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

KRISLLEN SAMARA FEITOSA DE SOUZA

PROPOSTA DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO PARA UM SISTEMA MOTOBOMBA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Recife
2022

KRISLLEN SAMARA FEITOSA DE SOUZA

PROPOSTA DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO PARA UM SISTEMA MOTOBOMBA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gerência da produção.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.

Recife

2022

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

S729p Souza, Krisllen Samara Feitosa de.
Proposta de política de manutenção baseada na condição para um sistema motobomba de redes de distribuição de água / Krisllen Samara Feitosa de Souza. 2022.
57 f: figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Recife, 2022.
Inclui referências.

1. Engenharia de produção. 2. Abastecimento de água. 3. Bombas centrífugas. 4. Corrente elétrica. 5. Manutenção baseada na condição. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG / 2022 - 367

KRISLLEN SAMARA FEITOSA DE SOUZA

PROPOSTA DE POLÍTICA DE MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO PARA UM SISTEMA MOTOBOMBA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Gerência da Produção.

Aprovado em: 17/08/2022.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profª. Drª. Caroline Maria de Miranda Mota (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me iluminar, me dar forças nos momentos difíceis e discernimento em meio às dificuldades.

Agradeço aos meus pais por todo incentivo, por torcerem por mim e por terem me dado toda educação necessária para que eu pudesse chegar até aqui. Minha gratidão também aos meus irmãos por sempre estarem a postos para me ajudar e me apoiar para que eu pudesse concluir mais essa etapa de minha vida.

Em especial, meu muito obrigado a Maria do Socorro Pontes Felix. Minha queria irmã, você é um espelho para mim. Em todos os lugares e momentos, tenho orgulho em poder te ter como base e referência.

Agradeço também a minha parceira de vida, Thamires Batista, por ter acreditado no meu potencial e ter me incentivado a ingressar no mestrado. Você me apoiou nessa conquista e serei sempre grata a toda força que me cedeu quando tudo mudou e se tornou desafiador para mim.

Ao meu amigo de estudos e de vida, Augusto Rodrigues. Obrigada por toda parceria ao longo da caminhada, que se iniciou na graduação e que perdura até hoje. Você me estendeu a mão em várias situações, me ajudou a superar várias das minhas limitações. Sempre disposto a ajudar, saiba que serei eternamente grata. Seu coração é grande e bondoso.

Ao meu orientador, Cristiano Cavalcante. Agradeço pela oportunidade e pelo acolhimento no Random, assim como por todo conhecimento compartilhado comigo. Ao professor Alexandre Ramalho, por ter topado me auxiliar nesse processo, sempre disposto a compartilhar seus conhecimentos e sanar minhas dúvidas. Vocês contribuíram significativamente para minha vida acadêmica, meu muito obrigado.

Quero agradecer também ao meu colega Yan, que se fez presente em um dos momentos difíceis para conclusão da minha dissertação, me ajudando, apoiando e compartilhando comigo seus conhecimentos. Aos demais amigos e colegas de laboratório e aos que pude encontrar durante o mestrado, meus agradecimentos por todos os momentos vividos, pelas contribuições e por todas as trocas.

Agradeço também ao PPGEP UFPE, pela oportunidade de vivenciar algo imprescindível para minha vida acadêmica e profissional. Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio.

RESUMO

Bombas hidráulicas do tipo centrífuga são ativos muito importantes para a operação adequada de redes urbanas de distribuição de água. A operação de bombas hidráulicas chega a ser responsável por cerca de 90% da energia consumida em empresas concessionárias do serviço de abastecimento de água e saneamento. O consumo de energia aumenta com o aumento do nível de deterioração de uma bomba hidráulica, visto que, conforme o sistema se deteriora, é necessária uma potência maior para prover a altura manométrica necessária para uma operação adequada. Para além do consumo crescente de energia com o aumento do nível de deterioração de uma bomba hidráulica, a susceptibilidade destes sistemas a falhas é algo importante a ser considerado, visto que a falha de tais ativos pode ter um impacto negativo na operação da rede de distribuição. Diante disto, o presente trabalho objetivou propor uma política de manutenção baseada na condição de sinais de corrente elétrica de motores de bombas centrífugas utilizadas em sistemas de abastecimento de água. Para tanto, foi elaborado um algoritmo de otimização, construído com vistas a testar a eficiência da política de manutenção proposta neste trabalho por meio da simulação. A política de manutenção, quando bem parametrizada, contribui para minimizar os custos operacionais das bombas (incluindo os custos referentes ao consumo de energia) e garantir um nível apropriado de confiabilidade, propiciando assim um serviço com maior segurança e qualidade.

Palavras-chaves: abastecimento de água; bombas centrífugas; corrente elétrica; manutenção baseada na condição.

ABSTRACT

Centrifugal type hydraulic pumps are very important assets for the proper functioning of urban water distribution networks. The operation of hydraulic pumps is responsible for around 90% of the energy consumed by water supply and sanitation concessionaires. Energy consumption increases with the increase in the level of deterioration of a hydraulic pump, since, as the system deteriorates, more power is needed to provide the necessary head for proper operation. In addition to the increasing consumption of energy with the increase in the level of deterioration of a hydraulic pump, the susceptibility of these systems to failure is something important to be considered, since the failure of such assets can have a negative impact on the operation of the distribution network. Therefore, this study aimed to propose a maintenance policy based on the state of electrical current signals from centrifugal pump motors used in water supply systems. Therefore, an optimization algorithm was developed, built with the objective of testing the efficiency of the maintenance policy proposed in this work through simulation. The maintenance policy, when properly parameterized, helps to minimize pump operating costs (including costs related to energy consumption) and to ensure an adequate level of reliability, thus providing a service with greater safety and quality.

Keywords: water supply; centrifugal pumps; electric current; condition-based maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica 12
Figura 2 - Perspectiva histórica da manutenção 18
Figura 3 - Gerações da Manutenção 18
Figura 4 - Classificação das ações de manutenção 22
Figura 5 - Sistema de distribuição de água 25
Figura 6 - Etapas da Pesquisa 28
Figura 7 - Bomba Centrífuga 30
Figura 8 - Consumo da corrente elétrica com base na deterioração do sistema 36
Figura 9 - Possíveis cenários 40
Figura 10 - Cenário 1 41
Figura 11 - Cenário 2 42
Figura 12 - Cenário 3 42
Figura 13 - Cenário 4 43
Figura 14 - Cenário 5 44
Figura 15 - Cenário 6 44
Figura 16 - Fluxograma do Algoritmo 47

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de modos de falha da bomba centrífuga 33
Tabela 2 - Notações 34
Tabela 3 - Cálculo dos parâmetros e ações para cada cenário 45
Tabela 4 - Dados de funcionamento da motobomba centrífuga 48
Tabela 5 - Resultados obtidos do exemplo numérico 48
Tabela 6 - Resultados da Análise de Sensibilidade 50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA 11
1.2 OBJETIVOS 13
1.2.1 Objetivo Geral 13
1.2.2 Objetivos Específicos 13
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 13
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 14
2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA 16
2.1 MANUTENÇÃO 16
2.1.1 Definições 16
2.1.2 Contexto Histórico 17
2.1.3 Tipos de Manutenção 19
2.1.4 Políticas de Manutenção 20
2.2 MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO 22
2.3 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA 24
2.3.1 Bombeamento de Água 26
2.3.2 Bombas Hidráulicas 26
3 METODOLOGIA 28
4 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MODELO PARA MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO 30
4.1 CARACTERIZAÇÃO E FUNÇÃO DA BOMBA CENTRÍFUGA 30
4.1.1 Aspectos de Falha da Bomba Centrífuga Usando Sinais Elétricos do Motor 31
4.2 NOTAÇÕES 34
4.3 COMPORTAMENTO DE DETERIORAÇÃO DO SISTEMA 35
4.4 PRESSUPOSTOS GERAIS 37
4.5 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO 38
4.6 Desenvolvimento do Modelo 45
4.7 APLICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO PROPOSTO 48
4.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 48
5 CONCLUSÕES 53
5.1 LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 53
REFERÊNCIAS 54

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é a “pedra angular” de qualquer comunidade. Desde os tempos mais remotos é nítida a importância que este recurso representa para a vida do homem. As principais civilizações primitivas, já consideravam um abastecimento organizado de água como elemento essencial e requisito de qualquer assentamento urbano (MAYS, 2000; TRIFUNOVIC, 2020). No ano de 2015, “Assegurar a disponibilidade da água, a sua gestão sustentável e saneamento” ocupou o sexto objetivo chave, elencado na Agenda 2030 pelos países constituintes da ONU - Organização das Nações Unidas, para promoção do desenvolvimento sustentável nos próximos 15 anos remanescentes.

Os sistemas de abastecimento de água são responsáveis por coletar, transportar, armazenar, tratar e distribuir água potável para a sociedade. Para cumprir com tamanha função este sistema conta com subsistemas e uma gama de ativos físicos que precisam ser escolhidos e instalados adequadamente de acordo com as características do terreno e da localidade (ZYL, 2014; ZHOU, 2018).

Ao longo do terreno, existem pontos de baixa pressão, que fazem com que a água não consiga chegar a alturas desejadas, em níveis de volume e pressão necessários para conseguir suprir as demandas da sociedade. Para vencer este obstáculo, estações elevatórias são construídas para que bombas hidráulicas realizem o bombeamento da água com as condições exigidas fazendo com que este recurso chegue até as mais difíceis distâncias.

A importância das bombas hidráulicas para sistemas de abastecimento de água é notória. Para Paul Winnett, gerente geral da Xylem Water Solutions, elas representam um dos cinco componentes cruciais desse sistema. Para o autor, além de desempenhar uma função necessária e crucial para que o sistema de abastecimento cumpra com sua missão geral, a bomba esta diretamente associada a fatores centrais como disponibilidade, consumo de energia elétrica, consequentemente custos e sustentabilidade ambiental (WINNETT, 2020).

De acordo com Kleiner, Adams e Rogers (2001) o sistema de abastecimento de água está continuamente sujeito a tensões ambientais e operacionais que levam à sua deterioração e degradação de seus ativos. Logo, as bombas hidráulicas estão suscetíveis a fatores que ocasionam a sua degradação e redução do seu tempo de vida. O que leva, a dois pontos centrais: disponibilidade e consumo de energia elétrica. Isto porque, uma falha não esperada da bomba, ocasiona a indisponibilidade do recurso e, além disto, quanto mais degradada mais energia elétrica ela irá consumir para conseguir a potência necessária para realizar seu trabalho, ou seja, consequentemente mais custos e insustentabilidade.

Fica nítido, diante desta problemática, que manter a integridade da bomba é algo crucial, pois o seu devido funcionamento é necessário para o desempenho do sistema de abastecimento de água de modo geral. Logo, analisar modos que levam a sua falha e realizar ações operacionais e de manutenção que condicionem seu bom desempenho e eficiência, torna-se necessário a fim de que este ativo cumpra com sua função por um período de tempo esperado.

Diante do exposto, este trabalho se propende a propor uma política de manutenção baseada na condição de bombas hidráulicas centrífugas, amplamente utilizadas em sistemas de abastecimento de água, tendo como base o comportamento da corrente elétrica utilizada pelo motor da bomba, para que esta possa cumprir com sua função principal, bombear a água.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Existe uma consciência cada vez maior em nosso meio de que a água está se tornando a questão crítica do século 21 (MORAIS; DE ALMEIDA, 2007). É sabido que a disponibilidade de água na natureza tem sido insuficiente para atender à demanda requerida em muitas regiões do planeta. E somado a esta quantidade insuficiente, falhas em sistemas de distribuição de água comprometem ainda mais esta disponibilidade. O racionamento da água por parte das concessionárias e outras ações, por parte do homem, como seu armazenamento e construção de poços artesianos tem sido algumas das alternativas utilizadas para que se possa ter acesso a este recurso, frente aos problemas frequentemente encontrados.

A imposição de restrição de fornecimento por si só induz a comportamentos que promovem problemas graves. Uma das problemáticas gira em torno da ausência de regularidade e fiscalização dos reservatórios utilizados por muitas pessoas para armazenar água, e da manutenção da água parda por longos períodos em reservatórios, o que favorece a proliferação e focos de reprodução de insetos agentes de doenças graves.

A abertura de poços artesianos, muitas vezes clandestinos, também representa um comportamento danoso para a população, visto que, esta ação pode se converter em um ponto de contaminação do lençol freático, assim como, promover o recalque de construções e desabamentos. Na cidade do México, por exemplo, a perfuração de poços artesianos tem causado o afundamento do solo e rachaduras em rodovias e edifícios (CASSELA, 2021). No Brasil, mais de 90% dos poços, são clandestinos, e o impacto disto, é justamente o risco de contaminações, problemas sanitários e ambientais (TRIGUEIRO, 2019).

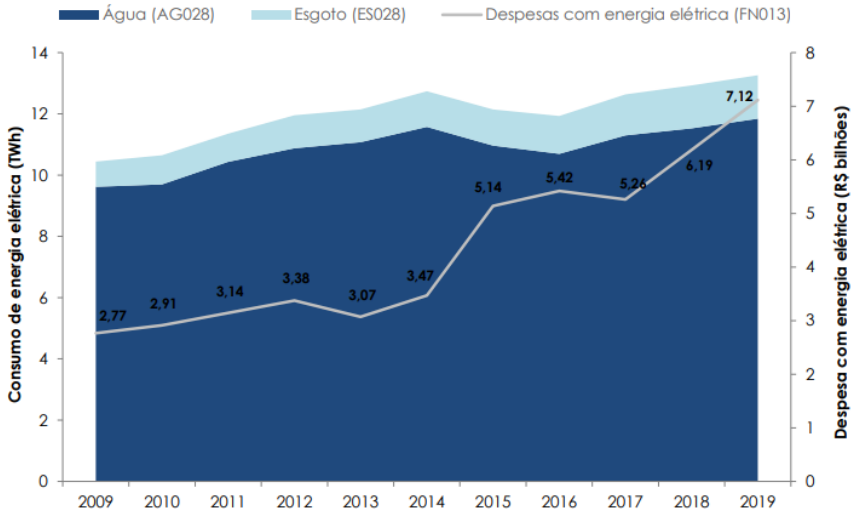
Podem-se visualizar problemas que se desencadeiam como em uma cadeia, um em função do outro, ou seja, quantidades insuficientes somadas às falhas em sistemas de abastecimentos

fazem muitas vezes, com que a população procure por opções ainda mais danosas, a fim poderem ter acesso à água em quantidades suficientes para suprirem as necessidades do dia a dia. Por isto, torna-se crucial que todos os ativos desse sistema funcionem devidamente e que as falhas que levam a indisponibilidade sejam evitadas por meio de ações operacionais e manutenções preventivas.

