, A.L.R. Águas subterrâneas na zona costeira do Recife (PE): evolução da salinização e perspectivas de gerenciamento. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 14, N°03, 2009
- MORAIS, D.C.; ALMEIDA, A.T. *Water Supply System Decision Making Using Multicriteria Analysis*. Water S.A. V. 32, N°2, 2006
- MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALMEIDA, A.T. *Modelo Multicritério Para Mapeamento De Perdas Em Redes De Distribuição De Água*. In: SBPO - Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional, Fortaleza-CE, 2007
- MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALMEIDA, A.T. *Priorização De Áreas De Controle De Perdas Em Redes De Distribuição De Água*. Pesquisa Operacional (Impresso), V. 30, P. 15-32, 2010
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. 5ª ed. LTC, 2012
- NAFI, A.; WEREY, C.; LLERENA, P. *Scheduling Of Water Distribution Systems Using A Multiobjective Approach*. Lecture Notes In Economics And Mathematical Systems, V. 618. 2009
- NAJID, N.M.; SELSOULI, M.A.; MOHAFID, A. *An Integrated Production And Maintenance Planning Model With Time Windows And Shortage Cost*. International Journal Of Production Research. V. 49, N°8. 2011
- NELSON, W. *Applied Life Data Analysis*. Wiley Series in Probability and Statistics, 1982

- O'CONNOR, P.D.T. Practical reliability Engineering. 2^a ed. John Wiley&Sons, New York, 1985
- PONTUAL, V. Tempos do Recife: representações culturais e configurações urbanas. Rev. Bras. Hist., São Paulo, v. 21, n. 42, 2001
- PREFEITURA DO RECIFE. Atlas do desenvolvimento humano na cidade do Recife, 2005. Disponível em <http://www.recife.pe.gov.br/pr/secplanejamento/pnud2005/> Consulta em agosto de 2014.
- PREFEITURA DO RECIFE. Perfil dos bairros. Lei Municipal nº 16.293 de 22.01.1997
- RAUSAND, M; HOYLAND, A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- REBAI, M.; KACEM, I.; ADJALLAH, K.H. *Scheduling Jobs And Preventive Maintenance Activities On Parallel Machines*. In: Selected Topics In Applied Computer Science. 10th Wseas International Conference On Applied Computer Science. Iwate Prefectural University(Japan), 2010
- ROY, B. Multicriteria Methodology for decision Aiding. Kluwer Academic Publishers, 1996
- RAUSAND, M.; HOYLAND A. *System Reliability Theory – Model, Statistical Methods*. Wiley, New Jersey, 2004
- SORTRAKUL, N.; CASSADY, C. R. *Genetic Algorithms For Total Weighted Expected Tardiness Integrated Preventive Maintenance Planning And Production Scheduling For A Single Machine*. Journal Of Quality In Maintenance Engineering. V. 13.1, 2007
- QUIMPO, R.G.; SHAMSI, U.M. Reliability Based Distribution System Maintenance. Journal Of Water Resources Planning And Management. V. 117. Maio/Junho, 1991

- SANESUL - Empresa De Saneamento E Do Estado De Mato Grosso Do Sul, *Distribuição De Água*, Disponível Em <Http://Www.Sanesul.Ms.Gov.Br/Conteudos.Aspx?Id=5>. Consulta Em 10/01/2014
- SCARF, P. A.; de Almeida, Adiel T. A study of a two-phase inspection policy for a preparedness system with a defective state and heterogeneous lifetime. *Reliability Engineering & Systems Safety*, v. 96, p. 627-635, 2011
- SELLITO, M.A.; WUTTKE, R.A. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da Banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Rev. Prod. On line*, v. III, 2008
- SELLITTO, M.A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. *Produção*, v.15, n.1, p.44-59, 2005
- SHARMA A.; YADAVA, G.S. A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *J Qual Mainten Eng* 17(1):5–25, 2011
- SHAMIR, U.; HOWARD, C.D.D. An Analytic Approach To Scheduling Pipe Replacement”, *Journal Of The American Water Works Association*, Vol. 71, No. 5, 1979
- SIMONETTI, M.J.; SOUZA, A.L.; SIVEIRA, L.F.S.; ARRUDA, J.P.S. *A Importância Da Engenharia Da Confiabilidade E Os Conceitos Básicos De Distribuição De Weibull*. Revista Sapere, Fatec Tatui, 21 Dez. 2009
- SOUSA, E. R. *Sistemas De Abastecimento De Água*. Documentação De Apoio À Disciplina De Saneamento Ambiental, Departamento De Engenharia Civil E Arquitetura; Secção De Hidráulica E Dos Recursos Hídricos E Ambientais - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2001
- TROJAN, F. Modelos multicritério para apoiar decisões na gestão da manutenção de redes de distribuição de água para a redução de custos e perdas. Tese de Doutorado em Engenharia De Produção, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2012

