



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA
ESTÁGIO PROFISSIONAL

Análise multivariada da influência das variações dos parâmetros de qualidade da água da rede na qualidade da água desmineralizada produzida na Central Termoelétrica de Maputo

Autor: Pedro Simões Chibulacho

Supervisores da CTM:

Arlindo Mahumane, Eng.^o

Zubaida Catamo, Eng.^a

Supervisor da UEM:

Prof. Doutor António Cumbane, Eng.^o

Maputo, Setembro de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA
ESTÁGIO PROFISSIONAL

**Análise multivariada da influência das variações dos parâmetros de
qualidade da água da rede na qualidade da água desmineralizada
produzida na Central Termoeléctrica de Maputo**

Autor: Pedro Simões Chibulacho

Supervisor da CTM:

Arlindo Mahumane, Eng.^o

Supervisor da UEM:

Prof. Doutor António Cumbane, Eng.^o

Co-supervisora da CTM

Zubaida Catamo, Eng.^a

Maputo, Setembro de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO ESTÁGIO PROFISSIONAL

Declaro que o estudante Pedro Simões Chibulacho, entregou no dia ___/___/2024 as cinco (05) cópias do relatório do seu relatório de estágio profissional com a referência: _____, intitulado: Análise multivariada da influência das variações dos parâmetros de qualidade da água da rede na qualidade da água desmineralizada produzida na Central Termoelétrica de Maputo.

Maputo, ____ de _____ de 2024

O Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro sob minha honra que o presente relatório de estágio foi elaborado por mim e é resultado da minha investigação, que não foi ou está sendo publicado para a aquisição de qualquer outro grau acadêmico nesta instituição de ensino ou em qualquer outra, estando devidamente referenciadas todas as fontes utilizadas durante a sua elaboração em conformidade com Regulamento de Culminação de Estudos nos Cursos de Engenharia em vigor na Universidade Eduardo Mondlane.

O Autor

Pedro Simões Chibulacho

Dedico este trabalho,

*às minhas queridas avós, Faustina Macie
“vovó Tina” (in memoriam) e Felicidade Utui
“vovó Cidade” pelo seu amor e carinho
incondicionais, assim como pelos incontáveis
momentos alegres proporcionados.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me permitido viver até aqui e poder alcançar um objectivo tão importante na minha vida.

Aos meus pais, Simões Victorino Chibulacho e Eduarda Maria Gabriel Siteo, por sempre terem feito o melhor que podiam por mim, de modo que eu realizasse os meus sonhos.

Ao meu supervisor Prof. Eng.º Doutor António Cumbane, por ter sempre se mostrado disponível para me orientar e apoiar ao longo da realização deste relatório, motivando a superar todas as dificuldades encontradas neste período.

À Electricidade de Moçambique, particularmente à Central Termoeléctrica de Maputo, por terem me recebido para a realização do estágio. Agradeço em especial à “equipe do laboratório” nomeadamente à Eng^a Zubaida Catamo, à Zulfa Covane, à Eng^a Yara Ventura e ao meu supervisor de estágio Eng^o Arlindo Mahumane, por terem me acolhido e sempre se mostrarem disponíveis para me ajudar e ensinar, tornado o estágio numa experiência memorável a nível académico e pessoal.

Aos demais estagiários da Central Termoeléctrica, com destaque ao Francisco Júnior, à Hessitany de Deus, ao Robson Langa e Ikramo Ismael. Aos colaboradores das diferentes áreas na Central Termoeléctrica que de forma directa ou indirecta contribuíram para o meu bem-estar e adaptação na empresa.

Aos meus colegas de faculdade e amigos Henriques Tsinine, Paulo Cossa, Victor Magaia, Valdemiro Fosse, Roberto Come, Enoque Muchanga, em especial ao Paulino Júlio, Valente Tamele Júnior e Aurélio Bila, por terem me apoiado e incentivado dentro e fora da academia.

Aos professores do Departamento de Química da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, pela orientação ao longo dos anos de formação, com destaque aos professores Borges Chambal, Carlos Lucas, Alberto Tsamba e Estevão Pondja por também serem para mim fonte de inspiração.

Agradeço à Rufina Maurício, Avelina Zualo, Vitendo Maurício, Armando Zimba, Jamila Ibrahim e Rosana Ibrahim por estarem sempre comigo, acreditarem em mim e me motivarem a fazer cada vez melhor.

À todos que aqui não foram mencionados, entretanto de alguma forma contribuíram para o sucesso da minha formação, realização do estágio e elaboração do relatório: MUITO OBRIGADO.

Resumo

Este relatório de estágio aborda a análise multivariada da influência das variações dos parâmetros de qualidade da água da rede na qualidade da água desmineralizada produzida na Central Termoelétrica de Maputo (CTM). O processo de desmineralização da água na CTM envolve várias etapas, desde o pré-tratamento, onde são removidas as impurezas maiores, e tratamento principal, que é feito através da osmose reversa e a troca iónica.

A análise foi realizada utilizando modelos de regressão multivariada para prever como os parâmetros de qualidade da água da rede, fornecida pela Águas da Região Metropolitana de Maputo (AdRMM), influenciam a qualidade da água desmineralizada produzida. O estudo incluiu a colecta de dados experimentais, seguidos pelo tratamento e interpretação desses dados com o auxílio dos softwares IBM® SPSS Statistics 26 e Microsoft Excel 2021.

Foram realizados vários testes laboratoriais para avaliar a qualidade da água desmineralizada e da água da rede. Estes testes incluíram medições de pH, condutividade eléctrica (EC), concentração de ferro (Fe), entre outros parâmetros. Os dados colectados foram então utilizados para construir modelos de regressão que permitiram avaliar a relação entre os parâmetros da água da rede e a qualidade da água desmineralizada.

Os resultados mostraram que os modelos de regressão são eficazes para prever as variabilidades dos parâmetros pH e condutividade eléctrica da água desmineralizada com coeficientes de determinação (R^2) de 85.5% e 94.2% respectivamente. No entanto, para o parâmetro $\text{Log(Fe}_D\text{)}$, o modelo demonstrou uma menor eficácia, explicando apenas 52.1% da variabilidade. A inclusão de novos parâmetros podem melhorar a precisão dos modelos, especialmente para $\text{Log(Fe}_D\text{)}$.

A análise detalhada dos dados permitiu construir um modelo com base nos parâmetros da água da rede bem como a combinação destes que mais influenciam no pH, EC e Feda água desmineralizada produzida, possibilitando a tomada de acções preventivas para garantir a continuidade da produção com a qualidade desejada.

Palavras-chave: Análise multivariada, qualidade da água desmineralização, regressão linear.

Abstract

This internship report addresses the multivariate analysis of the influence of variations in the quality parameters of the mains water on the quality of the demineralized water produced at the Maputo Thermoelectric Power Plant (CTM). The water demineralization process at CTM involves several steps, from pretreatment, where larger impurities are removed, and main treatment, which is done through reverse osmosis and ion exchange.

The analysis was performed using multivariate regression models to predict how the quality parameters of the mains water, supplied by Águas da Região Metropolitana de Maputo (AdRMM), influence the quality of the demineralized water produced. The study included the collection of experimental data, followed by the processing and interpretation of these data with the aid of IBM® SPSS Statistics 26 and Microsoft Excel 2021 software.

Several laboratory tests were carried out to assess the quality of the demineralized water and the mains water. These tests included measurements of pH, electrical conductivity (EC), iron concentration (Fe), among other parameters. The collected data were then used to build regression models that allowed the evaluation of the relationship between the parameters of the tap water and the quality of the demineralized water.

The results showed that the regression models are effective in predicting the variability of the pH and electrical conductivity parameters of the demineralized water, with coefficients of determination (R^2) of 85.5% and 94.2%, respectively. However, for the $\text{Log(Fe}_D\text{)}$ parameter, the model demonstrated lower effectiveness, explaining only 52.1% of the variability. The inclusion of new parameters can improve the accuracy of the models, especially for $\text{Log(Fe}_D\text{)}$.

The detailed analysis of the data allowed the construction of a model based on the tap water parameters, as well as the combination of these that most influence the pH, EC and Fe of the demineralized water produced, enabling preventive actions to be taken to ensure the continuity of production with the desired quality.

Keywords: Multivariate analysis, water quality, demineralization, linear regression.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Formulação do problema e justificativa	2
1.2.	Objectivos.....	3
1.2.1.	Objectivo geral	3
1.2.2.	Objectivos específicos	3
1.3.	Metodologia.....	3
2.	Revisão bibliográfica	4
2.1.	Água.....	4
2.1.1.	Água em Moçambique	4
2.1.2.	Factores que afectam a qualidade da água	5
2.1.3.	Propriedades da água.....	6
2.2.	Principais impurezas no tratamento industrial da água	8
2.2.1.	pH	8
2.2.2.	Condutividade	9
2.2.3.	Total de sólidos dissolvidos	9
2.2.4.	Ferro	9
2.2.5.	Turvação.....	10
2.2.6.	Cloretos	10
2.2.7.	Cloro livre.....	10
2.2.8.	Cálcio e Magnésio	11
2.2.9.	Dureza total.....	11
2.2.10.	Sílica.....	11
2.2.11.	Demanda Química de Oxigénio.....	12
2.2.12.	Sulfato	12
2.3.	Desmineralização da água	13
2.3.1.	Coagulação.....	13

2.3.2.	Filtração	14
2.3.3.	Osmose reversa.....	17
2.3.4.	Troca iónica	20
2.4.	Análise multivariada	23
2.4.1.	Análise de regressão múltipla.....	23
2.4.2.	Modelos de regressão	25
3.	Contextualização da área de estudo e métodos experimentais.	26
3.1.	Descrição da área de estudo.....	26
3.1.1.	Planta de Pré-tratamento e Desmineralização da CTM.....	27
3.2.	Metodologia experimental	31
3.2.1.	Colecta das amostras	31
3.2.2.	Reagentes	31
3.2.3.	Equipamentos e instrumentos.....	31
3.3.	Descrição dos equipamentos	32
3.3.1.	Multímetro digital Hach HQ40d	32
3.3.2.	Turbidímetro Hach TL2300	32
3.3.3.	Esterilizador de Ar Quente HAS-T501r	33
3.3.4.	Espectrofotómetro Hach DR6000	33
3.3.5.	Sistema de purificação de água Direct Q-3	33
3.3.6.	Reactor Hach DRB200	34
3.4.	Procedimentos experimentais	34
3.4.1.	pH	34
3.4.2.	Condutividade e Total de Sólidos Dissolvidos	34
3.4.3.	Ferro	35
3.4.4.	Turvação.....	35
3.4.5.	Cloretos	36
3.4.6.	Cloro livre.....	36

3.4.7. Sulfato.....	36
3.4.8. Demanda Química de Oxigênio.....	37
4. Apresentação e tratamento de dados	38
4.1. Dados faltantes	39
4.2. <i>Outliers</i>	40
4.3. Verificação de assunções.....	42
4.3.1. Multicolinearidade	42
4.3.2. Homocedasticidade, Independência e Linearidade	42
4.3.3. Normalidade.....	43
4.4. Construção do modelo	44
4.4.1. Modelo de regressão linear	46
4.5. Análise de Variância.....	46
4.6. Validação dos modelos	47
5. Discussão dos resultados.....	49
6. Conclusões e recomendações	56
6.1. Conclusões.....	56
6.2. Recomendações.....	57
7. Bibliografia.....	58

Lista de figuras

Figura 1 - Repartição dos recursos hídricos terrestres.....	4
Figura 2 - Mapa de Recursos Hídricos de Moçambique.....	5
Figura 3 - Arranjo da molécula de água	7
Figura 4 - Pontes de hidrogénio entre as moléculas água	7
Figura 5 - Escala de pH.....	9
Figura 6 - Composição de um filtro de camada dupla e tripla respectivamente.	15
Figura 7 - Processo de osmose reversa.....	17
Figura 8 - Membrana de Osmose Reversa de módulo espiral	19
Figura 9 - Processo de troca iónica e regeneração em um leito misto	23
Figura 10 - Localização da Central Termoeléctrica de Maputo	26
Figura 11 - Esquema do ciclo de potência instalado na CTM.....	27
Figura 12 – Diagrama do processo de desmineralização da água na CTM	28
Figura 13 - Variação da Tur, Fe_D, EC_D e Fe_C ao longo do tempo	39
Figura 14 - Gráfico Quantil-Quantil: Qui-quadrado da Distância de Mahalanobis	41
Figura 15 - Gráficos de dispersão padronizada.....	43
Figura 16 - Gráfico Percentil-Percentil: Distribuição Normal de Regressão Resíduos padronizados	43

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades físicas da água e compostos similares..	7
Tabela 2 - Principais impurezas no tratamento industrial da água	8
Tabela 3 - Características da membrana de CA e PA.....	18
Tabela 4 - Reagentes usados na realização dos testes	31
Tabela 5 - Equipamentos e instrumentos usados na realização dos testes	31
Tabela 6 - Variáveis consideradas no estudo.....	38
Tabela 7 - Descrição dos dados experimentais obtidos	38
Tabela 8 - Resultados do teste little MCAR	40
Tabela 9 - Dados após a estimação dos valores faltantes e eliminação de outliers.....	41
Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas.....	42
Tabela 11 – Variáveis e coeficientes da regressão obtidos pelo método backward.....	44
Tabela 12 - Teste ANOVA das regressões	47
Tabela 13 - Coeficientes de determinação e desvio padrão das regressões	48

Lista de Siglas

CTM – Central Termoeléctrica de Maputo

Df – Graus de liberdade (*Degrees of freedom*)

AdRMM – Águas da Região Metropolitana de Maputo

COD – Demanda de Química de Oxigénio (*Chemical Oxygen Demand*)

DPD – N, N-dietil-1,4-benzenodiamina (*N, N-diethyl-1,4-benzenediamine*)

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez (*Nephelometric Turbidity Units*)

TDS – Total de Sólidos Dissolvidos (*Total Dissolved Solids*)

UV – Ultravioleta

WTP – Planta de Tratamento de Água (*Water Treatment Plant*)

ACC – Condensador Refrigerado a Ar (*Air Cooled Condenser*)

CA – Acetatos de celulose (*Cellulose Acetate*)

PA – Poliamida (*Polyamide*).