A bomba hidráulica do tipo centrifuga, como supracitado anteriormente, é um dos principais ativos do sistema de distribuição de água, e falhas não esperadas levam a indisponibilidade do recurso e a um serviço de má qualidade. E chama ainda a atenção, o fato de que bombas centrífugas, respondem por aproximadamente, a 20% do consumo global de energia elétrica (BADR; AHMED, 2015). O bombeamento, conforme Mays (2010) é responsável por consumir a maior parte da energia utilizada em sistemas de abastecimento de água. Vilanova, Magalhães Filho e Balestieri (2015) citam que entre 2% a 3% da energia elétrica mundial é consumida especificadamente por estações de bombeamento, e cerca de 90% desta energia é absorvida pelas motobombas.

O último levantamento feito pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS no ano de 2019 traz dados que mostram esta realidade em termos nacionais. Como pode ser visualizado na Figura 1, este consumo de energia elétrica e as despesas associadas, apresentam um comportamento crescente. Em 2019, por exemplo, o consumo de energia elétrica nos sistemas abastecimento de água chega a ter um aumento de 2,7% em relação a 2018.

Figura 1 - Consumo de energia elétrica



Fonte: SNIS (2019)

O fator principal utilizado para determinar o preço da água é o custo atrelado a quantidade de energia utilizada para bombear água de uma área para outra (NGANCHA; KUSAKANA;

MARKUS, 2020). Para Móller et al. (2020) bombas, motores e ações operacionais eficientes são necessárias para reduzir o consumo de energia elétrica, assim como os custos de operação.

Segundo Morais e De Almeida (2007) a falta de atenção para aspectos das ações de manutenção em sistema de distribuição de água, por parte da gestão responsável e por parte do governo, principalmente em termos de recursos disponíveis para investir em medidas preventivas, é algo bastante notável nos dias atuais. Existe certa deficiência em termos de gerenciamento e planejamento da manutenção, que geram, em muitos casos, desperdícios e indisponibilidade e insustentabilidade. De acordo com os autores, a manutenção inadequada tem sérias consequências, tanto em termos financeiros e sociais quanto para o meio ambiente, principalmente quando a população enfrenta graves cenários de escassez de água e a sustentabilidade é tida como um dos principais objetivos do planeta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Propor uma política de manutenção baseada na condição de sinais de corrente elétrica de motores de bombas centrífugas utilizadas em sistemas de abastecimento de água.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Caracterizar o sistema objeto de estudo;
b) Desenhar um modelo matemático que incorpore as condições do sistema;
c) Elaborar um algoritmo de simulação para o modelo de política de manutenção;
d) Validar a política de manutenção por meio de um exemplo numérico;
e) Analisar a sensibilidade do modelo proposto.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A crescente tendência em direção à sustentabilidade, eficiência econômica e proteção do meio ambiente afetou a forma como as organizações realizam suas operações e gerenciam seus recursos. Diante disto, falhas em sistemas de distribuição de água tem se tornado uma questão de bastante interesse em todo mundo. Tanto os aspectos técnicos quanto os financeiros estão

recebendo cada vez mais atenção, especialmente durante períodos de escassez de água ou fases de rápido desenvolvimento (LAMBERT; HIRNER, 2000).

Segundo Zyl (2014) um abastecimento confiável de água limpa e segura é o primeiro e mais importante serviço municipal de que as pessoas precisam. E frente a isto, uma operação e manutenção adequada são indispensáveis para garantir que os investimentos resultem na prestação de um serviço sustentável, que atenda às necessidades dos consumidores, que não comprometa o fornecimento do serviço, e que não leve a indisponibilidade do recurso, nem cause maiores perdas de água, perdas financeiras e riscos à saúde do homem.

Dada à importância que o abastecimento de água representa para sociedade, principalmente por ser um recurso natural essencial para a vida humana, vários estudos têm sido realizados visando melhorar as ações de manutenção nas redes de distribuição, com o objetivo principal de reduzir os problemas capazes de comprometer o funcionamento requerido para atender a demanda da população, em quantidades suficientes e com níveis de qualidade adequados (TROJAN; MORAIS, 2012).

Para Winnett (2020) existem oportunidades de melhorar o desempenho de sistemas de abastecimento de água, e ações que visem a manutenibilidade de sistemas de bombeamento, representam um caminho significativo para evitar falhas que condicionem indisponibilidade e para reduzir custos operacionais, como o custo do consumo de energia elétrica pela concessionária.

Logo, fica evidente, a necessidade de se conhecer todo funcionamento e características do sistema que a bomba hidráulica representa, assim como a importância de se determinar quais os objetivos que se desejam alcançar, para que ações adequadas de manutenção sejam definidas em torno de uma política de manutenção eficiente que melhor atenda aos requisitos, principalmente em termos de custos e de disponibilidade deste ativo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para uma melhor organização do fluxo de informações a presente dissertação foi dividida em cinco capítulos principais, tais quais: Introdução; Referencial Teórico e Revisão da Literatura; Metodologia; Resultados e discussões; e Conclusões.

No primeiro e presente capítulo é feita uma introdução acerca do trabalho. Além de todo contexto que levou a escolha do tema, são apresentados: a descrição do problema, os objetivos (geral e específicos), a justificativa e relevância da temática abordada, e a estrutura no qual o trabalho foi organizado. No segundo capítulo são apresentados teorias e principais conceitos

que embasam a temática abordada e que são importantes para que uma melhor compreensão, principalmente no que tange a contribuições presentes na literatura já existente.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia do trabalho. O que inclui as principais etapas que foram seguidas para que os objetivos traçados pudessem ser alcançados. No quarto capítulo são apresentados os resultados alcançados por meio da realização dessa pesquisa, o que inclui, além da política de manutenção proposta, a aplicação de um exemplo número e uma análise de sensibilidade do modelo. Por fim, no quinto capítulo são relatadas as conclusões obtidas no que tange aos resultados, impactos alcançados e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MANUTENÇÃO

Buscou-se, neste presente subcapítulo, discorrer acerca da manutenção, de modo geral, o que inclui pontos de grande importância para seu entendimento, tais quais, definições atribuídas sob a perspectiva de diferentes autores, o contexto histórico de sua evolução, os tipos, bem como as políticas de manutenção existentes.

2.1.1 Definições

A manutenção, de acordo com Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016), é definida como a combinação de ações, sejam elas técnicas e/ou administrativas, tomadas quando se objetiva reter ou restaurar um item para um estado no qual ele seja capaz de desempenhar sua função requerida.

Semelhantemente Mishra e Pathak (2012) definem a manutenção como o trabalho que deve ser feito a fim de manter o sistema ou um equipamento na condição para o qual foi projetado para operar, de modo que possa ser utilizado em sua capacidade e eficiência total por um máximo período de tempo, sem causar qualquer perda de tempo por conta de danos acidentais ou quebras. De Almeida *et al.* (2015) destacam que a manutenção pode ser definida como o conjunto de atividades realizadas a fim de assegurar os níveis de desempenho necessário para garantir o cumprimento das metas de produção. Estas atividades podem ser tomadas com vistas a evitar a ocorrência da falha ou como forma de restaurar a condição operacional após a ocorrência da falha.

Mehmet, Mehmet e Sejdiu (2018) destacam a importância do conceito de manutenção como sendo algo presente e indispensável para qualquer sistema produtivo. É sabido, que a eficiência e a qualidade de um equipamento são reduzidas com o tempo, fazendo com que máquinas possam falhar com maior frequência. Diante disto, é necessária a utilização de uma manutenção adequada, de acordo com as características do equipamento e objetivos da organização, para que um sistema possa funcionar regularmente.

A manutenção também é tida como função dentro de uma organização. Segundo Mishra e Pathak (2012) a função de manutenção envolve cuidar dos aspectos de segurança de certos equipamentos, está relacionada com a lucratividade através da produção do equipamento e seu custo operacional, e com o seu nível de desempenho e disponibilidade. Diante disto, a função

de manutenção tem como responsabilidade garantir que os equipamentos / instalações de produção estejam disponíveis para uso, com mínimo de custo possível, durante um período de tempo estipulado.

Ou seja, a manutenção não visa apenas manter o equipamento em bom estado de funcionamento, ela desempenha também um papel decisivo no cumprimento das metas de produção de uma organização, com vistas para um custo de propriedade ideal e para uma alta performance da produtividade (MEHMET; MEHMET; SEJDIU, 2018). A importância da função manutenção aumentou, justamente devido ao seu papel tanto em manter quanto em melhorar a disponibilidade e a segurança do sistema, bem como da qualidade dos produtos (MULLER; MARQUEZ; IUNG, 2008).

De Almeida *et al.* (2015) destaca ainda, a manutenção em termos de estratégia, elencando que as ações tomadas devem estar alinhadas com os objetivos do negócio, e portanto, com as características do sistema de produção. De um modo geral, mesmo com as possíveis variações nos objetivos de manutenção por conta das peculiaridades de cada sistema, é comum em vários setores, que a manutenção seja utilizada com o intuito de:

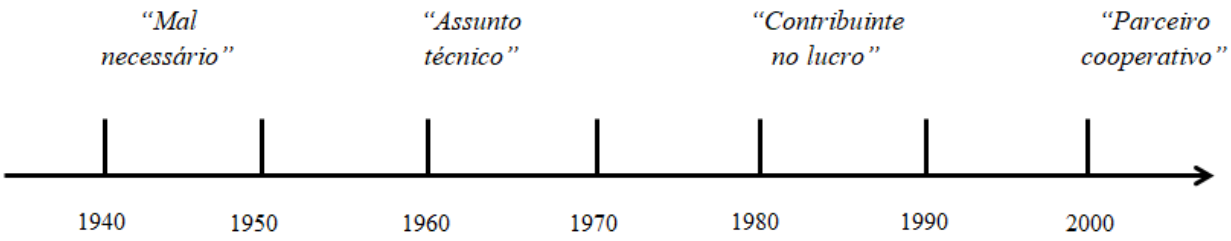
- Prolongar a vida útil do sistema;
- Garantir níveis de disponibilidade satisfatórios;
- Garantir a prontidão operacional dos sistemas, e;
- Proteger as pessoas que usam as instalações.

2.1.2 Contexto Histórico

No contexto descrito por Pintelon e Parodi-herz (2008), representado pela Figura 2, no início de sua história, a manutenção não era nada mais que uma parte inevitável da produção. Ela era considerada um “mal necessário”, e nesta época, reparos e substituições eram feitos quando necessários, sem nenhuma preocupação com a otimização. Por volta de 1960, a manutenção passou a ser considerada como uma questão técnica, o que incluiu tanto soluções de otimização como também certa atenção para organização do trabalho.

Mais adiante, acerca do ano de 1980, a manutenção que era uma parte da função produção, se tornou uma função totalmente desenvolvida e complexa, englobando questões técnicas e de gestão e exigindo flexibilidade para lidar com a dinamicidade do mundo de negócios. Atualmente, ela é vista como um parceiro cooperativo para estratégia de negócio, estando possivelmente no mesmo nível que a produção (PINTELON; PARODI-HERZ, 2008).

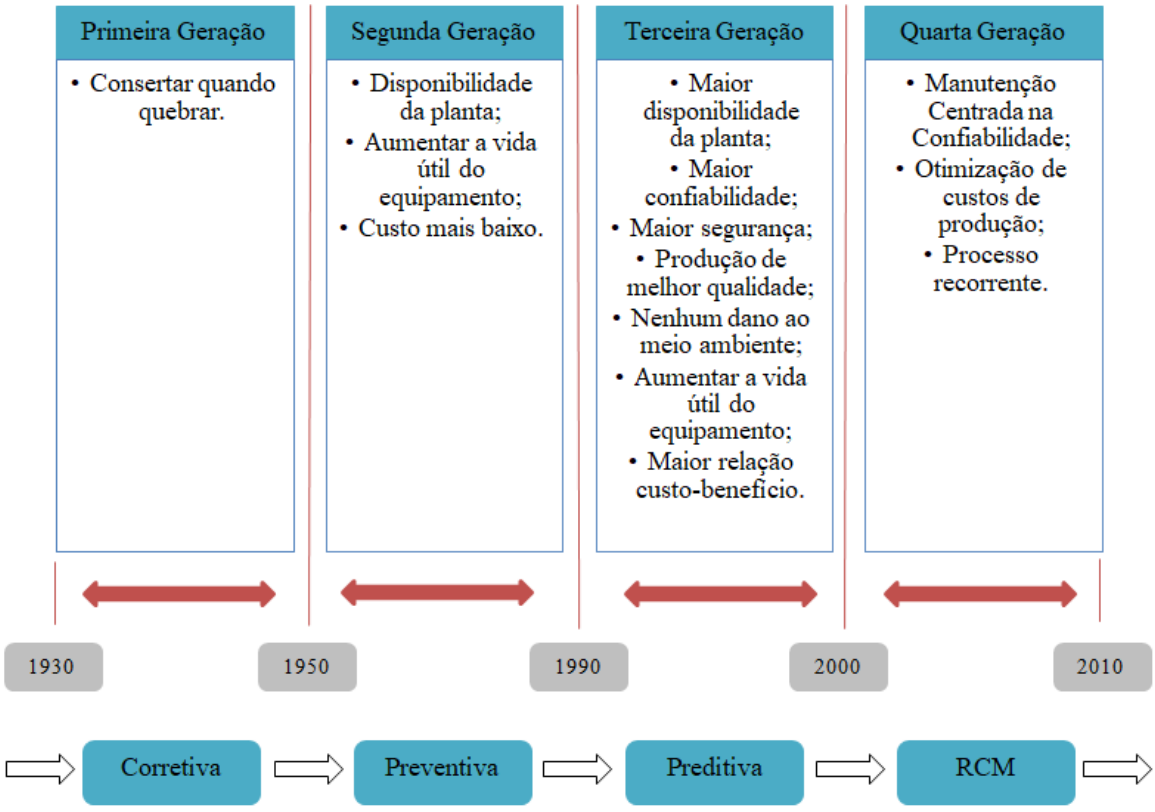
Figura 2 - Perspectiva histórica da manutenção



Fonte: Adaptado de Pintelon e Parodi-Herz (2008)

Moubray *apud* Trojan (2017) contextualiza a evolução da manutenção através da descrição de quatro gerações, representadas conforme a linha de tempo ilustrada na Figura 3.

