



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ LUIZ GOMES MOZ

**DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS E INTERVALOS ENTRE
MANUTENÇÕES PROGRAMADAS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO COM AUXÍLIO DE MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Recife

2018

ANDRÉ LUIZ GOMES MOZ

**DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS E INTERVALOS ENTRE
MANUTENÇÕES PROGRAMADAS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO COM AUXÍLIO DE MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Área de concentração: Planejamento da Manutenção

Orientador(a): Prof^a. Dr. Dayse Duarte

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M939d Moz, André Luiz Gomes.
Definição de equipamentos críticos e intervalos entre manutenções programadas em uma estação de tratamento de esgoto com auxílio de métodos de decisão multicritério / André Luiz Gomes Moz. – 2018.
61 folhas, il., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Dayse Cavalcanti Lemos Duarte.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Estações de tratamento de esgoto. 3. Equipamento crítico. 4. Intervalo ótimo entre manutenções. 5. *AHP*. 6. *PROMETHEE*. I. Duarte, Dayse Cavalcanti Lemos. (Orientadora). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-457



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2**

Aos seis dias do mês dezembro do ano de dois mil e dezoito, às 10:30, no bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS E INTERVALOS ENTRE MANUTENÇÕES PROGRAMADAS EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM AUXÍLIO DE MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**, elaborado pelo aluno **André Luiz Gomes Moz**, matrícula 105.527.574-62, composta pelos professores, **Dayse Cavalcanti Lemos Duarte** (Orientador), **João Paulo Cerquinho Cajueiro** (examinador 1) e **Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveria** (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi argüido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela aprovação do candidato, atribuindo-lhe à monografia a média (), julgando-o apto à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof(a). **Dayse Cavalcanti Lemos Duarte** - Nota: _____
DEMEC/UFPE

Assinatura: _____

Examinador 1: Prof(a). **João Paulo Cerquinho Cajueiro** - Nota: _____
DEMEC/UFPE

Assinatura: _____

Examinador 2: Prof(a). **Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira** - Nota: _____
DECIV/UFPE

Assinatura: _____

Recife, 06 de Dezembro de 2018

José Maria A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso - TCC2

RESUMO

O acirrado ambiente de disputa por espaço no mercado mundial que se encontram as grandes empresas e indústrias nos dias de hoje, tem reforçado a necessidade de se estabelecer diretrizes e estratégias de gestão que vão além de conhecimentos técnicos apenas. Manter um processo de produção com sua máxima eficiência, reduzir custos desnecessários e garantir a segurança dos equipamentos e operadores, são desafios que requerem tomadas de decisão assertivas, reduzindo a chance de algo vir a falhar e comprometer todo o sistema. No setor ambiental e de saneamento, as Estações de Tratamento de Esgoto – ETE's detêm uma enorme quantidade de equipamentos que, na obrigação de atender as legislações ambientais aplicáveis, devem operar corretamente e com o mínimo de interrupções possíveis. Para isso, é necessário estabelecer planos sistemáticos de manutenção capazes de antecipar a ocorrência da falha, através de substituições dos componentes que sofreram desgaste no equipamento. Além disso, ações direcionadas obedecendo níveis de criticidade do sistema tendem a garantir maior eficiência produtiva, além de economizar o tempo gasto em atividades de menor impacto imediato. Neste contexto, o trabalho foi desenvolvido, propondo uma metodologia para a seleção do equipamento crítico em uma ETE, além da determinação do intervalo ótimo entre manutenções, com base nos métodos de decisão multicritério de auxílio a decisão *Análise Hierárquica do Processo - AHP* e *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations - PROMETHEE*. Dessa forma, pôde-se concluir que os redutores são os equipamentos com maior criticidade na estação de tratamento, e o intervalo ótimo entre manutenções programadas obtido foi de 1110 horas ou aproximadamente 1 mês e meio.

Palavras-Chave: Estações de tratamento de esgoto. Equipamento crítico. Intervalo ótimo entre manutenções. *AHP*. *PROMETHEE*.

ABSTRACT

The fierce environment of space dispute in the world market that are the big companies and industries today, has reinforced the need to establish guidelines and management strategies that go beyond technical knowledge only. Maintaining a production process with its maximum efficiency, reducing unnecessary costs and ensuring the safety of equipment and operators are challenges that require assertive decision making, reducing the chance of something failing and compromising the entire system. In the environmental and sanitation sector, Effluent Treatment Stations - ETE's holds an enormous amount of equipment that, in complying with applicable environmental laws, must operate correctly and with the minimum of possible interruptions. For this, it is necessary to establish systematic maintenance plans capable of anticipating the occurrence of the failure, through replacements of the components that have suffered wear on the equipment. In addition, directed actions, obeying criticality levels of the system, tend to guarantee greater productive efficiency, besides saving the time spent in activities of less immediate impact. In this context, the work developed here proposes a study for the selection of critical equipment in a ETE, in addition to determining the optimal interval between maintenance, based on multicriteria decision support methods *Hierarchical Process Analysis - HPA* and *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations - PROMETHEE*. Thus, it was concluded that the gear units are the most critical equipment in the treatment plant, and the optimal interval between scheduled maintenance was 1110 hours or approximately 1.5 months.

Keywords: Effluent treatment stations. Critical equipment. Optimum interval between maintenances. *HPA. PROMETHEE*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Níveis hierárquicos do método AHP	18
Figura 2 –	Fluxograma representativo da metodologia utilizada	30
Figura 3 –	Etapas do processo de tratamento de esgoto doméstico.....	34
Figura 4 –	Fluxograma do processo de tratamento do esgoto em ETE's.....	36
Figura 5 –	Vista de cima de uma ETE com tratamento por filtro biológico e decantador secundário	36
Figura 6 –	Gradeamento Mecanizado	37
Figura 7 –	Gradeamento Manual	38
Figura 8 –	Esquema de um desarenador	38
Figura 9 –	Ilustração esquemática de um decantador primário circular e retangular com fluxo horizontal	39
Figura 10 –	Foto retirada de um Filtro Biológico	40
Figura 11 –	Ilustração de funcionamento de um filtro biológico	40
Figura 12 –	Foto retirada de um decantador secundário	41
Figura 13 –	Parâmetros inseridos através do software Visual PROMETHEE	53
Figura 14 –	Input dos valores obtidos com as alternativas em relação aos critérios	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Principais métodos multicritério utilizados e referências associadas.....	19
Tabela 2 –	Escala Fundamental de Saaty para o método AHP.....	21
Tabela 3 –	Exemplo da Matriz de Julgamento no método AHP.....	21
Tabela 4 –	Matriz de comparação dos critérios.....	43
Tabela 5 –	Matriz de comparação normalizada	44
Tabela 6 –	Pesos normalizados dos critérios.....	44
Tabela 7 –	Comparação das alternativas para o critério de Segurança.....	45
Tabela 8 –	Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Segurança.....	45
Tabela 9 –	Comparação das alternativas para o critério de Interrupção ao Processo.....	46
		
Tabela 10 –	Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Interrupção ao Processo.....	46
Tabela 11 –	Comparação das alternativas para o critério de Custo com Manutenção.....	46
Tabela 12 –	Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Custo com Manutenção.....	47
Tabela 13 –	Comparação das alternativas para o critério de Tempo de Indisponibilidade.....	47
Tabela 14 –	Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Tempo de Indisponibilidade.....	47
Tabela 15 –	Comparação das alternativas para o critério de Condições de Operação.....	48
Tabela 16 –	Amostras de tempo entre falhas para o equipamento crítico selecionado.....	50
Tabela 17 –	Parâmetros de Weibull obtidos com a regressão linear.....	51
Tabela 18 –	Comportamento da probabilidade de falha e confiabilidade com o tempo.....	51
Tabela 19 –	Custos unitários de manutenção corretiva e preventiva.....	53
Tabela 20 –	Valores do custo em função do intervalo entre manutenções.....	53
Tabela 21 –	Parâmetros do método PROMETHEE II.....	54
Tabela 22 –	Resultado final para os fluxos de entrada, saída e líquido das alternativas.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Curva das funções de probabilidade de falha $F(t)$ e confiabilidade $R(t)$	52
Gráfico 2 –	Curva representativa do custo $C_m(t)$ em função do tempo.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.4	OBJETIVO GERAL.....	13
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO.....	14
2.2	HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO.....	14
2.3	POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO.....	16
2.4	MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE AUXÍLIO À DECISÃO.....	17
2.4.1	AHP (Análise Hierárquica do Processo)	20
2.4.2	PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)	24
2.5	CONFIABILIDADE.....	28
2.6	CUSTO COM MANUTENÇÃO.....	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO CRÍTICO – AHP.....	32
3.2	CONSIDERAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO INTERVALO ENTRE MANUTENÇÕES – PROMETHEE.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	O PROCESSO DE TRATAMENTO.....	36
4.2	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE's.....	37
4.3	TRATAMENTO PRELIMINAR.....	39
4.4	TRATAMENTO PRIMÁRIO.....	41
4.5	TRATAMENTO SECUNDÁRIO.....	41
4.6	SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO CRÍTICO – AHP.....	43
4.7	DEFINIÇÃO DO INTERVALO ÓTIMO ENTRE MANUTENÇÕES – PROMETHEE.....	50
5	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O sistema de esgotamento sanitário é fundamental para fornecer a garantia mínima de saúde pública à população. Prover recursos suficientes para que o processo de tratamento dos efluentes seja eficaz, é primordial. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), saneamento é o gerenciamento ou controle dos aspectos físicos que podem ocasionar danos à saúde humana, prejudicando seu corpo, sua mente e sua vida social. Outra definição ainda para saneamento, é a descrita pela Lei do Saneamento Básico ¹, que o define como “*conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais.*” Dentre esses fatores, encontram-se aqueles destinados ao tratamento de efluentes domésticos, caracterizados pelos dejetos provenientes das residências, edifícios comerciais, indústrias ou qualquer edificação que possua, em suas instalações, banheiros e/ou cozinhas, dispostos em fossas ou tanques de acúmulo. O efluente não tratado, é capaz de ocasionar doenças graves à população como dengue, febre tifoide, diarreias, hepatite, entre outras. Tendo em vista o caráter nocivo do efluente doméstico, faz-se necessário seu tratamento através das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), responsáveis por receber, tratar e devolver o efluente afim de que se evite os riscos associados a saúde humana. Para tal, é de extrema importância que o processo se mantenha de forma ininterrupta, com seus equipamentos funcionando corretamente, garantindo o fluxo contínuo no processo de tratamento.

Entretanto, todo e qualquer equipamento eletromecânico está sujeito a degradação ao longo do tempo. Condições de operação severas, oxidação, trincas, desgaste, fadigas, são alguns dos mecanismos de falha mais comuns que farão com que o equipamento se deteriore e venha a falhar ao longo do seu ciclo de vida. Uma problemática vivenciada atualmente, no que diz respeito a produtividade desses equipamentos, está vinculada a uma análise precária e um mau planejamento e controle do sistema de manutenção. De acordo com o British Standard BS EN 13306-2017, manutenção é o conjunto de ações técnicas, administrativas e gerenciais ao longo da vida útil de um equipamento, que tem por objetivo manter e restaurar o mesmo afim de que desempenhe sua função corretamente. Equipamento ou processo parado é sinônimo de risco e altos custos, que

¹ BRASIL. Lei Ordinária nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm. Acesso em: 04/06/2018.

envolvem desde o elevado investimento na substituição do equipamento, até a parada do processo produtivo, traduzida em custo por perda de produção. Uma visão ultrapassada, mas ainda bastante utilizada pelas empresas, é a de que o setor de manutenção exerce função meramente corretiva e suas ações visam somente situações emergenciais, ou seja, o equipamento opera sem intervenções até que se configure a falha, necessitando assim de uma ação corretiva. Segundo Bevilacqua e Braglia (2000), este tipo de intervenção já não é aceitável nos dias atuais, devido a determinados elementos críticos como a qualidade do produto, o elevado custo de manutenção, que pode representar de 15 a 70% dos custos totais de produção, e principalmente a segurança dos operadores, das máquinas e equipamentos adjacentes e ainda do meio ambiente.

Dessa forma, visando uma eficiência cada vez maior na operação e produtividade dos equipamentos, a manutenção tem sido objeto de estudo constante, propondo ao longo do tempo soluções para a otimização do seu controle e planejamento. O avanço da tecnologia e dos estudos, proporcionaram um controle minucioso na operação de máquinas e equipamentos, caracterizado pelo acompanhamento contínuo e de forma antecipada das suas características, aspectos físicos e operacionais. Através de ensaios de inspeção dos mais simples como os de líquido penetrante e partícula magnética, aos mais complexos como ensaios de ultrassom, radiografia e emissão acústica, é possível detectar uma falha antes mesmo que ela se manifeste ou propague no material. Contudo, toda e qualquer ação de manutenção, passa pela decisão de um gestor, que se torna responsável por planejar, viabilizar e acompanhar as atividades. Qualquer atitude ou decisão precipitada sem fundamentação, encadeiam uma série de erros e falhas sucessivas que, por consequência, se traduzem em custos elevados desnecessários.