PAC – Policloreto de Alumínio (*Poly-aluminium chloride*)

VIS – Visível

RO – Osmose Reversa (*Reverse Osmosis*)

CIP – *Clean in Place*

SAC – Resina de troca catiónica de ácido forte (*Strong Acid Cation Exchanger*)

WAC – Resina de troca catiónica ácida fraca (*Weak Acid Cation Exchanger*)

SBA – Resina de troca aniónica de base forte (*Strong Base Anion Exchanger*)

WBA – Resina de troca aniónica de base fraca (*Weak Base Anion Exchanger*)

HRSG – Caldeira de recuperação de calor e geração de vapor (*Heat Recover Steam Generator*)

MCAR – Completamente Perdido ao Acaso (*Missing Completely at Random*)

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia eléctrica é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento económico e social de qualquer nação. A Central Termoeléctrica de Maputo (CTM) é um exemplo de infra-estrutura essencial para o atendimento das demandas energéticas do país.

Para o funcionamento eficiente das centrais termoeléctricas, a qualidade da água utilizada no processo é de muito importante. A água desmineralizada é um componente essencial, pois sua pureza reduz a corrosão e a formação de incrustações nos equipamentos, prolongando a vida útil das instalações. Neste contexto, torna-se imperativo compreender como as variações nos parâmetros de qualidade da água da rede influenciam a qualidade da água desmineralizada. Uma análise detalhada desses parâmetros pode fornecer base teórica para otimizar os processos de tratamento de água e melhorar a eficiência operacional da CTM.

O presente relatório de estágio surge com o objectivo de realizar uma análise multivariada para estabelecer equações de regressão linear múltipla que permitam prever a variação do pH, da condutividade eléctrica (EC) e do teor de ferro (Fe) na água desmineralizada, com base nas variações dos parâmetros de qualidade da água da rede.

A metodologia adoptada neste estudo inclui a colecta sistemática de dados dos parâmetros de qualidade da água da rede e da água desmineralizada, seguida da aplicação de técnicas estatísticas para a construção de modelos de regressão. A análise dos resultados fornecerá uma base científica para a implementação de estratégias de monitoramento e controle que visem garantir a produção consistente de água desmineralizada de qualidade constante.

1.1. Formulação do problema e justificativa

Aquando da operação da Central Termoeléctrica de Maputo (CTM), água desmineralizada é produzida para a posteriori ser usada para geração de vapor e de seguida para a produção de energia eléctrica através de um gerador acoplado à uma turbina a vapor.

A necessidade de garantir com que a água esteja sempre de acordo com os parâmetros desejados, faz com que sejam realizados testes diários da qualidade da água em diferentes pontos da planta, de modo a prevenir efectivamente a formação de incrustações, a ocorrência de corrosão e a acumulação de sais nos sistemas térmicos da planta. Com o passar dos anos foram acumulando-se quantidades significativas de dados que sem o tratamento adequado apresentam pouco uso prático, desta forma, surge a necessidade de converter estes dados em conhecimento.

Transformar dados em conhecimento é importante porque permite que o conhecimento seja utilizado na tomada de decisões informadas, identificar tendências, bem como relações complexas entre diferentes variáveis.

Pelo facto de haver ocorrência de variação de mais de dois (2) parâmetros de qualidade da água da rede, entende-se que a análise multivariada é a que pode obter uma análise mais detalhada e compreensiva comparativamente as análises univariada e bivariada.

Realizar uma análise multivariada permite a identificação de relações complexas entre diferentes variáveis e como podem afectar um determinado resultado, o que auxilia na definição de estratégias de investimentos e no estabelecimento de expectativas. Deste modo, esta análise pode ajudar a reduzir riscos e probabilidades de falhas durante a operação.

Este trabalho está focado em utilizar a análise estatística multivariada para verificar como se relacionam os parâmetros de qualidade da água recebida da rede na planta (fornecida pela Águas da Região Metropolitana de Maputo- AdRMM) e os parâmetros de qualidade da água desmineralizada produzida, identificando os parâmetros da água da rede que mais influenciam na variação da qualidade da água produzida, bem como possibilitando a previsão das variações a ocorrer na qualidade da água desmineralizada produzida, sendo assim possível tomar as acções necessárias de modo garantir a continuidade da produção de água desmineralizada com a qualidade desejada.

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo geral

Analisar através da estatística multivariada a qualidade da água desmineralizada produzida na Central Termoeléctrica de Maputo com base nas variações dos parâmetros da água da rede de abastecimento pública.

1.2.2. Objectivos específicos

- Descrever a planta de desmineralização da água da Central Termoeclétrica de Maputo;
- Verificar a adequação dos dados para a construção de um modelo multivariado;
- Construir um modelo multivariado da qualidade água desmineralizada;
- Avaliar a adequação do modelo multivariado construído.

1.3. Metodologia

Para a realização deste relatório de estágio foram seguidas as seguintes fases:

- Pesquisa bibliográfica: onde foram buscadas informações acerca da produção de energia eléctrica em uma central eléctrica de ciclo combinado, operação de plantas de tratamento de água usando membranas de osmose reversa, troca iónica, bem como técnicas de análise estatística multivariada.
- Ensaio experimental e colecta de dados: onde foram realizados testes laboratoriais onde foram obtidos os valores dos parâmetros de qualidade da água desmineralizada e da água da rede.
- Apresentação e tratamento dos dados tratados: onde foram apresentados, tratados e interpretados os dados obtidos com o auxílio do software IBM® SPSS Statistics 26 e Microsoft Excel, como também foram apresentadas as discussões dos resultados.
- Elaboração do relatório: onde foram agrupadas as informações adquiridas durante as etapas anteriores e foi feito o relatório final com base no Regulamento de Culminação de Estudos nos Cursos de Engenharia em vigor na Universidade Eduardo Mondlane.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Água

Três quartos do planeta terra é coberta em água, entretanto boa parte desta não é adequada para uso na forma que é encontrada na natureza. De toda água existente no planeta apenas 3% da água é doce e pode ser usada para o consumo humano, pois os restantes 97% são preenchidos por água salgada (Nalco Company, 2009).

Olhando para as fontes de água doce, verifica-se que 70% da água doce disponível encontra-se em geleiras ou blocos de gelo nos polos, no topo das montanhas como neve e geleiras ou ainda no subsolo em *permafrosts* (camadas do subsolo da crosta terrestre que está permanentemente congelada) desta forma ficando inacessível para o uso. Com isso, fica-se com 1% de toda água disponível na terra que se encontra na superfície e nos lençóis freáticos, para suportar toda a vida terrestre e fornecer recursos hídricos à todas as indústrias (Nalco Company, 2009).

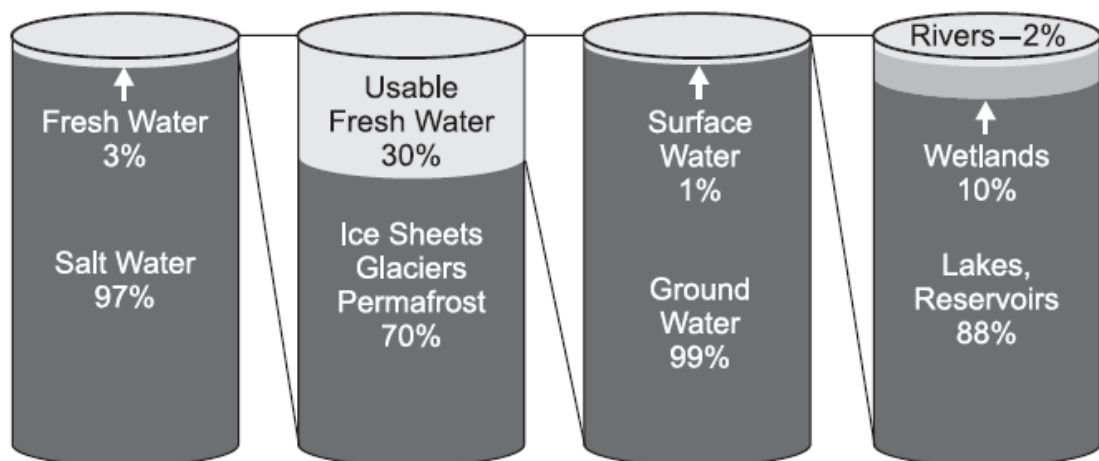


Figura 1 - Repartição dos recursos hídricos terrestres.

Fonte: Nalco Company (2009).

A nível mundial são consumidos mais de quatro (4) trilhões de metros cúbicos de água anualmente, desde valor 70% são usados na agricultura, 20% para uso industrial e os restantes 10% para uso doméstico (LawnStarter, s.d.).

2.1.1. Água em Moçambique

Moçambique tem treze grandes bacias hidrográficas¹ e vinte duas espalhadas pela costa, sendo que a região norte apresenta maior parte das pequenas bacias costeiras, além das grandes bacias como a do Lúrio, Licungo e Rovuma. Na região centro as bacias

¹ Área de drenagem de um rio principal e seus afluentes.

do Púnguè, Búzi, Save e Zambeze são as principais bacias. No sul de Moçambique apresenta a Bacia do Limpopo, bem como os rios Save, Incomáti, Umbeluzi e Maputo (USAID, s.d.).

Aquíferos vulcânicos estão presentes numa extensão limitada ao longo da fronteira sudoeste e na região central, embora estes aquíferos geralmente tenham baixa produtividade. Aquíferos sedimentares são muito mais hidrologicamente produtivos e estão presentes na maior parte do resto de Moçambique, principalmente nas regiões sul e centro-oeste. A água subterrânea geralmente pode ser encontrada em profundidades rasas a moderadas, embora furos de até cem metros podem ser encontrados no Norte (USAID, s.d.).

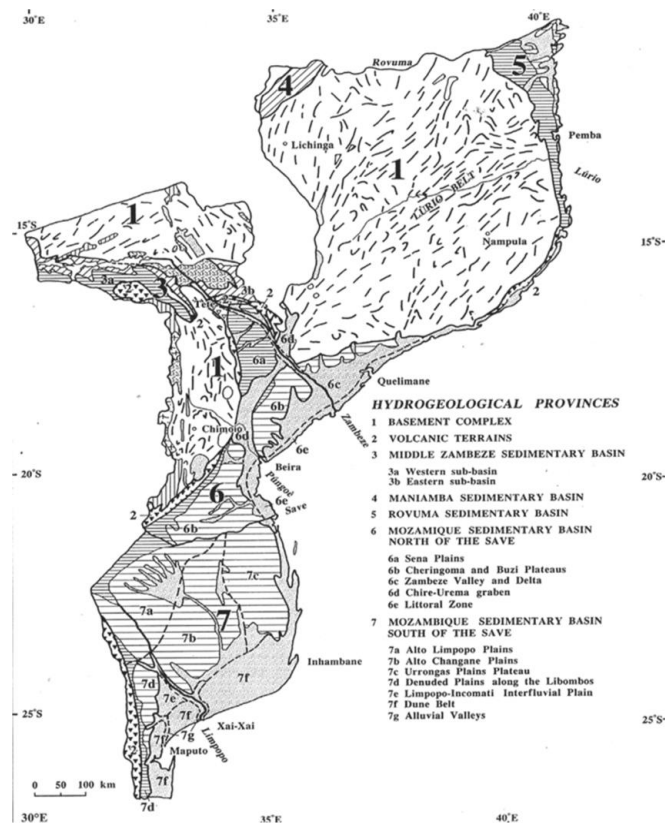


Figura 2 - Mapa de Recursos Hídricos de Moçambique.

Fonte: (Barbieri, et al., 2018)

2.1.2. Factores que afectam a qualidade da água

A Nalco Company (2009) descreve que a qualidade da água proveniente da superfície e dos lençóis freáticos (aquíferos) pode ser afectada por diversos factores naturais, como queda de chuva, características geológicas e mudanças sazonais, assim como, factores humanos como poluição e barragens.

Ainda segundo o mesmo autor, um factor determinante para a variação de minerais na água de lagos e rios é a dissolução de rochas. Outro factor natural que afecta a qualidade da água superficial é a queda de chuvas pode alterar significativamente a qualidade da água devido a rápida diluição dos minerais no rio.

A composição da água da subterrânea é afectada maioritariamente pelo solo e pelas rochas por onde a água flui até chegar ao aquífero. Por exemplo, a dureza (cálcio e magnésio) é derivada do calcário e sílica do quartzo (Applebaum, 1968).

A variação de temperatura sazonal é mais um factor abordado pela Nalco Company (2009) que causa variação da qualidade da água que complica o seu tratamento, causando retenção de ar dos filtros durante o Inverno devido ao aumento da solubilidade dos gases e maior viscosidade da água, o que causa queda de pressão através dos leitos de filtro. A mudança sazonal da temperatura da água pode também causar problemas nos sistemas de refrigeração, as velocidades mais baixas da água usadas durante o Inverno podem permitir a formação de incrustações nos trocadores de calor.

É importante notar que a temperatura de descarga da água de refrigeração pode ser considerada poluição, dado que, o calor adicional adquirido pela água na planta pode criar um ambiente impróprio para o desenvolvimento da vida aquática visto que, o aumento da temperatura causa a redução da concentração de oxigénio dissolvido na água assim como propicia o desenvolvimento de fungos e bactérias que ferem a vida aquática (PrePara Enem, s.d.).

2.1.3. Propriedades da água

A fórmula molecular para a água é H_2O , que pode fornecer informação sobre a composição e a massa molecular. A geometria da molécula consiste em duas ligações O-H de comprimento 0.096 nm com um ângulo de 104.5° entre si (Sharp, 2001). A água é uma molécula dipolar pois apresenta carga parcial negativa no átomo de oxigénio e carga parcial positiva para os átomos de hidrogénio. Muitas substâncias são dissolvidas em água devido a esta polaridade (Nalco Company, 2009).

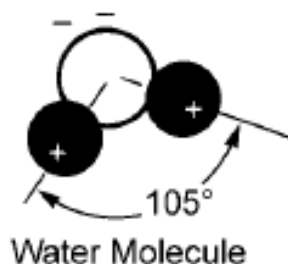


Figura 3 - Arranjo da molécula de água

Fonte: Nalco Company (2009)

A natureza dipolar da água causa agregação da sua molécula, desde modo, uma molécula de água forma pontes de hidrogénio com 4 moléculas de água adjacentes. Esta particularidade faz com que a energia necessária para romper as pontes de hidrogénio e libertar uma molécula de água para formar vapor seja alta comparativamente a compostos químicos similares (ver tabela 1), o que resulta em características como elevado ponto de ebulição, alta tensão superficial e elevada viscosidade (Sharp, 2001).