Figura 3 - Gerações da Manutenção



Fonte: Adaptado de Trojan e Marçal (2017)

A primeira geração, conforme Moubray (1999) cobre o período até a Segunda Guerra Mundial, quando a indústria não era altamente mecanizada e a prevenção da falha do equipamento não era alta prioridade na gestão da maioria dos gerentes. Trojan e Marçal (2017) explicam que esta geração deu suporte ao conceito de manutenção corretiva, que corresponde

ao reparo após a falha. Quando um equipamento falhava era tarefa de um especialista retornar o item com falha ao seu estado operacional (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Durante a Segunda Guerra Mundial as coisas mudaram dramaticamente, pressões de guerra aumentaram a demanda por produtos industriais, levando a uma maior mecanização do setor industrial e ao desenvolvimento da Pesquisa Operacional. No ano de 1950, as máquinas se tornaram mais numerosas e complexas. Este cenário levou a ideia de que as falhas de equipamentos podiam e deviam ser evitadas, levando ao conceito de manutenção preventiva, que é o marco da segunda geração, caracterizada em termos de manutenção, por aumentar a vida útil do equipamento, culminar em um custo mais baixo e em disponibilidade da planta (MOUBRAY, 1999).

Conforme Trojan e Marçal (2017) a terceira geração foi impulsionada por expectativas crescentes de manutenção, que forçaram o desenvolvimento de novas tecnologias com intuito de auxiliar o setor produtivo e de manter a segurança, qualidade, disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e consequentemente dos processos de produção. Este novo cenário proporcionou evolução de técnicas de monitoramento, na análise de falhas e em estudos de riscos trazidos a base para conceituar a manutenção preditiva.

O autor elenca ainda a quarta geração, caracteriza pelo conceito de RCM – *Reliability Centered Maintenance*, herdado da indústria aeroespacial e que trouxe técnicas avançadas ligadas à confiabilidade e disponibilidade e frequentemente adaptada a sistemas industriais, com vistas a um processo recorrente e para otimização de custos de produção (TROJAN; MARÇAL, 2017). Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) explicam que na abordagem RCM a manutenção é realizada no nível do componente e o esforço de manutenção para um item é uma função da confiabilidade. Assim, a manutenção só será realizada após avaliação das consequências das falhas, em termos de segurança, economia, operação e ambiente, no nível do componente.

2.1.3 Tipos de Manutenção

A manutenção pode ser classificada em três tipos distintos difundidos cientificamente e normativamente na literatura, são eles: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

A manutenção corretiva, conforme Pintelon e Parodi-Herz (2008), diz respeito a ações de reparação após a ocorrência de uma avaria ou perda de função, ou seja, após a ocorrência de uma falha. São ações “reativas” por sua própria natureza o que implica em: “espere até que

quebre, então conserte". São difíceis de prever, visto que, o comportamento de falha de um equipamento é estocástico e as avarias são imprevistas. Substituir uma lâmpada defeituosa, reparar um duto rompido ou um motor parado são exemplos de ações de manutenção corretiva.

De modo mais pontual, a manutenção corretiva pode ser definida como a manutenção realizada para restaurar um equipamento inutilizável, que parou de funcionar de acordo com os padrões aceitáveis (MISHRA; PATHAK, 2012).

A manutenção preventiva corresponde a ações realizadas após um período de tempo especificado, ou quando um sistema especificado foi usado, a fim de reduzir a probabilidade de sua falha. Este tipo de manutenção engloba tarefas predeterminadas em consonância com as funcionalidades do equipamento e com seu tempo de vida útil. As tarefas são programadas durante paradas ou desligamentos da máquina (BASRI *et al*., 2017).

Conforme Mishra e Pathak (2012) a manutenção preventiva tem como objetivo principal atuar por meio de ações planejadas antes que a falha aconteça, detectando qualquer condição que possa causar a falha de um sistema e se antecipando, antes que a quebra ocorra. Inspeções, ajustes, reparos e substituições são exemplos de ações que configuram a manutenção preventiva.

A manutenção preditiva, é elencada por Basri et al. (2017) por ser um avanço na manutenção preventiva e geralmente envolve sistemas de monitoramento. Neste tipo de manutenção, as falhas repetidas ou de alto risco são analisadas por meio de dados históricos que detalham a ocorrência de falhas operacionais de um sistema e, em seguida, a ação de manutenção é conduzida em meio à operação, com base na condição do componente monitorado. De acordo com Mobley (2002) a premissa da manutenção preditiva é a de que o monitoramento regular da condição mecânica real, a eficiência e outros indicadores da condição operacional de um componente fornecerão os dados necessários para aplicação da predição, a fim de garantir o maior intervalo possível entre os reparos, reduzir a quantidade e minimizar o custo de interrupções não programadas ocasionadas por falhas.

O autor elenca ainda, que a manutenção preditiva usa a condição operacional real dos equipamentos e sistemas da planta para otimizar sua operação total, o que pode ser feito por meio da utilização de ferramentas, como monitoramento de vibração, termografia, tribologia, entre outras; que possibilitam a obtenção da condição operacional real de sistemas críticos da planta e com base nesses dados, as atividades de manutenção são programadas (MOBLEY, 2002).

2.1.4 Políticas de Manutenção

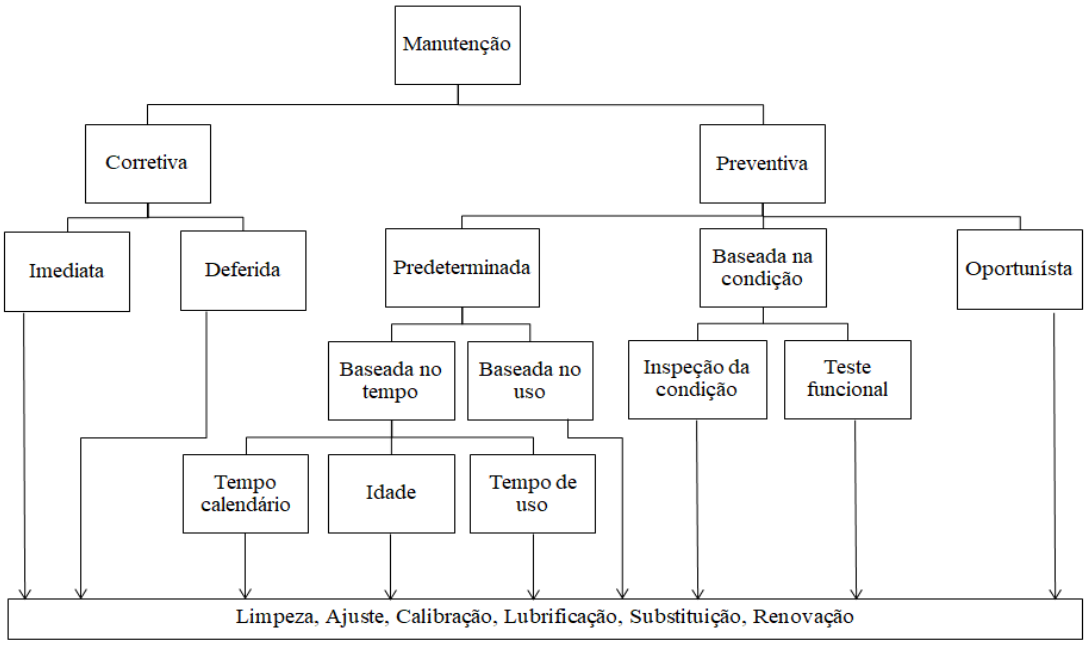
Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) definem políticas de manutenção como sendo uma regra ou conjunto de regras que descrevem e direcionam o mecanismo de acionamento para diferentes ações de manutenção, ou seja, a política determina as diretrizes sobre quais ações de manutenção devem ser realizadas.

Segundo Bottani *et al*. (2014) uma política de manutenção representa uma estratégia seguida por uma organização para um melhor gerenciamento da manutenção, o que envolve seguir todas as práticas e atividades orientadas a evitar o fracasso e suas consequências. Ou seja, existe um procedimento (ações de manutenção) que deve ser seguido para alcance dos objetivos e sucesso em termos de mantenabilidade do sistema, e a política de manutenção escabele todo o direcionamento necessário para este fim.

As ações de manutenção para um item incluem atividades como inspeção, teste de conformidade, monitoramento, manutenção de rotina, revisão, reconstrução, melhoria, modificação, reparo, diagnóstico e/ou correção da falha, verificação da função, manutenção de parada, entre outras. Além disto, essas ações podem ser realizadas em qualquer nível de decomposição de um objeto, no nível da planta, no nível intermediário e no nível do componente (BEN-DAYA; KUMAR; MURTHY, 2016).

Alguns exemplos de políticas de manutenção difundidos na literatura são: política de manutenção baseada em falha, política de substituição por idade, política de substituição por blocos, política baseada no tempo de uso, política de manutenção oportunista, política de manutenção baseada na condição, políticas mistas, políticas com base em inspeções, entre outras (WANG, 2002; PINTELON; PARODI-HERZ, 2008). Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016) mostram uma forma eficaz de classificar e agrupar as ações de manutenção para construção de uma política de manutenção (Figura 4) tendo como base um tipo corretivo ou preventivo de manutenção.

Figura 4 - Classificação das ações de manutenção



Fonte: Adaptado de Ben-Daya, Kumar e Murthy (2016)

De acordo com Pintelon e Parodi-Herz (2008), á medida que novas técnicas de manutenção estão disponíveis, novas implicações econômicas provenientes de ações de manutenção são compreendidas, e isto tem um impacto direto na política de manutenção. Conforme Wang (2002) cada tipo de política possui suas características, vantagens e desvantagens e vários tipos podem ser considerado para desencadear de uma forma ou de outra, intervenções de manutenção preventiva ou corretiva.

É importante ressaltar, diante da variedade de políticas de manutenção existentes, que o tipo de política apropriada para ser usada depende totalmente das características do sistema e dos objetivos que se desejam alcançar, tais quais: redução de custos, maior disponibilidade do equipamento, qualidade dos produtos, maior confiabilidades, entre outros. É importante que a política esteja em conformidade com os objetivos do gestor para que a satisfação e o sucesso da organização sejam alcançados.

2.2 MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO

Do et al. (2015) apresentam a Manutenção Baseada na Condição, do inglês *Condition-Based Maintenance* – CBM, como uma abordagem cada vez mais utilizada em contextos industriais. Segundo os autores trata-se de um modelo de manutenção que leva em consideração as reais condições operacionais do sistema ao longo do tempo, fazendo com que se destaque

frente a outros modelos de manutenção. Através do desenvolvimento cada vez mais avançado de equipamentos de monitoração que fornecem informações necessárias e precisas sobre a condição no qual se encontra dado equipamento, a CBM consegue cumprir com seu objetivo central, de tomar a decisão de manutenção preventiva com base neste estado observado, de modo mais próximo da realidade.

É possível corroborar a ideia traga no parágrafo anterior, com a de outros autores que também trazem a CBM como uma manutenção realista e inovadora. Alaswad e Xiang (2017) contextualizam o fato de que as organizações precisam estar atentas e melhorando sempre a eficiência de suas operações, isto porque existe uma tendência crescente para competitividade e deste modo às corporações precisam buscar continuamente novas estratégias que garantam o bom desempenho de suas atividades.

Frente a isto, a CBM se destaca por ser uma manutenção que focaliza e concilia modelos de confiabilidade orientados por dados com o uso de dados coletados através de sensores utilizados para monitorar sistemas operacionais para deste modo, desenvolver estratégias de manutenção. Segundo os autores, o propósito desta abordagem centra-se em diminuir o número de ações de manutenção que são realizadas desnecessariamente e ainda, reduzir ou até eliminar riscos atrelados a ações preventivas (ALASWAD; XIANG, 2017).

Historicamente, o conceito de CBM não é algo novo, muitas vezes referenciada por outros termos, como manutenção preditiva, seu conceito foi introduzido pela primeira vez pelo “Rio Grande Railway Company” em 1940, que utilizou técnicas de manutenção com base na condição para detectar vazamentos em motores por meio de dados observados de temperatura e pressão. A aplicação desta abordagem culminou em resultados positivos, fazendo com este tipo de manutenção fosse utilizada em outros contextos (PRAJAPATI; BECHTEL; GANESAN, 2012).

Segundo Koons-Stapf (2015) a era da informação propiciou ainda mais o desenvolvimento da CBM, que incorporou uma nova geração, que detectou benefícios úteis ao realizar medições físicas, coletar dados e analisá-los ao longo tempo, tendo com isto uma visão aprofundada sobre o real estado de dado sistema.

Conceitualmente, Shin e Jun (2015) conceitua a CBM, conforme uma definição traga pela British Standard, que a trata como uma manutenção que tem por base o monitoramento do desempenho, ou seja, é um política definida e realizada em função da deterioração de um sistema, tendo dado(s) parâmetro(s) como indicador(es), ocorre que, um parâmetro será monitorado, e uma mudança neste irá direcionar as ações de manutenção que deverão ser

realizadas, de modo que, em muitos casos, são utilizados valores limiares para indicar qual decisão deve ser tomada.

Para os autores a CBM apresenta vantagens significativas que podem ser visualizadas ao passo que sua aplicação implica em maior precisão na previsão e antecipação as falhas, proporciona maior segurança as ações e ao sistema, garantia de qualidade e consequente satisfação do usuário, permite um melhor planejamento da manutenção, reduz o número ou até elimina inspeções desnecessárias, reduz de custos (SHIN; JUN, 2015).

2.3 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Sistemas de abastecimento de água são sistemas projetados para fornecer água à população, o que inclui manter uma fonte de água confiável e de alta qualidade, o tratamento adequado da água, sua distribuição e engloba ainda o atendimento da necessidade dos consumidores e dos padrões locais e regulamentos federais; a manutenção de tubulações, tanques de armazenamento e bombas que transportam a água (BUENFIL, 2005).