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia sistemática de apoio à decisão através de análises multicritério. Tendo em vista a diversidade dos critérios de julgamento e suas importâncias, faz-se necessário a utilização de uma metodologia adequada para auxiliar o gestor a direcionar suas atividades e gerir seu processo de manutenção da forma mais eficiente. Para o trabalho aqui exposto, será utilizada a ferramenta *Análise Hierárquica do Processo – AHP* para selecionar o equipamento crítico em uma determinada estação de tratamento de esgoto e, definido o equipamento, o intervalo ideal entre manutenções programadas será obtido com o auxílio da ferramenta de decisão *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations – PROMETHEE*.

1.1 JUSTIFICATIVA

Custos desnecessários com manutenção, perda de produção e acidentes envolvendo máquinas e equipamentos, são problemas enfrentados por qualquer empresa que não assuma de forma integral e minuciosa seu controle com os processos de manutenção. Definir o intervalo ótimo entre manutenções sistemáticas em um equipamento requer conhecimento mais detalhado acerca de diversos fatores que variam no tempo, como: a condição do equipamento, a consequência da falha e os custos de manutenção e/ou reposição associados. Além disso, é necessário ainda solucionar o conflito existente entre fornecedor e empresa. Enquanto o primeiro, na intenção de lucrar com um maior fluxo de venda para reposição, estabelece intervalos mais curtos no manual do equipamento, a empresa deve estabelecer intervalos que maximizem a vida útil do equipamento, realizando assim uma manutenção baseada na condição e não somente num tempo preestabelecido.

Apesar dessa necessidade de se definir uma estratégia de planejamento de manutenções sistemáticas de forma a garantir uma maior confiabilidade ao processo, muitas empresas, de forma imatura, ainda se limitam a utilizar exclusivamente os intervalos previamente definidos pelos fornecedores nos manuais dos equipamentos. De fato, há um fluxo muito grande de informações que devem ser processadas pelos gestores que, apesar de capacitados, são seres humanos limitados para tal.

Dessa forma, estabelecer uma ferramenta matemática de auxílio à decisão é essencial para que todo e qualquer gestor seja capaz de manter um controle rigoroso a respeito de seu planejamento e controle da manutenção, diminuindo custos, prevenindo acidentes e eliminando os riscos associados.

1.2 OBJETIVO GERAL

- Estabelecer diretrizes para determinação do tempo ótimo entre manutenções, baseado na confiabilidade do equipamento e no custo de manutenção associado, tendo como objeto de estudo o equipamento crítico de uma Estação de Tratamento de Esgoto – ETE.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir os critérios de avaliação do método AHP e PROMETHEE;
- Estudar o comportamento dos critérios do método PROMETHEE em função dos intervalos entre manutenções;
- Identificar o equipamento crítico na estação de tratamento de esgoto, utilizando o método AHP;
- Obter o intervalo ideal entre manutenções programadas utilizando o método de decisão multicritério PROMETHEE.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO

O tratamento do efluente e todo o processo da estação, depende principalmente do bom funcionamento de seus equipamentos. Para que haja um fluxo contínuo de efluente tratado com qualidade e atendendo aos requisitos e normas estabelecidos, é de extrema necessidade e importância que todos os equipamentos (sejam elétricos, mecânicos ou eletromecânicos) estejam funcionando da forma correta e, se possível, com a máxima eficiência de produção.

No entanto, sabe-se que todo equipamento está sujeito a degradação por fatores físicos, químicos ou biológicos durante seu ciclo de vida útil. Por sorte, muitos desses processos de degradação podem ser detectados, corrigidos, retardados ou até mesmo evitados quando se estabelece a estratégia de manutenção mais adequada para tal. Segundo Kardec e Ribeiro (2002), o objetivo principal da manutenção é garantir a disponibilidade e o desempenho correto das funções dos equipamentos e instalações de modo a garantir confiabilidade, segurança, preservação ao meio ambiente e custos adequados ao processo produtivo de qualquer empresa.

2.2 HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

A manutenção surgiu na indústria mecânica no fim do século XIX, e até 1914 não havia departamentos específicos nas empresas determinados ao planejamento e controle da manutenção dos equipamentos. Iniciando de forma bastante rudimentar, a manutenção cumpria o simples papel da ação corretiva, onde o próprio operador atuava assim que a falha no equipamento se manifestasse. Dessa forma, a evolução do histórico da manutenção pode ser entendida com base nas classes de gerações abaixo:

- I. Primeira Geração: período que antecede a 2ª Guerra Mundial, onde as empresas possuíam equipamentos simples e superdimensionados. Nesta época, a produtividade não era prioridade e, por isso, não se fazia necessário um plano sistemático das atividades de manutenção, sendo necessário apenas serviços de lubrificação, limpeza e reparos após o manifesto da falha ou quebra, o que configura essa geração como a da manutenção fundamentalmente *corretiva*.

- II. Segunda Geração: período que compreende a 2ª Guerra Mundial até meados dos anos 60, foi marcado pelo forte aumento da mecanização dos processos produtivos, visto que a demanda pelos produtos aumentou significativamente, em paralelo a diminuição da mão de obra industrial. Com isso, evidenciou-se a necessidade da busca por uma maior confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, objetivando uma produção cada vez mais qualificada e ininterrupta. Com esse pensamento, surgiram as ideias de que as falhas recorrentes, deveriam ser evitadas, e não apenas corrigidas após já manifestadas. Dessa forma, deu-se início a aplicação da *manutenção preventiva*.
- III. Terceira Geração: geração que se iniciou no final dos anos 70 e foi marcada pelo avanço tecnológico nos setores industriais. A aplicação de métodos computacionais e a sofisticação de instrumentos para medição e controle das características de funcionamento dos equipamentos deu início ao que hoje conhecemos como *manutenção preditiva* (OTANI & MACHADO, 2008). Com isso, as empresas passaram a utilizar a tecnologia disponível para acompanhar continuamente variáveis como vibração, ruído, deformação, desgaste, temperatura, entre outros capazes de identificar uma falha iminente no equipamento, a fim de mitigar um possível dano o quanto antes.
- IV. Quarta Geração: geração essa que compreende os dias atuais, onde vivemos em um cenário de competitividade global intenso, com uma reestruturação do conceito de manutenção, visando um processo cada vez mais controlado e previsível, onde a manutenção passa a ser interesse não só mais do seu próprio departamento e sim da empresa como um todo. O aumento na manutenção preditiva e diminuição nas manutenções preventivas e corretivas não planejadas, aplicação de análise de falhas e riscos, utilização de técnicas de confiabilidade e uma política baseada nos resultados, são características marcantes dessa nova geração que prevê uma eficácia cada vez maior dos ativos da empresa, sempre buscando minimizar as falhas e aumentar seus ganhos e lucros através dos resultados.

2.3 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

É possível encontrar em bibliografias, diversas denominações e divisões das políticas de manutenção por atores diferentes. Segundo Juliato e Lima (2004), definir a política de manutenção a ser adotada e os graus de criticidade de cada máquina ou equipamento, deve ser uma tarefa conjunta entre a equipe de manutenção e produção. Gerir e acompanhar o funcionamento dos equipamentos é uma responsabilidade que deve ser assumida pela estrutura organizacional como um todo, visto que esses são os ativos que fornecem toda a capacidade de produção da empresa. Bevilacqua & Braglia (2000) definem cinco diferentes políticas de manutenção:

- I. Manutenção Corretiva: caracterizada pela ação de reparo somente quando há o manifesto evidente da falha. Não havendo qualquer tipo de intervenção no equipamento antes dessa falha ocorrer. Considerada a mais antiga e conservadora política de manutenção, compreende um conjunto de ações reativas, e não planejadas. Branco Filho (2008) cita ainda duas subdivisões da manutenção corretiva: a Manutenção Corretiva Programada, onde a ação corretiva é realizada na data posterior ao evento da falha, e a Manutenção Corretiva de Emergência, onde a ação de correção não pode ser adiada, e a falha deve ser imediatamente reparada.
- II. Manutenção Preventiva: caracterizada por prever um plano sistemático de intervenções no equipamento, com base em critérios de confiabilidade do mesmo. Baseado na taxa de falhas do equipamento, a política preventiva de manutenção busca determinar uma série de verificações, substituições e/ou revisões de componentes do equipamento com uma certa frequência, determinada no plano sistemática fornecido pelo engenheiro ou gestor de manutenção encarregado (BEVILACQUA & BRAGLIA, 2000).
- III. Manutenção Oportunista: política essa pouco discutida e verificada nas bibliografias, tem por objetivo otimizar o tempo de disponibilidade dos equipamentos aproveitando o tempo em que este estaria parado para receber algum tipo de reparo (ação corretiva), para realizar a manutenção preventiva já programada para um determinado componente daquele equipamento. Com isso, a manutenção oportunista, como o próprio nome já diz, busca a oportunidade certa de realizar duas ações de manutenção (corretiva e preventiva) em uma mesma parada para intervenção no equipamento, reduzindo seu tempo indisponível e aumentando a eficiência do processo de produção.

- IV. Manutenção Baseada na Condição: manutenção baseada na condição visa a utilização de sistemas de aquisição de dados e medição de parâmetros para monitoramento contínuo do desempenho de um determinado equipamento. Os dados obtidos podem ser visualizados em tempo real pelo administrador do processo que será capaz de identificar uma situação de anomalia e, se necessário, realizar controles pontuais ou até mesmo parar a máquina para um possível reparo antes que a falha ocorra.
- V. Manutenção Preditiva: Considerada uma versão mais analítica da manutenção baseada na condição, a manutenção preditiva utiliza os dados coletados em tempo real para analisar uma possível tendência temporal da falha. Se, por acaso, um diagnóstico dos parâmetros de controle indicar um desvio nas características de funcionamento ideais do equipamento, a tendência evolutiva desse desvio ou defeito será analisada para posteriormente realizar a programação da parada da máquina.

2.4 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE AUXÍLIO À DECISÃO

Nas atividades do dia a dia, nos deparamos com diversas situações em que se faz necessário a tomada de decisão, como por exemplo no supermercado quando precisamos comprar determinado produto mas devemos escolher uma, entre várias opções, que diferem com relação a uma série de critérios como preço, qualidade, estética, durabilidade, entre outros. No universo das organizações e nas atividades de gestão, o mesmo pode ser evidenciado. Por diversas vezes os gestores se deparam com situações em que precisam avaliar a alternativa mais adequada dentro de um cenário que considera várias opções, na maioria das vezes conflitantes entre si, e que não se expressam na mesma unidade ou não possuem o mesmo comportamento (ORREGO RODRIGUEZ, 2006).

Foi no intuito de resolver essa problemática que, na década de 70, surgiram as primeiras ferramentas de *Auxílio Multicritério à Decisão (AMD)*, utilizadas na época para auxiliar o decisor a estabelecer uma estrutura de preferências das alternativas disponíveis, relacionando cada alternativa com a consequência de sua escolha (ALMEIDA, 2013). Segundo Santos (2015), decisões mal tomadas pelos gestores responsáveis podem causar problemas irreparáveis para a organização e, em alguns casos, acabar com a sua própria carreira.

Dessa forma, os métodos de auxílio multicritério à decisão, são uma ferramenta de extrema utilidade e facilitação para qualquer pessoa que, em algum momento de suas atividades, precise se deparar com situações de escolha. Além do auxílio ao decisor, essas ferramentas podem, em maiores escalas, evitar a ocorrência de acidentes com alto nível de risco, aumentar a eficiência de produção e vida útil dos equipamentos e minimizar custos desnecessários, bastando o decisor entender os critérios, como eles se relacionam, e saber aplicar a teoria por trás dos métodos no seu ambiente de trabalho. Diante disso, faz-se necessário a escolha do método que melhor se aplica a situação de cada decisor e, para tal, devem ser considerados alguns aspectos importantes como: o tipo de problemática a ser solucionada; as informações e dados disponíveis; as estruturas de preferência do decisor; o contexto envolvendo o processo de decisão, entre outros (GOMES et al., 2002). De acordo com Vincke (1992), Roy (1996) e Pardalos *et al.*, (1995), os métodos podem ser classificados em:

- *Métodos de critério único de síntese*: métodos pertencentes a Escola Americana de AMD, que tem por objetivo elaborar uma única função valor de utilidade que relacione todos os critérios/objetivos comparados. Aqui, destaca-se o método AHP (*Análise Hierárquica do Processo*), caracterizado por utilizar uma metodologia compensatória entre os critérios.
- *Métodos de sobreclassificação*: representados pela Escola Francesa de AMD, são métodos que realizam comparação par a par entre as alternativas, atribuindo pesos a cada um dos critérios avaliados. Diferente dos métodos de critério único de síntese, esses são de caráter não compensatório. Dentre os métodos utilizados por essa escola, destacam-se os da Família ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) e os da Família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*).
- *Métodos interativos*: como o próprio nome já sugere, os métodos atribuídos a essa categoria se caracterizam por propor uma interação constante entre o decisor e as consequências advindas das soluções propostas por ele. Em tempo real, o decisor é capaz de avaliar se a solução proposta lhe satisfaz, e caso contrário, prosseguir com uma nova solução. São métodos muito aplicados em problemas envolvendo a programação matemática, sendo estes de natureza contínua ou discreta. Dentro desta categoria, destaca-se o método de PLMO (*Programação Linear Multiobjetivo*).