-
- TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Prioritizing Alternatives For Maintenance Of Water Distribution Networks: A Group Decision Approach. *Water S.A.*, V. 38, 2012.
- TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Using Electre Tri To Support Maintenance Of Water Distribution Networks. *Pesquisa Operacional (Impresso)*, V. 32, P. 423-442, 2012
- TWYMAN J., TWYMAN C. *Golpe De Ariete En Redes De Tuberías*, Twyman Ingenieros Consultores Ltda., 2009
- VINCKE, Ph. *Multicriteria Decision Aid*. Chichester: Wiley, 1992
- WALSKI, T.M. *Water Distribution*. Capitulo 18 De Mays, L.W., *Water, Water Resources Handbook*, Mcgraw-Hill, New York, 1996
- WANG, S.; LIU, M. *A Branch And Bound Algorithm For Single-Machine Production Scheduling Integrated With Preventive Maintenance Planning*. *International Journal Of Production Research*. V. 51, N°3. 2013
- WEIBULL, W. *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*. *Journal of Applied Mechanics*, 293 – 297, Setembro de 1951.
- WORD BANK. *Managing Urban Water Supply and Sanitation: Operation and Maintenance*. Department of Operations Evaluation, 2001
- YULAN, J.; ZUHUA, J.; WENRUI, H. *Multi-Objective Integrated Optimization Research On Preventive Maintenance Planning And Production Scheduling For A Single Machine*. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*. V.39, N°9. 2008

ANEXOS

A1. TABELA PARA O CÁLCULO DA FUNÇÃO WEIBULL

CORREGO DO TIRO					
t	F(t)	F(t) acum.		ln(t)	ln[ln(1/(1-F(t)))]
3504	0,111111	0,111111111		8,16166	-2,138911028
4464	0,111111	0,222222222		8,403801	-1,381050422
5760	0,111111	0,333333333		8,658693	-0,902720456
7056	0,111111	0,444444444		8,861634	-0,531391212
7248	0,111111	0,555555556		8,888481	-0,209573275
7632	0,111111	0,666666667		8,940105	0,094047828
8040	0,111111	0,777777778		8,992184	0,408179685
8280	0,111111	0,888888889		9,021598	0,787195008
16896	0,111111	1		9,734832	

PRAÇA DO TRABALHO					
t	F(t)	F(t) acum.		ln(t)	ln[ln(1/(1-F(t)))]
480	0,083333	0,083333333		6,173786	-2,441716399
552	0,083333	0,166666667		6,313548	-1,701983355
1008	0,083333	0,25		6,915723	-1,245899324
1848	0,083333	0,333333333		7,521859	-0,902720456
2352	0,083333	0,416666667		7,763021	-0,6180462
2712	0,083333	0,5		7,905442	-0,366512921
2952	0,083333	0,583333333		7,990238	-0,132995836
3720	0,083333	0,666666667		8,221479	0,094047828
12456	0,083333	0,75		9,429958	0,32663426
15888	0,083333	0,833333333		9,673319	0,583198081
17376	0,083333	0,916666667		9,762845	0,910235093
25632	0,083333	1		10,1516	

LARGO DOM LUIZ

t	F(t)	F(t) acum.		ln(t)	ln[ln(1/(1-F(t)))]
360	0,066667	0,066666667		5,886104	-2,673752092
864	0,066667	0,133333333		6,761573	-1,944205697
1008	0,066667	0,2		6,915723	-1,499939987
1248	0,066667	0,266666667		7,129298	-1,170683338
3240	0,066667	0,333333333		8,083329	-0,902720456
3552	0,066667	0,4		8,175266	-0,671726992
3576	0,066667	0,466666667		8,182	-0,464246379
3864	0,066667	0,533333333		8,259458	-0,271624945
5472	0,066667	0,6		8,607399	-0,087421572
5880	0,066667	0,666666667		8,679312	0,094047828
6312	0,066667	0,733333333		8,750208	0,278961034
9000	0,066667	0,8		9,10498	0,475884995
12120	0,066667	0,866666667		9,402612	0,700571065
13152	0,066667	0,933333333		9,484329	0,996228893
17616	0,066667	1		9,776563	