Dião *et al*. (2014) explicam que, um sistema de abastecimento de água representa uma rede com características topológicas e comportamentais complexas, responsável por abastecer a população. Os dois requisitos mais importantes desses sistemas são de que eles forneçam água aos consumidores em volume suficiente e pressão adequada e que sejam capazes de entregar água potável que satisfaça as expectativas de qualidade dos clientes (MAYS, 2010).

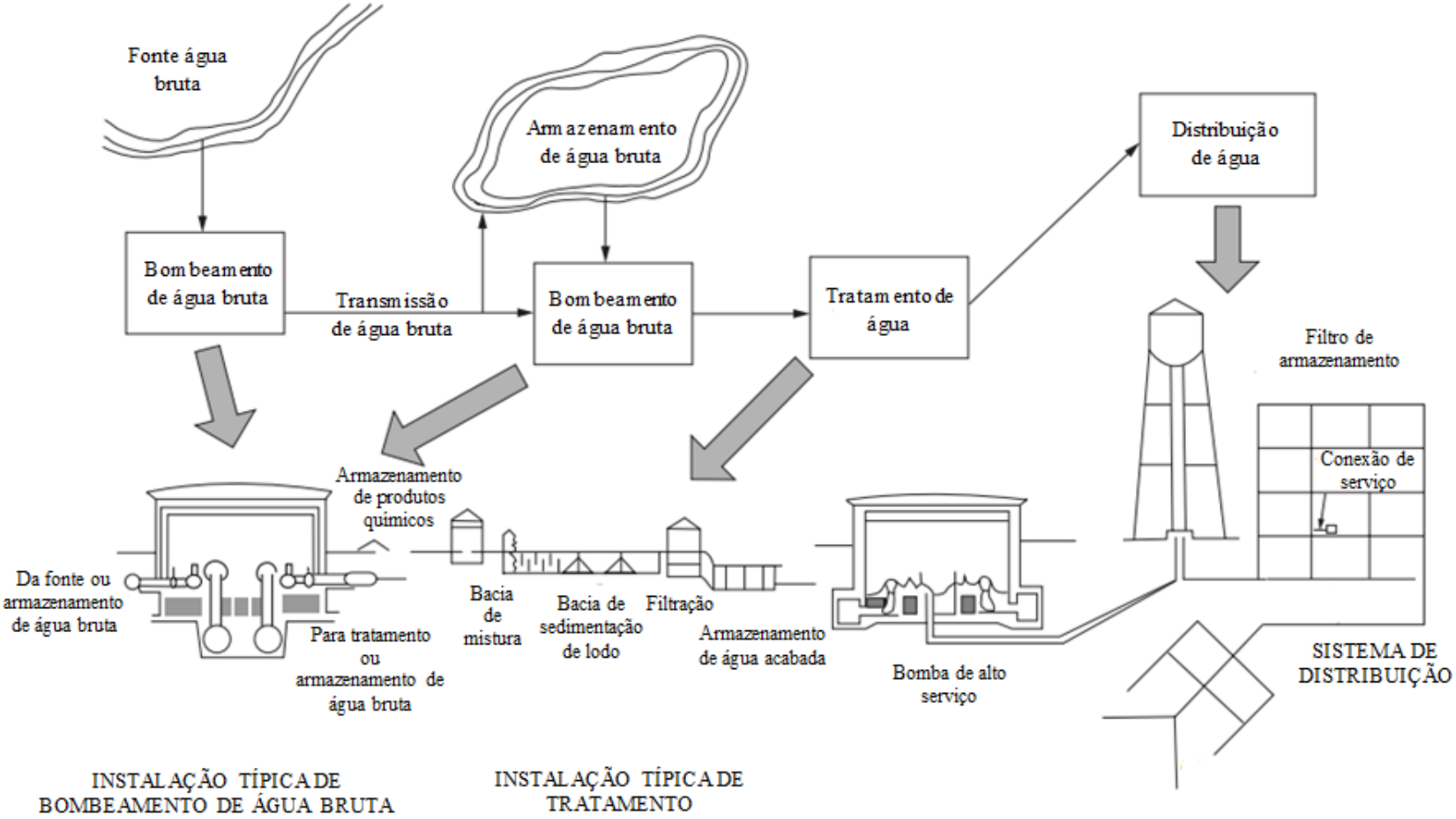
Conforme Mays (2010) os elementos principais, ilustrados na Figura 5, de um sistema de abastecimento de água são:

- Fonte de água bruta, a exemplo de um lago, rio, água subterrânea de um aquífero.
- Suprimentos de superfície (instalações de tratamento convencionais) onde ocorrem processos como filtração, desinfecção, entre outros.
- Sistemas de transmissão, que incluem túneis, reservatórios e / ou instalações de bombeamento, e instalações de armazenamento.
- Rede de distribuição de água.

De modo geral, um sistema de abastecimento de água é formado por três processos fundamentais (TRIFUNOVIC, 2020):

1. Extração e Transporte de água bruta,
2. Tratamento e Armazenamento de água, e
3. Transporte e Distribuição de água limpa.

Figura 5 - Sistema de distribuição de água



Fonte: Adaptado de Mays (2000)

2.3.1 Bombeamento de Água

Os terrenos, por sua própria natureza diferenciam-se com relação as suas características topográficas e deste modo em determinada região podem ser encontradas partes planas, partes aclives e declives. Para que uma concessionária de água consiga abastecer determinadas áreas, torna-se necessário a elevação das pressões e para fazer este trabalho, são instaladas estações elevatórias (PEDROSA, 2015).

Segundo o autor, as estações elevatórias de água podem ser caracterizadas pelo conjunto das instalações e equipamentos de bombeamento utilizados para levar a água aos pontos mais elevados e podem ser utilizadas nas captações, aduções, estações de tratamento e na distribuição aos consumidores. Estas estações são compostas basicamente por tubulações de sucção, conexões de recalque, e pelo sistema de bombeamento, representado, em suma, pelo conjunto motobomba (PEDROSA, 2015).

Mays (2010) também salienta o fato de que existem situações em que não é possível utilizar a gravidade para transportar a água até o sistema de distribuição com a pressão necessária para atender a demanda do serviço. Nestes pontos, são utilizados sistemas exclusivos responsáveis por fornecer a pressão necessária para que o volume de água atenda as demandas exigidas. Estes são os chamados sistemas de bombeamento, que por tamanha função, representam o elemento central das estações elevatórias e um dos principais elementos de um sistema de abastecimento de água.

Segundo o autor, em um sistema de abastecimento, sistemas de bombeamento podem ser utilizados basicamente para três tipos de aplicações: no alto serviço, fornecendo pressão e descarregando a água nas redes de distribuição; para aumentar a pressão na rede de distribuição ou abastecer tanques de armazenamento elevados; e para levantar a água da fonte e leva-la até a estação de tratamento ou armazenamento (MAYS, 2010).

2.3.2 Bombas Hidráulicas

Bombas, de modo geral, são geralmente classificadas em duas classes principais: volumétricas e turbobombas. As volumétricas, que são do tipo pistão, raramente são usadas em sistemas de abastecimento de água. Já as turbobombas, chamadas também de bombas hidráulicas, são comumente utilizadas nestes sistemas (PEDROSA, 2015).

As bombas hidráulicas recebem uma subclassificação, sendo as bombas de velocidade e as bombas de deslocamento positivo, as mais utilizadas em sistema de abastecimento de água.

As bombas de deslocamento são comuns às estações de tratamento por conta do processo de dosagem químicas, já as bombas centrífugas de velocidade são usadas para maioria das aplicações no sistema de abastecimento (MAYS, 2010).

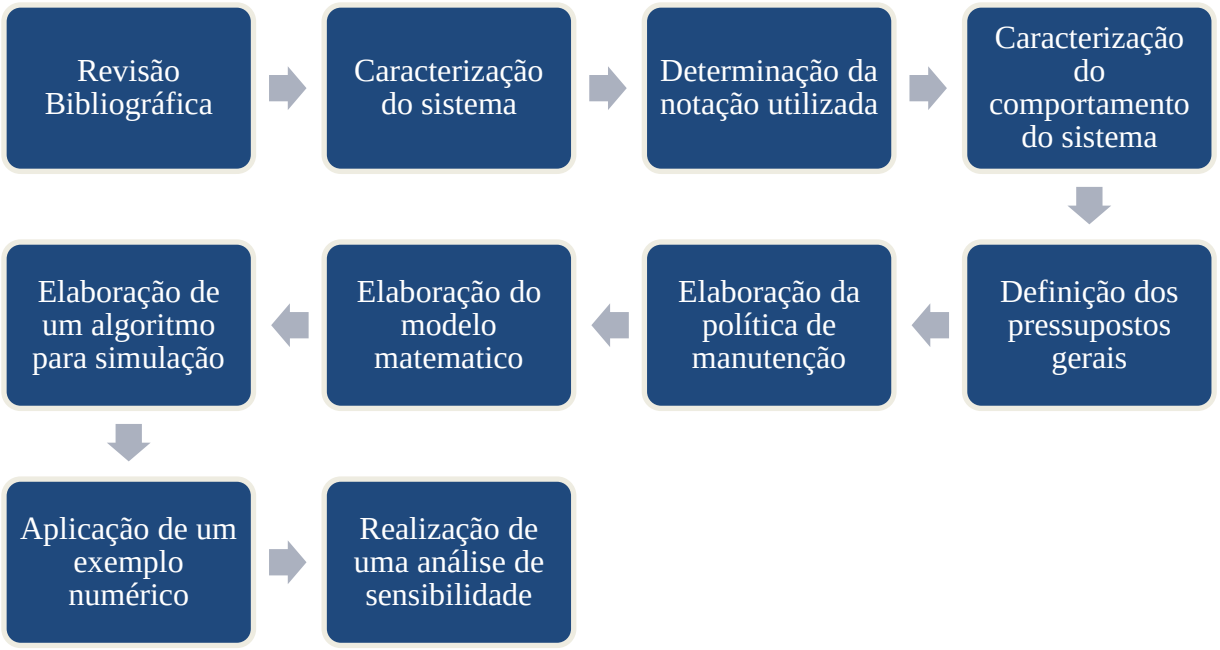
As bombas de velocidade, conforme Mays (2010) são ainda classificadas em bombas de turbina vertical e bombas centrífugas, sendo estas últimas comumente utilizadas em sistema de abastecimento de água. Rishel (2002) também saliente a comumente usabilidade das bombas centrífugas por concessionárias de água, e as caracteriza como sendo bombas de maior capacidade, que usam a força centrífuga para mover a água através delas e para o sistema de abastecimento.

Girdhar e Moniz (2005) caracterizam a bomba centrífuga como máquinas hidráulicas que são utilizadas com o objetivo de energizar e transferir um fluído dentro do sistema, com um fluxo que vai variar de acordo com as necessidades do próprio sistema. Jones et al. (2006) explicam que na bomba centrífuga o fluído é energizado por um impulsor rotativo e deslocado radialmente, ou seja, com um fluxo radial, seguindo a trajetória em planos normal ao eixo da bomba.

3 METODOLOGIA

Conforme exposto anteriormente, a presente pesquisa se direcionou a propor uma política de manutenção baseada na condição para um sistema motobomba utilizado em redes de distribuição de água. Para tanto, metodologicamente algumas etapas principais, mostradas na Figura 6, foram sequencialmente seguidas.

Figura 6 - Etapas da Pesquisa



Fonte: A autora (2022)

A primeira etapa efetuada para construção deste trabalho consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica. A referida pesquisa envolveu uma busca na literatura atual, por livros, revistas, dissertações, entre outros materiais que permitissem uma revisão sobre os principais pressupostos teóricos acerca da temática selecionada para esta pesquisa.

Logo, os conceitos de manutenção, sua história, classificação, ações e políticas; a teoria em torno da importância e dos componentes de um sistema de abastecimento de água e do sistema de bombeamento em específico, com foco em bombas centrífugas, foram levantados por meio da bibliografia já publicada na literatura. Foram utilizadas bases de dados como o Google acadêmico e o Portal de Periódicos da Capes.

Após obtenção de todo conhecimento literário necessário, foi feita uma caracterização do funcionamento do sistema motobomba, alvo de estudo deste trabalho. A partir desse

entendimento foram definidos todos os parâmetros inerentes à política proposta e ao modelo desenvolvido. Tornou-se necessário ainda, entender e descrever o comportamento de deterioração do sistema, para fins da proposição da política.

As informações necessárias para toda caracterização do sistema, bem como de seu funcionamento e modos de falha, foram obtidas através de consultas a um especialista da área de manutenção atuante em uma concessionária de distribuição de água, mediante reuniões periódicas realizadas entre os anos de 2021 e 2022.

Assim, foi então proposta uma política de manutenção. Posteriormente, a sua construção, um modelo matemático com intuito de apoiar a referida política foi desenvolvido, tendo a simulação como sendo a abordagem adotada. Esta última, por sua vez, foi efetuada, por meio da construção de um algoritmo, elaborado com intuito de testar a eficiência da política de manutenção proposta.

Posteriormente foi selecionada uma bomba centrífuga para obtenção de dados reais utilizados em uma aplicação de um exemplo numérico. Os dados utilizados para parametrização do comportamento de deterioração do sistema, no exemplo numérico, foram obtidos mediante consulta ao especialista citado anteriormente. A aplicação foi efetuada no ambiente de programação *Spyder*, utilizando-se da linguagem *Python* 3. Por fim, uma análise de sensibilidade foi realizada com intuito de analisar possíveis impactos provenientes de variações nos parâmetros de entrada e deste modo, testar a robustez do modelo proposto.