Na tabela 1 a seguir destacam-se os principais métodos utilizados, associados a algumas referências em que foram aplicados ou estudados.

Tabela 1 - Principais métodos multicritério utilizados e referências associadas

Método	Classificação	Referências Seminais
Electre	Método de superação	ELECTRE I (ROY, 1968); ELECTRE II (ROY; BERTIER, 1971); ELECTRE III (ROY; HUGONNARD); ELECTRE IV (ROY; HUGONNARD, 1981); ELECTRE IS (ROY; SKALKA, 1985); ELECTRE TRI (YU, 1992; MOUSSEAU; SLOWINSKI; ZIELNIEWICZ, 2000)
Promethee	Método de superação	Bran, Mareschal e Vicke (1984) e Brans, Vicke e Mareschal (1986)
Regime	Método de superação	Hinloopen, Nijkamp e Rietveld (1983)
Multiattribute Utility Theory (MAUT)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Fishburn (1970) e Keeney Raiffa (1983)
Simple Multi Atributte Rating Technique (SMART)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Edwards (1977)
Analytic Hierarchy Process (AHP)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Saaty (1977) e Saaty (1980)
Analytic Network Processes (ANP)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Saaty (1996)
Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)	Teoria da Utilidade Multiatributo	Bana, Costa e Vansnick (1994)

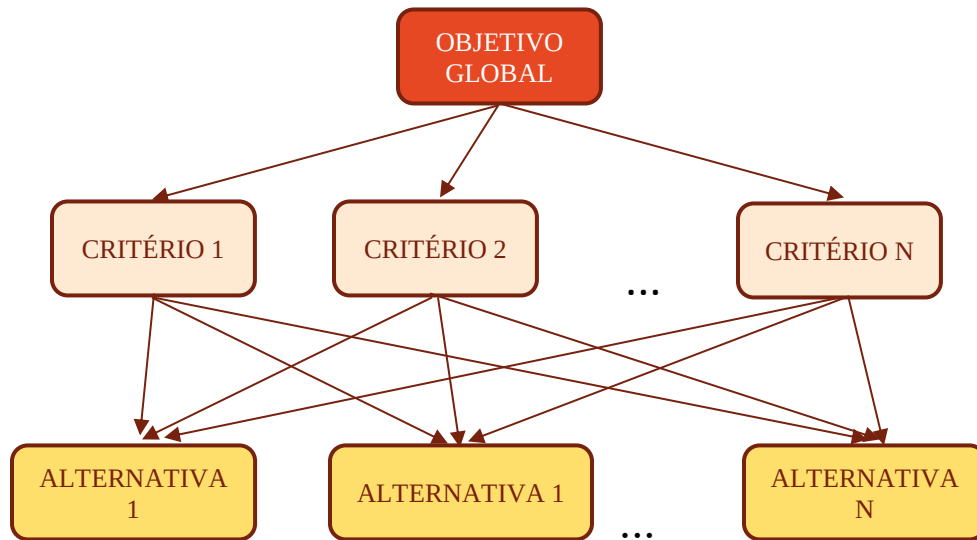
Fonte: (RODRIGUEZ et al., 2013)

Neste trabalho, serão abordados especificamente os métodos AHP e PROMETHEE. Para isso, faz-se necessário abordar separadamente cada método, explicitando o procedimento de cálculo utilizado em cada um, bem como os objetivos esperados com a aplicação na problemática sugerida para esse estudo.

2.4.1 AHP (Análise Hierárquica do Processo)

Criado por *Saaty* na década de 70, o método *AHP* é uma ferramenta de auxílio ao decisor que tem como principal característica o tratamento quantitativo e qualitativo simultâneo de critérios de escolha, na maioria das vezes conflitantes entre si, para auxílio na escolha da alternativa ideal com base em índices de preferência atribuídos a cada alternativa em comparação com as outras. Segundo Meireles e Sanches (2009), o método se baseia na construção de níveis hierárquicos que facilitam a compreensão do decisor com relação a ponderação de importância de cada alternativa em relação a cada critério estabelecido, como pode ser visto na figura 1.

Figura 1 - Níveis hierárquicos do método AHP



Fonte: O autor (2018)

Esse método tem sido utilizado com frequência em aplicações onde se faz necessário definir prioridades, ou tomar decisões estratégicas quando se tem uma série de alternativas com impactos ou consequências diferentes em relação aos critérios estabelecidos. Para estruturar o problema através do método AHP, o decisor precisa estabelecer inicialmente um objetivo global (SHIMIZU, 2000) e, com isso, avaliar a alternativa que satisfaça da melhor maneira o conjunto de critérios estabelecidos para se alcançar esse objetivo. Os pesos aqui não são atribuídos de forma direta, mas sim através de uma matriz de julgamento ou comparação que obedece à *Escala Fundamental de Saaty* (SAATY, 1990), visualizada na tabela 2.

Tabela 2 - Escala Fundamental de Saaty para o método AHP

1	IGUAL IMPORTÂNCIA	AS DUAS ALTERNATIVAS CONTRIBUEM IGUALMENTE PARA O OBJETIVO
3	IMPORTÂNCIA PEQUENA DE UMA SOBRA OUTRA	A EXPERIÊNCIA E O JULGAMENTO FAVORECEM LEVEMENTE UMA ALTERNATIVA EM RELAÇÃO À OUTRA
5	IMPORTÂNCIA GRANDE OU ESSENCIAL	A EXPERIÊNCIA E O JULGAMENTO FAVORECEM FORTEMENTE UMA ALTERNATIVA EM RELAÇÃO À OUTRA
7	IMPORTÂNCIA MUITO GRANDE OU DEMONSTRADA	UMA ALTERNATIVA É FORTEMENTE FAVORECIDA EM RELAÇÃO À OUTRA, E PODE SER DEMONSTRADO NA PRÁTICA
9	IMPORTÂNCIA ABSOLUTA	UMA ALTERNATIVA É FAVORECIDA EM RELAÇÃO À OUTRA, COM O MAIS ALTO GRAU DE CERTEZA
2, 4, 6 e 8	VALORES INTERMEDIÁRIOS	QUANDO SE PROCURA CONDIÇÕES DE COMPROMISSO ENTRE DUAS DEFINIÇÕES.

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

A escala fundamental é utilizada para realizar as comparações par a par entre as alternativas e definir o índice que melhor explica a relação entre elas. De forma a facilitar a visualização das comparações feitas e os resultados obtidos com elas, utiliza-se uma matriz de julgamento como a da tabela 3 abaixo:

Tabela 3 - Exemplo da Matriz de Julgamento no método AHP

CRITÉRIO “K”	A	B	C	D
A	1	4	0,2	4
B	0,25	1	3	5
C	5	0,33	1	5
D	0,25	0,2	0,2	1

Fonte: O autor (2018)

os índices representados pelas células da cor branca foram inseridos indicando a razão de comparação entre os critérios da coluna amarela com os da linha amarela. Por exemplo, o índice 0,25 da célula representada na segunda linha da primeira coluna deve ser visto como a razão de $\frac{1}{4}$, onde o numerador faz referência aos critérios da coluna amarela e o denominador faz referência

aos critérios da linha amarela. Uma relação de 1 para 4, neste caso, indica que o critério “A” é 4 vezes mais importante se comparado ao critério “B”, o que se estabelece entre os índices de superioridade pequena (índice 3) e moderada (índice 5).

Com as matrizes de julgamento construídas para cada critério, elas são então normalizadas e assim obtemos as matrizes de julgamento normalizadas. Para facilitar o entendimento, chamaremos de “A” a matriz de julgamento não normalizada e de “W” a matriz de julgamento após a normalização de seus valores. Sendo “ a_{ij} ” os elementos de cada célula da matriz A e “n” o número de alternativas definidas, temos:

$$V_i(W_j) = \frac{a_{ij}}{[\sum_{j=1}^n a_{ij}]} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

onde, $V_i(W_j)$ representa o valor de cada elemento da matriz “W”, indicando o impacto da alternativa “i” em relação a alternativa “j” de acordo com os índices estabelecidos pela escala fundamental de Saaty. Com isso, podemos obter o vetor de prioridades das alternativas com relação ao critério “k”:

$$V_k(W_j) = \frac{\sum_{i=1}^n V_i(W_j)}{n} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

Onde o vetor de prioridade pode ser representado por um vetor coluna da forma:

$$V_k = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

sendo $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$ os valores dos impactos de cada alternativa com relação ao critério “k”. Definidos os vetores de prioridades das alternativas sobre cada critério, o próximo passo é definir os pesos dos critérios, adotando novamente a escala fundamental de Saaty para realizar comparações par a par entre eles. Com isso, o decisor deve construir a matriz de julgamento dos critérios, estabelecendo os índices de comparação entre cada um deles, seguindo o mesmo passo a

passo exposto através das equações 2.1 e 2.2. Dessa forma, temos:

$$Y_i(C_j) = \frac{c_{ij}}{[\sum_{j=1} a_{ij}]} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.4)$$

onde, “ c_{ij} ” representa os valores de cada célula da matriz de julgamento dos critérios não normalizada e “ m ” o número de critérios estabelecidos. Assim sendo, o vetor de prioridade dos critérios é definido por:

$$Y(C_j) = \frac{\sum_{i=1} Y_i(C_j)}{m} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

Onde o vetor de prioridade dos critérios pode ser representado por um vetor coluna da forma:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{k1} \\ y_{k2} \\ \vdots \\ y_{kj} \\ \vdots \\ y_{km} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

sendo $y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m$ os pesos de cada critério.

Por fim, os valores finais de impacto das alternativas são obtidos através de um processo de agregação, onde os vetores de prioridade das alternativas com relação a cada critério são agregados formando a matriz “ M ” e, em seguida, realiza-se a multiplicação dessa matriz pelo vetor coluna “ Y ” que representa os pesos dos critérios. Vale ressaltar aqui, que os vetores de prioridade das alternativas devem ser agrupados na matriz, da esquerda para a direita, respeitando a mesma ordem dos critérios estabelecidos no vetor de prioridade dos critérios “ Y ”. Ou seja, se y_1 representa o peso do critério 1, o primeiro vetor a ser inserido na matriz será o de prioridade das alternativas em relação ao critério 1, e assim por diante.

Dessa forma, podemos representar a multiplicação da seguinte forma:

$$M \cdot Y = R \quad (2.7)$$

$$\begin{matrix} V_{k1} & V_{k2} & \dots & V_{km} \\ \begin{bmatrix} x_{1k1} & x_{1k2} & \dots & x_{1km} \\ x_{2k1} & x_{2k2} & \dots & x_{2km} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{nk1} & x_{nk2} & \dots & x_{nkm} \end{bmatrix} & \cdot & \begin{bmatrix} y_{k1} \\ y_{k2} \\ \vdots \\ y_{km} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.8)$$

Assim, o resultado obtido com o método AHP é o vetor “R” que representa os valores de impacto das alternativas considerando todos os critérios envolvidos no problema. Ordenando os valores do vetor “R” na ordem decrescente, criamos um ranking das alternativas, facilitando a escolha do decisor pela melhor alternativa.

2.4.2 PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)

Os métodos da família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) foram apresentados pela primeira vez em 1982 por Jean-Pierre Brans, em um congresso realizado na Universidade Laval localizada em Québec, no Canadá.

O método, pertencente a linha da Escola Francesa, consiste em uma análise multicritério que auxilia na comparação de diversas alternativas de decisão conflitantes, levando-se em conta critérios de sobreclassificação, a fim de facilitar a escolha do decisor quanto a melhor alternativa a ser tomada (REDISKE et al., 2015). São métodos bastante flexíveis que trabalham com dois graus de liberdade, um relativo ao tipo de função de preferência a ser selecionada e o outro relativo aos pesos e limiares a serem definidos pelo usuário.