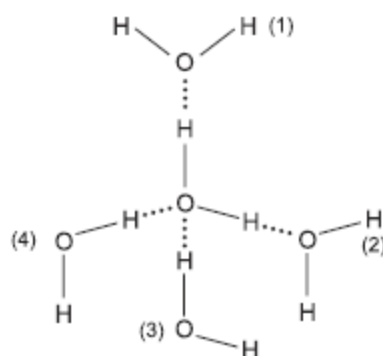


Figura 4 - Pontes de hidrogénio entre as moléculas água

Fonte: Nalco Company (2009)

A água ao ser congelada é expandida, resultando em uma densidade menor que no seu estado líquido, o que não é comum para muitos líquidos. Esta propriedade advém do facto de as pontes de hidrogénio formarem uma estrutura cristalina, expandindo o gelo acima do seu volume como líquido (Ashish, 2022).

Tabela 1 - Comparação entre as propriedades físicas da água e compostos similares

Propriedade	Água	Metanol	Éter Dimetil
Fórmula	H ₂ O	CH ₃ OH	(CH ₃) ₂ O
Massa molecular (g/mol)	18	32	46
Densidade (kg/L)	0.998	0.7914	0.713
Ponto de ebulição (K)	373	338	248

Propriedade	Água	Metanol	Éter Dimetil
Volume molecular (nm ³)	0.0299	0.0420	0.107
Calor específico (J/K.mol)	75.2	81.0	109.0
Calor de vaporização (kJ/mol)	41.4	37.1	18.4
Tensão superficial (mN/m)	72.8	22.6	16.4
Viscosidade (μPa.s)	1002	550	233

Fonte: (Sharp, 2001) (adaptado)

2.2. Principais impurezas no tratamento industrial da água

A tabela 2 lista as principais impurezas que podem ser encontradas no durante a desmineralização da água. Estas impurezas podem ser classificadas em **iônicas e solúveis, insolúveis e gasosa**.

Tabela 2 - Principais impurezas no tratamento industrial da água

Iônico e solúvel		Insolúvel	Gasoso
Catiónico	Aniónico		
Cálcio	Bicarbonato	Matéria suspensa	Dióxido de carbono
Magnésio	Carbonato	Cor	Sulfato de Hidrogênio
Sódio	Hidróxido	Matéria Orgânica	Amoníaco
Potássio	Sulfato	Sílica Coloidal	Metano
Amônio	Cloreto	Microrganismo	Oxigênio
Ferro	Nitrato	Bactéria	Cloro livre
Manganês	Fosfato	Óleo	
	Sílica		
	Cor		

Fonte: (Applebaum, 1968)

Os componentes da água podem ser completamente dissolvidos na fonte de água, porém se tornarem insolúveis devido a mudança na temperatura e concentração no processo em que a água é usada.

2.2.1. pH

O pH representa o valor da concentração de hidrogênio, é um número adimensional que indica o nível de acidez ou basicidade de uma solução. Todos os problemas mais relevantes durante o tratamento de água (corrosão, formação de incrustações e proliferação microbológica) estão associados de alguma forma ao pH (Omer, 2020).

A figura 5 mostra uma escala de pH de 0 a 14, sendo 7 neutro, pH inferior a 7 indica que se trata de uma solução ácida, enquanto que, pH superior a 7 indica que se trata de uma solução básica. Uma mudança de uma unidade em uma escala de pH representa uma

mudança de 10 vezes no nível de acidez, de modo que, uma solução com pH de 7 é 100 vezes mais ácida do que uma solução com pH de 9 e uma solução com pH 4 é 1000 vezes mais ácida do que uma solução com pH 7.

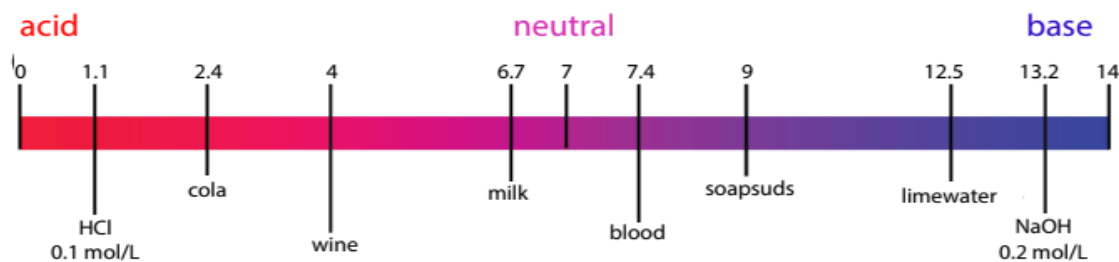


Figura 5 - Escala de pH

Fonte: (YSI, 2015)

2.2.2. Condutividade

Condutividade é a capacidade de a água conduzir corrente eléctrica. Esta habilidade está directamente relacionada com a concentração de iões presentes na água. Um dos maiores problemas causados pela condutividade alta é a formação de incrustações, formado uma camada isolante, reduzindo a eficiência de transferência de calor, obrigando a usar mais combustível para compensar a perda de calor. A condutividade é geralmente medida em microsiemens ou milisiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$ or mS/cm) (Fondriest Environmental, Inc, 2014).

2.2.3. Total de sólidos dissolvidos

A água é considerada um solvente universal pela sua habilidade de dissolver moléculas de diversas substâncias, e o número de partículas dissolvidas por unidade de volume de água é chamada total de sólidos dissolvidos (*Total Dissolved Solids – TDS*).

Total de sólidos dissolvidos são a soma de todas as substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas na água e geralmente variam de 25 a 2500 mg/L. A principal utilidade dos sólidos dissolvidos nos processos industriais é determinar o limite até a água pode ser concentrada antes de ser necessário descartar, pois altas concentrações causam a formação de incrustações (Nalco Company, 2009).

2.2.4. Ferro

Ferro (Fe) ocorre naturalmente de forma geral na água subterrânea, em quantidades variáveis de ferro dependendo da área geológica, em solução como ferro solúvel (Fe^{2+}), entretanto, quando exposto ao oxigénio pode formar ferro insolúvel (Fe^{3+}). Apesar de ocorrer naturalmente, o ferro também é produto da corrosão das condutas, assim sendo, o ferro presente na água pode ser resultado da dissolução do ferro das condutas e não

necessariamente do ferro remanescente após a passagem pela planta de tratamento de água (Nalco Company, 2009).

A incrustação de ferro nos trocadores iônicos causa uma perda de capacidade do sistema. A melhor maneira de evitar perdas de capacidade é a remoção de ferro da água bruta por um pré-tratamento antes da desmineralização no trocador iônico. Óxidos de ferro podem precipitar na caldeira causando corrosão e agindo como isolamento térmico.

2.2.5. Turvação

A turvação é a medida da clareza relativa da água. É uma medida da quantidade de luz que é espalhada pelos sólidos suspensos na água quando luz é emitida através da amostra de água. Os materiais que tornam a água turva incluem argila, matéria orgânica e inorgânica e outros organismos microscópicos (Water Science School, 2018).

A turvação é um parâmetro importante pois pode causar a formação de incrustações nas membranas de osmose reversa assim, fornecer área de contacto para a adsorção de metais pesados assim como, causar entupimento nos trocadores de calor. A turvação é medida em Unidade Nefelométrica de Turbidez (*Nephelometric Turbidity Units* – NTU).

2.2.6. Cloretos

O cloreto (Cl^-) ocorre naturalmente em águas subterrâneas e superficiais, mas a presença de concentração relativamente alta de cloreto em água doce (cerca de 250 mg/L ou mais) pode indicar poluição das águas. Cloretos podem entrar em águas superficiais através de várias fontes, incluindo rocha contendo cloreto, escoamento agrícola e mistura com águas residuais (Omer, 2020).

O cloreto está associado à corrosão devido aos compostos formados com ele; por exemplo, cloreto de magnésio (MgCl_2) pode gerar ácido clorídrico (HCl) quando aquecido. O íon cloreto é fundamental na quebra de películas passivantes (camada na superfície do metal que age como barreira para adicional corrosão) que protegem metais ferrosos e ligas contra a corrosão (Aqua Pure Filters, s.d.).

2.2.7. Cloro livre

O cloro livre (Cl_2) não ocorre naturalmente na água, geralmente é adicionada com o objectivo de controlar o desenvolvimento microbiano e melhorar a remoção da cor na fase de pré-tratamento antes da membrana de osmose reversa. Membranas de osmose reversa são muito sensíveis a presença de cloro livre, a exposição de cloro livre resultado

na degradação quase imediata membranas, o que resulta na redução significativa da rejeição de sais. O dano é irreversível e continua desde que a membrana seja exposta ao oxidante (Kucera, 2010).

2.2.8. Cálcio e Magnésio

O cálcio (Ca^{2+}) é a principal componente da dureza na água, está presente em muitos minerais principalmente calcário, e está geralmente na margem entre 2 e 200 mg/L como Ca. É um factor de grande importância na determinação do potencial de formação de incrustações ou tendência corrosiva da água.

O magnésio (Mg^{2+}) é habitualmente responsável por um terço da dureza total, sendo que os restantes dois terços sendo dureza causada pelo cálcio. Geralmente está na margem entre 10 e 50 mg/L como Mg. Dado que o carbonato de magnésio (MgCO_3) é mais solúvel que o carbonato de cálcio (CaCO_3), o magnésio raramente é um componente importante na formação de incrustações, excepto nos casos onde o silicato (SiO_3^{2-}) está presente na água (Nalco Company, 2009).

2.2.9. Dureza total

A dureza da água é definida como o conteúdo de cationes metálicos divalentes presentes na água. Cálcio dissolvido e magnésio são os dois únicos cationes divalentes encontrados em níveis apreciáveis na maioria das águas, estes entram na água principalmente pelo contacto com rochas, particularmente depósitos de calcário. Tanto o cálcio quanto o magnésio existem principalmente ligados ao bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) ou cloreto. Quando a água dura evapora ou é aquecida acima de 61°C o bicarbonato se converte em carbonato (CO_3^{2-}) e precipita com cálcio para formar incrustações de carbonato de cálcio (Omer, 2020; Helen E. Diggs, 2009).

Os efeitos da dureza da água nas condutas variam com a concentração mineral, temperatura e pH. Os problemas mais notórios associados à formação de depósitos minerais de água dura são a diminuição da eficiência e longevidade funcional do equipamento exposto a água dura aquecida (Helen E. Diggs, 2009).

2.2.10. Sílica

Sílica (SiO_2) está presente em quase todos os minerais, e é encontrado na água doce entre concentrações de 1 e 100 mg/L. A sílica pode estar dissolvida, entretanto é maioritariamente coloidal devido a sua interacção com adsorventes como óxido de magnésio (MgO) e hidróxido de ferro [$\text{Fe}(\text{OH})_3$].

A existência da sílica pode causar a formação de incrustações na caldeira, e por ser volátil a altas temperaturas pode se depositar nas pás da turbina. A sílica também pode na presença de ferro e alumínio rapidamente formar silicatos destes metais, causando a formação de incrustações nas membranas de osmose reversa (Omer, 2020; Nalco Company, 2009).

2.2.11. Demanda Química de Oxigénio

A demanda química de oxigénio (*Chemical Oxygen Demand* – COD) é um parâmetro que mede todos os compostos orgânicos: as substâncias biodegradáveis e as não biodegradáveis. É um teste químico feito usando oxidantes fortes (dicromato de potássio - $K_2Cr_2O_7$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e calor, e o resultado pode estar disponível em apenas 2 h (Omer, 2020).

A demanda de oxigénio é um parâmetro crítico para analisar o impacto da poluição orgânica na água, pois quando as águas residuais tratadas são devolvidas ao meio ambiente, elas podem colocar materiais orgânicos na água. Altas concentrações de COD em águas residuais indicam a presença de substâncias orgânicas que podem diminuir a quantidade de oxigénio dissolvido, isso tem impactos negativos no meio ambiente, como a morte de animais e vegetais (MN Editors, 2022).

2.2.12. Sulfato

Sulfatos (SO_4^{2-}) ocorrem naturalmente na água, são dissolvidos na água a partir de certas rochas como gipso, estando geralmente na água com concentrações entre 5 e 200 mg/L como SO_4^{2-} (Nalco Company, 2009).

A presença de sulfato em caldeiras e sistemas de refrigeração pode levar a consequências negativas, como formação de incrustações sólidas como o sulfato de cálcio ($CaSO_4$), e corrosão pois aumenta a acidez da água na caldeira combinado com outros iões como o hidrogénio, afectando a eficiência e a vida útil dos equipamentos.

De forma geral, os efeitos negativos das impurezas da água na indústria podem ser descritos da seguinte forma:

- Formação de depósitos e incrustações nas cadeiras e trocadores de calor, agindo desta forma como isolantes;
- Formação de incrustações nas membranas de osmose reversa;
- Corrosão das caldeiras, trocadores de calor e condutas;

- Baixa qualidade de vapor gerado, sujando os equipamentos que usam vapor reduzindo a sua eficiência.

2.3. Desmineralização da água

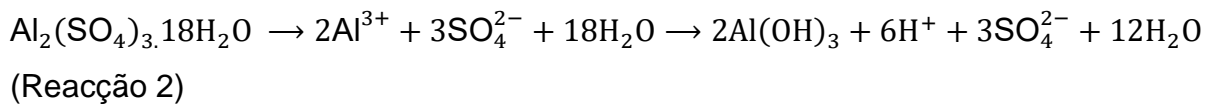
Como abordado anteriormente, a água na natureza apresenta muitas impurezas que podem ser prejudiciais aos processos industriais, particularmente para a formação de vapor. Trocares iónicos e membranas de osmose reversa podem remover impurezas iónicas, no entanto, a água contém muitas outras impurezas não iónicas que devem ser removidas no pré-tratamento, que é projectado para minimizar ou evitar a deposição dessas impurezas e consequentemente formação de incrustações nos trocadores iónicos e nas membranas de osmose reversa, elevando desta forma a vida útil dos equipamentos.

2.3.1. Coagulação

A coagulação envolve o uso de compostos catiónicos para neutralizar a carga negativa das partículas suspensas na água. Metais trivalentes, como Fe^{3+} e Al^{3+} são coagulantes comumente usados, estes reagem com água para formar produtos de hidrólise e precipitar, que a seguir reagem com partículas com carga negativa para originar microflocos. A neutralização da carga das partículas permite que as partículas se aproximem e se criem partículas maiores que se depositam mais rapidamente. O uso de coagulantes é importante para o efectivo e consistente desempenho dos sistemas de filtração granular (Hendricks, 2011; Kucera, 2010; Voutchkov, 2017).