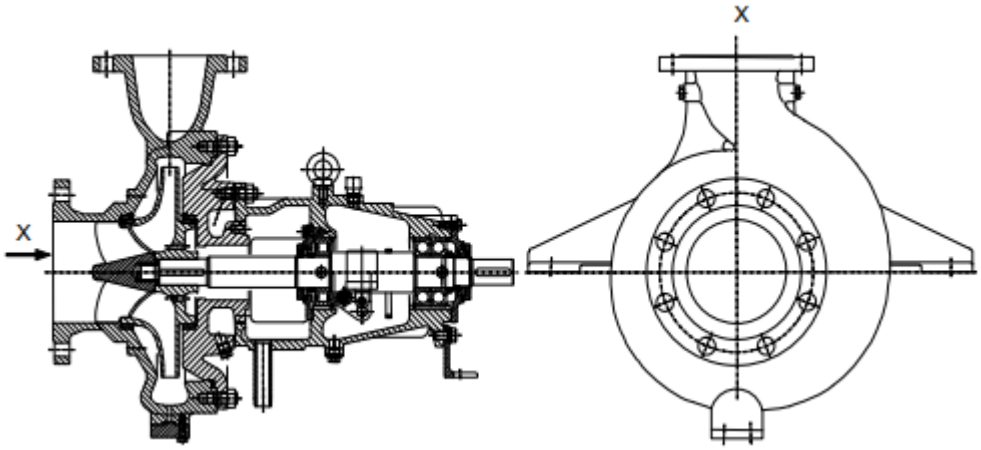
4 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MODELO PARA MANUTENÇÃO BASEADA NA CONDIÇÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO E FUNÇÃO DA BOMBA CENTRÍFUGA

Segundo Girdhar e Moniz (2005), uma bomba, em um contexto mais geral, pode ser caracterizada como um equipamento que utiliza energia para elevar, transportar ou até comprimir um líquido. Existem vários tipos de bombas utilizadas para diferentes aplicações tanto na indústria quanto em outros setores. Com base em seu princípio de operação, existem dois tipos principais: bombas de deslocamento positivo e bombas rotodinâmicas também chamadas de centrífugas.

A bomba centrífuga, conforme Gulich (2010), é caracterizada como uma turbomáquina que possui como função principal transportar o líquido com um fluxo de volume especificado e atendendo um determinado nível de pressão. Elas adicionam energia ao fluído para que este consiga alcançar determinada altura manométrica. Este tipo de bomba, ilustrado na Figura 7, é composto essencialmente por uma carcaça, mancais de rolamento, um eixo e um impulsor (rotor).

Figura 7 - Bomba Centrífuga



Fonte: Gulich (2010)

O líquido a ser bombeado pela bomba centrífuga entra através do bocal de sucção para o rotor, montado no eixo, acionado por meio de um acoplamento do motor. O motor é responsável por transformar energia elétrica em energia mecânica. Esta energia mecânica que chega até o rotor é transformada por este, em energia cinética. Isto ocorre de modo que, o rotor transfere a

energia necessária para transportar e acelerar o fluido na direção circunferencial, direção esta, que faz com que a pressão estática aumente em conformidade com a cinética (GULICH, 2010).

4.1.1 Aspectos de Falha da Bomba Centrífuga Usando Sinais Elétricos do Motor

Em sistemas de abastecimento e distribuição de água a incapacidade de atender a demanda de água com uma pressão mínima especificada, representa uma falha hidráulica para este sistema. A mesma pode ser decorrente de vários motivos, isto porque se trata de um sistema complexo que possui vários ativos, e sendo assim, esta eventualidade pode se dá por conta de um vazamento e até mesmo por conta da falha de um equipamento físico, como o desligamento de uma bomba centrífuga (ZHOU, 2018).

As bombas centrífugas são uma das mais utilizadas em diversos setores da sociedade e em redes de abastecimento de água, representam um dos principais ativos. São tão amplamente usadas, que seu funcionamento chega a consumir cerca de 90% da energia elétrica consumida por estações de bombeamento (KURITZA et al., 2017).

Segundo Harihara e Parlos (2012) muitas dessas bombas são acionadas por motores de indução, e desta forma, o conjunto motobomba condiciona a função central de bombear a água para o sistema de abastecimento e distribuição. Falhas em motores de indução podem resultar em um desligamento não programado da bomba centrífuga, e levam a perdas de produção e consequentemente de receita, além de ocasionar indisponibilidade do recurso que abastece a sociedade.

Logo, esforços significativos têm sido destinados à detecção de falhas em motobombas. O que geralmente é feito por meio da análise de dados de vibração, pressão e velocidade. Ocorre que, estes meios de análise necessitam da instalação de sensores no sistema, que levam a um aumento considerável no custo e são invasivos. Em contrapartida, poucas são as literaturas revisadas por pares que lidam com técnicas menos invasivas, e que analisam falhas específicas do motor que aciona a bomba, por meio de sinais elétricos (HARIHARA; PARLOS, 2012).

Como supracitado no capítulo anterior, o motor da bomba centrífuga é responsável por transformar energia elétrica em energia mecânica, necessária para que a energia cinética e de pressão sejam fornecidas ao líquido, fazendo com que a bomba cumpra com sua função. Este motor, composto pelo estator e pela parte móvel que é o rotor, funciona através de campos eletromagnéticos, ou seja, ele desempenha sua função quando a tensão da corrente elétrica é transformada em magnetismo.

Seixas e Fernandes (2016) explicam que o motor converte energia elétrica, relacionada com tensão e corrente, em energia mecânica. Ocorre que, o estator do motor possui fios bobinados que transmitem a eletricidade e realizam um movimento que gera um campo magnético. A corrente elétrica deste campo magnético faz o rotor girar, gerando assim, a energia mecânica.

Contudo, com o tempo tensões ambientais e operacionais contribuem para deterioração da bomba. Assim, a estrutura da bomba, que estava em perfeitas condições para que a mesma pudesse realizar sua função, vai se deteriorando, o que consequentemente poderá levar a sua falha. Na maioria dos modos de falhas, a exemplo de desgaste em rolamentos ou nos mancais, quanto maior o nível de deterioração da motobomba maior será o consumo de energia elétrica e consequentemente maior será o nível de corrente elétrica.

Neste viés, conforme componentes físicos vão se deteriorando, a bomba vai perdendo eficiência ao transferir velocidade radial para o líquido, e com isso será preciso uma maior quantidade de corrente elétrica para que a mesma tenha a potência necessária a fim de compensar as perdas de carga do processo. Então, a bomba precisará aumentar o consumo de corrente elétrica para ter a potência necessária para alcançar a altura manométrica solicitada. É preciso mais energia para compensar a deterioração das características físicas da bomba.

Somado a isto, Pereira (2016) relata que motores de indução são suscetíveis ao desequilíbrio de tensão entre fases que resulta em um desequilíbrio na corrente elétrica, ou seja, quedas de tensão fazem com que o equipamento solicite mais corrente elétrica para manter a potência de trabalho e sofra com isto, um sobreaquecimento. Quando os limites ideais de corrente para o qual o equipamento é programado a operar são ultrapassados, o motor queima, automaticamente se desliga, ou seja, falha.

A bomba é programada para operar com um determinado valor ideal de corrente elétrica, também chamado de nominal. Contudo, existe um valor, representado pelo fator de serviço (FS), no qual um motor consegue trabalhar acima de seu valor ideal. Logo, sua corrente elétrica máxima, que não pode ser ultrapassada, é dada pelo produto da corrente nominal com o fator de serviço, assim como expressa a fórmula 1 (PEREIRA, 2016).

$$\mathrm{Cm} = \mathrm{FS} * \mathrm{Cn} \qquad (1)$$

Onde:

Cm = Corrente máxima

Cn = Corrente nominal (ideal)

FS = Fator de Serviço

O fator de serviço está diretamente relacionado ao tempo de vida útil do motor, logo, a sua utilização implica em uma vida útil inferior àquela do motor com carga nominal. Quando a corrente máxima é ultrapassada ocorre sobrecarga, o que leva a queima do motor (BULGARELLI, 2006; PEREIRA, 2016).

De modo geral, pode-se aferir que, uma bomba centrífuga possui diversos modos de falhas que podem decorrer de fontes distintas e apresentar comportamentos diferentes. Diante disto, considera-se neste presente trabalho, um comportamento de deterioração em que a corrente elétrica aumenta conforme a motobomba vai se deteriorando ao longo do tempo. E ainda, possíveis cenários em que o conjunto motobomba pode vir a falhar, antes mesmo dos níveis de corrente máxima serem ultrapassados.

A Tabela 1 apresenta exemplos de modos que repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica pelo motor da bomba, e possíveis modos de falhas que podem vir a ocorrer sem promover o referido aumento de consumo.

Tabela 1 - Exemplos de modos de falha da bomba centrífuga

Modos de falha que repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica	
Possíveis Causas Elétricas	Tensão Baixa
	Queda de Tensão por falha dimensionamento
	Queda de Tensão por mau contato
	Falhas Elétricos nos acionamentos - Soft-Starter
	Inversor de Frequência com falha
Possíveis Causas Estruturais	Rolamento ou mancais Danificados
	Desbalanceamento do eixo
	Enrolamentos com impedâncias diferentes
	Rotor maior que o especificado
Possíveis Causas Hidráulicas	Estouro da rede - Diminuindo a altura manométrica do sistema
	Pressão de sucção mais baixa- Aumentando a altura manométrica total
Modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica	
Possíveis Causas Hidráulicas	Entrada de Ar - Cavitação
	Obstrução da rede - Aumentando a altura manométrica do sistema - Diminuindo a vazão
Possíveis Causas Estruturais	Quebra abrupta de componentes
Possíveis Causas Poluição	Poluição dos elementos elétricos (graxa ou outro poluente)

Possíveis Causas Temperatura	Elevação de temperatura dos componentes ou enrolamentos (obstrução)

Fonte: A autora (2022)

4.2 NOTAÇÕES

A notação utilizada para representar as variáveis e os parâmetros de entrada da política de manutenção proposta e do modelo desenvolvido é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Notações

Variáveis de Decisão	
T	Tempo ótimo para substituição preventiva
C_{n_m}	Valor de corrente elétrica para substituição preventiva
Critério de decisão	
$CT(T, C_{n_m})$	Taxa de Custo
Parâmetros do modelo	
pi	Potência elétrica inicial e ideal da bomba
pf	Potência elétrica utilizada a cada incremento de x
p	Potência elétrica retirada da rede elétrica pelo motor
V	Tensão entre fases
FP	Fator de Potência
FS	Fator de Serviço
C_n	Corrente elétrica Nominal
C_m	Corrente elétrica Máxima
C_r	Corrente real
h	Tempo no qual a bomba está ligada (em horas)
x	Variável aleatória que representa o incremento de corrente elétrica utilizada pela bomba ao longo do tempo
α	Parâmetro de forma da distribuição Gama
β	Parâmetro de escala da distribuição Gama
$f_{(x;\, \alpha,\, \beta)}$	Função de distribuição acumulada de x
j	Vida do equipamento conforme a corrente elétrica
w	Vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica
η	Parâmetro de escala da distribuição *Weibull*

β_w	Parâmetro de forma da distribuição *Weibull*
$f_{(w;\, n,\, \beta)}$	Função de distribuição da vida do equipamento
C_{vida}	Comprimento do ciclo de vida do equipamento
C_{acum}	Ciclo de vida acumulado de todos os equipamentos
C_h	Custo do consumo de energia elétrica por hora
C_e	Custo do consumo de energia elétrica
C_p	Custo de manutenção preventiva
C_c	Custo de manutenção corretiva
C	Custo total do ciclo de renovação do equipamento
C_t	Custo total acumulado de todos os equipamentos

Fonte: A autora (2022)

4.3 COMPORTAMENTO DE DETERIORAÇÃO DO SISTEMA

Na maioria dos processos de deterioração física é possível observar um comportamento monótono, uniforme (DO et al., 2015). Diante disto, uma das distribuições de probabilidade bastante utilizada, justamente por possuir esta característica é a distribuição gama. Amplamente utilizada, segundo Kiche, Ngesa e Orwa (2019) esta distribuição segue uma família de dois parâmetros de probabilidades contínuas e pode ser parametrizada em termos de um parâmetro de forma *k* e um parâmetro de escala *θ*. Considerando $k = \alpha$ e $\beta = 1/\theta$, uma variável aleatória *x* distribuída conforme um processo gama é denotada por:

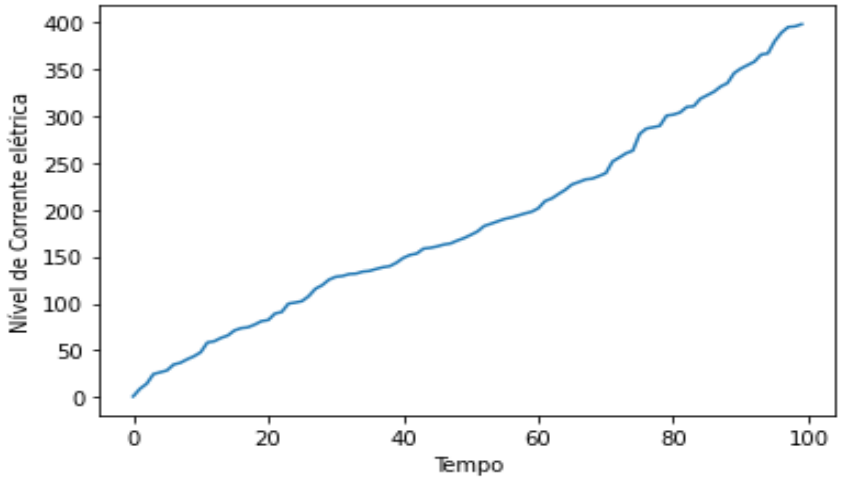
$$f_{(x;\propto,\beta)} = \frac{\beta^{\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\beta X}}{\Gamma(\alpha)} \quad , \quad x > 0; \quad \propto, \beta > 0 \qquad (2)$$

Assumindo estas características assume-se que a deterioração do sistema evolui como um processo estocástico Gama $(x_t)_{t\geq 0}$. O consumo de corrente elétrica é linear a deterioração do sistema, visto que, quanto mais deteriorado mais corrente elétrica e consequentemente mais energia elétrica o motor irá consumir, chegando a falhar caso seu nível de corrente máxima seja ultrapassado. Logo, a variável aleatória *x*, representa um incremento de corrente elétrica utilizada pelo motor quando está vai deteriorando ao longo do tempo, e pode ser simulada através do Método da Transformação Inversa, tendo como base a seguinte proposição:

Proposição 1. Seja *U* uma variável aleatória uniforme (0,1). Para qualquer função de distribuição contínua *F*, se definirmos a variável aleatória *x* por $x = F^{-1}(U)$, então a variável aleatória *x* tem função de distribuição *F*. [$F^{-1}(u)$ definida para ser igual ao valor *x* para o qual $F(x) = u$.].