Gomes, Araya e Cargiano (2004), relatam que a aplicação desse método é usualmente mais voltada para trabalhos que envolvam problemáticas cujo conjunto de alternativas possíveis é finito. A família de métodos PROMETHEE se divide em 7 diferentes aplicações que, segundo Brans, Vincke e Mareschal (1984), podem ser descritas como se segue:

- PROMETHEE I: método utilizado para problemáticas de ordenação, essa primeira aplicação da família PROMETHEE trabalha com a determinação de uma pré-ordem parcial das alternativas de escolha do decisor, apresentando uma relação de incomparabilidade entre elas. Essa pré-ordem é definida através dos fluxos de sobreclassificação positivos $\Phi^+(a)$ e negativos $\Phi^-(a)$ que indicam o quanto uma

alternativa é melhor que as demais e o quanto as demais superam essa mesma alternativa, respectivamente;

- PROMETHEE II: também empregado em problemáticas de ordenação, esse método, diferente do anterior, estabelece uma pré-ordem completa entre as alternativas, visto que não é possível estabelecer relações de incomparabilidade do tipo $\Phi^+(a) > \Phi^+(b)$ e $\Phi^-(a) > \Phi^-(b)$, como é possível na variante I. Essa pré-ordem completa é obtida através do fluxo líquido determinado pela equação 2.9 abaixo:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (2.9)$$

Dessa forma, faz-se a comparação dos fluxos líquidos entre as alternativas par a par e em seguida são organizadas em ordem decrescente de acordo com o fluxo líquido. Uma alternativa é preferível em relação a outra se seu fluxo líquido for maior, e é indiferente se o fluxo líquido de ambas for igual;

- PROMETHEE III: esse método apresenta uma ampliação da noção de indiferença, trabalhando com limites variáveis e situações de probabilidade de fluxos. Aqui, no lugar dos fluxos líquidos são utilizados grupos intervalares. É um método que pode ser empregado tanto para problemática de escolha quanto de ordenação das alternativas;
- PROMETHEE IV: neste método é determinada uma pré-ordem que pode ser completa ou parcial, onde se tem um conjunto contínuo de soluções. É uma generalização do PROMETHEE II pois envolve situações que admitem soluções infinitas;
- PROMETHEE V: esse método se caracteriza por ser uma ampliação do PROMETHEE II pois, após estabelecer a pré-ordem completa das alternativas, introduz restrições identificadas no problema, aplicando princípios de otimização inteira 0-1. Dessa forma, o índice “1” determina o valor selecionado e o índice “0” o não selecionado;
- PROMETHEE VI: da mesma forma como a variante IV, esse método permite determinar uma pré-ordem completa ou parcial das alternativas. A diferença aqui se

dá pela incapacidade do decisor de definir pesos específicos para cada critério, sendo necessário determinar intervalo de valores para cada um deles.

- PROMETHEE – GAIA (*Geometric Analysis for Interactive Aid*): trata-se de uma extensão de aplicação visual aos métodos da família PROMETHEE. Aqui o objetivo é realizar uma análise gráfica e representativa do impacto dos pesos atribuídos a cada critério pelo decisor, e da relação de sobreclassificação das alternativas em relação aos critérios.

De acordo com Cavalcante e Almeida (2005), de uma forma geral, os métodos da família PROMETHEE são utilizados para resolver problemas de análise multicritério do tipo:

$$MAX \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_j(x), \dots, f_n(x) \quad \forall \quad x \in A\} \quad (2.10)$$

Onde “ A ” representa um conjunto finito e enumerável de “ n ” ações potenciais em $f_j(x)$, com $j = 1, 2, \dots, n$, sendo “ n ” o número de critérios definidos e $f_j(x)$ o desempenho de cada alternativa em cada um dos critérios. Tendo isso em mente, a resolução de qualquer problemática multicritério envolvendo os métodos dessa família, se constrói basicamente por duas etapas (ALMEIDA, 2011):

- I. *Primeira etapa*: construção das relações de sobreclassificação, realizando o input dos valores relativos aos critérios e as alternativas.
- II. *Segunda etapa*: exploração das relações de sobreclassificação construídas, levando em consideração a variante dos métodos (I, II, III, IV, V ou VI) que mais se adequa a problemática em questão.

Inicialmente, o decisor deve atribuir pesos a cada critério definido por ele, onde “ w_j ” representará esses pesos e tem como significado a importância de cada critério para o problema. Em seguida, definidos os pesos de cada critério, o decisor pode definir uma função de preferência $F_j(a, b)$ assumindo valores entre 0 e 1, que aumentam se a diferença de desempenho entre as alternativas $[f_j(a) - f_j(b)]$ aumenta, e são iguais a zero se o desempenho de uma alternativa é igual ou inferior ao desempenho da outra.

Após estabelecer os valores de $F_j(a, b)$, a última parte da primeira etapa é obter o grau de sobreclassificação $\Pi(a, b)$ para cada par de alternativa (a,b), que também pode ser chamado de índice de preferência multicritério, e representa a intensidade de preferência de uma alternativa em relação a outra. O grau de sobreclassificação é obtido por:

$$\Pi(a, b) = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^n w_j F_j(a, b) \quad \text{onde, } W = \sum_{j=1}^N w_j \quad (2.11)$$

Terminada a primeira etapa de construção das relações de sobreclassificação, vem agora a fase de exploração dessas relações. Para isso, o decisor define primeiro os fluxos de entrada (negativos) e os fluxos de saída (positivos) de cada alternativa:

$$\Phi^+(a) = \sum_{b \in A} \frac{\Pi(a, b)}{n-1} \quad (\text{fluxo de saída}) \quad (2.12)$$

O fluxo de saída da equação 2.12, representa a média de todos os graus de sobreclassificação de “a” em relação a todas as outras alternativas. Quanto maior for o fluxo de saída, melhor será a alternativa.

$$\Phi^-(a) = \sum_{b \in A} \frac{\Pi(b, a)}{n-1} \quad (\text{fluxo de entrada}) \quad (2.13)$$

Já o fluxo de entrada, representa a média de todos os graus de sobreclassificação de todas as outras alternativas, sobre “a”. Logo, quanto menor é esse valor, melhor é a alternativa. Por fim, o fluxo total ou fluxo líquido de cada alternativa é obtido a partir dos fluxos de entrada e saída:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (\text{fluxo total ou líquido}) \quad (2.14)$$

Através do fluxo líquido, as alternativas serão ordenadas em ordem decrescente, sendo a melhor alternativa aquela que obtiver o maior fluxo líquido. A utilização desse fluxo líquido, no entanto, depende do método a ser utilizado. Logo, é extremamente importante que o decisor faça a escolha certa acerca de qual das 6 variantes de métodos ele irá optar para solucionar o problema.

2.5 CONFIABILIDADE

A confiabilidade está relacionada a capacidade de uma máquina, componente, dispositivo ou sistema em desempenhar sua função corretamente durante um determinado intervalo de tempo. Estabelecer um sistema confiável é essencial em qualquer ambiente de trabalho. Equipamentos com alto índice de confiabilidade, são capazes de produzir mais, recebendo menos intervenções corretivas, reduzindo os custos com perda de produção e aumentando a eficiência do processo. Essa característica, no entanto, pode variar com o tempo e por isso se faz necessário estudar seu comportamento. Nesse contexto, a distribuição de *Weibull* pode ser utilizada para determinar a probabilidade de falha do equipamento em um determinado período de tempo e, a partir disso, a confiabilidade do mesmo. Neste caso, devemos considerar as seguintes fórmulas da distribuição de *Weibull*:

1) Densidade de probabilidade de Weibull

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \text{com } \beta > 0 \quad (2.15)$$

2) Probabilidade de Falha $F(t)$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \text{com } \beta > 0 \quad (2.16)$$

Onde,

- $F(t) \rightarrow$ Probabilidade de falha após um determinado tempo “t” de operação;
- $t \rightarrow$ Tempo de operação até a ocorrência da falha;
- $\beta \rightarrow$ Fator de forma ou inclinação (indica a forma da curva representativa das falhas)
 - $\beta > 1$: valor característico de falhas devido ao desgaste
 - $\beta = 1$: valor característico de falhas aleatórias
 - $\beta < 1$: valor característico de problemas com mortalidade infantil
- $\eta \rightarrow$ Fator de escala (representa o intervalo de tempo onde 63,2% das falhas ocorrem)

3) Confiabilidade $R(t)$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad \text{com } \beta > 0 \quad (2.17)$$

ou ainda,

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.18)$$

Dessa forma, conhecendo os parâmetros β e η da distribuição podemos estimar a função que representa a confiabilidade do equipamento selecionado, em função do tempo. A determinação desses parâmetros, nem sempre é uma tarefa tão simples. Para o estudo de caso deste trabalho, será analisado o indicador de manutenção *MTBF (Mean Time Between Failures)* que quer dizer “tempo médio entre falhas”, através de uma amostra de dados do equipamento selecionado. Com isso, utiliza-se uma regressão linear simples com a ferramenta de análise de dados do Excel como suporte, para obter os parâmetros de forma e escala de *Weibull*.

2.6 CUSTO COM MANUTENÇÃO

Para o cálculo do custo com manutenção, será adotado uma política de substituição que consiste na troca de um item, seja ele um dispositivo, um componente ou o próprio equipamento, no momento em que ele falha ou a partir do momento que atinge sua idade de substituição T . Analisando bem, a política de substituição ideal equivale a realização de manutenções preventivas (ou programadas) em intervalos de tempo T , onde realiza-se a troca do item prevenindo que o mesmo venha a falhar. Essa periodicidade, como já vimos anteriormente, influencia no processo de decisão, pois está diretamente relacionada ao custo de manutenção envolvido e a confiabilidade do equipamento. Para estabelecer uma relação entre o custo e o intervalo entre as manutenções preventivas (substituições), faremos as seguintes considerações:

1) Custo unitário com manutenção preventiva “ C_p ” (substituição antes da falha)

$$C_p = C_{mop} + C_{mp} \quad (2.19)$$

2) *Custo unitário com manutenção corretiva “Cc” (substituição após ocorrência da falha)*

$$C_c = C_{moc} + C_{mc} + C_{pp} \quad (2.20)$$

Onde,

- C_{mop} → Custo com mão de obra para atividade de manutenção preventiva (relativo ao custo por hora trabalhada dos operadores envolvidos);
- C_{mp} → Custo com materiais para atividade de manutenção preventiva (representa o custo com materiais necessários para realizar a atividade);
- C_{moc} → Custo com mão de obra para atividade de manutenção corretiva;
- C_{mc} → Custo com materiais para atividade de manutenção corretiva;
- C_{pp} → Custo com perda de produção (custo relativo a perda de produção durante o intervalo de tempo necessário para reparo da falha).

De acordo com Cavalcante e Almeida (2005), o custo esperado devido a utilização de uma política de substituição por intervalos de tempo “t” é dado por:

$$C(t) = C_c \int_0^t f(x)dx + C_p \int_t^\infty f(x)dx = C_c.F(t) + C_p.R(t) \quad (2.21)$$

No contexto aqui estudado, a noção de custo só é relevante quando tomada em função do tempo, visto que nosso objetivo é maximizar a confiabilidade e minimizar o custo esperado por tempo de utilização. Nesse caso, faz-se necessário definir outro termo importante que é o *Uptime* $U(t)$, ou tempo de utilização. Este termo faz referência ao tempo médio esperado de uso de um determinado equipamento com substituições realizadas em intervalos de tempo “t”.

Segundo Vaurio (1998) este tempo pode ser obtido por:

$$U(t) = \int_0^t R(x)dx \quad (2.22)$$

Logo, o custo médio esperado por unidade de tempo de utilização, designado por $Cm(t)$ é dado por:

$$Cm(t) = \frac{C(t)}{U(t)} = \frac{Cc.F(t) + Cp.R(t)}{\int_0^t R(x)dx} \quad (2.23)$$

Por fim, definidos os critérios e os seus comportamentos em função do tempo entre manutenções, a última etapa do estudo consiste na aplicação do método *PROMETHEE II*, com auxílio do software *Visual PROMETHEE*, para inserir e compilar os dados obtidos nas etapas anteriores. Aqui destaca-se a necessidade do conhecimento do decisor acerca dos critérios, para definir as funções de preferência e os pesos relativos a cada um. Compilando os dados, obtém-se os resultados para o fluxo de entrada, de saída e líquido das alternativas através de um ranking. A alternativa satisfatória e, portanto, a que fornece o intervalo ótimo entre manutenções será aquela de maior fluxo e líquido.

3 METODOLOGIA

Tendo definido os principais métodos utilizados para abordagem multicritério de auxílio à decisão e suas características, o próximo passo consiste em estabelecer uma metodologia adequada para o desenvolvimento do estudo de caso. De forma geral, a metodologia seguirá um fluxo partindo da restrição do nosso campo de estudo, onde deve ser determinado o equipamento crítico dentre os encontrados na estação de tratamento, tendo como suporte de decisão os critérios que serão estabelecidos na seção 3.1, para aplicação do método AHP. Definido o objeto de estudo, a segunda e última etapa do estudo é obter o intervalo ótimo entre manutenções com suporte do método de decisão *PROMETHEE II* para esse equipamento crítico, levando em conta as considerações descritas na seção 3.2. Com isso, as etapas seguirão o fluxo determinado pela figura 2 abaixo.

Figura 2 - Fluxograma representativo da metodologia utilizada



Fonte: O autor (2018)

3.1 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO CRÍTICO - AHP

Para esta etapa, foi selecionado o método de auxílio multicritério *AHP* para definição dos equipamentos críticos ao processo, tendo em vista a facilidade em compreender e estruturar o problema utilizando a decomposição hierárquica do método, além de representar de forma clara as preferências dos decisores em situações onde o grupo de decisão é formado por profissionais com visões e interesses diferentes. Inicialmente, é necessário definir os equipamentos que farão parte do campo de estudo. Para isso, os seguintes equipamentos foram definidos como mais relevantes:

- *Motores*: equipamento utilizado para converter energia elétrica em energia mecânica de rotação em eixos.