Os coagulantes podem ser sais inorgânicos ou compostos orgânicos. Os inorgânicos incluem sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$ e cloreto férrico (FeCl_3) e os orgânicos incluem poliaminas. Os sais de alumínio não são geralmente usados devido a dificuldade em manter o alumínio na sua forma dissolvida, mesmo em baixas concentrações, com isso, pequenas quantidades de alumínio podem causar incrustações irreversíveis nas membranas de osmose reversa. Por outro lado, o cloreto de polialumínio (*Poly Aluminium Chloride* - PAC) foi desenvolvido como uma alternativa, o PAC é um coagulante pré-hidrolisado $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}]$, assim, o PAC obtém melhor coagulação e forma flocos rapidamente, tornando-se um produto muito mais eficiente, assim como também possui doses mais baixas de alumínio, portanto, deixando significativamente menos resíduos de alumínio (Chant, 2022; Kucera, 2010; Mukherjee, 2020; Voutchkov, 2017).





Mukherjee (2020) destaca as seguintes vantagens do PAC sobre o sulfato de alumínio:

- Funciona em uma concentração muito menor. Como regra geral, as doses de PAC são aproximadamente um terço daquelas necessárias ao usar sulfato de alumínio;
- Deixa menos resíduos de alumínio na água tratada, e;
- Aplicável em uma ampla faixa de pH.

As reacções entre os coagulantes e os constituintes da água são influenciadas por diversos factores (como pH e dosagem) deste modo, é impossível prever com precisão a quantidade de coagulante que irá reagir, assim sendo, a dosagem em cada caso deve ser determinada por testes laboratoriais como *Jar Test* (Cheremisinoff, 2002).

2.3.2. Filtração

A filtração é um procedimento em que se promove a passagem de uma mistura sólido-líquido através de um meio poroso (meio filtrante) que retém os sólidos (bolo de filtração) deixando passar o líquido (filtrado).

Filtros de meio granular são os frequentemente usados no tratamento de água, são geralmente aplicados para remoção de sólidos suspensos na margem de 5 a 50 mg/L, onde um efluente com turbidez menor que 1 NTU é necessário. Os sólidos suspensos filtrados são removidos do filtro retirando o filtro de funcionamento e realizando uma lavagem em contracorrente (*backwashing*) do leito (Nalco Company, 2009).

Os filtros de meio granular podem ser classificados de acordo com a composição e arranjo usados na filtração de água:

- Camada única – usando apenas areia ou antracite;
- Camada dupla – usando antracite e areia;
- Camada tripla – usando antracite, areia e garnet.

2.3.2.1. Filtro de camada tripla

Os filtros de camada tripla (*Multimedia Filter* – MMF) podem remover partículas com tamanho de até cerca de 10 µm, e com a adição de coagulante pode se alcançar a remoção de partículas com tamanho entre 1 - 2 µm. Filtros de camada tripla contêm camadas graduadas de antracite por cima de areia por cima de garnet. Não há limite distinto entre cada uma das camadas, há uma transição gradual de uma densidade de

material e tamanho para o próximo, de outra forma haveria um acúmulo de partículas em cada interface. Partículas maiores são removidas no topo através da antracite, enquanto partículas menores são posteriormente removidas através da areia e garnet. Filtros de camada tripla oferecem filtração mais fina do que os filtros de camada dupla (antracite e areia) devido à natureza relativamente fina da garnet adicional (Kucera, 2010).

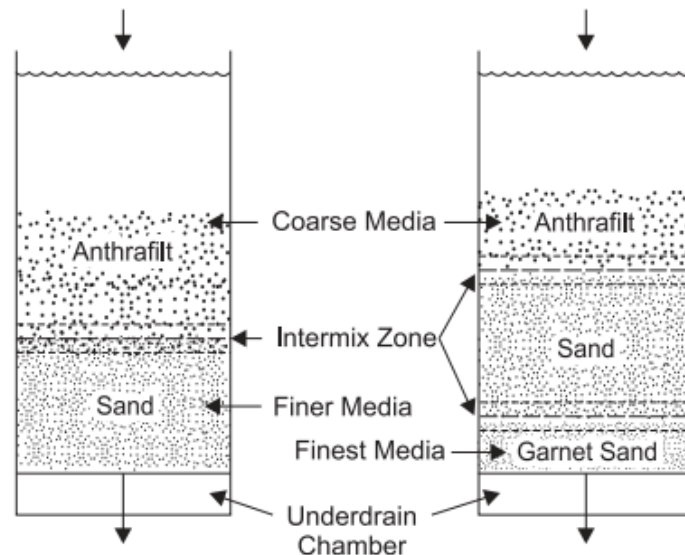


Figura 6 - Composição de um filtro de camada dupla e tripla respectivamente.

Fonte: Nalco Company (2009)

Um filtro de meio granular só pode operar devidamente se o sistema lavagem reversa usado limpar eficientemente o material removido pelo filtro. De modo geral, recomenda-se realizar a lavagem reversa quando a diferença de pressão se eleva até 70 kPa acima do normal. Os métodos usados frequentemente para realizar a lavagem reversa em filtros de meio granular são:

- Lavagem reversa com água somente
- Lavagem reversa com água e sopro de ar
- Lavagem reversa combinada de ar e água

O fluxo da lavagem reversa depende do tamanho do meio poroso, o tipo de meio poroso, a temperatura da água e do tipo de sistema de lavagem reversa usado, bem como a configuração do filtro (Buecker, 2006; Nalco Company, 2009).

2.3.2.2. Filtros de carvão activado

Filtros de carvão activado são usados para reduzir a concentração de compostos orgânicos e para remover oxidantes como cloro livre da alimentação das membranas de osmose reversa.

Carvão activado deriva de materiais de origem natural como hulha, madeira e ossos. Estes materiais são queimados em um ambiente de baixo oxigénio para criar carvão, que depois é activado por vapor, dióxido de carbono ou oxigénio, produzindo carvão altamente poroso, fornecendo desta forma maior capacidade de adsorção ao carvão (Buecker, 2006).

Cloro livre e outros oxidantes são removidos usando carvão activado por reacções de oxidação/redução:



Onde: C* = carbono e C*O = carbono oxidado

A remoção de compostos orgânicos é um processo de adsorção. A capacidade de remoção de compostos orgânicos é uma função da temperatura, pH, natureza do composto orgânico, e concentração de modo que, não é possível prever com precisão a capacidade do filtro de carvão activado.

Filtros de carvão activado não são projectados para remover sólidos suspensos ou bactérias. Na verdade, os filtros de carvão activado encorajam o desenvolvimento de bactérias já que os compostos orgânicos removidos no leito fornecem nutrientes aos micróbios. Os filtros são lavados em contracorrente ocasionalmente para remover quaisquer sólidos suspensos que podem ter se acumulado no meio filtrante. A lavagem reversa não remove os compostos absorvidos nos poros do carvão activado. Embora algumas instalações regenerem o carvão activado usando vapor ou outras técnicas, a maioria opta por substituir o leito quando exausto (Kucera, 2010).

2.3.2.3. Filtro de cartucho

O filtro de cartucho é geralmente projectado na planta após os filtros de pré-tratamento e antes da bomba de alta pressão para reter pequenas partículas, colóides, microorganismos, para evitar o bloqueio da membrana e osmose reversa.

Os filtros de cartucho não têm capacidade de lavagem reversa, então eles devem ser substituídos quando ficarem bloqueados. Medidores de pressão são necessários na entrada e saída de água do filtro de cartucho, pois com o aumento do tempo de operação, a resistência de operação do elemento filtrante aumenta gradativamente devido à retenção do material no meio filtrante. Quando a diferença de pressão de operação

atingir 0,1MPa, o elemento filtrante deve ser substituído (Haiyuan Water Treatment Plant, 2021).

Geralmente os filtros de cartucho são feitos de polipropileno porque resiste ao crescimento de bactérias. É importante notar que após a instalação de novos filtros de cartucho, o efluente inicial deve ser drenado. Isso é necessário para evitar a incrustação das membranas de osmose reversa por materiais usados na fabricação do meio filtrante de cartucho. No caso de filtros de polipropileno, ftalatos são usados em sua fabricação, tão pouco quanto 50 ppb de ftalato irão incrustar irreversivelmente uma membrana de osmose reversa (Kucera, 2010).

2.3.3. Osmose reversa

Osmose reversa (*Reverse Osmosis – RO*) é uma técnica de desmineralização a base de membrana semipermeável usada para separar sólidos dissolvidos de uma solução. Membranas de forma geral agem como uma barreira selectiva, barreiras que permitem algumas substâncias (como água) selectivamente atravessarem a membranas enquanto retêm selectivamente outras substâncias dissolvidas. Durante a RO uma pressão superior a pressão osmótica é exercida no compartimento que contém a solução concentrada, que força a água a atravessar a membrana na direcção inversa da osmose.

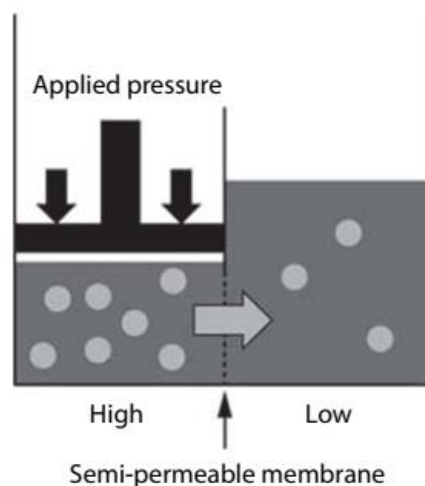


Figura 7 - Processo de osmose reversa

Fonte: Kucera (2010)

Devido a resistência adicional originada pelas membranas, a pressão aplicada necessária para a realização da osmose reversa é significativamente superior à pressão osmótica.

2.3.3.1. Aplicações da Osmose Reversa

A osmose reversa pode ser usada para purificar água ou para concentrar e recuperar substâncias dissolvidas na corrente de alimentação. O processo de RO é usado em conjunção com trocador iónico de leito misto na água de alimentação de caldeiras de alta pressão, pois reduz a frequência de regeneração das resinas, assim, reduzindo a quantidade de ácido, base e efluente de regeneração que deve ser armazenado e neutralizado (Gama, 2017).

Outras aplicações comuns da RO incluem:

- Dessalinização de água do mar para uso potável;
- Geração de água pura para indústria electrónica, farmacêutica e de bebidas, e;
- Concentração de adoçante de milho.

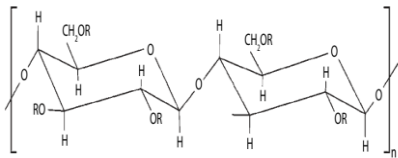
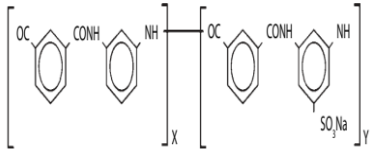
2.3.3.2. Membranas de osmose reversa

O desempenho da osmose reversa é directamente dependente das propriedades do material da membrana, mais especificamente a natureza química do polímero constituinte da membrana e a estrutura da membrana.

Existem no mercado essencialmente dois tipos de membranas de osmose reversa:

- Membranas de acetatos de celulose (*Cellulose Acetate – CA*);
- Membrana de poliamida (*Polyamide – PA*).

Tabela 3 - Características da membrana de CA e PA

Propriedade	Membrana CA	Membrana PA
Estrutura química		
Rejeição de sais (%)	~ 95	~ 98+
Rejeição de sílica (%)	~ 85	~ 96+
Margem de pH	4 – 6	3 – 10
Pressão de alimentação	1.4 – 4.1 MPa	1 – 2.8 MPa
Temperatura	Até 35 °C	Até 45 °C
Carga superficial	Neutra	Negativa (aniónica)
Tolerância a cloro	Até 1 ppm	<0.02 ppm
Crescimento biológico	Não afecta	Causa incrustações
Tolerância a incrustações	Boa	Aceitável
Rugosidade da superfície	Lisa	Rugosa

Fonte: Kucera (2010) adaptado

As membranas de PA foram desenvolvidas com o objectivo de melhorar o desempenho das membranas de CA, particularmente a alta pressão de operação e baixa rejeição de sais das membranas de CA impediam que a tecnologia de osmose reversa se tornasse comercialmente aceitável.

Os módulos enrolados em espiral, mais utilizados actualmente, são constituídos por duas camadas de membranas que são coladas em lados opostos pelo espaçador do canal de permeado. O envelope formado é enrolado ao redor de um tubo perfurado, colocado no interior do cana permeado, colocando-se uma tela plástica externamente ao envelope, de forma a obter um canal para a corrente de alimentação (Kucera, 2010).

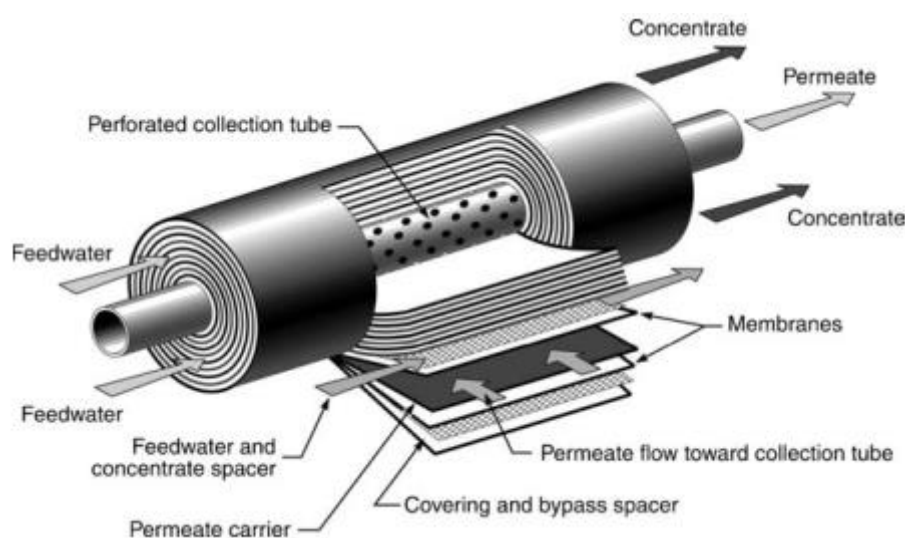


Figura 8 - Membrana de Osmose Reversa de módulo espiral

Fonte: Nalco Company (2009)

2.3.3.3. Causas comuns para a redução de eficiência

Se a quantidade de água requerida não é produzida, a eficiência da planta e os custos de operação são afectados. Se a qualidade da água produzida baixar, equipamentos subsequentes como trocadores iónicos irão requerer manutenção adicional, elevando os custos de operação. Para manter um equipamento de RO na eficiência óptima (Nalco Company, 2009) destaca a necessidade de prevenir e controlar a:

a) Formação de incrustações

Como abordado anteriormente, as incrustações das membranas são causadas por partículas e micróbios que se prendem aos espaçadores de canal na superfície das membranas. Membranas com incrustações exibem dois principais problemas de

performance: Elevada pressão de operação (ou baixo fluxo de permeado) e elevada queda de pressão.

b) Formação de depósitos

A formação de depósitos (*scaling*) ocorre quando a selectividade da membrana causa supersaturação e precipitação de sais minerais solúveis, como carbonato de cálcio (CaCO₃) e sulfato de cálcio (CaSO₄). Membranas com depósitos exibem dois principais problemas de performance: Elevada pressão de operação (ou baixo fluxo de permeado) e baixa rejeição de sais.