O comportamento de degradação do sistema associado ao nível acumulado de corrente elétrica utilizada pelo motor ao longo do tempo (dias) é representado na Figura 8.

Figura 8 - Consumo da corrente elétrica com base na deterioração do sistema



Fonte: A autora (2022)

Como supracitado anteriormente, além do modelo de deterioração da motobomba, tendo como parâmetro o consumo da corrente elétrica, que cresce à medida que o nível de deterioração aumenta, são consideradas ainda falhas que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica. A falha ocorrida mediante esse cenário será representada pela variável *w*, simulada seguindo uma distribuição *Weibull*.

Segundo Melo (2014) a distribuição *Weibull*, amplamente utilizada nas últimas décadas, tem sua popularidade atribuída a estudos voltados para confiabilidade e a análise de dados de sobrevivência. Segue uma família de dois parâmetros de probabilidades contínuas e pode ser parametrizada em termos de um parâmetro de escala η e um parâmetro de forma β. Logo, a variável aleatória *w* distribuída conforme um processo *Weibull* é denotada por:

$$f_{(w;\eta,\beta)} = 1 - e^{\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad x \geq 0; \quad \eta, \beta > 0 \qquad (3)$$

A variável aleatória *w*, representa o tempo de vida do equipamento, e pode ser simulada através do Método da Transformação Inversa, tendo como base a Proposição 1, apresentada anteriormente.

4.4 PRESSUPOSTOS GERAIS A

Para efeitos de caracterização do sistema que o conjunto motobomba representa, considera-se que:

- Considera-se uma bomba centrífuga, do tipo trifásica.
- O conjunto motobomba será simplificado como um único componente, visto que, funcionam em conjunto para atender a função principal de bombear água.
- O comportamento de deterioração do sistema no tempo *j* será simbolizado por uma variável aleatória *x* que representa um incremento de corrente elétrica utilizada pelo motor da bomba. Este incremento segue uma distribuição gama.
- Na ausência de ações preventivas ou corretivas, a evolução da deterioração associada ao nível de corrente elétrica utilizada pelo motor, é considerada estritamente crescente.
- O monitoramento da corrente elétrica configura-se como um procedimento operacional padrão, realizado por meio de um sensor.
- A vida do equipamento relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica, é representada por *w* e é gerada seguindo uma distribuição *Weibull*.

  Para efeitos de falha do sistema, alguns pressupostos também são considerados. Dado que o sistema é novo:

- O estado inicial do nível de deterioração *x* será $x_0 = 0$.
- O estado inicial da vida *w* do componente será $w_0 = 0$.
- Existem modos de falhas competitivos: ou o sistema falha porque ultrapassou o nível de corrente máxima (C_m), que representa um valor que não pode ser ultrapassado por razões econômicas e de disponibilidade do equipamento, ou o sistema falha porque a vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica (*w*) foi alcançada.
- Se a corrente máxima for ultrapassada, será realizada uma ação corretiva e o valor da corrente retorna para seu valor nominal.
- Se a vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica for alcançada, será realizada uma ação corretiva e o sistema retorna para o estado de novo.

- Após uma renovação no sistema a cada T unidade de tempo será realizada uma manutenção preventiva.
- Uma manutenção preventiva devido à corrente será realizada no momento j, quando em j o C_{n_m} for atingido.
- O sistema não é substituído, mas sim reformado, sofre um *overall*, que tem o efeito de uma substituição.
- A falha do sistema é auto anunciada.

4.5 POLÍTICA DE MANUTENÇÃO

Trata-se de uma política baseada na condição, tendo como parâmetro principal, o monitoramento da corrente elétrica utilizada pelo motor e que leva em consideração ainda, fatores que podem fazer com que o sistema falhe antes mesmo da motobomba alcançar o limiar de corrente máxima. Ou seja, é uma política que considera um sistema motobomba que pode apresentar modos de falhas competitivos, pois o mesmo pode vir a falhar devido a uma ultrapassagem de um limiar de corrente elétrica ou quando seu tempo de vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica é alcançado.

Neste contexto, basicamente, duas ações de manutenção, são passíveis de realização, tais quais: ações de manutenção preventiva e ações de manutenção corretiva. As ações de manutenção preventiva, como o próprio nome já diz, serão realizadas previamente. Por sua vez, o tempo ótimo para manutenção preventiva, representado por T e o valor ótimo de corrente elétrica para manutenção preventiva, representado por C_{n_m} são otimizados com base na minimização da taxa de custo.

As ações de manutenção corretivas serão realizadas quando alguns dos possíveis modos de falhas, supracitados anteriormente vierem a ocorrer. Ou seja, quando a vida w do sistema se encerrar antes ou no mesmo momento em que o tempo ótimo para manutenção preventiva ser alcançado ou quando o valor máximo de corrente elétrica é ultrapassado.

Para ambas as ações de manutenção existem custos associados a sua realização. Ou seja, existe um custo C_p atrelado a efetuação de uma ação de manutenção preventiva e um custo C_c atrelado a efetuação de uma ação de manutenção corretiva.

Além dos custos de manutenção preventiva e de manutenção corretiva, existe ainda, um custo de corrente elétrica - C_e, associado ao comportamento do sistema. Este custo é obtido através do produto entre o custo por hora de energia elétrica consumida pela bomba, o valor da

potência da mesma, e a quantidade de horas por dias no qual a mesma permanece acionada, como mostra a fórmula 4.

$$C_e = ((p * h * j)/1000) * C_h \quad (4)$$

O valor da potência elétrica retirada da rede elétrica pelo motor, utilizado para cálculo do custo do consumo de energia elétrica é calculado através de uma média entre a potência inicial e a potência final obtida quando um incremento de *x* é gerado, como mostra a fórmula 5.

$$p = \frac{(p_i + p_f)}{2} \quad (5)$$

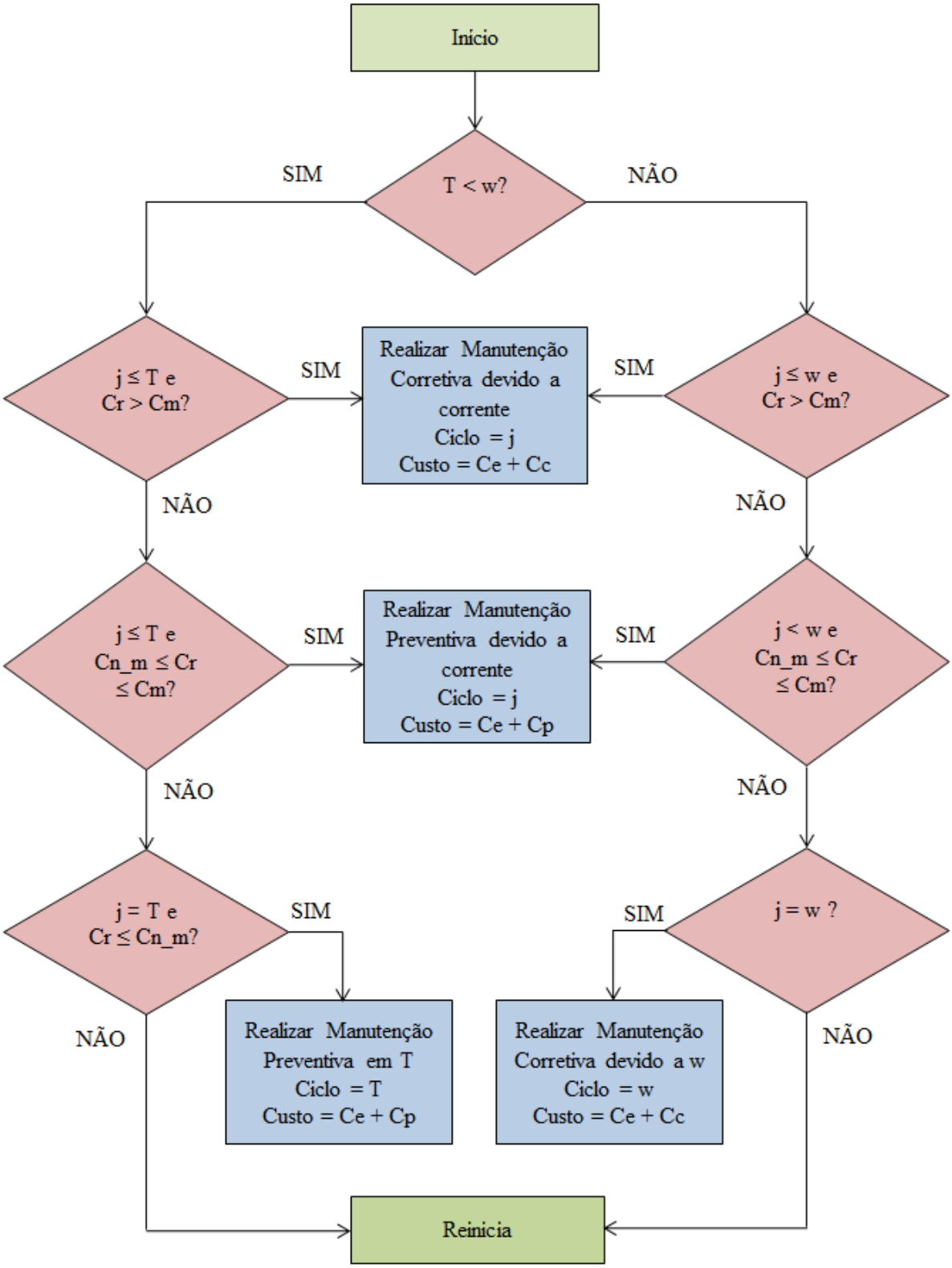
O valor da potência inicial, assim como o valor da potência final podem ser obtidos através da fórmula 6.

$$p_f = \sqrt{3} * V * x * cos\theta \quad (6)$$

De modo geral, esta política de manutenção foi proposta para fins de minimização da taxa de custo associada às ações de manutenção e ao consumo de energia elétrica da motobomba centrífuga. Logo, no âmbito da otimização, ela irá depender essencialmente de duas decisões: Qual será o tempo ótimo (*T*) para realizar ações de manutenção preventiva? Qual deve ser o limite do valor de corrente elétrica (C_{n_m}) ideal em um tempo *j* para realizar ações de manutenção preventiva?

Em meio à tomada de tais decisões, seis cenários específicos, mostrados no fluxograma ilustrado na Figura 9, podem se manifestar mediante o funcionamento desse sistema até que um custo por unidade de vida do equipamento seja encontrado.

Figura 9 - Possíveis cenários

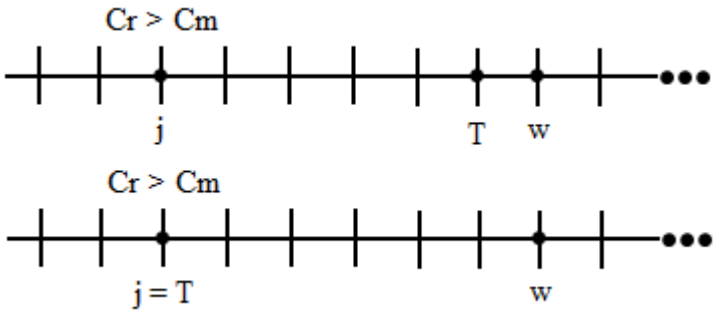


Fonte: A autora (2022)

Trata-se de modos de falhas que estão competindo. Logo, ao ser iniciado o fluxograma, uma primeira decisão precisa ser tomada, para que uma nova verificação seja realizada. Deste modo, verifica-se se o tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T* foi alcançado antes da vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica *w* ser atingida. Partindo de uma situação afirmativa para essa questão, têm-se os seguintes cenários:

Cenário 1: ($j \leq T \wedge C_r > C_m \mid T < w$), o limite de corrente máxima C_m foi ultrapassado antes ou no mesmo momento em que o tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T* foi alcançado, dado que este último foi atingido antes da vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica *w*, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Cenário 1

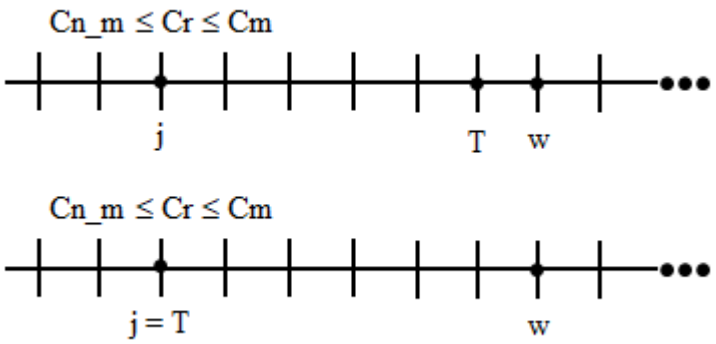


Fonte: A autora (2022)

Neste cenário, o ciclo de vida do equipamento se encerra devido a uma ação de manutenção corretiva no tempo *j*. Os custos associados a esse cenário são o custo do consumo de energia elétrica C_e e o custo da ação corretiva C_c.

Cenário 2: ($j \leq T \wedge C_{n_m} \leq C_r \leq C_m \mid T < w$), a corrente real C_r é maior ou igual ao valor de corrente ótimo para realização de manutenção preventiva C_{n_m} e menor ou igual que o valor de corrente máxima $C_{m.}$ Ou seja, o valor de corrente ideal para uma ação de manutenção preventiva foi atingido antes ou no mesmo momento que o tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T* é alcançado, dado que este último foi atingido antes da vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica *w*, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Cenário 2

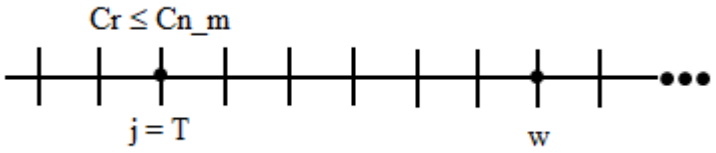


Fonte: A autora (2022)

Neste cenário, o ciclo de vida do equipamento se encerra devido a uma ação de manutenção preventiva no tempo *j*. Os custos associados a esse cenário são o custo do consumo de energia elétrica C_e e o custo da ação preventiva C_p.