FEBEM MANGABEIRA

t	F(t)	F(t) acum.		ln(t)	ln[ln(1/(1-F(t)))]
3504	0,125	0,125		8,16166	-2,013418678
3744	0,125	0,25		8,22791	-1,245899324
4032	0,125	0,375		8,302018	-0,755014863
4152	0,125	0,5		8,331345	-0,366512921
5448	0,125	0,625		8,603004	-0,019356889
7560	0,125	0,75		8,930626	0,32663426
8952	0,125	0,875		9,099632	0,732099368
30144	0,125	1		10,31374	

A2. DADOS DO TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

CÓRREGO DO TIRO				
Tempo	Acumulado amostra	Acumulado weibull	weibull-amostra	weibull(n-1) - amostra
3504	0,111111111	0,102346915	0,008764196	0,102346915
4464	0,222222222	0,200387367	0,021834855	0,089276256
5760	0,333333333	0,382006712	0,048673379	0,15978449
7056	0,444444444	0,587687585	0,143243141	0,254354252
7248	0,555555556	0,617284994	0,061729438	0,172840549
7632	0,666666667	0,674293044	0,007626377	0,118737488
8040	0,777777778	0,730699861	0,047077916	0,064033195
8280	0,888888889	0,761468032	0,127420857	0,016309746
16896	1	0,999995163	4,83728E-06	0,111106274
beta	3,007		Dteste	0,254354252
eta	7345,885		Dcritico (tabelado)	0,43
alfa = 0,05				

PRAÇA DO TRABALHO				
Tempo	Acumulado amostra	Acumulado weibull	weibull-amostra	weibull(n-1) - amostra
480	0,083333333	0,138809384	0,055476051	0,138809384
552	0,166666667	0,153503541	0,013163126	0,070170208
1008	0,25	0,233975381	0,016024619	0,067308714
1848	0,333333333	0,34794596	0,014612627	0,09794596
2352	0,416666667	0,403167082	0,013499584	0,069833749
2712	0,5	0,438279098	0,061720902	0,021612431
2952	0,583333333	0,459997643	0,123335691	0,040002357
3720	0,666666667	0,52191074	0,144755927	0,061422594
12456	0,75	0,849512175	0,099512175	0,182845508
15888	0,833333333	0,898703375	0,065370041	0,148703375
17376	0,916666667	0,914161296	0,002505371	0,080827963
25632	1	0,964022778	0,035977222	0,047356111
beta	0,7799		Dteste	0,182845508
eta	5492,309		Dcritico (tabelado)	0,375
alfa = 0,05				

LARGO DOM LUIZ				
Tempo	Acumulado amostra	Acumulado weibull	 weibull-amostra 	 weibull(n-1) - amostra
360	0,066666667	0,067440308	0,000773641	0,067440308
864	0,133333333	0,150737108	0,017403775	0,084070442
1008	0,2	0,172850867	0,027149133	0,039517534
1248	0,266666667	0,208248684	0,058417983	0,008248684
3240	0,333333333	0,445526559	0,112193225	0,178859892
3552	0,4	0,475237901	0,075237901	0,141904567
3576	0,466666667	0,477453218	0,010786552	0,077453218
3864	0,533333333	0,503287726	0,030045608	0,036621059
5472	0,6	0,625074452	0,025074452	0,091741119
5880	0,666666667	0,650756549	0,015910117	0,050756549
6312	0,733333333	0,675984334	0,057348999	0,009317667
9000	0,8	0,79617549	0,00382451	0,062842156
12120	0,866666667	0,880390544	0,013723878	0,080390544
13152	0,933333333	0,899631082	0,033702252	0,032964415
17616	1	0,952796689	0,047203311	0,019463356
beta	0,9711		Dteste	0,178859892
eta	5581,004		Dcritico (tabelado)	0,338
			alfa = 0,05	

FEBEM - MANGABEIRA				
Tempo	Acumulado amostra	Acumulado weibull	 weibull-amostra 	 weibull(n-1) - amostra
3144	0,125	0,187813962	0,062813962	0,187813962
3504	0,25	0,234955746	0,015044254	0,109955746
3744	0,375	0,26841122	0,10658878	0,01841122
4032	0,5	0,310272574	0,189727426	0,064727426
4152	0,625	0,32816074	0,29683926	0,17183926
5448	0,75	0,527223537	0,222776463	0,097776463
7560	0,875	0,799624226	0,075375774	0,049624226
8952	1	0,907780011	0,092219989	0,032780011
			Dteste	0,222776463
			Dcritico (tabelado)	0,454
beta	2,3306		alfa = 0,05	
eta	6166,812			