Uma das formas de prevenir a formação de depósitos é reduzir a taxa de recuperação (percentagem de água efluente que é convertida em permeado), entretanto, isto implica uso ineficiente da água assim, não sendo uma solução prática para o uso industrial. Outra forma de reduzir a formação de depósitos nos sistemas de RO é o uso de **anti incrustantes**, sendo este o mais atractivo pelos seguintes motivos: Baixos custos, eliminação da necessidade de lidar com substâncias perigosas, aplicável em uma larga margem de depósitos e melhor qualidade de permeado.

Kucera (2010) destaca que os anti-incrustantes operam através de um dos seguintes métodos:

- **Inibição de limiar** – a habilidade de manter sais supersaturados em solução;
- **Modificação de cristais** – a habilidade de mudar a forma dos cristais, resultando em depósitos moles e não aderentes;
- **Dispersão** – a habilidade de transmitir uma carga altamente negativa aos cristais, desta forma deixando eles separados e impedindo a propagação.

c) Degradação das membranas

A degradação das membranas ou perda de integridade pode ser causada por ataque químico (por exemplo, ataque de clore livre residual ou lavagem frequente da membrana) ou por estresse físico (por exemplo, golpe de ariete ou queda de pressão excessiva), resultando em menor rejeição de sais e maior quantidade de sólidos dissolvidos no permeado. Para minimizar a degradação das membranas deve ser removido o cloro livre da alimentação das membranas, realizar a operação adequada e redução da frequência de lavagem.

2.3.4. Troca iónica

Troca iónica é uma reacção química reversível onde um ião em solução é trocado por ião com carga semelhante ligado a uma partícula sólida imóvel. Actualmente, as resinas orgânicas sintéticas tornaram-se a principal escolha devido às suas propriedades que permitem serem adaptadas a requisitos específicos.

Durante o processo de desmineralização da água, as resinas desempenham um papel crucial na troca de iões de hidrogénio (H^+) por iões carregados positivamente, como cálcio e sódio. Da mesma forma, os iões hidroxilo (OH^-) são trocados por iões carregados negativamente, como sulfatos e cloretos. Essa troca garante um equilíbrio entre a quantidade de iões H^+ e OH^- , resultando em água relativamente pura e neutra após o tratamento de troca iónica (Cheremisinoff, 2002).



Como a reacção entre o H^+ e o OH^- é extremamente rápida, a reacção 6 se completa instantaneamente, o que, por sua vez, actua como a força motriz para impulsionar as reacções em 4 e 5 em uma direcção rápida.

2.3.4.1. Resinas de troca iónica

As resinas de troca iónica são polímeros sintéticos conhecidos por sua insolubilidade em vários solventes. Essas resinas exibem a capacidade de reagir como se fossem ácidos, bases ou sais, no entanto, existe uma diferença fundamental entre as resinas e os ácidos, bases ou sais tradicionais. Nas resinas de troca iónica, apenas os catiões (nas resinas de troca catiónica) ou os aniões (nas resinas de troca aniónica) estão livres para participar activamente das reacções químicas. Esse comportamento selectivo permite que eles troquem iões de forma eficaz durante vários processos. (Jha & Jha, s.d.).

As resinas de troca iónica podem ser classificadas nas quatro categorias a seguir.

- Resina de troca catiónica de ácido forte (SAC: *Strong Acid Cation Exchanger*);
- Resina de troca catiónica ácida fraca (WAC: *Weak Acid Cation Exchanger*);
- Resina de troca aniónica de base forte (SBA: *Strong Base Anion Exchanger*);
- Resina de troca aniónica de base fraca (WBA: *Weak Base Anion Exchanger*).

As resinas de ácido forte e base forte funcionam em toda a faixa de pH do meio. A resina de troca catiónica de ácido fraco e a resina de troca aniónica de base fraca. funcionam em intervalos de pH básicos e ácidos, respectivamente. Como resultado, aniões fortes como sulfato e cloreto são preferidos por trocadores de aniões de base fraca. Isso levou a uma importante aplicação no tratamento de água, em que iões como sulfato e cloreto são primeiro removidos por um trocador de aniões de base fraca e os chamados aniões fracos, como como silicato são removidos em uma segunda coluna contendo um trocador de aniões de base forte (Venkateswarlu, 1996).

2.3.4.2. Leito misto

Os trocadores iónicos de leito misto (*Mixed Bed* – MB) contêm duas resinas, a SAC e a SBA que são homogeneamente misturadas quando em serviço. Quando esgotadas, as componentes das resinas são separadas por lavagem reversa. Devido à diferença de densidade entre as duas resinas, a resina SAC permanece no fundo enquanto a resina SBA repousa no topo (Nalco Company, 2009). O trocador funciona como se consistisse em milhões de unidades de trocadores catiónicos e aniónicos em miniatura. Um trocador MB geralmente serve para polir de efluente de um sistema de trocadores catiónicos e aniónicos, unidade de osmose reversa ou outro arranjo de purificação (Buecker, 2006).

As reacções químicas são as mesmas descritas anteriormente para as resinas de catiónicas e aniónicas em unidades separadas, mas com diferenças muito importantes. Em leitos separados, o uso de resinas de SAC gera ácidos minerais a partir de iões presentes na água, criando um ambiente ácido que causa o com que os iões de sódio sejam liberados na água tratada. A presença de resinas de SBA contribui com iões hidroxilo, aumentando ainda mais a condutividade do efluente. Por outro lado, em um leito misto, o ambiente ácido formado pelas resinas SAC é imediatamente neutralizado pelas resinas SBA adjacentes, reduzindo a fuga de sódio e mantendo um ambiente neutro (Venkateswarlu, 1996).

2.3.4.3. Regeneração de trocadores iónicos

Quando uma resina de troca iónica atinge um ponto em que todos os seus locais de troca, que inicialmente continham iões H^+ ou OH^- , agora estão preenchidos com outros catiões ou aniões, a resina é considerada "exausta" ou "saturada". Para restaurar a

capacidade de troca iónica da resina, ela deve passar por uma regeneração. A regeneração envolve equilibrar a resina saturada com um ácido forte (para o caso de resinas catiónicas) ou uma base forte (para o caso de resinas aniónicas), visto que, as reacções de troca iónica são reversíveis (Gama, 2017; Venkateswarlu, 1996).

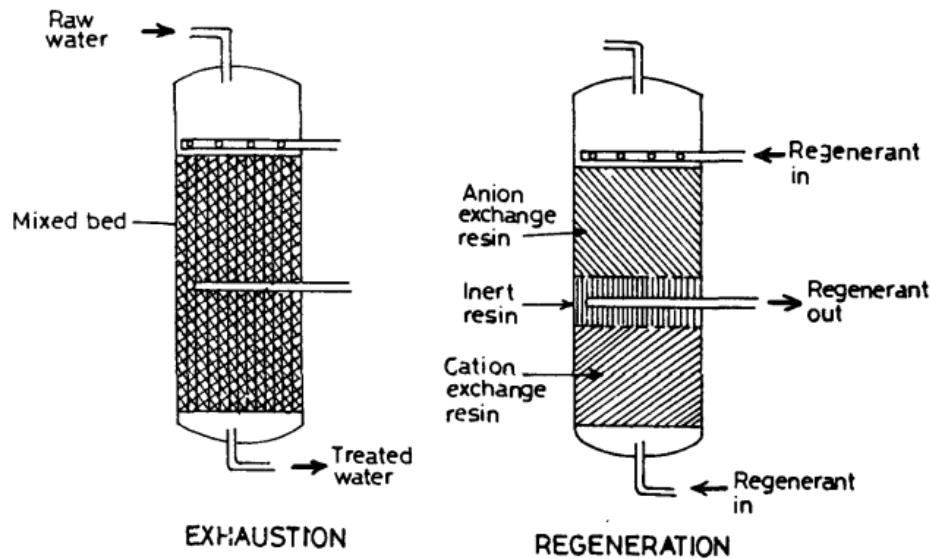


Figura 9 - Processo de troca iónica e regeneração em um leito misto

Fonte: Venkateswarlu, 1996

2.4. Análise multivariada

Análise multivariada se refere a todas as técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre indivíduos ou objectos sob investigação. Assim, qualquer análise simultânea de mais do que duas variáveis pode ser considerada, a princípio, como multivariada (Hair, Black, Babin, & Anderson, 2019).

Segundo Johnson & Wichern (2007) a análise multivariada é usada na simplificação da representação de um fenómeno retendo informações importantes, assim como, oferece uma visão mais abrangente e detalhada de como as variáveis estão interconectadas e como contribuem para os resultados observados.

2.4.1. Análise de regressão múltipla

A análise de regressão múltipla é uma técnica estatística que pode ser usada para analisar a relação entre uma única variável dependente (resposta) e várias variáveis

independentes (preditor). Embora suas aplicações sejam sempre crescentes, Hair et al. (2019) destacam que estas recaem em duas grandes classes de problemas de pesquisa:

- **Previsão** – envolve o quanto que uma variável estatística independente da regressão pode prever a variável dependente;
- **Explicação** – examina os coeficientes de regressão (sua magnitude, sinal e significância estatística) para cada variável independente e tenta desenvolver uma razão ou teórica para os efeitos das variáveis independentes.

Tais problemas de pesquisa não são mutuamente exclusivos, e uma aplicação da análise de regressão múltipla pode abordar qualquer um ou ambos os tipos de problema de pesquisa.

Segundo Hoyt, Leierer, & Millington (2006) a regressão múltipla linear é geralmente usada devido a sua flexibilidade pois pode ser usada para testar hipóteses de associações lineares ou curvilíneas entre variáveis e para testar associações complexas entre múltiplas variáveis. Para a realização de uma análise de regressão múltipla linear destaca Hahs-Vaughn (2017) que as seguintes assunções devem ser satisfeitas:

- **Independência** – assume-se em regressão que cada valor previsto é independente, o que significa que o valor previsto não está relacionado com qualquer outra previsão. Havendo independência, generalizações da amostra de volta para a população podem ser feitas;
- **Homocedasticidade** - a dispersão dos resíduos (diferença entre os valores observados da variável dependente e os valores preditos pelo modelo de regressão) deve ser aproximadamente a mesma para todos os valores dos preditores. Se a assunção de homogeneidade da variância for violada, as estimativas dos erros padrão são maiores e as distribuições condicionais também podem ser não normais;
- **Normalidade** - a assunção de normalidade significa que as distribuições das pontuações na variável dependente ou os erros de previsão são de forma normal. A violação da assunção de normalidade pode resultar em *outliers*;
- **Linearidade** - significa que a mudança na variável dependente é proporcional às mudanças em cada variável independente, mantendo outras variáveis constantes. Essa assunção garante que o modelo de regressão capture com precisão as relações subjacentes entre as variáveis;

- **Não colinearidade** – implica que as variáveis independentes não devem ser altamente correlacionadas umas com as outras. A alta multicolinearidade pode dificultar o isolamento dos efeitos individuais dos preditores na variável dependente.

2.4.2. Modelos de regressão

O modelo de regressão linear múltipla mais simples para prever Y a partir de m preditores X_k é:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- Y é a variável dependente;
- X_k 's são as variáveis preditoras ou independentes, onde $k = 1, \dots, m$;
- β_k é o declive parcial da linha de regressão para Y previsto por X_k ;
- β_0 é a intercepção da linha de regressão para Y previsto pelo conjunto de X_k 's;
- ε_i são os resíduos ou erros de previsão, e;
- i representa um índice para um indivíduo ou objecto, onde $i = 1, \dots, n$.

Em modelos mais complexos, como nos casos em que as variáveis dependentes não apresentam uma relação linear com as variáveis preditoras, (Hahs-Vaughn, 2017) explica que podem ser analisados usando regressão múltipla considerando modelos polinomiais, como por exemplo:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_{11} X_{1i}^2 + \beta_{22} X_{2i}^2 + \beta_{12} X_{1i} X_{2i} + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 2})$$

Se for assumido $X_{1i}^2 = X_{3i}$, $X_{2i}^2 = X_{4i}$, $X_{1i} X_{2i} = X_{5i}$, $\beta_{11} = \beta_3$, $\beta_{22} = \beta_4$ e $\beta_{12} = \beta_5$ a equação pode ser reescrita como uma regressão linear múltipla:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \beta_5 X_{5i} + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 3})$$

Em geral, qualquer modelo de regressão que seja linear em parâmetros é um modelo de regressão linear, independentemente da forma da superfície que gera. Isto significa que os parâmetros são multiplicados pelas variáveis independentes directamente, sem envolver funções não lineares ou outros parâmetros. A forma da curva ou superfície que o modelo gera não afecta sua linearidade, desde que essa relação de parâmetros seja linear (Montgomery & Runger, 2011).

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.

3.1. Descrição da área de estudo

A Central Termoelétrica de Maputo pertencente a Electricidade de Moçambique, E.P. (EDM) é uma instalação de produção de energia eléctrica localizada em Moçambique, junto à N4, nas margens da Baía de Maputo, e está situada a aproximadamente 3 km a noroeste do Porto de Maputo. A central conta com uma capacidade de 106 MW e 5804459 GJ/ano, uma eficiência de 50.2%, tendo custado cerca de \$172 milhões.