- *Redutores*: equipamento mecânico cuja função principal é a redução da rotação de um acionador (neste caso, dos motores). Através dos seus componentes básicos como eixos, rolamentos, jogo de engrenagens e carcaça, obtêm-se uma redução na rotação de saída, necessário para aplicações onde se requer um torque mais elevado em baixas rotações.
- *Painéis Elétricos*: equipamento projetado para realizar a distribuição de energia e o controle de sistemas através de componentes como disjuntores, interruptores, temporizadores, relés, CLP's e outros dispositivos utilizados para controle de um sistema elétrico.
- *Válvulas*: dispositivo utilizado para controlar o fluxo de líquidos, gases e materiais em suspensão. Pode ser encontrada em diversos tipos de configurações e tamanhos, além de ser equipamento essencial para segurança do processo, dos equipamentos e dos operadores.
- *Bombas*: equipamento utilizado para fornecer a energia necessária ao escoamento de fluídos através de dutos ou tubulações.

Esta etapa inicial do estudo de caso consiste em comparar cada equipamento destacado anteriormente com base em alguns critérios preestabelecidos, onde são atribuídos pesos a cada critério com base nos índices de comparação definidos pela escala fundamental de *Saaty*, conforme tabela 2. A seguir são destacados os critérios escolhidos para seleção do equipamento crítico:

- *Segurança*: esse critério define a criticidade do equipamento com respeito a segurança dos operadores, do ambiente e dos equipamentos adjacentes.
- *Interrupção ao Processo*: define a capacidade de uma falha ou quebra em um equipamento gerar uma interrupção parcial ou total no processo.
- *Custo com Manutenção*: critério mais financeiro, que leva em conta o custo total com a manutenção de um equipamento, envolvendo custo com mão de obra, sobressalentes e serviços de terceiros.
- *Tempo de Indisponibilidade*: define a criticidade do equipamento com respeito ao tempo em que permanece indisponível, desde sua retirada até a retomada total de sua função.
- *Condições de Operação*: estabelece o quão crítico são as condições operacionais que envolvem o equipamento como temperatura, umidade, vibração, estrutura de suporte, localização e carga requerida.

3.2 CONSIDERAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DO INTERVALO ENTRE MANUTENÇÕES - *PROMETHEE*

Atualmente, o desafio maior dos gestores de manutenção está não mais em desenvolver conhecimento técnico a respeito de seus equipamentos e processos, e sim estabelecer planos sistemáticos de manutenção que forneçam um processo de produção cada vez mais confiável, seguro e resultando em menores custos para a empresa. Nesse contexto, a manutenção preventiva tem por função reduzir a incidência de falhas nos equipamentos através de políticas de substituições periódicas dos elementos que compõem o equipamento, aumentando assim a sua vida útil. Essa periodicidade, no entanto, deve ser estudada com bastante cuidado antes de se estabelecer qualquer plano sistemático, visto que intervalos muito curtos entre manutenções proporcionam um sistema com maior confiabilidade, porém custos altíssimos, além de aumentar a indisponibilidade do equipamento que estará inoperante durante o tempo necessário para realizar a ação preventiva. Em contrapartida, longos intervalos entre manutenções resultam em um alto potencial de falha do equipamento, ou seja, baixa confiabilidade, podendo se estender a danos irreversíveis e acidentes, gerando também custos relativamente altos para a empresa devido a perda de produção e a necessidade de aquisição de um novo equipamento. Logo, esse conflito existente justifica a adoção dos critérios de custo com manutenção e confiabilidade do equipamento para o modelo aqui proposto.

A determinação desse intervalo requer, no entanto, um estudo prévio acerca do comportamento das falhas no equipamento e o reflexo no custo com manutenção, em função do tempo. Para isso, é necessário partir de uma base de dados capaz de fornecer informações suficientes para o estudo desse comportamento. Várias são as metodologias utilizadas para descrever o modo de falha dos equipamentos, aqui nesse estudo, será utilizada a distribuição de probabilidade *Weibull*, muito útil para aplicações envolvendo o modelo de vida de dispositivos e máquinas.

Por fim, determinado o comportamento dos critérios em função do tempo, será utilizado o método multicritério de auxílio a decisão *PROMETHEE II* com suporte do software *Visual Promethee* para solucionar o conflito existente entre eles e permitir que o gestor decida qual o intervalo ótimo entre manutenções preventivas no equipamento selecionado. Além disso, algumas considerações necessárias ao procedimento de cálculo são definidas a seguir:

- Os parâmetros da distribuição de *Weibull* que representa o comportamento da falha no redutor, serão obtidos com base em uma análise por regressão linear sobre 10 amostras de dados referentes ao tempo entre falhas do equipamento;
- A substituição realizada na intervenção do equipamento é “perfeita”, ou seja, renova o sistema e o torna tão bom quanto um novo;
- A duração das manutenções corretivas e preventivas serão representadas respectivamente por “ t_c ” e “ t_p ”;
- Considera-se uma jornada de trabalho com 8 horas diárias, totalizando 176 horas de trabalho regular dos operadores durante o mês;
- O custo com a manutenção preventiva, é relativo apenas aos componentes necessários na programação (troca de óleo, rolamentos e retentores). Já o custo com materiais necessários em uma manutenção corretiva leva em conta a necessidade de substituição não só de componentes renováveis sistematicamente, mas também de todos os componentes falhos como eixos e engrenagens, por exemplo.
- As atividades de manutenção são realizadas com 2 operadores, sendo 1 eletricista e 1 mecânico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo de caso será desenvolvido considerando dados teóricos a respeito de uma estação de tratamento de esgoto com processo por filtro biológico e decantadores secundários, localizada no município de Olinda, em Pernambuco. Para isso, nesta etapa inicial do estudo de caso, faz-se necessário discutir acerca dos principais aspectos de funcionamento de uma ETE, bem como as etapas percorridas pelo efluente durante todo o processo de tratamento.

4.1 O PROCESSO DE TRATAMENTO

Desde sua origem até o destino final, todo o efluente urbano ou industrial produzido pelo ser humano deve receber um tratamento adequado a fim de que se elimine ou minimize os efeitos causados pela sua contaminação. O processo de tratamento se inicia com a coleta do efluente que percorre as redes coletoras espalhadas pela cidade até as estações elevatórias de esgoto que bombeiam o efluente para as estações de tratamento, onde é processado, tratado e por fim despejado em corpos d'água adequados. Dessa forma, os processos se seguem da forma descrita na figura 3, onde se percebe uma conexão com o sistema de tratamento da água, que faz parte do ciclo natural de produção dos efluentes.

Figura 3 - Etapas do processo de tratamento de esgoto doméstico



Fonte: Disponível em < <https://www.cesan.com.br/noticias/cesan-leva-interatividade-e-tecnologia-para-a-feira-do-verde/> > (acesso em 21 de julho de 2018)

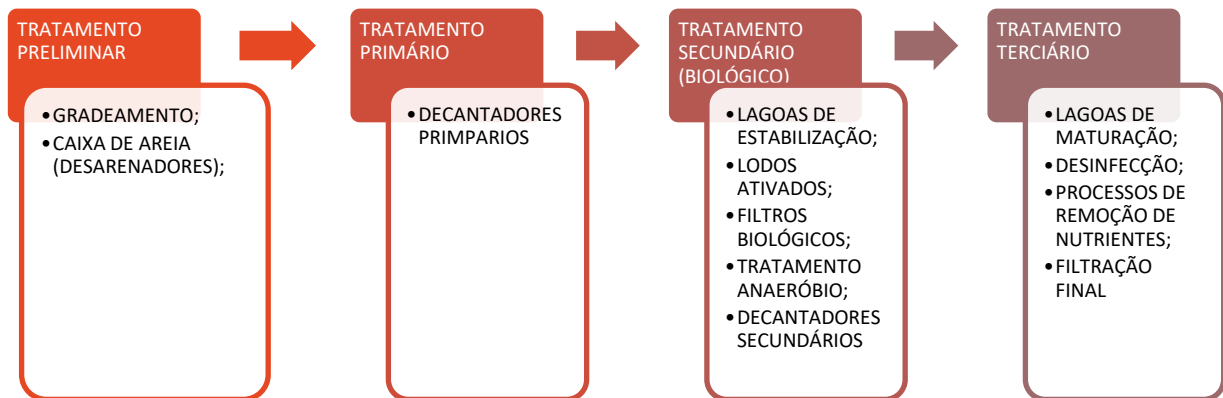
O processo por completo pode ser entendido pelas etapas descritas a seguir:

- 1) *Coleta por gravidade*: o esgoto produzido é destinado às EEE's - Estações Elevatórias de Esgoto por meio da ação da gravidade, onde todo o efluente flui através das redes coletoras de esgoto espalhadas pela cidade;
- 2) *Bombeamento para as ETE's*: Ao chegar nas EEE's, o esgoto, situado em um nível inferior, é bombeado através de conjuntos motobombas para as Estações de Tratamento de Esgoto onde receberá seu devido tratamento;
- 3) *Tratamento e devolução do efluente tratado*: principal etapa do ciclo, é aqui onde o esgoto recebe o tratamento adequado e posteriormente é despejado, já limpo, em corpos d'água como rios, lagos e mares.

4.2 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE's

Para o presente trabalho, o foco de estudo serão as estações de tratamento de esgoto (ETE's) e seus diferentes processos. De forma geral, toda cidade ou estado que receba o tratamento do efluente, seja por ordem pública, privada ou parcerias, concentra uma grande quantidade de estações de tratamento espalhadas por toda a região e situadas em locais completamente distintos. Dessa forma, diversos tipos e níveis de tratamento são utilizados, a depender de uma série de fatores como: área disponível para implantação da ETE; topografia do local e das bacias de drenagem; características físico-químicas do corpo receptor; disponibilidade financeira para aplicação de tecnologias; grau de instrução dos operadores; variação climática da região de implementação da ETE; volumes diários de esgoto a ser tratado; existência de locais de reaproveitamento dos resíduos gerados pela ETE. Com isso, a garantia de uma eficiência máxima ao processo deve levar em consideração todos os fatores anteriormente citados. O fluxograma da figura 4 abaixo, representa de forma geral as etapas, os diferentes níveis e tipos de tratamentos em uma ETE.

Figura 4 - Fluxograma do processo de tratamento do esgoto em ETE's



Fonte: O autor (2018)

Aqui, o estudo de caso terá como base um processo de tratamento análogo ao representado pela estação de tratamento da figura 5 abaixo, com tratamento preliminar por gradeamento e desarenadores mecanizados, seguido de um tratamento primário a base de decantadores primário e, por fim, o ciclo é finalizado com o nível secundário do processo, por filtros biológicos e decantadores secundários. Há, ainda, um tratamento complementar por leitos de secagem para o lodo produzido no processo. No entanto, a nível de eficiência, consideramos apenas os tratamentos preliminares, primários e secundários.

Figura 5 - Vista de cima de uma ETE com tratamento por filtro biológico e decantador secundário



Fonte: Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/place/Compesa+-+ETE+PEIXINHOS/@-8.0178733,-34.8779895,326a,35y,241.42h/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7ab1813c1f62319:0x795803f840a48d6b!8m2!3d-8.01661!4d-34.876841>> (Acesso em 20 de julho de 2018)

4.3 TRATAMENTO PRELIMINAR

Etapa inicial do processo de tratamento, é nesta fase onde o esgoto é entregue à estação na sua forma mais bruta, com impurezas e resíduos sólidos presentes ainda em grandes quantidades. Com o objetivo de “peneirar” essas impurezas e resíduos, o esgoto inicia o processo passando por um tratamento mais grosseiro através de gradeamentos e posteriormente por outro um pouco mais refinado, utilizando desarenadores. Dessa forma, as etapas iniciais podem ser divididas da seguinte forma:

Gradeamento: sistema constituído por barras paralelas de ferro ou aço carbono, posicionadas transversalmente no canal de chegada do esgoto na estação, com o objetivo de remover os sólidos mais grosseiros presentes ainda no efluente, evitando, assim, obstruções nas tubulações e danos nos equipamentos eletromecânicos. A remoção dos resíduos sólidos pode ser feita de forma *manual* (figura 7) ou *mecanizada* (figura 6).

Figura 6 - Gradeamento Mecanizado



Fonte: Disponível em < <https://www.tratamentodeagua.com.br/produto/grades-mecanizadas/> > (Acesso em 20 de julho de 2018)

Figura 7 - Gradeamento Manual



Fonte: Disponível em <<http://desentupidoraprecisa.blogspot.com/2012/09/etes-em-belo-horizonte.html>> (acesso em 20 de julho de 2018)

Desarenadores (caixa de areia): etapa seguinte ao gradeamento, esta tem por finalidade a remoção da areia presente no esgoto que poderá causar sérios problemas as etapas seguintes do tratamento. Além do impacto no processo, os desarenadores evitam, também, o impacto ambiental quando impedem ou minimizam a possibilidade de assoreamento dos corpos receptores do esgoto tratado. O desarenador é composto por uma *ponte girante*, responsável pela “raspagem” dos grãos de areia mais densos e de maiores dimensões que ficam sedimentados no fundo do tanque, e por um *parafuso classificador*, responsável por remover esses grãos e transporta-los para uma caixa coletora, como pode ser observado na figura 8 abaixo.