Cenário 3: ($j = T \wedge C_r \leq C_{n_m} \mid T < w$), a corrente real C_r é menor ou igual ao valor de corrente ótimo para realização de manutenção preventiva $C_{n_m,}$ no mesmo momento em que o tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva T é atingido, dado que este último foi alcançado antes da vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica *w*, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 - Cenário 3



Fonte: A autora (2022)

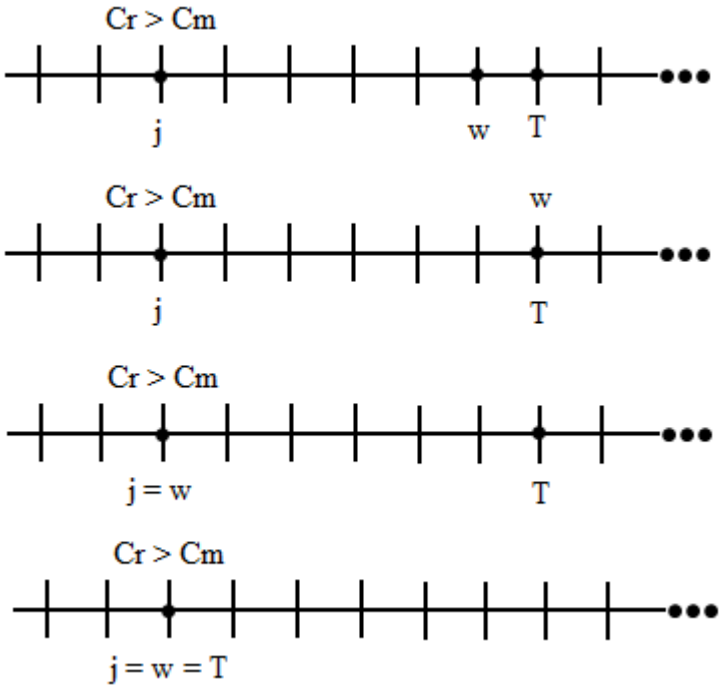
Neste cenário, o ciclo de vida do equipamento se encerra devido a uma ação de manutenção preventiva no tempo *T*. Os custos associados a esse cenário são o custo do consumo de energia elétrica C_e e o custo da ação preventiva C_p.

Partindo da situação em que o vida do equipamento *w* foi atingido antes ou no mesmo momento em que o tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T* foi alcançado, têm-se os seguintes cenários:

Cenário 4: ($j \leq w \wedge C_r > C_m \mid w \leq T$), o limite de corrente máxima C_m foi ultrapassado antes ou no mesmo momento em que a vida relativa aos modos de falha que não repercutem no

aumento do consumo de corrente elétrica *w* foi alcançada, dado que esta última foi atingida antes ou no mesmo momento do tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T*, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Cenário 4

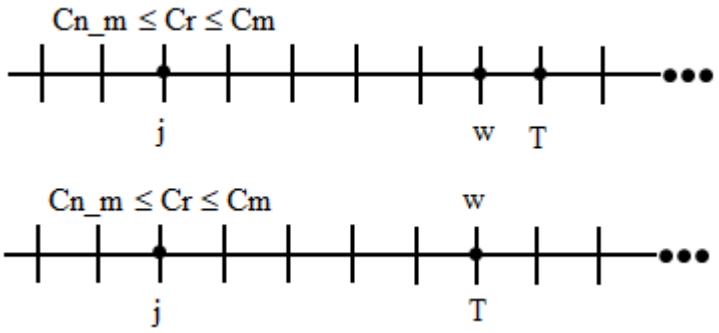


Fonte: A autora (2022)

Neste cenário, o ciclo de vida do equipamento se encerra devido a uma ação de manutenção corretiva no tempo *j*. Os custos associados a esse cenário são o custo do consumo de energia elétrica C_e e o custo da ação corretiva C_c.

Cenário 5: ($j < w \wedge C_{n_m} \leq C_r \leq C_m \mid w \leq T$), a corrente real C_r é maior ou igual ao valor de corrente ótimo para realização de manutenção preventiva C_{n_m} e menor ou igual que o valor de corrente máxima $C_{m.}$ Ou seja, o valor de corrente ideal para uma ação de manutenção preventiva foi atingido antes da vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica *w* ser alcançada, dado que esta última foi atingida antes ou no mesmo momento do tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T*, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Cenário 5

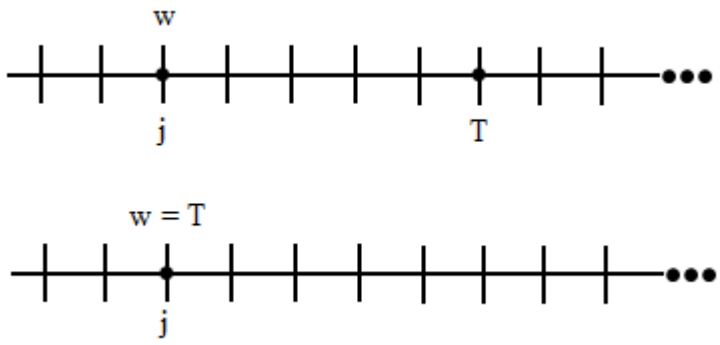


Fonte: A autora (2022)

Neste cenário, o ciclo de vida do equipamento se encerra devido a uma ação de manutenção preventiva no tempo *j*. Os custos associados a esse cenário são o custo do consumo de energia elétrica C_e e o custo da ação preventiva C_p.

Cenário 6: ($j = w \mid w \leq T$), a vida relativa aos modos de falha que não repercutem no aumento do consumo de corrente elétrica *w* foi alcançada em um momento *j*, ou seja o equipamento falha em qualquer valor da corrente elétrica, tendo em vista que o limite máximo não tenha sido ultrapassado, dado que *w* chegou antes ou no mesmo momento do tempo ótimo para realização de uma manutenção preventiva *T*, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Cenário 6



Fonte: A autora (2022)

Neste cenário, o ciclo de vida do equipamento se encerra devido a uma ação de manutenção corretiva no tempo *w*. Os custos associados a esse cenário são o custo do consumo de energia elétrica C_e e o custo da ação corretiva C_c.

O custo total relativo ao equipamento assim como o ciclo de vida do equipamento vão sendo obtidos conforme a ocorrência dos cenários, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo dos parâmetros e ações para cada cenário

Cenário	Custo total do ciclo de renovação do equipamento	Ciclo de vida do equipamento
1	$C = C_e + C_c$	$C_{vida} = j$
2	$C = C_e + C_p$	$C_{vida} = j$
3	$C = C_e + C_p$	$C_{vida} = T$
4	$C = C_e + C_c$	$C_{vida} = j$
5	$C = C_e + C_p$	$C_{vida} = j$
6	$C = C_e + C_c$	$C_{vida} = w$

Fonte: A autora (2022)

A taxa de custo, ou seja, o Custo por unidade de tempo $CT(T, C_{n_m})$ é então obtido através da relação Custo total acumulado de todos os equipamentos (C_t) por Ciclo de vida acumulado de todos os equipamentos (C_{acum}).

4.6 Desenvolvimento do Modelo

Quando se fala em política de manutenção é importante ter em mente que esta é desenvolvida como meio para solucionar um problema de desempenho de um sistema analisado. Neste viés, um modelo que representa o problema, deve ser desenvolvido com intuito de apoiar a política de manutenção proposta.

Duas das abordagens clássicas para representar um problema são: a simulação e o modelo analítico. Este último, por mais que forneça um resultado imediato, possui algumas limitações em termos de possibilidades de desenvolvimento, ao passo que se trata de um mecanismo que restringe o uso de suposições que precisam ser consideradas para um determinado problema.

Em contrapartida, a simulação, que também constitui um mecanismo que pode ser utilizado para representar um problema, através da realização de repetidas interações e reprodução de uma determinação situação, fornece um resultado de desempenho de uma política de manutenção, considerando várias suposições.

Desde modo, a simulação foi a abordagem selecionada e um algoritmo de otimização foi construído com vistas a testar a eficiência da política de manutenção proposta neste trabalho. Este algoritmo segue a seguinte lógica:

Passo 1: definição dos parâmetros de entrada: V, FP, FS, C_n, C_m, h, α, β, η, β_w, C_h, C_p, C_c;

Passo 2: geração das variáveis de decisão T e C_{n_m}, através dos limites pré-estabelecidos;

Passo 3: geração de sementes para x e w através do Método da Transformação Inversa;

Passo 4: cálculo da potência consumida pela bomba;

Passo 5: cálculo do custo do consumo de energia elétrica conforme a potência utilizada;

Passo 6: verificação do cenário ocorrido;

Passo 7: cálculo e acúmulo do custo total por equipamento - C e do ciclo de renovação do equipamento - C_{vida};

Passo 8: cálculo da taxa de custo $CT(T, C_{n_m})$;

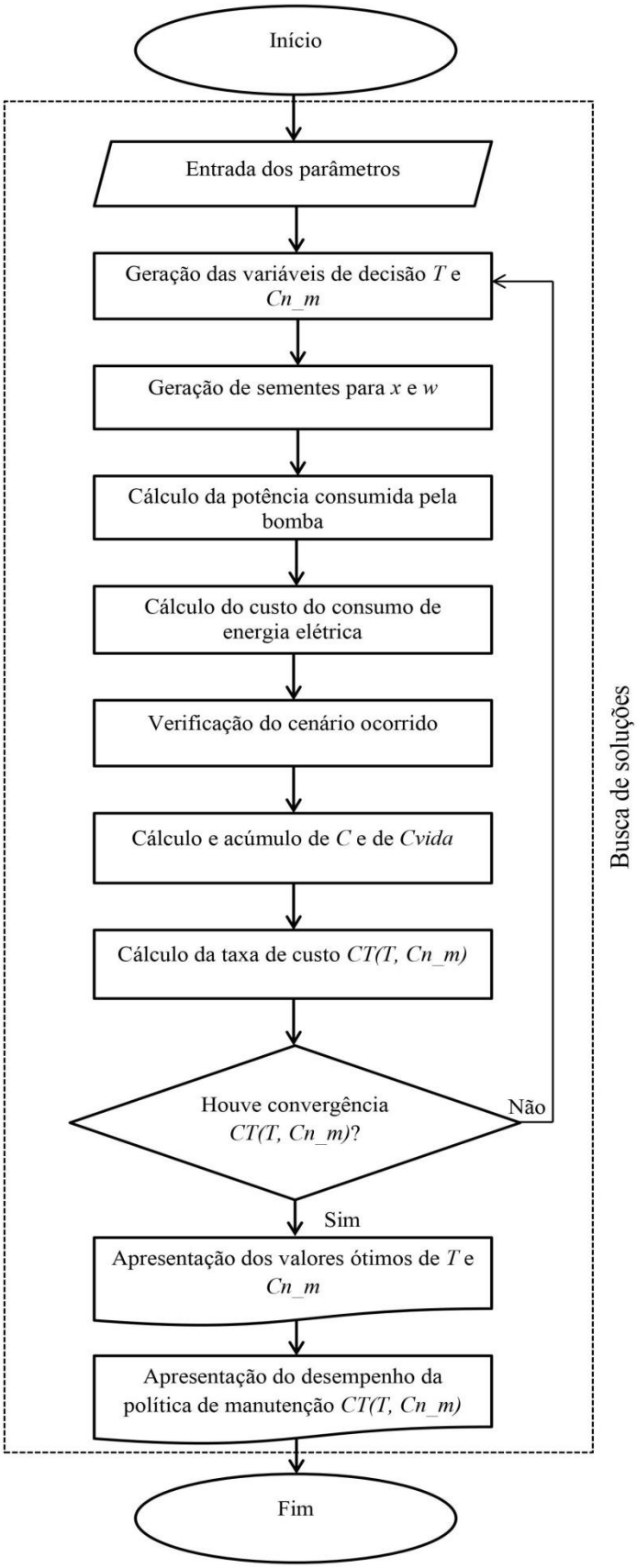
Passo 9: repetição dos passos 2-9 até que se verifique convergência do valor de $CT(T, C_{n_m})$;

Passo 10: apresentação dos valores ótimos de T e C_{n_m} que retornaram o valor minimizado da taxa de custo;

Passo 11: apresentação do desempenho da política de manutenção $CT(T, C_{n_m})$.

O fluxograma, ilustrado na Figura 16, demonstra a sequência dos passos seguidos para simulação.

Figura 16 - Fluxograma do Algoritmo



Fonte: A autora (2022)

4.7 APLICAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO PROPOSTO

A aplicação numérica realizada para validar a política de manutenção proposta neste trabalho trata-se de uma aplicação realística, que considerou uma bomba centrífuga do tipo trifásica, que apresenta os dados de funcionamento, em termos tensão entre fases, fator de potência, fator de serviço e corrente elétrica nominal, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de funcionamento da motobomba centrífuga

V	FP	FS	C_n
220	0,85	1,15	13

Fonte: A autora (2022)

Utilizando a equação 1 obtêm-se uma C_m de 14,95. Através da equação 5, obtêm-se uma p_i equivalente a 4210,61. Considera-se nesta aplicação que a bomba funciona 24 horas por dia, ou seja, $h = 24$ e que o C_h é de 0,4 unidades monetárias. Para C_p considerou-se um valor de 900 unidades monetárias e para C_c um valor 4 vezes maior que equivale a 3600 unidades monetárias.

Para geração de sementes de x considerou-se o parâmetro de forma $\alpha = 0,5$ e o parâmetro de escala $\beta = 0,0035$ e para geração de sementes de w, considerou-se o parâmetro de escala $\eta = 273,487851$ e o parâmetro de forma $\beta_w = 4$. Através da utilização do algoritmo proposto e implementado no *python*, obteve-se deste exemplo numérico, os seguintes resultados:

Tabela 5 - Resultados obtidos do exemplo numérico

T	238
C_{n_m}	13,2695
$CT(T, C_{n_m})$	48,6525

Fonte: A autora (2022)

A aplicação numérica demonstrou que mediante o funcionamento de uma bomba centrifuga com os dados de entrada utilizados, mencionados anteriormente, tem-se um custo por unidade de tempo de 48,6525 unidades monetárias, em que uma substituição preventiva deverá ser efetuada em 238 dias ou em que uma ação preventiva deverá ser feita quando o valor de corrente elétrica equivalente a 13,2695 for atingido.