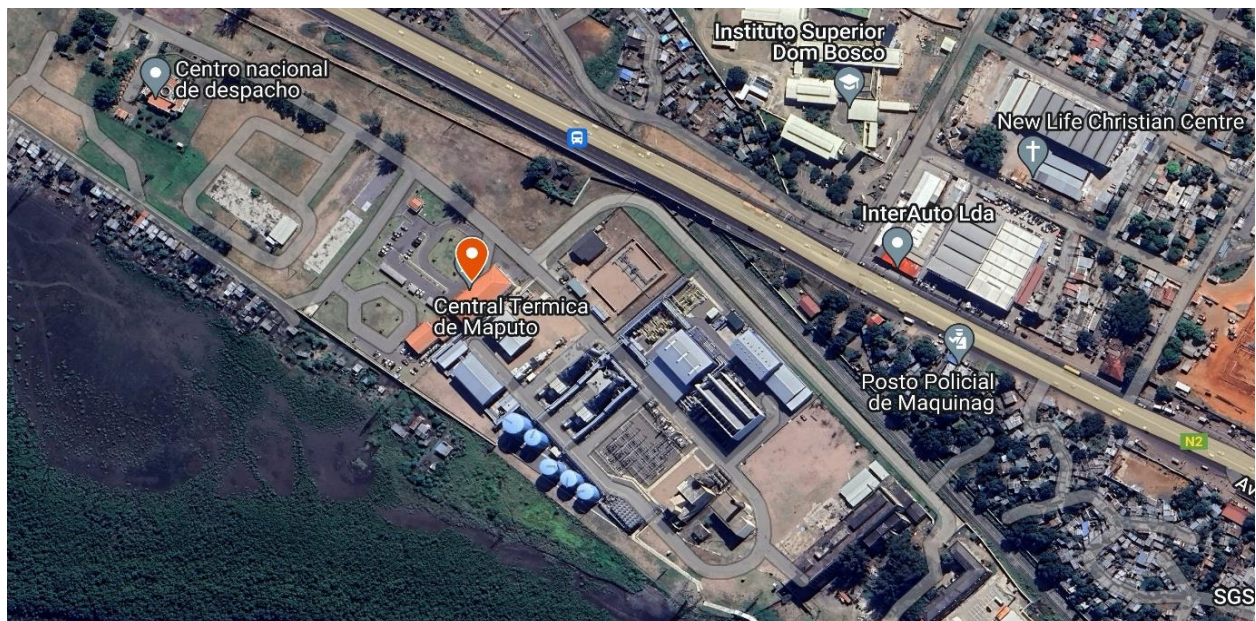


Figura 10 - Localização da Central Termoelétrica de Maputo

Fonte: (Google Maps, 2023)

A Central Termoelétrica de Maputo utiliza a tecnologia de ciclo combinado para maximizar a eficiência da geração de energia. A central eléctrica é composta por duas turbinas a gás com capacidade de produção de 40 MW cada, duas caldeiras de recuperação de calor e geração de vapor (*Heat Recover Steam Generators - HRSG*) e uma turbina a vapor com capacidade de produção de 26 MW, perfazendo a capacidade total de 106 MW.

No início, a queima de combustível na câmara de combustão gera gases de alta pressão e temperatura, impulsionando a turbina a gás para produzir energia mecânica que seguidamente é convertida em energia eléctrica pelo gerador. Em seguida, os gases de exaustão, ainda quentes, são redireccionados para os HRSGs, onde o calor é transferido para água, gerando vapor. O HRSG está equipado com um sistema coordenado de dosagem de fosfato, antioxidante e amina. A turbina a vapor é aplicada para pressão

mista, assim, é capaz de receber vapor de alta pressão e de baixa pressão gerados pelo HRSG. O tipo de condensador é um condensador refrigerado a ar (*Air Cooled Condenser – ACC*).

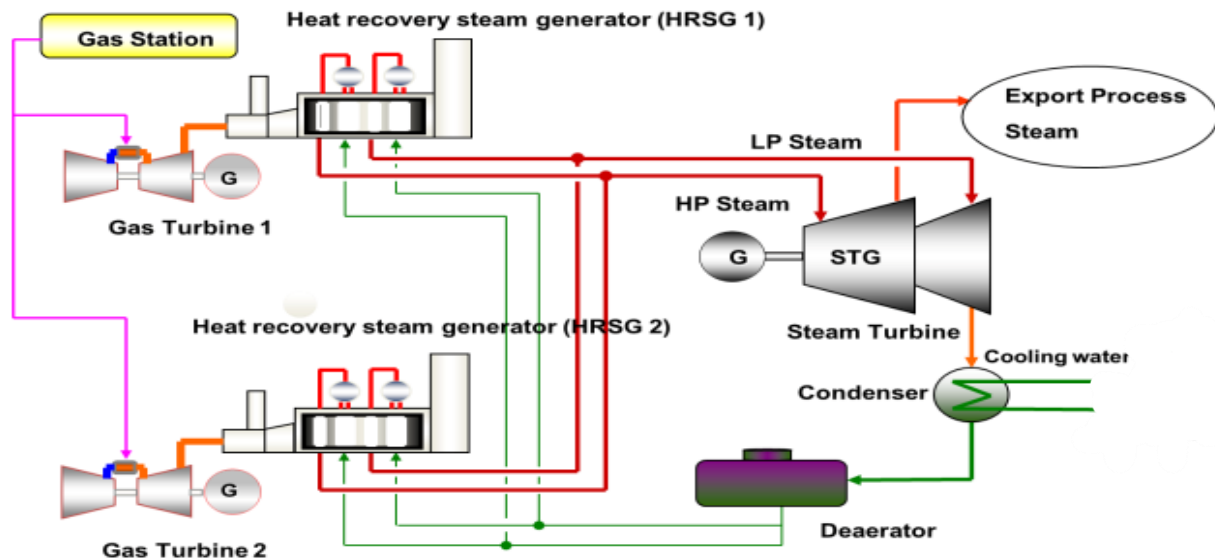


Figura 11 - Esquema do ciclo de potência instalado na CTM

Fonte: (Pattamon & Tangjitsitcharoen, 2018)

3.1.1. Planta de Pré-tratamento e Desmineralização da CTM

A planta de tratamento de água (*Water Treatment Plant – WTP*) da Central Termoelétrica de Maputo recebe água da AdrMM. A água recebe dosagem do coagulante PAC antes de entrar nos MMFs de modo melhorar a eficiência da remoção de sólidos suspensos. Ocasionalmente uma parte da água recebida da rede é direccionada para o tanque de água potável com capacidade de 50 m³ antes de chegar aos MMFs.

A WTP é constituída por dois MMFs, estando em condições normais um em operação e o outro em standby, com capacidade de operar a 35 m³/h cada. A pressão normal de operação dos MMFs encontra-se entre 250 e 300 kPa. A lavagem reversa é realizada nos filtros MMF quando estes atingem uma diferença de pressão de 200 kPa ou quando a turbidez a saída do MMF for superior ao esperado. A lavagem reversa é realizada com água e sopro de ar. O efluente dos MMFs segue para dois tanques de água bruta (*Raw Water storage tank*) com volume de 1200 m³ cada e o um tanque de água de serviço e incêndio (*Service water storage & fire water tank*) com capacidade de 2300 m³. Apenas a água armazenada no tanque de água de bruta segue para o processo de desmineralização.

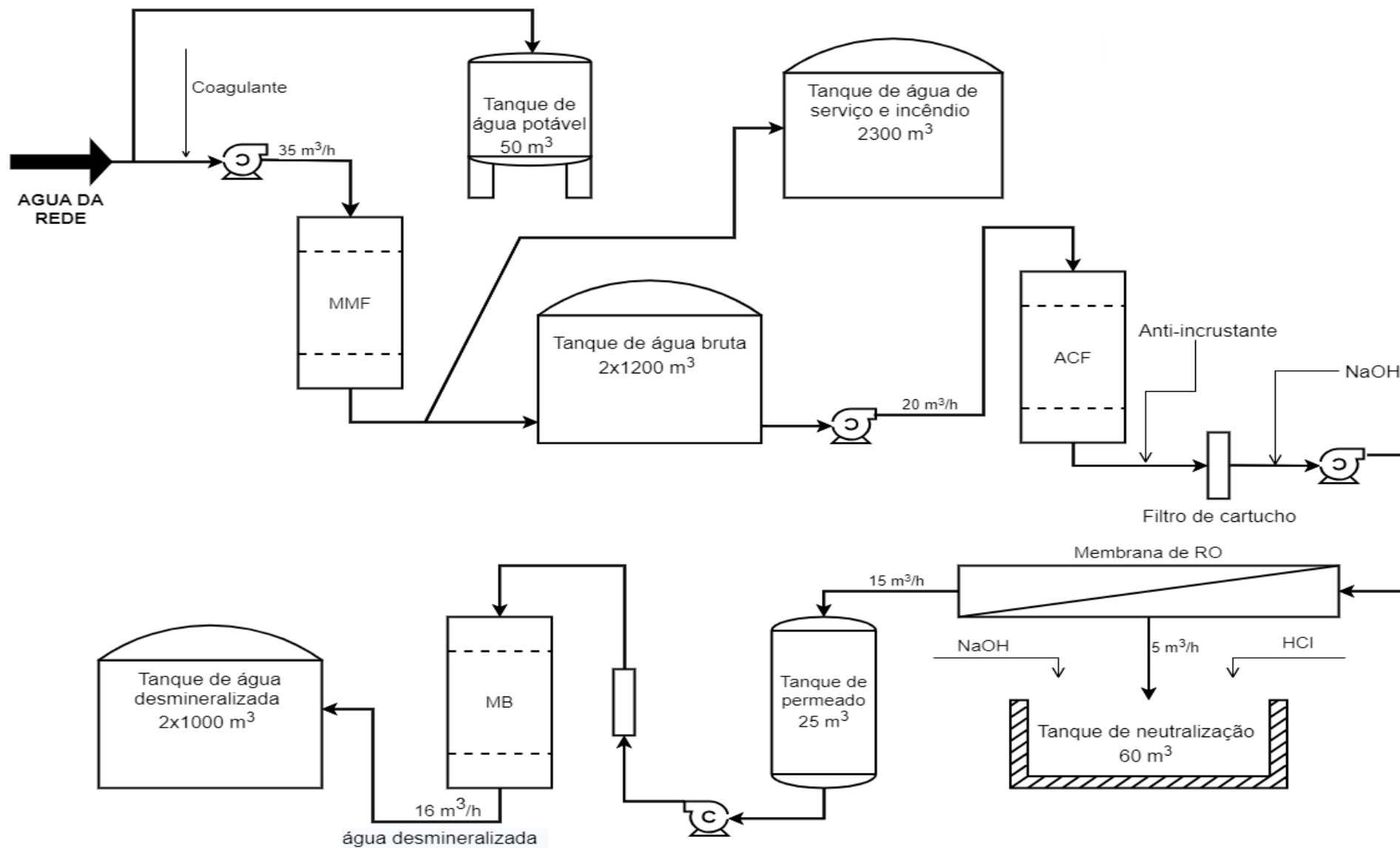


Figura 12 – Diagrama do processo de desmineralização da água na CTM

Partindo do tanque de água bruta, a água é bombeada para os filtros de carvão activado (*Activated Carbon Filter – ACF*) a uma vazão de 20 m³/h onde cloro livre e compostos orgânicos são removidos. Assim como nos MMFs, a WTP conta com dois ACFs, estando em condições normais um em operação e o outro em *standby*. A pressão normal de operação dos ACFs está entre 400 e 500 kPa. A lavagem reversa é realizada nos ACF quando estes atingem uma diferença de pressão de 100 kPa. A lavagem reversa é realizada com água.

Por diferença de pressão, a água segue dos ACF para as membranas de osmose reversa. Entretanto, antes de chegar a alimentação das membranas de RO a água é doseada por anti-incrustante Permatreat PC-191T de modo a minimizar a formação de depósitos dentro das membranas através do bloqueio de crescimento de cristais, depois a água passa por um filtro de cartucho de 5 micrómetros onde são removidas quaisquer partículas suspensas que possam ter sido arrastadas até esta etapa, deste modo reduzindo a quantidade de incrustação formada nas membranas de RO. A WTP é equipada por dois filtros de cartuchos (um para cada linha de membrana de RO) e são substituídos quando estes atingem uma diferença de pressão de 200 kPa.

Logo a seguir ao filtro de cartucho hidróxido de sódio (NaOH) é doseado de modo a elevar o pH para os níveis ideais (entre 7.5 e 8.5), pois mitiga a formação de incrustações devido a compostos orgânicos. A água é depois transportada pelas bombas de alta pressão (*RO High Pressure Pumps*) para as membranas de RO. A WTP apresenta duas bombas de alta pressão (uma para cada linha de membrana de RO) operadas por um inversor de frequência (*Variable Frequency Drive*) para atingir a vazão de permeado requerida para cada linha.

A água passa então para as membranas de RO, onde são removidos iões dissolvidos da água. Existem duas linhas de membranas de RO (uma em operação e a outra em *standby*), cada uma com dois estágios com um arranjo 2:1 (ver anexo 2.A1), significando que o concentrado dos dois primeiros sistemas de membranas de RO (1º estágio) é alimentados a um sistema de membranas de RO (2º estágio). As membranas quando limpas operam a uma pressão de alimentação de 650 kPa e com o passar do tempo estas formam incrustações e depósitos que elevam a pressão de alimentação, assim sendo, o *Clean in Place* (CIP) é realizado quando a pressão na alimentação atinge 1200 kPa, tomando atenção para a diferença de pressão por estágio não seja superior a 200

kPa. Cada linha conta com sensores de pH, caudal e condutividade para o permeado e concentrado.

Cada linha é projectada para operar com taxa de recuperação de 75%, deste modo, cada linha produz 5 m³/h de concentrado que é direccionado por uma vala ao tanque de neutralização (*Neutralization pond*) e 15 m³/h de permeado que é direccionado ao tanque de permeado (*Permeate tank*) com capacidade de 25 m³ para depois passar pelo trocador iónico de leito misto (MB).