Figura 8 - Esquema de um desarenador

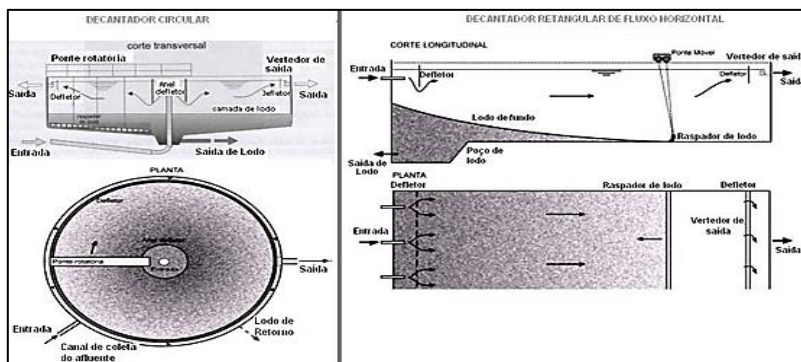


Fonte: Disponível em <http://www.bishenambiental.com.br/caixa-areia-ete> (acesso em 21 de julho de 2018)

4.4 TRATAMENTO PRIMÁRIO

Dando sequência ao processo, o esgoto, agora já livre de impurezas e resíduos sólidos mais grosseiros, segue para o próximo nível de tratamento onde passará por processos de sedimentação em decantadores primários. Apesar de receber um tratamento preliminar, as características poluidoras do efluente ainda continuam presentes e devem ser eliminadas. Esta etapa do tratamento é destinada à remoção dos sólidos suspensos sedimentáveis e dos sólidos flutuantes através da precipitação e acúmulo destes no fundo do tanque. A massa de sólidos depositada no fundo dos decantadores é o que dá origem ao lodo primário bruto, posteriormente retirado por raspadores, bombas ou tubulações (DIELLE, 2014). A figura 9 abaixo ilustra dois tipos diferentes de decantadores primários.

Figura 9 - Ilustração esquemática de um decantador primário circular e retangular com fluxo horizontal



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005)

A eficiência de remoção desses sólidos suspensos gira em torno de 60 e 70% (VON SPERLING, 2005).

4.5 TRATAMENTO SECUNDÁRIO

O efluente tratado nas estações, para ser despejado nos corpos receptores, deve atender as exigências estabelecidas pelos órgãos federais responsáveis por sua fiscalização, como é o caso do *CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente* e, quando aplicável, pelos órgãos estaduais e/ou municipais, como é o caso da *CPRH – Agência Estadual de Meio Ambiente*, no estado de Pernambuco. No entanto, apenas a eficiência do tratamento primário com mecanismos físicos, não é suficiente para atender a tais requisitos e, para isso, faz-se necessária uma etapa de tratamento

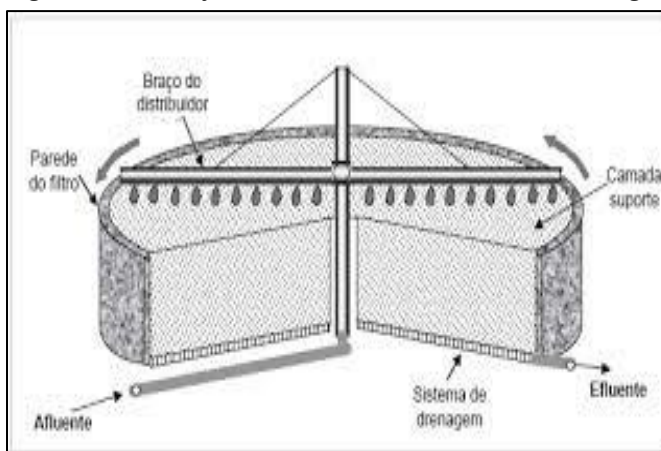
que envolva tecnologias mais avançada e a utilização de processos biológicos para remoção da matéria orgânica dissolvida. Com isso, denomina-se tratamento secundário, o processo pelo qual o esgoto receberá tratamentos biológicos, capazes de degradar e remover a matéria orgânica ainda presente na sua forma dissolvida, a fim de obter a eficiência máxima do processo (DIELLE, 2014). As principais tecnologias biológicas utilizadas para promover o tratamento do efluente nessa etapa do processo são: *Lodos Ativados; Wetlands; Processos Anaeróbios e Aeróbios; reatores UASB; MBR – Biorreatores de Membrana; Tanque Séptico; Lagoas de Estabilização; Biofilmes*. (CORNELLI et al., 2014). A estação de tratamento em estudo nesse trabalho, possui tecnologia de tratamento por filtros biológicos e decantadores secundários, que é um processo aeróbio de degradação da matéria orgânica, como pode ser visto nos exemplos das figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 - Foto retirada de um Filtro Biológico



Fonte: Disponível em < <https://slideplayer.com.br/slide/10453433/>> (acesso em 20 de julho de 2018)

Figura 11 - Ilustração de funcionamento de um filtro biológico



Fonte: Adaptado de Nascimento (2010)

Figura 12 - Foto retirada de um decantador



Fonte: Disponível em
 <[http://www.interagua.pt/media/Fotogaleria_I/Decantador_secundario_\(ETAR_de_Vilarandelo_Portugal\).JPG](http://www.interagua.pt/media/Fotogaleria_I/Decantador_secundario_(ETAR_de_Vilarandelo_Portugal).JPG)>
 (acesso em 21 de julho de 2018)

4.6 SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO CRÍTICO (AHP)

Tendo em vista a vasta gama de equipamentos encontrados na estação de tratamento, é necessário realizar uma filtragem a fim de focarmos naquele equipamento que merece uma atenção maior devido a sua criticidade. Com base na metodologia descrita na seção 2.4.1 e, utilizando os critérios estabelecidos na seção 3.1, o resultado para os pesos de cada um dos critérios definidos anteriormente foi obtido através da comparação entre eles seguindo os índices de referência já citados. O resultado é mostrado na tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Matriz de comparação dos critérios

PESOS DOS CRITÉRIOS	SEGURANÇA	INTERRUPÇÃO DO PROCESSO	CUSTO COM MANUTENÇÃO	TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO
SEGURANÇA	1,00	4,00	8,00	2,00	6,00
INTERRUPÇÃO DO PROCESSO	0,25	1,00	6,00	1,00	3,00
CUSTO COM MANUTENÇÃO	0,13	0,17	1,00	0,20	2,00
TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	0,50	1,00	5,00	1,00	5,00
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	0,17	0,33	0,50	0,20	1,00
SOMA	2,04	6,50	20,50	4,40	17,00

Fonte: O autor (2018)

Os índices devem ser obtidos através de pesquisa de campo com supervisores e coordenadores da equipe de manutenção eletromecânica da estação. Devido a necessidade de sigilo de dados e informações por parte da empresa, os valores utilizados neste trabalho são meramente ilustrativos. Normalizando os valores da tabela 4 acima, obtêm-se a tabela 5 representada a seguir:

Tabela 5 - Matriz de comparação normalizada

TABELA NORMALIZADA	SEGURANÇA	IMPORTÂNCIA AO PROCESSO	CUSTO COM MANUTENÇÃO	TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO
SEGURANÇA	0,49	0,62	0,39	0,45	0,35
IMPORTÂNCIA AO PROCESSO	0,12	0,15	0,29	0,23	0,18
CUSTO COM MANUTENÇÃO	0,06	0,03	0,05	0,05	0,12
TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	0,24	0,15	0,24	0,23	0,29
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	0,08	0,05	0,02	0,05	0,06

Fonte: O autor (2018)

Por fim, calcula-se a média entre os valores representados em cada linha, resultando no peso normalizado para cada critério estabelecido, que é o vetor de prioridade dos critérios:

Tabela 6 - Pesos normalizados dos critérios

	SEGURANÇA	IMPORTÂNCIA AO PROCESSO	CUSTO COM MANUTENÇÃO	TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO
PESOS NORMALIZADOS	0,46	0,19	0,06	0,23	0,05

Fonte: O autor (2018)

Esse resultado torna evidente um valor de extrema importância em processos que envolvam máquinas e equipamentos que é a prioridade com relação a segurança. A criticidade associada a um equipamento inseguro já pode ser identificada como alta, visto que esse critério sobressai com relação aos demais, sendo duas vezes mais crítico que o segundo critério mais relevante para este estudo de caso. Logo, da equação 2.6, temos que:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{k1} \\ y_{k2} \\ \vdots \\ y_{kj} \\ \vdots \\ y_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,46 \\ 0,19 \\ 0,06 \\ 0,23 \\ 0,05 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Com o vetor de prioridade dos critérios, o próximo passo é comparar cada alternativa com relação a cada um dos cinco critérios estabelecidos. Para isso, uma nova análise é feita no intuito de definir os índices de comparação com base na escala fundamental de *Saaty*. As tabelas comparativas e os resultados para os vetores de prioridade das alternativas pode ser visto nas tabelas a seguir:

Tabela 7 - Comparação das alternativas para o critério de Segurança

SEGURANÇA	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
MOTORES	1,00	0,25	0,20	0,14	1,00
BOMBAS	4,00	1,00	0,20	0,14	2,00
PAINÉIS ELÉTRICOS	5,00	5,00	1,00	0,33	6,00
VÁLVULAS	7,00	7,00	3,00	1,00	7,00
REDUTORES	1,00	0,50	0,17	0,14	1,00
SOMA	18,00	13,75	4,57	1,76	17,00

Fonte: O autor (2018)

Tabela 8 - Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Segurança

SEGURANÇA	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
PESOS NORMALIZADOS	0,051	0,107	0,281	0,507	0,054

Fonte: O autor (2018)

Para o critério de segurança, as válvulas são equipamentos de alta criticidade visto que são responsáveis por controlar todo o fluxo de efluente nas tubulações. Logo, qualquer avaria ou falha neste equipamento pode acarretar em danos nas tubulações e na própria válvula, podendo causar até o rompimento da estrutura e, com isso, compromete a segurança não só dos operadores ao redor, mas também do próprio equipamento e do meio ambiente, visto que o fluido em questão é o esgoto e qualquer tipo de vazamento pode gerar uma infiltração no solo contaminando o lençol freático.

Tabela 9 - Comparação das alternativas para o critério de Interrupção ao Processo

INTERRUPÇÃO DO PROCESSO	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
MOTORES	1,00	3,00	4,00	8,00	1,00
BOMBAS	0,33	1,00	2,00	3,00	0,13
PAINÉIS ELÉTRICOS	0,25	0,50	1,00	5,00	0,20
VÁLVULAS	0,13	0,33	0,20	1,00	0,11
REDUTORES	1,00	8,00	5,00	9,00	1,00
SOMA	2,71	12,83	12,20	26,00	2,44

Fonte: O autor (2018)

Tabela 10 - Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Interrupção ao Processo

INTERRUPÇÃO AO PROCESSO	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
PESOS NORMALIZADOS	0,33	0,11	0,10	0,03	0,43

Fonte: O autor (2018)

Aqui, destacam-se os redutores por estarem presentes na maioria dos processos envolvidos na estação de tratamento, além de não possuírem outra alternativa, senão a retirada do equipamento para manutenção ou substituição, o que pode parar o processo por completo. Diferentemente dos redutores, as válvulas possuem dispositivo de *Bypass* fazendo uso de processos redundantes, ou seja, caso haja falha em uma válvula, basta fecharmos esta e desviar o fluxo para uma outra em paralelo a esta, não comprometendo o fluxo do processo.

Tabela 11 - Comparação das alternativas para o critério de Custo com Manutenção

CUSTO COM MANUTENÇÃO	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
MOTORES	1,00	3,00	8,00	7,00	0,33
BOMBAS	0,33	1,00	7,00	8,00	0,33
PAINÉIS ELÉTRICOS	0,13	0,14	1,00	1,00	0,17
VÁLVULAS	0,14	0,13	1,00	1,00	0,11
REDUTORES	3,00	3,00	6,00	9,00	1,00
SOMA	4,60	7,27	23,00	26,00	1,94

Fonte: O autor (2018)

Tabela 2 - Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Custo com Manutenção

CUSTO COM MANUTENÇÃO	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
PESOS NORMALIZADOS	0,28	0,20	0,04	0,04	0,44

Fonte: O autor (2018)

Tratando-se de custo, os redutores, por serem equipamentos mais complexos envolvendo engrenagens e eixos usinados e com tratamento térmico especial, originam os maiores custos com manutenção entre as alternativas de equipamentos.