4.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma análise de sensibilidade foi realizada com a intenção de analisar a robustez do modelo proposto neste trabalho. Neste viés, os parâmetros de entrada foram variados em ± 10%, a fim de verificar alterações nos resultados encontrados por meio da aplicação do exemplo numérico frente às variações realizadas. A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados mediante a análise de sensibilidade.

Tabela 6 - Resultados da Análise de Sensibilidade

	Parâmetros do modelo							Política		
Casos	α	β	η	β_w	C_h	C_p	C_c	T	C_{n_m}	$CT(T, C_{n_m})$
1	0,5	0,0035	273,487851	4	0,4	900	3600	238	13,2695	48,6525
2	0,55	0,0035	273,487851	4	0,4	900	3600	304	13,2949	48,6784
3	0,45	0,0035	273,487851	4	0,4	900	3600	252	13,2370	48,6259
4	0,5	0,00385	273,487851	4	0,4	900	3600	308	13,2942	48,6933
5	0,5	0,00315	273,487851	4	0,4	900	3600	222	13,2492	48,5965
6	0,5	0,0035	300,836636	4	0,4	900	3600	280	13.2956	47.9620
7	0,5	0,0035	246,139065	4	0,4	900	3600	205	13,2395	49,5623
8	0,5	0,0035	273,487851	4,4	0,4	900	3600	229	13,2747	48,2788
9	0,5	0,0035	273,487851	3,6	0,4	900	3600	246	13,2568	48,9652
10	0,5	0,0035	273,487851	4	0,44	900	3600	220	13,2692	52,7406
11	0,5	0,0035	273,487851	4	0,36	900	3600	310	13,2713	44,5656
12	0,5	0,0035	273,487851	4	0,4	990	3600	247	13,2786	48,9654
13	0,5	0,0035	273,487851	4	0,4	810	3600	230	13,2580	48,0976
14	0,5	0,0035	273,487851	4	0,4	900	3960	225	13,2617	48,8829
15	0,5	0,0035	273,487851	4	0,4	900	3240	242	13,2767	48,3882

Fonte: A autora (2022)

Mediante a análise de sensibilidade realizada, tendo como base os dados anteriormente utilizados no exemplo numérico apresentado, é possível perceber que algumas modificações ocorreram ao variar os parâmetros de entrada do modelo proposto.

Entre as mais significativas, percebeu-se que quanto maior o parâmetro de forma da distribuição Gama, menor é o incremento de corrente elétrica, o que resulta em um valor de corrente elétrica para substituição preventiva (C_{n_m}) maior, ou seja, mais distante. Contudo, quanto maior o parâmetro de escala, maior é o incremento de corrente elétrica, o que resulta em um valor de corrente elétrica para substituição preventiva (C_{n_m}) menor, ou seja, mais próximo.

Outra análise pontual a ser considerada corresponde às variações no parâmetro de escala da distribuição *Weibull*. Quando o parâmetro de entrada da vida característica dessa distribuição aumenta, o momento próprio de substituição preventiva (T) também tenderá a aumentar, ou seja, a substituição será realizada com uma menor frequência, visto que o aumento do parâmetro de escala da distribuição faz com que a substituição preventiva atendida para o caso base seja tida como prematura.

No que tange ao custo, é importante entender, assim como foi possível verificar, a tendência existente no fato de que, quando o custo da ação de manutenção aumenta, seja ela, preventiva ou corretiva, a taxa de custo tende a aumentar. Se o custo da ação de manutenção diminui, o mesmo ocorre com a taxa. Contudo, um aumento no custo para ação preventiva C_p implica em um tempo ótimo para manutenção preventiva T mais distante, ou seja, em substituições menos frequentes. Se esse aumento ocorre no custo para ação corretiva C_c o T tende a ser mais próximo, e as substituições são realizadas com maior frequência.

Outro comportamento referente ao custo pôde também ser verificado. Percebeu-se que, quanto maior o custo do consumo de energia elétrica por hora, mais próximos será o tempo ótimo para manutenção preventiva T e o valor de corrente elétrica para substituição preventiva (C_{n_m}). Esse aumento também implica em uma taxa de custo maior.

Em termos gerenciais, os resultados obtidos demonstram algumas implicações. A aplicação numérica, por si só, apresenta não só o custo que será obtido por unidade de tempo, como também os momentos ótimos, seja para uma substituição preventiva ou para uma ação preventiva em prol da corrente elétrica. A revelação de tais consequências indica uma maneira efetiva para auxiliar no bom funcionamento e desempenho do sistema.

Consequentemente, torna-se possível alcançar qualidade, atender as necessidades da população com menores chances de descontentamento pela indisponibilidade da água, e ainda reduzir os custos operacionais envolvidos. A análise de sensibilidade, por sua vez, demonstrou certa robustez, no que tange principalmente aos valores ótimos de corrente elétrica para ação

de manutenção preventiva. Além disso, a mesma possibilitou verificar as respostas nos valores de *T* e de $CT(T, C_{n_m})$, advindas de alterações nos parâmetros de entradas, possíveis de serem realizadas para testes em caráter de entendimento do comportamento do funcionamento do sistema.

5 CONCLUSÕES

A política de manutenção, quando bem parametrizada, contribui para minimizar os custos operacionais das bombas centrífugas utilizadas para distribuição e abastecimento da água utilizada pela sociedade. Além disto, garante um nível de apropriado de confiabilidade, propiciando assim um serviço com maior segurança e qualidade. Desta forma percebe-se a importância da proposição desta política, tendo em vista os benefícios que poderão ser oferecidos para concessionárias de água e para a sociedade com um todo.

De forma mais pontual, é possível visualizar impactos positivos provenientes da construção e aplicação da política de manutenção com base na condição proposta para motobombas centrífugas de redes de distribuição de água. Visto que, decisões podem ser tomadas tendo como subsídio resultados ótimos alcançados por meio da simulação do sistema, em que características e suposições inerentes ao seu funcionamento podem ser consideradas.

Neste sentido, os resultados alcançados demonstram potencialidades em contribuir para otimização de toda operação necessária para que a água consiga chegar até a sociedade, garantir a disponibilidade do recurso, reduzir os custos operacionais envolvidos, e consequentemente, reduzir os impactos que levam a insustentabilidade do planeta.

Além disso, o custo do consumo de energia elétrica proveniente do uso de bombas centrífugas em redes de distribuição de água é um dos mais significativos. Logo, ao passo que um modelo de otimização é aplicado, torna-se possível reduzir os custos operacionais, o que inclui o custo atrelado à citada forma de energia utilizada mediante operação.

Dessa forma, a relevância da pesquisa se tornou ainda mais significativa, ao passo que a economia gerada poderá ser utilizada para que investimentos sejam realizados nessas redes em prol da qualidade de funcionamento do sistema. Assim, maiores benefícios poderão ser adquiridos, principalmente em termos de uma maior disponibilidade do recurso.

5.1 LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se que a política proposta seja adaptada tendo como parâmetros de monitoramento, outros fatores, tais como a vibração ou a temperatura, a fim de verificar se estes são também eficientes para parametrização de uma política voltada para manutenção de motobombas centrífugas. Além disso, sugere-se que sejam implementados outros algoritmos de otimização, mais efetivos na busca de soluções.

REFERÊNCIAS

ALASWAD, S.; XIANG, Y. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 157, p. 54-63, 2017.

BARD, H. M.; AHMERD, W. H. *Pumping Machinery Theory and Practice*. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

BASRI, E. I. et al. Preventive Maintenance (PM) planning: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 23, n. 2, p. 114-143, 2017.

BEN-DAYA, M.; KUMAR, U.; MURTHY, D. N. *P. Introduction to maintenance engineering: modeling, optimization, and management.* Chichester: Wiley, 2016.

BOTTANI, E. et al. An empirical study on the relationships between maintenance policies and approaches among Italian companies. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 20, n. 2, p. 135–162, 2014.

BUENFIL, M. Water Distribution System Operation. In: KEELEY, J.; LEHR, J. H., 3 ed. *Water Encyclopedia*, Wiley-Interscience: 2005. p. 1-9.

BULGARELLI, R. *Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais*. São Paulo, 2006. 149 f. Dissertação (Engenharia de energia e automação elétricas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CASSELA, C. *Mexico City Is Sinking at an Alarming And Largely Unstoppable Rate, New Data Find*s. Sciencealert, 2021. Disponível em: https://www.sciencealert.com/mexico-city-is-sinking-at-an-alarming-and-largely-unstoppable-rate-according-to-data. Acesso em: 30 jun. 2021.

DE ALMEIDA, A.T. et al. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. s.l., Springer, 2015.

DIÃO, K. et al. Clustering analysis of water distribution systems: identifying critical components and community impacts. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 11, p. 1764-1773, 2014.

DO, P. et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 133, p. 22-32, 2015.

GIRDHAR, P.; MONIZ, O. *Practical Centrifugal Pumps*. Oxford: Elsevier - Newnes, 2005.

GULICH, J. F. *Centrifugal pumps*. 2 ed. New York: Springer, 2010.

HARIHANA, P. P.; PARLOS, A. G. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals. In: *Centrifugal Pumps*. Croatia: InTech, 2012. cap 2, p.15-32.

JONES, G. M. et al. *Pumping Station Design*. 3 ed. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2006.

KICHE, J.; NGESA, O.; ORWA, G. On Generalized Gamma Distribution and Its Application to Survival Data. *International Journal of Statistics and Probability*, v. 7, n. 4, Jul. 2019.

KLEINER, Y.; ADAMS, B. J.; ROGERS, J. S. Water distribution network renewal planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 15, n. 1, p. 15-26, 2001.

KOBBACY, K. A. H.; MURTHY, D. N. P. Complex system maintenance handbook. Springer: London, 2008. cap 2, p. 21-48.

KOONS-STAPF, A. Condition Based Maintenance: Theory, Methodology, & Application. In: Conference: Reliability and Maintainability Symposium, 1, Flórida, 2015. *Anais...* Flórida: Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos, 2015.

KURITZA, J. C et al. Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: development and case study. *Brazilian Journal of Water Resources*, Porto Alegre, v. 22, n. 45, fev. 2017.

LAMBERT, A.; HIRNER, W. *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures.* International Water Association: London, UK, 2000.

MAYS, L. *Water Distribution Systems Handbook.* Arizona: McGraw-Hill, 2000.

MAYS, L. *Water Transmission and Distribution: Principles and Practices of Water Supply Operations*. 4 ed. American Water Works Association: United States of America, 2010.

MEHMET, Xh.; MEHMET, B.; SEJDIU, Rr. The equipment maintenance management in manufacturing enterprises. *IFAC PapersOnLine*, v. 51, n. 30, p. 800–802, 2018.

MELO, V. S. *Modelos envolvendo duas distribuições Weibull inversa e apresentação da Weibull inversa generalizada*. Dissertação (Mestrado em matemática) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MISHRA, R. C.; PATHAK, K. *Maintenance Engineering and Management*. 2. ed. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012.

MOBLEY, R. K. *An Introduction to predictive maintenance*. 2. ed. Butterworth-Heinemann: Woburn, 2002.

MÓLLER, D. S. et al. Optimal pump selection for variable speed operation in water distribution network. *Brazilian Journal of Water Resources*, Porto Alegre, v. 25, p. 1-10, Oct. 2020.

MOUBRAY, J. *Reliability-Centred Maintenance*. Butterworth-Heinemann: Woburn, 1999.

MULLER, A.; MARQUEZ, A. C.; IUNG, B. On the concept of e-maintenance: Review and current research. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 93 p. 1165–1187, 2008.

NGANCHA, P. B.; KUSAKANA, K.; MARKUS, E. D. Energy savings configuration for a water-pumping system. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, v. 9, n. 4, Jul. 2020.

PEDROSA, H. T. S. *Otimização em estação elevatória de sistemas de abastecimento de água buscando a eficiência energética*. Recife, 2015. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

PEREIRA, L. L. S. *Análise de motobombas submersas com diferentes acionamentos elétricos a partir da roda de falhas*. Natal, 2016. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PINTELON, L.; PARODI-HERZ, A. Maintenance: an evolutionary perspective. In:

PRAJAPATI, A.; BECHTEL, J.; GANESAN, S. Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 18, n. 4, p. 384-400, 2012.

RISHEL, J. B. *Water pumps and pumping systems*. [S.l.]. McGraw-Hil, 2002.

SEIXAS, F. J. M.; FERNANDES, R. C. *Máquinas elétricas II*. São Paulo: Unesp, 2016.

SHIN, J. H.; JUN, H. B. On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, v. 2, p. 119-127, Jan. 2015.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto.* 2019. Disponível em: http://www.snis.gov.br/diagnosticos. Acesso em: 30 jun. 2021.

TRIFUNOVIC, N. *Introduction to Urban Water Distribution*. 2 ed. CRC Press: Boca Raton, 2020.

TRIGUEIRO, A. *Quase 90% dos poços artesianos do Brasil são clandestinos, aponta estudo*. Mundo Sustentável, 2019. Disponível em: https://mundosustentavel.com.br/quase-90-dos-pocos-artesianos-do-brasil-sao-clandestinos-aponta-estudo/. Acesso em: 30 jun. 2019.

TROJAN, F.; MARÇAL, R. F. M. Proposal of Maintenance-types Classification to Clarify Maintenance Concepts in Production and Operations Management. *Journal of Business and Economics*, v. 8, n. 7, p. 560-572, 2017.

TROJAN, F.; MORAIS, D. C. Using electre tri to support maintenance of water distribution networks. *Pesquisa Operacional*, v. 32, n.2, p.423-442, 2012.

VILANOVA, M. R. N.; MAGALHÃES FILHO, P.; BALESTIERI, J. A. P. Performance measurement and indicators for water supply management. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 2015. v. 43, p. 1-12.

WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, v. 139, n. 3, p. 469-489, 2002.

WINNETT, P. *Optimizing Pumping Systems in Drinking Water Distribution*. WaterWord, 2020. Disponível em: https://www.waterworld.com/international/utilities/article/14181574/optimizing-pumping-systems-in-drinking-water-distribution. Acesso em: 30 jun. 2021.

ZHOU, Y. *Deterioration and Optimal Rehabilitation Modelling for Urban Water Distribution System*s. CRC Press/Balkema: EH Leiden, The Netherlands, 2018.

ZYL, J. V. *Introduction to Operation and Maintenance of Water Distribution Systems*. 1 ed. Water Research Commission: Gezina, 2014.