Partindo do tanque de permeado, a água é bombeada para os MBs onde é feita a última etapa desmineralização por troca iónica. Antes de chegar aos MB a água passa por um filtro de cartucho de 5 micrómetros. A WTP é constituída por dois MBs, estando assim como nos outros equipamentos um em operação e o outro em *standby*. Cada MB tem capacidade de operar a 16 m³/h, sendo a pressão normal de operação de 400 kPa. OS MBs contam com sensores de pH, condutividade e sílica no efluente, quando um destes parâmetros não é satisfeito a operação no MB específico é interrompida e inicia-se o processo de regeneração. A regeneração na WTP é realizada por ácido clorídrico a 37% e hidróxido de sódio a 50%, onde é introduzida por baixo e pelo topo respectivamente de modo a regenerar as resinas SAC e SBA respectivamente.

Saindo do MB, a água é então armazenada em dois tanques de água desmineralizada (*Demin Water storage tank*) com capacidade de 1000 m³ cada. Ambos tanques estão interconectados para minimizar a estagnação da água e deste modo garantir a qualidade da água desmineralizada fornecida a caldeira e outros componentes da planta. A mesma interligação, com o mesmo objectivo esta presente nos tanques de água bruta.

Toda a água descartada no processo de regeneração, CIP, lavagem reversa dos filtros, e concentrado das membranas de RO é levada através de uma vala ao tanque de neutralização com capacidade de 60 m³, onde o pH é ajustado através do uso de ácido clorídrico e hidróxido de sódio, de modo a minimizar o impacto da descarga de rejeitos líquidos no meio ambiente.

3.2. Metodologia experimental

3.2.1. Colecta das amostras

Para a realização deste estudo foram realizados testes semanais dos parâmetros de qualidade da água bruta e água desmineralizada. Os pontos de colecta podem ser vistos no anexo 2.A3. Todos os testes foram realizados no laboratório da Central Termoeléctrica de Maputo, tendo sido as amostras colectas em frascos de vidro previamente esterilizados.

3.2.2. Reagentes

Tabela 4 - Reagentes usados na realização dos testes

Descrição	Quantidade
DPD ² Free Chlorine Reagent Powder Pillow	1
SulfaVer 4 Sulfate Reagent Powder Pillow	1
FerroVer Iron Reagent Powder Pillow	1
Mercuric Thiocyanate Solution	2 mL
Ferric Ion Solution	1 mL
COD Digestion Reagent vials	2
FerroZine Iron Solution	2 mL
Água desmineralizada	500 mL

3.2.3. Equipamentos e instrumentos

Tabela 5 - Equipamentos e instrumentos usados na realização dos testes

Descrição	Quantidade
Espectrofotómetro Hach DR6000	1
Turbidímetro Hach TL2300	1
Multímetro digital Hach HQ40d	1
Esterilizador de Ar Quente HAS-T501r	1
Reactor Hach DRB200	1
Sistema de purificação de água Direct Q-3	1
Pipeta Pasteur 1mL	5
Cubeta de vidro redonda 10 mL	10
Guardanapos de papel	-
Luvax de latex	1 par
Mascara descartável com filtro PFF2	1

² N, N-dietil-1,4-benzenodiamina (N, N-diethyl-1,4-benzenediamine)

3.3. Descrição dos equipamentos

3.3.1. Multímetro digital Hach HQ40d

Este equipamento possui a capacidade de realizar a leitura do nível de acidez das soluções e da sua condutividade eléctrica, apresentando princípios de funcionamento diferentes para cada leitura.

- **pH metro**

O medidor de pH portátil usa um eléctrodo de pH e um eléctrodo de referência para medir a diferença de potencial entre a amostra e a solução de referência. O eléctrodo de pH consiste em um bulbo de vidro³ com uma superfície sensível que interage com a amostra que está sendo medida. O eléctrodo de referência consiste em um fio de prata-cloreto de prata imerso em uma solução de cloreto de potássio.

Quando o eléctrodo de pH é imerso na amostra, os iões de hidrogénio na amostra interagem com a superfície de vidro do eléctrodo, o que cria uma diferença de potencial entre a amostra e a solução de referência, esta diferença de potencial é proporcional ao valor de pH da amostra.

- **Conductímetro**

O medidor portátil Hach HQ40d também pode medir a condutividade e o total de sólidos dissolvidos de uma solução usando uma sonda de condutividade.

Para medir a condutividade o medidor usa uma sonda de condutividade, que consiste em dois eléctrodos espaçados. Quando a sonda é colocada na amostra, uma tensão é aplicada entre os eléctrodos e a corrente resultante é medida, que é proporcional à concentração de iões.

O total de sólidos dissolvidos é calculado com base na condutividade medida e na temperatura da amostra usando um factor de conversão.

3.3.2. Turbidímetro Hach TL2300

O turbidímetro Hach TL2300 é um instrumento usado para medir a turbidez de uma amostra líquida, este funciona com base no princípio de dispersão de luz, onde a quantidade de luz dispersada é directamente proporcional à concentração de partículas na amostra.

³ Recipiente de vidro com ma forma esférica ou oval.

O instrumento contém uma lâmpada de tungsténio, que emite luz para a amostra em um comprimento de onda específico. Quando a luz passa pela amostra, parte dela é espalhada pelas partículas da amostra que é proporcional à concentração das partículas na amostra, bem como seu tamanho e forma. A luz espalhada é detectada por um detector de luz, que converte a luz em um sinal eléctrico.

3.3.3. Esterilizador de Ar Quente HAS-T501r

O Esterilizador de Ar Quente HAS-T501r é um dispositivo que utiliza ar a alta temperatura para esterilizar equipamentos e instrumentos de laboratório.

O dispositivo possui um elemento de aquecimento que é usado para gerar calor. O elemento de aquecimento aquece o ar dentro da câmara, que por sua vez aquece o equipamento. A temperatura é mantida na temperatura de esterilização desejada por um tempo especificado (neste caso entre 10 e 15 minutos).

A câmara de esterilização é feita de aço inoxidável e foi projectada para ser hermética para evitar qualquer contaminação externa. A temperatura pode ser ajustada usando um painel de controle para atender a temperatura de esterilização desejada.

3.3.4. Espectrofotómetro Hach DR6000

O espectrofotómetro Hach DR6000 é um instrumento usado para a análise quantitativa de uma ampla variedade de substâncias químicas e biológicas. Ele utiliza tecnologia óptica para medir a absorção de luz por uma amostra nas regiões ultravioleta (UV – entre 10 nm e 400 nm) e visível (VIS – 400 nm e 700 nm) do espectro electromagnético.

O espectrofotómetro DR6000 usa uma lâmpada de tungsténio como fonte de luz, de seguida, a luz passa por um monocromador, que selecciona um comprimento de onda de luz específico que corresponda ao máximo de absorção da substância que está sendo analisada.

O comprimento de onda de luz seleccionado passa pela amostra na cubeta, que absorve parte da luz dependendo de sua composição química e concentração. A luz transmitida passa então por um detector, que mede a intensidade da luz que passou pela amostra e converte em um sinal eléctrico.

3.3.5. Sistema de purificação de água Direct Q-3

O sistema de purificação de água Direct Q-3 é um sistema de purificação de água laboratorial que usa várias etapas de purificação para produzir água pura. A água entra

no sistema e passa por um filtro de pré-tratamento, que remove partículas suspensas da água. A água pré-tratada passa então por uma membrana de RO, que remove iões dissolvidos e outras impurezas da água.

A água mais tarde passa por uma resina de troca iónica de leito misto, que remove quaisquer iões e contaminantes remanescentes da água. Após a purificação da água, ela passa por uma lâmpada UV, que esteriliza a água destruindo quaisquer bactérias, vírus e outros microorganismos remanescentes. A água esterilizada passa então por um estágio de filtração final, que remove quaisquer partículas remanescentes e garante que a água esteja pura e pronta para uso em laboratório.

3.3.6. Reactor Hach DRB200

O reactor DRB200 é um instrumento usado para digestão térmica de amostras, principalmente de água. A sua função principal é aquecer as amostras a temperaturas controladas para promover a digestão de compostos orgânicos e inorgânicos, tornando-os aptos para análises subsequentes como a determinação de fósforo e nitrogénio.

O bloco reactor possui um elemento de aquecimento que gera calor quando uma corrente eléctrica passa por ele. O sistema de controle de temperatura do instrumento recebe informações dos sensores de temperaturas que compara com a definida de antemão, e efectua ajustes na potencia fornecida ao elemento de modo a atingir ou manter a temperatura desejada.

3.4. Procedimentos experimentais

3.4.1. pH

- Pipetaram-se cerca de 40 mL das amostras (o suficiente para submergir a ponta da sonda);
- Retirou-se a tampa protectora da sonda de pH e limpou-se delicadamente a ponta com água desmineralizada;
- Mergulhou-se a ponta da sonda de pH na amostra, assegurando que a ponta estivesse completamente submersa;
- Aguardou-se alguns segundos para que a leitura de pH se estabilizasse no visor;
- Anotou-se o valor do pH exibido no visor.

3.4.2. Condutividade e Total de Sólidos Dissolvidos

- Pipetaram-se cerca de 40 mL das amostras (o suficiente para submergir a ponta da sonda);

- Retirou-se a tampa protectora da sonda de condutividade e TDS, a seguir limpou-se delicadamente a ponta com água desmineralizada;
- Mergulhou-se a ponta da sonda de condutividade e TDS na amostra, assegurando que a ponta estivesse completamente submersa;
- Aguardou-se alguns segundos para que a leitura de condutividade e TDS se estabilizassem no visor;
- Anotou-se o valor da condutividade e TDS exibido no visor.

3.4.3. Ferro

Reacção do Ferro com o Reagente FerroVer

- Pipetaram-se 10 mL de amostras em cubetas de espectrofotometria;
- Adicionou-se uma saqueta em pó do reagente FerroVer a cada cubeta e de seguida misturou-se bem a solução na cubeta para garantir uma distribuição homogénea do reagente;
- Deixaram-se as cubetas repousarem por um 3 min, permitindo que a reacção entre o ferro e o reagente FerroVer formasse o complexo acastanhado;
- Utilizou-se o espectrofotómetro Hach DR6000 para medir a absorbância das soluções em cada cubeta e assim determinar a concentração de ferro nas amostras;
- Anotou-se o valor de ferro exibido no visor.

Reacção do Ferro com o Reagente FerroZine

- Pipetaram-se 10 mL de amostras em cubetas de espectrofotometria;
- Adicionou-se 1 mL do reagente FerroZine a cada cubeta de seguida misturou-se bem a solução na cubeta para garantir uma distribuição homogénea do reagente;
- Permitiu-se um tempo de 5 min para que ocorresse a reacção entre o ferro e o reagente FerroZine, resultando na formação do complexo roxo;
- Utilizou-se o espectrofotómetro Hach DR6000 para medir a absorbância das soluções em cada cubeta e assim determinar a concentração de ferro nas amostras;
- Anotou-se o valor de ferro exibido no visor.

3.4.4. Turvação

- Preencheu-se uma cubeta limpa com a amostra líquida a ser medida;

- Inseriu-se a cubeta na abertura do turbidímetro;
- Aguardou-se até que o valor de turbidez se estabilizasse e fosse registrado no display do turbidímetro;
- Registrou-se os valores de turbidez medidos para cada amostra.

3.4.5. Cloretos

- Pipetaram-se 10 mL de amostras em cubetas de espectrofotometria;
- Adicionou-se 0.8 mL da solução de tiocianato de mercúrio a cada cubeta de seguida misturou-se bem a solução na cubeta para garantir uma distribuição homogénea do reagente;
- Adicionou-se 0.4 mL de cloreto de ferro a cada cubeta de seguida misturou-se bem a solução na cubeta para garantir uma distribuição homogénea do reagente;
- Permitiu-se um tempo de 2 min para que ocorresse a reacção, resultando na formação do complexo de coloração vermelho-alaranjada intensa;
- Utilizou-se o espectrofotómetro Hach DR6000 para medir a absorvância das soluções em cada cubeta e assim determinar a concentração de ferro nas amostras;
- Anotou-se o valor de ferro exibido no visor.

3.4.6. Cloro livre

- Pipetaram-se 10 mL de amostras em cubetas de espectrofotometria;
- Adicionou-se uma saqueta em pó do reagente DPD a cada cubeta de seguida misturou-se bem a solução na cubeta para garantir uma distribuição homogénea do reagente;
- Permitiu-se um tempo de 60 s para que ocorresse a reacção entre o cloro e o reagente DPD, resultando na formação do complexo rosado;
- Utilizou-se o espectrofotómetro Hach DR6000 para medir a absorvância das soluções em cada cubeta e assim determinar a concentração de cloro nas amostras;
- Anotou-se o valor de cloro exibido no visor.

3.4.7. Sulfato

- Pipetaram-se 10 mL de amostras em cubetas de espectrofotometria;

- Adicionou-se uma saqueta em pó do reagente SulfaVer 4 a cada cubeta de seguida misturou-se bem a solução na cubeta para garantir uma distribuição homogénea do reagente;
- Permitiu-se um tempo de 5 min para que ocorresse a reacção entre os sulfatos e o reagente SulfaVer 4, resultando na formação do complexo esbranquiçado;
- Utilizou-se o espectrofotómetro Hach DR6000 para medir a absorbância das soluções em cada cubeta e assim determinar a concentração de sulfatos nas amostras;
- Anotou-se o valor de sulfatos exibido no visor.

3.4.8. Demanda Química de Oxigénio

- Pipetou-se 2 mL de amostras de água a serem analisadas aos COD *Digestion Reagent vials*;
- Agitou-se cuidadosamente para garantir a homogeneização da amostra com o reagente;
- Transferiu-se cada amostra preparada para um reactor de digestão, seguindo as instruções específicas do equipamento;
- Aqueceu-se as amostras no reactor DRB200 a uma temperatura de 150 °C por um tempo de 2 h para promover a oxidação química da matéria orgânica;
- Após a digestão, resfriou-se as amostras até temperatura ambiente;
- Utilizou-se o espectrofotómetro Hach DR6000 para medir a absorbância das soluções em cada cubeta e assim determinar o valor do COD nas amostras;
- Anotou-se o valor de COD exibido no visor.

4. APRESENTAÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

As variáveis consideradas para este estudo são apresentadas na tabela a seguir, tendo sido estas seleccionadas com base na disponibilidade de reagentes e equipamentos para a realização dos testes.