Tabela 133 - Comparação das alternativas para o critério de Tempo de Indisponibilidade

TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
MOTORES	1,00	2,00	7,00	8,00	0,20
BOMBAS	0,50	1,00	6,00	7,00	0,20
PAINÉIS ELÉTRICOS	0,14	0,17	1,00	2,00	0,11
VÁLVULAS	0,13	0,14	0,50	1,00	0,11
REDUTORES	5,00	5,00	9,00	9,00	1,00
SOMA	6,77	8,31	23,50	27,00	1,62

Fonte: O autor (2018)

Tabela 144 - Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Tempo de Indisponibilidade

TEMPO DE INDISPONIBILIDADE	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
PESOS NORMALIZADOS	0,22	0,17	0,05	0,03	0,53

Fonte: O autor (2018)

O tempo de indisponibilidade dos equipamentos é calculado a partir do momento em que ele para de operar e se estende até a sua retomada por completo. Com isso, os redutores podem ficar indisponíveis por semanas e até meses em caso de avaria, pois os sobressalentes que o compõem necessitam de manutenção especial e com bastante cautela, desprendendo de tempos maiores para manutenção.

Tabela 155 - Comparação das alternativas para o critério de Condições de Operação

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
MOTORES	1,00	1,00	9,00	8,00	4,00
BOMBAS	1,00	1,00	9,00	8,00	4,00
PAINÉIS ELÉTRICOS	0,11	0,11	1,00	0,17	0,13
VÁLVULAS	0,13	0,13	6,00	1,00	0,50
REDUTORES	0,25	0,25	8,00	2,00	1,00
SOMA	2,49	2,49	33,00	19,17	9,63

Fonte: O autor (2018)

Tabela 16 - Vetor de prioridade das alternativas para o critério de Condições de Operação

CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	MOTORES	BOMBAS	PAINÉIS ELÉTRICOS	VÁLVULAS	REDUTORES
PESOS NORMALIZADOS	0,38	0,38	0,03	0,08	0,13

Fonte: O autor (2018)

No que diz respeito as condições de operação dos equipamentos, motores e bombas são os mais afetados pelos fatores de temperatura, umidade, carga, vibração e localização do equipamento. Motores e bombas trabalham em rotações muito altas, recebendo cargas de trabalho também elevadas, além de estarem sujeitos a vibração excessiva e, no caso das bombas, a presença de resíduos sólidos e impurezas no efluente que são capazes de deteriorar sua estrutura interna e danificar seu rotor.

Estabelecidas as matrizes de comparação entre as alternativas, os vetores de prioridade das alternativas em relação a cada critério são mostrados a seguir:

$$V_{segurança} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,051 \\ 0,107 \\ 0,281 \\ 0,507 \\ 0,054 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$V_{interrupção} = \begin{bmatrix} 0,33 \\ 0,11 \\ 0,1 \\ 0,03 \\ 0,43 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$V_{custo} = \begin{bmatrix} 0,28 \\ 0,2 \\ 0,04 \\ 0,04 \\ 0,44 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$V_{indisponibilidade} = \begin{bmatrix} 0,22 \\ 0,17 \\ 0,05 \\ 0,03 \\ 0,53 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$V_{condição} = \begin{bmatrix} 0,38 \\ 0,38 \\ 0,03 \\ 0,08 \\ 0,13 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

De posse dos vetores de prioridade das alternativas, faz-se agora a multiplicação matricial definida pela equação 2.8 a fim de obter como resultado o vetor de criticidade das alternativas. A multiplicação é feita levando-se em conta o vetor de prioridade dos critérios da equação 4.1 e a matriz formada pelos vetores de prioridade das alternativas, descritos nas equações de 4.2 à 4.6.

$$\begin{bmatrix} 0,051 & 0,33 & 0,28 & 0,22 & 0,38 \\ 0,107 & 0,11 & 0,2 & 0,17 & 0,38 \\ 0,281 & 0,1 & 0,04 & 0,05 & 0,03 \\ 0,507 & 0,03 & 0,04 & 0,03 & 0,08 \\ 0,054 & 0,43 & 0,44 & 0,53 & 0,13 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,46 \\ 0,19 \\ 0,06 \\ 0,23 \\ 0,05 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0,176} \\ \mathbf{0,14} \\ \mathbf{0,163} \\ \mathbf{0,254} \\ \mathbf{0,267} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Por fim, ordenando o vetor de criticidade do maior valor para o menor, levando em conta os equipamentos associados a cada valor, temos o ranking final de criticidade dos equipamentos que pode ser visto na tabela 17 a seguir:

Tabela 17 - Ranking final de criticidade dos equipamentos

REDUTORES 1º	0,267
VÁLVULAS 2º	0,254
MOTORES 3º	0,176
PAINÉIS ELÉTRICOS 4º	0,163
BOMBAS 5º	0,14

Fonte: O autor (2018)

Assim sendo, conclui-se que os redutores são os equipamentos mais críticos do processo e por isso merecem uma atenção especial sendo, portanto, o objeto de estudo para a próxima etapa do estudo de caso.

4.7 DEFINIÇÃO DO INTERVALO ÓTIMO ENTRE MANUTENÇÕES

Definido o redutor como nosso equipamento crítico, a última etapa do estudo de caso consiste em avaliar o comportamento dos critérios de custo e confiabilidade desse redutor em função do tempo, com base em dados de falha do equipamento crítico. Por fim, analisa-se o conflito entre os resultados obtidos para cada critério com auxílio do software *Visual PROMETHEE* e com isso o intervalo ótimo entre manutenções é obtido.

1) *Determinação dos parâmetros de Weibull*

Tabela 6 - Amostras de tempo entre falhas para o equipamento crítico selecionado

AMOSTRAGEM	TEMPO ENTRE FALHAS (Horas)
1	1284
2	1500
3	1326
4	1300
5	1349
6	1250
7	950
8	1280
9	1400
10	1200

Fonte: O autor (2018)

Utilizando o modelo de análise de dados do Excel para realizar uma regressão linear com os dados acima, obtém-se:

Tabela 197 - Parâmetros de Weibull obtidos com a regressão linear

PARÂMETROS DE WEIBULL	
β	8,702738123
η	1354,989169

Fonte: O autor (2018)

2) *Determinação da confiabilidade e probabilidade de falha para as diferentes alternativas de tempo “t” entre substituições*

Considerando 21 alternativas de intervalos entre manutenções e utilizando a função de *Weibull* no Excel, para resolver as equações 2.16 e 2.17 em função das alternativas de tempo, temos:

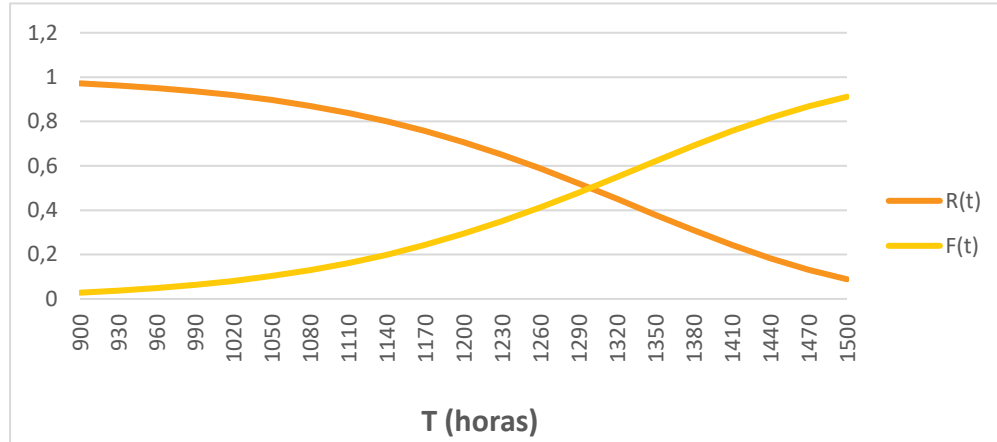
Tabela 8 - Comportamento da probabilidade de falha e confiabilidade com o tempo

t (horas)	F(t)	R(t)
900	0,02802	0,97198
930	0,0371	0,9629
960	0,04861	0,95139
990	0,06306	0,93694
1020	0,08099	0,91901
1050	0,10299	0,89701
1080	0,12968	0,87032
1110	0,16163	0,83837
1140	0,19936	0,80064
1170	0,24326	0,75674
1200	0,29351	0,70649
1230	0,34997	0,65003
1260	0,41213	0,58787
1290	0,47898	0,52102
1320	0,54904	0,45096
1350	0,62031	0,37969
1380	0,69042	0,30958
1410	0,7568	0,2432
1440	0,81698	0,18302
1470	0,86892	0,13108
1500	0,91131	0,08869

Fonte: O autor (2018)

Plotando os gráficos, podemos analisar e comparar o comportamento de $F(t)$ e $R(t)$ no tempo:

Gráfico 1- Curva das funções de probabilidade de falha $F(t)$ e confiabilidade $R(t)$



Fonte: O autor (2018)

Através do gráfico fica evidente o comportamento da falha no equipamento ao longo do tempo. Como já citado, intervalos curtos entre manutenções resultam num sistema mais confiável com menor probabilidade de falha. Em contrapartida, grandes intervalos entre manutenções evidenciam a maior probabilidade do equipamento falhar, resultando em um sistema não confiável.

3) Determinação do custo em função do tempo

Antes de determinar o comportamento do custo em função das alternativas de tempo, calcula-se os custos unitários com manutenção preventiva e corretiva. A equipe de manutenção leva em média 8 horas para realizar uma atividade sistemática de prevenção, 12 horas para uma atividade de correção. O custo por hora de um eletricitista é R\$ 18,75 e de um mecânico é R\$ 15,34. O custo com materiais é em média R\$ 1.500,00 para atividade de manutenção preventiva e R\$ 5.000,00 para manutenção corretiva. Por fim, o custo por hora com perda de produção para o caso de ações corretivas é em média R\$ 2,08. Com essas considerações, temos que:

$$Cc = \left[(18,75 + 15,34) \frac{R\$}{h} \times 12 h \right] + \left(2,08 \frac{R\$}{h} \times 12 h \right) + R\$ 5.000,00 \quad (4.8)$$

$$Cp = \left[(18,75 + 15,34) \frac{R\$}{h} \times 8 h \right] + R\$ 1.500,00 \quad (4.9)$$

Tabela 9 - Custos unitários de manutenção corretiva e preventiva

CUSTOS UNITÁRIOS	
C_c	R\$ 5.434,08
C_p	R\$ 1.772,72

Fonte: O autor (2018)

Com isso, podemos determinar o comportamento do custo em função das alternativas de intervalo e da probabilidade de falha e confiabilidade, através das equações 2.16, 2.17 e 2.23.

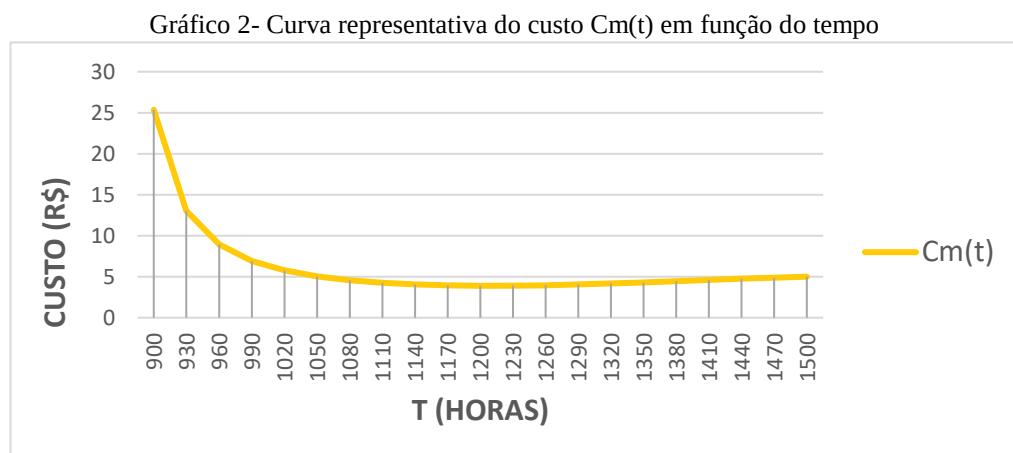
Tabela 10 - Valores do custo em função do intervalo entre manutenções

t	F(t)	R(t)	Cm(t)
900	0,02802	0,97198	25,3593
930	0,0371	0,9629	13,0269
960	0,04861	0,95139	8,93614
990	0,06306	0,93694	6,93033
1020	0,08099	0,91901	5,76869
1050	0,10299	0,89701	5,03701
1080	0,12968	0,87032	4,55812
1110	0,16163	0,83837	4,24386
1140	0,19936	0,80064	4,04554
1170	0,24326	0,75674	3,934
1200	0,29351	0,70649	3,89043
1230	0,34997	0,65003	3,9017
1260	0,41213	0,58787	3,95772
1290	0,47898	0,52102	4,04983
1320	0,54904	0,45096	4,16986
1350	0,62031	0,37969	4,30953
1380	0,69042	0,30958	4,46023
1410	0,7568	0,2432	4,61312
1440	0,81698	0,18302	4,7596
1470	0,86892	0,13108	4,89202
1500	0,91131	0,08869	5,00453

Fonte: O autor (2018)

Analisando a curva do custo no gráfico 2 a seguir, evidencia-se um comportamento interessante previsto anteriormente, com custos elevados para pequenos intervalos de tempo, caindo a medida que os intervalos aumentam, e apresentando um leve aumento no final da curva.

Isso se explica com o aumento da probabilidade de falha e diminuição da confiabilidade.



Fonte: O autor (2018)

4) Resolução do conflito entre $R(t)$ e $C_m(t)$ através do PROMETHEE II

Analisando os gráficos de $R(t)$ e $C_m(t)$, percebe-se o conflito existente para determinação do intervalo ideal entre manutenções. No intuito de resolver esse conflito e obter o intervalo satisfatório, é utilizado aqui o método multicritério de auxílio a decisão *PROMETHEE II* com suporte do software *Visual PROMETHEE* para obtenção dos resultados. Para isso, faz-se necessário a atribuição dos parâmetros pertinentes ao método, como a função de preferência e os pesos atribuídos a cada critério e os limites de indiferença “q” e de preferência “p” quando aplicáveis. Para o caso em estudo, utilizaremos:

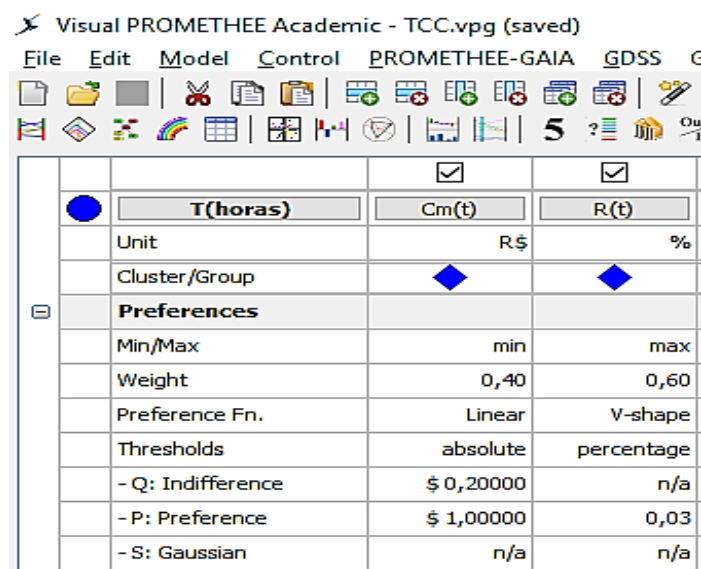
Tabela 11 - Parâmetros do método PROMETHEE II

PARÂMETROS	$C_m(t)$	$R(t)$
Max/Mín	Mín	Max
Peso	0,4	0,6
Função de preferência	Linear	Tipo V
Limite de indiferença (q)	0,2	n/a
Limite de preferência (p)	1	0,03

Fonte: O autor (2018)

Agora, com auxílio do software *Visual PROMETHEE* os dados são inseridos como mostram as figuras 13 e 14 abaixo:

Figura 13 – Parâmetros inseridos através do software Visual PROMETHEE



Fonte: Visual PROMETHEE Academic

Figura 14 - Input dos valores obtidos com as alternativas em relação aos critérios

☒	T1	☐	\$ 25,35930	0,97198275
☒	T2	☐	\$ 13,02690	0,96290377
☒	T3	☐	\$ 8,93614	0,95138925
☒	T4	☐	\$ 6,93033	0,93694140
☒	T5	☐	\$ 5,76869	0,91901002
☒	T6	☐	\$ 5,03701	0,89700566
☒	T7	☐	\$ 4,55812	0,87032257
☒	T8	☐	\$ 4,24386	0,83837366
☒	T9	☐	\$ 4,04554	0,80064003

Fonte: Visual PROMETHEE Academic

Após inserir os dados no software, eles são compilados fornecendo os fluxos de entrada, de saída e líquido, descritos na seção 2.4.2 que podem ser visualizados na tabela 24 a seguir.

Tabela 12- Resultado final para os fluxos de entrada, saída e líquido das alternativas

ALTERNATIVAS	t(horas)	Phi	Phi+	Phi-
T8	1110	0,3232	0,545	0,222
T9	1140	0,3117	0,552	0,24
T7	1080	0,2885	0,537	0,248
T10	1170	0,2734	0,543	0,27
T11	1200	0,222	0,522	0,3
T6	1050	0,2107	0,543	0,333
T2	930	0,1804	0,57	0,389
T3	960	0,1717	0,565	0,394
T1	900	0,1711	0,571	0,4
T12	1230	0,1598	0,49	0,33
T4	990	0,1464	0,56	0,413
T5	1020	0,1407	0,555	0,414
T13	1260	0,0886	0,449	0,36
T14	1290	0,0109	0,401	0,39
T15	1320	-0,077	0,348	0,425
T16	1350	-0,177	0,295	0,472
T17	1380	-0,281	0,246	0,527
T18	1410	-0,388	0,202	0,59
T19	1440	-0,493	0,163	0,656
T20	1470	-0,597	0,127	0,724
T21	1500	-0,687	0,094	0,781

Fonte: O autor (2018)

Finalmente, conclui-se que a alternativa que fornece o maior fluxo líquido e, portanto, será tomada como o resultado pretendido para o intervalo ideal entre manutenções no redutor, é a alternativa 8 que representa um intervalo de 1110 horas (aproximadamente) 1 mês e meio.

5 CONCLUSÕES

Finalizado o estudo aqui desenvolvido, faz-se evidente os benefícios de se estabelecer uma política de manutenção bem estruturada, com a definição da criticidade de equipamentos e do intervalo ideal entre manutenções, objetivando ações mais direcionadas e garantindo uma maior eficácia para os gestores. A diversidade de equipamentos encontrados em uma estação de tratamento de esgoto justifica a necessidade desse estudo, visto que se torna extremamente improdutivo e custoso controlar em um mesmo nível todos os equipamentos ao mesmo tempo.

No capítulo 2, foi discutido a evolução das atividades de manutenção ao longo dos anos, com o avanço dos mecanismos utilizados nos processos de produção, além do salto tecnológico desenvolvido com as ferramentas utilizadas para analisar de forma contínua o comportamento dos equipamentos, antecipando a ocorrência de falhas. A diversidade de fatores conflitantes, que estão atrelados ao processo de decisão, quando mal geridos, podem impactar negativamente o processo produtivo, tornando o sistema ineficaz, inseguro e caro. Com isso, ainda no capítulo 2, destaca-se a utilização dos métodos multicritério de auxílio a decisão como ferramentas essenciais no suporte a gestão de manutenção.

A metodologia desenvolvida no capítulo 3, com base nos métodos descritos na seção 2.4, fornece o roteiro a ser seguido no estudo de caso onde foram discutidos os critérios, parâmetros e funções utilizadas pelos métodos no estudo de caso.

O resultado obtido com o método *AHP* no capítulo 4 foi extremamente satisfatório, uma vez que os redutores são equipamentos extremamente complexos, caros e essenciais para o processo de tratamento. As válvulas, por outro lado, estabeleceram também um resultado interessante, tendo em vista sua “baixa avaliação” na maioria dos critérios, porém com uma superioridade quase que absoluta em relação ao critério de segurança que detém o maior peso entre os demais. Isso mostra a capacidade do método de transparecer, em números, resultados muitas vezes imprevisíveis. Além disso, o desenvolvimento do método mostrou-se bastante simples e intuitivo, proporcionando ainda uma participação direta com o conhecimento dos gestores.

A utilização do método *PROMETHEE II* para obtenção do intervalo ideal de 1110 horas entre manutenções, demonstrou de forma clara sua utilidade para aplicações envolvendo critérios conflitantes entre si, quando permite ao decisor estabelecer suas funções de preferência e os pesos atribuídos a cada critério. Além disso, o software *Visual PROMETHEE* utilizado para compilação dos dados e visualização dos resultados, mostrou-se bastante útil e prático, sendo ideal para ganho

de tempo no desenvolvimento dos cálculos.

Diante dos resultados, conclui-se a importância de se trabalhar com diretrizes e estratégias bem definidas e fundamentadas na gestão da manutenção. A utilização de uma metodologia adequada para solução da problemática de decisão com base em diferentes critérios, torna o trabalho mais produtivo, rentável e com um sistema cada vez mais eficiente e principalmente seguro.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. Recife: Editora Universitária UFPE. 2011.
- ALMEIDA, A. T. *Processo de decisão nas organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério..* São Paulo: Atlas. 2013.
- ALMEIDA, A. T. et. al. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. New York, NY: Springer. 2015.
- BEVILACQUA, M. & BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, 24 Março, pp. 71-83. 2000.
- BRANCO FILHO, G. *A Organização, o planejamento e o controle da manutenção*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA. 2008.
- BRANS, J., MARESCHAL, B. & VINCKE, P. *A new family of outranking methods in multicriteria analysis..* Amsterdam: Operational Research. 1984.
- BRANS, J., MARESCHAL, B. Promethee Methods. In: FIGUEIRA, José; GRECO, Salvatore; EHRGOTT, Matthias. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Operations Research Management Science. p. 163-195. 2005.
- BRASIL. Lei Ordinária Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. *Lei do Saneamento Básico*, 5 Janeiro. 2007.
- CAVALCANTE, C. & ALMEIDA, A. *Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza*. Recife(PE): Pesquisa Operacional. 2005.
- CORNELLI, R., AMARAL, F., FERREIRA DANILEVICZ, A. & DE MACEDO GUIMARÃES, L. Métodos de tratamento de esgoto doméstico: uma revisão sistemática. *Revista de estudos ambientais*, pp. 20-36. 2014.
- DE QUEIROZ SANTOS, A. C. *Abordagem Multicritério para classificação de equipamentos críticos e determinação de tempos de inspeções para manutenção*. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco: Recife. 2015.

DIELLE, E. F. Estudo da nova norma brasileira de projeto de estação de tratamento de esgotos - NBR 12.209/2011. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora: Minas Gerais. 2014.

GOMES, C. *Principais características da teoria da utilidade multiatributo, e análise comparativa com a teoria da modelagem de preferências e teoria das expectativas*. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. O autor: Rio de Janeiro. 1998.

GOMES, L., ARAYA, M. & CARIGNANO, C. *Tomada de decisões em cenários complexos*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning. 2004.

GOMES, L. F. A. M., GOMES, C. F. S. & ALMEIDA, A. T. *Tomada de decisão gerencial: Enfoque Multicritério..* São Paulo: Editora Atlas. 2002.

JULIATO, A. C. & LIMA, C. R. C. Definição de Políticas de Manutenção à Luz da Teoria das Restrições. *XI SIMPEP*, 08 Novembro, p. 2. 2004.

KARDEC, A. & RIBEIRO, H. *Gestão Estratégica e Manutenção Autônoma*. Rio de Janeiro: Qualitymark. 2002.

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

MEIRELES, M. & SANCHES, C. *Processo de tomada de decisões gerenciais multicritério subordinadas à vantagem competitiva*. São Paulo: FACCAMO. 2009.

NASCIMENTO, M. C. P. *Filtro biológico percolador de pequena altura de meio suporte aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB*. Dissertação. (Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte. 2001.

ORREGO RODRIGUEZ, T. F. *Contribuições ao modelo de manutenção preventiva "piggyback" pela abordagem multicritério e de gestão de sobressalentes*. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Pernambuco: Recife. 2016.

OTANI, M. & MACHADO, W. V. A Proposta de Desenvolvimento de Gestão da Manutenção Industrial na Busca da Excelência ou Classe Mundial. *Gestão Industrial*, v.4(n.02), pp. p. 01-16. 2008.

PARDALOS, P. M., SISKOS, Y. & ZOPOUNIDIS, C. *Advences in multicriteria analysis*. s.l.:Kluwer Academic Publishers. 1995.

- REDISKE, G., STORCH, C. & NARA, E. *Construção de mapas conceituais do método AHP e Promethee*. Ponta Grossa-PR, Brasil: V Congresso brasileiro de Engenharia de Produção. 2015.
- RODRIGUEZ, D. S. S., COSTA, H. G. & DO CARMO, L. F. R. R. S. Métodos de auxílio multicritério à decisão aplicados a problemas de PCP: Mapeamento da produção em periódicos publicados no Brasil. *Gestão & Produção*, 20(1), pp. 134-146.2013.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*.. s.l.:Kluwer Academic Publishers. 1996.
- SAATY, T. *The analytic hierarchy process in conflict management*: International Journal of Conflict Management, Vol. 1 Issue: 1, pp.47-68. 1990.
- SAATY, T. *Método de análise hierárquica*. São Paulo: McGraw-Hill; Makron. 1991.
- SHIMIZU, T. *Decisão nas organizações: introdução aos problemas de decisão gerencial encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão*: Atlas, São Paulo. 2001.
- SOUZA, F. *Decisões racionais em situações de incerteza*. Recife: Livro Rápido. 2005.
- SPERLING, M. V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. 2005.
- VAURIO, J.K. *Availability and cost functions for periodically inspected preventively maintained units*. Reliability Engineering and Systems Safety 63: 133–140. 1998.
- VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid*.. Bruxelles: João Wiley & Sons. 1992.