Tabela 6 - Variáveis consideradas no estudo

Nome da variável	Descrição
pH_D	pH da água desmineralizada
EC_D	Condutividade da água desmineralizada
Fe_D	Teor de ferro da água desmineralizada
pH_C	pH da água da rede
EC_C	Condutividade da água da rede
TDS	Total de sólidos dissolvidos na água da rede
Fe_C	Teor de ferro da água da rede
Tur	Turbidez na água da rede
Cl	Teor de cloretos na água da rede
Cl2	Teor de cloro livre na água da rede
SiO2	Teor de sílica na água da rede
SO4	Teor de sulfatos na água da rede
COD	Demanda química de oxigénio na água da rede

Para este teste foram analisadas 80 amostras na Central Termoeléctrica de Maputo, colectadas em dois pontos distintos City water and Demin Water tank (ver anexo 2.A3). Durante a colectada de todas as amostras foram usados frascos de vidro previamente esterilizados e estes realizados no máximo uma hora após colecta.

Os resultados dos testes laboratoriais realizados encontram-se no anexo 1.A1. a tabela 6 apresentava a descrição resumida dos dados por variável, onde são descritas o número de casos (N), a média, desvio padrão, valores máximos e mínimo assim como o número de dados faltantes por caso (n).

Tabela 7 - Descrição dos dados experimentais obtidos

Variável	N	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	Dados faltantes	
						n	%
pH_D	40	8.21	0.961	9.89	6	5	11.1
EC_D	40	1.047	0.989	6.61	0.05	5	11.1
Fe_D	36	0.080	0.168	0.641	0	9	20.0
pH_C	40	7.639	0.460	8.93	6.68	5	11.1
EC_C	40	457.4	56.074	620	348	5	11.1

Variável	N	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	Dados faltantes	
						n	%
TDS	40	230.89	24.040	300	178.4	5	11.1
Fe_C	40	0.106	0.055	0.28	0.05	5	11.1
Tur	38	2.218	1.061	4.54	0.5	7	15.6
Cl	7	40.30	15.013	54.8	17.4	38	<u>84.4</u>
Cl2	40	1.573	0.799	3.5	0.02	5	11.1
SiO2	20	11.900	4.154	19	2	25	<u>55.6</u>
SO4	40	11.750	4.235	28	5	5	11.1
COD	30	10.30	5.920	31	0	15	33.3

A figura 13 a seguir mostra a distribuição dos dados para os parâmetros de qualidade da água que apresentam desvio padrão notável para o período de estudo.

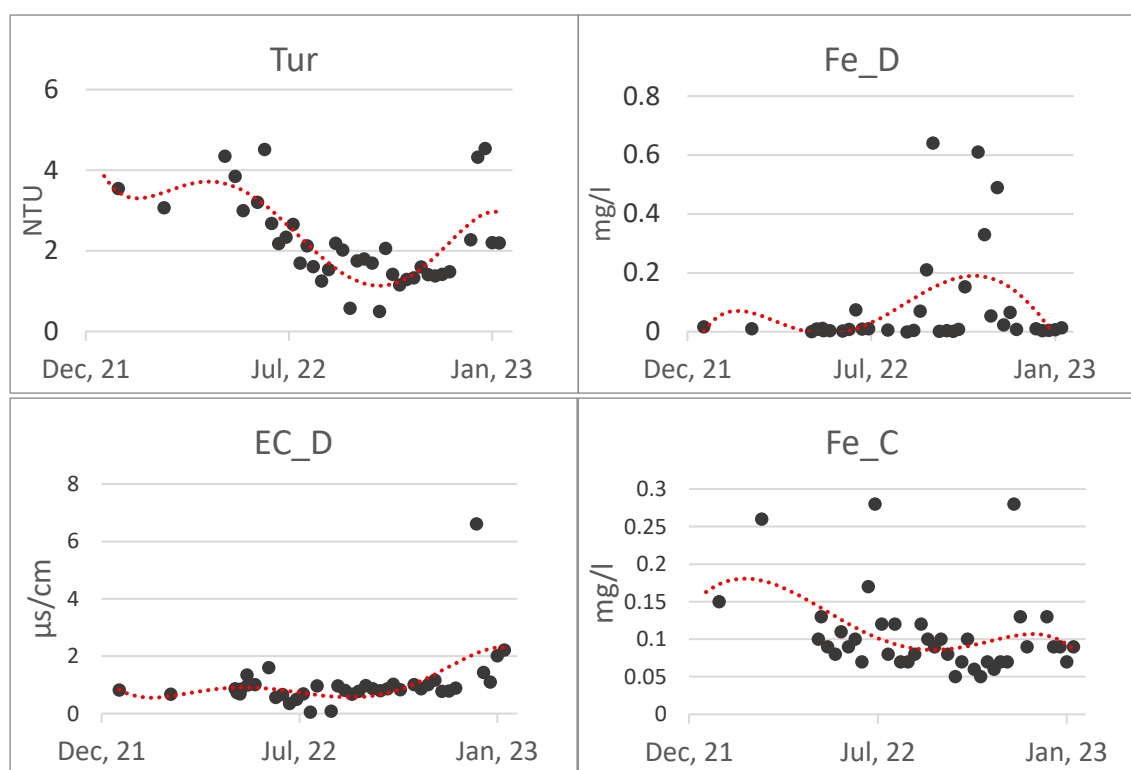


Figura 13 - Variação da Tur, Fe_D, EC_D e Fe_C ao longo do tempo

4.1. Dados faltantes

Dados são classificados como faltantes quando não estão disponíveis valores válidos para realização de análise e podem ser originados por diversos motivos como por exemplo defeito de equipamento. Segundo Hair, Black, Babin, & Anderson (2019) como regra geral variáveis com até cerca de 30% de dados em falta podem ter os seus efeitos remediados. deste modo, foram eliminadas as variáveis independentes cloretos (Cl^-) e sílica (SiO_2).

Ainda segundo o mesmo autor casos com variáveis dependentes em falta devem ser eliminados de modo a não criar relações artificiais entre as variáveis, com isso, foram eliminados os casos 5, 21, 33 e 2. Foram também eliminados os casos 12, 10, 3, 8, 1, 4 por apresentarem uma percentagem de dados faltantes superior a 50% antes da eliminação das variáveis independentes (ver anexo 1. A2).

Tabachnick & Fidell (2013) afirmam que o padrão de dados faltantes é mais importante que a quantidade de dados faltantes e que o padrão é um factor determinante na escolha do método de atribuição usado para remediar o efeito dos dados em falta. Para verificar o padrão de dados faltantes foi realizado o teste little MCAR (*missing completely at random* - completamente perdidos ao acaso) tendo sido obtido o seguinte resultado:

Tabela 8 - Resultados do teste little MCAR

Teste Little MCAR		
χ^2	df	Sig.
20.942	13	0.074

Onde: Graus de liberdade (df) = N – (Número de variáveis independentes + 1)

O método de Maximização de Expectativa foi usado para atribuição dos dados faltantes por ser o método geral usado quando se tem dados faltantes que indicam que foram perdidos ao acaso. A essência do método reside em alternar entre uma **etapa de expectativa** onde os valores dos dados em falta são estimados e outra **etapa de maximização** onde a optimização dos dados é feita através da actualização dos parâmetros para maximizar a probabilidade das variáveis dependentes dados os valores estimados (ver Anexo 1.A4)

4.2. Outliers

A detecção de *outliers* descreve um comportamento anormal dos dados obtidos. A Distância de Mahalanobis (D_M) é um método usado para identificar *outliers* multidimensionais, que é baseado na estimação da D_M e seguida comparação com o valor crítico da distribuição qui-quadrado (ver anexo 1.A3).

$$D_M = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (x - \mu)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: x - Vector de dados, μ - Vector da média das variáveis independentes, S - Matriz de covariância das variáveis independentes.

Entretanto nem todos os valores maiores que os valores críticos representam *outliers*, então o gráfico qui-quadrado que relaciona a D_M e a distribuição qui-quadrado é usada

(Filzmoser, s.d.). Segundo Wilson (2010) recomenda-se o uso da análise gráfica para a detecção de *outliers*, assim, após a realização dos cálculos foi obtido o seguinte gráfico:

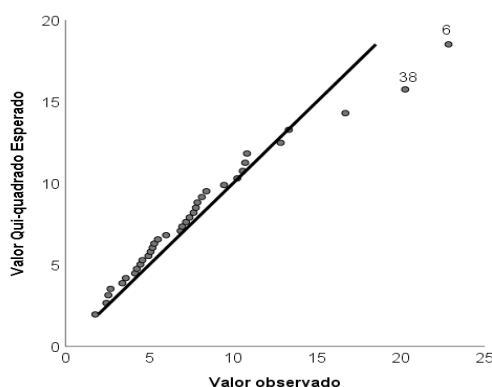


Figura 14 - Gráfico Quantil-Quantil: Qui-quadrado da Distância de Mahalanobis

Tabela 9 - Dados após a estimação dos valores faltantes e eliminação de outliers

Caso	Água desmineralizada			Água da rede							
	pH_D	EC_D	Fe_D	pH_C	EC_C	TDS	Fe_C	Tur	Cl2	SO4	COD
	-	µs/cm	mg/l	-	µs/cm	mg/l	mg/l	NTU	mg/l	mg/l	mg/l
7	8.48	0.69	0.008	6.99	348	178.4	0.13	3.33	1.86	11	12
9	8.45	1.34	0.012	7.67	414	208.0	0.09	3.85	1.69	14	21
11	7.01	1.01	0.004	6.97	389	209.2	0.08	3.00	1.34	18	8
13	9.11	1.60	0.003	7.94	402	206.0	0.09	3.21	1.06	12	10
14	7.59	0.56	0.008	7.08	391	203.9	0.10	4.52	2.30	10	13
15	8.76	0.66	0.075	7.96	480	253.0	0.07	2.68	1.69	9	10
16	8.50	0.35	0.009	7.69	403	221.0	0.17	2.18	1.52	11	11
17	8.07	0.50	0.007	7.58	390	205.6	0.28	2.34	0.02	11	9
18	7.01	0.69		8.17	414	216.1	0.12	2.66	3.04	16	12
19	9.89	0.05		7.52	445	235.0	0.08	1.70	1.55	12	6
20	8.01	0.96	0.006	7.66	422	225.0	0.12	2.13	1.79	11	2
22	9.05	0.08		7.50	450	229.0	0.07	1.25	2.54	13	9
23	8.75	0.97	0.000	6.68	421	222.0	0.08	1.54	2.54	8	9
24	8.78	0.81	0.005	7.81	489	252.0	0.12	2.19	0.78	10	11
25	9.33	0.67	0.070	7.27	436	225.0	0.10	2.02	1.63	12	4
26	7.14	0.78	0.210	7.14	447	239.0	0.09	0.58	1.66	8	9
27	8.61	0.98	0.641	7.92	495	243.0	0.10	1.75	0.85	9	13
28	9.75	0.86	0.002	8.03	453	241.0	0.08	1.80	1.16	7	16
29	8.18	0.80	0.004	8.37	452	250.0	0.05	1.70	1.57	9	8
30	8.95	0.87	0.002	7.34	477	234.0	0.07	0.50	1.45	5	9
31	9.50	1.02	0.008	8.15	443	225.0	0.10	2.06	1.57	8	8
32	9.09	0.83	0.153	7.07	437	225.0	0.06	1.42	2.16	8	10
34	7.01	1.01	0.610	7.52	427	222.0	0.07	1.29	2.82	7	8
35	6.90	0.87	0.330	7.61	490	240.0	0.06	1.33	1.45	7	21
36	6.00	1.01	0.054	7.79	458	225.0	0.07	1.60	2.32	7	9
37	7.00	1.17	0.490	7.70	500	243.0	0.07	1.41	1.13	13	10
39	7.80	0.79	0.066	7.80	567	265.0	0.13	1.42	0.03	10	13

Caso	Água desmineralizada			Água da rede							
	pH_D	EC_D	Fe_D	pH_C	EC_C	TDS	Fe_C	Tur	Cl2	SO4	COD
	-	µs/cm	mg/l	-	µs/cm	mg/l	mg/l	NTU	mg/l	mg/l	mg/l
40	8.00	0.89	0.008	7.80	620	300.0	0.09	1.48	0.21	12	9
41	8.90	6.61	0.010	7.70	490	242.0	0.13	2.28	0.50	10	4
42	9.20	1.43	0.004	8.30	437	216.0	0.09	4.33	2.26	15	6
43	8.30	1.10	0.005	7.50	430	206.0	0.09	4.54	0.68	15	9
44	7.10	2.01	0.007	7.40	566	263.0	0.07	2.21	1.74	14	8
45	8.10	2.21	0.014	8.20	552	270.0	0.09	2.20	1.57	19	9

Valor estimado pelo método EM

4.3. Verificação de suposições

Para analisar um modelo e suas limitações é importante entender as suposições dos métodos a serem usados para a sua construção e como estas afetam o tratamento de dados. Tranmer, Murphy, Elliot, & Pampaka (2020) destacam que para a maioria das suposições a sua violação não implica necessariamente que a regressão linear não possa ser utilizada, mas que se deve ter em conta que haverá certas limitações, adaptar a interpretação ou ainda transformar os dados para adequar a modelação linear.

4.3.1. Multicolinearidade

A multicolinearidade entre as variáveis foi testada através do coeficiente de correlação de Pearson, tendo sido obtidos os seguintes resultados:

Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas

	pH_D	EC_D	Fe_D	pH_C	EC_C	TDS	Fe_C	Tur	Cl2	SO4	COD
pH_D	1										
EC_D	0.023	1									
Fe_D	-0.335	-0.093	1								
pH_C	0.111	0.126	0.005	1							
EC_C	-0.126	0.237	0.123	0.325	1						
TDS	-0.059	0.157	0.096	0.363	<u>0.942</u>	1					
Fe_C	0.052	0.029	-0.217	0.010	-0.253	-0.257	1				
Tur	0.092	0.100	-0.372	0.070	-0.413	-0.515	0.173	1			
Cl2	-0.155	-0.239	0.116	-0.169	-0.409	-0.365	-0.425	0.036	1		
SO4	-0.093	0.101	-0.253	0.138	0.020	-0.050	0.105	0.526	-0.016	1	
COD	-0.153	-0.235	0.182	0.054	0.004	-0.054	-0.075	0.094	-0.049	-0.136	1

4.3.2. Homocedasticidade, Independência e Linearidade

A independência, linearidade e homocedasticidade das variáveis dependentes foi testada através do gráfico que relaciona o variável independente prevista pradonizada e

os resíduos padronizados como sugerido por Hahs-Vaughn (2017), tendo sido obtidos os seguintes resultados:

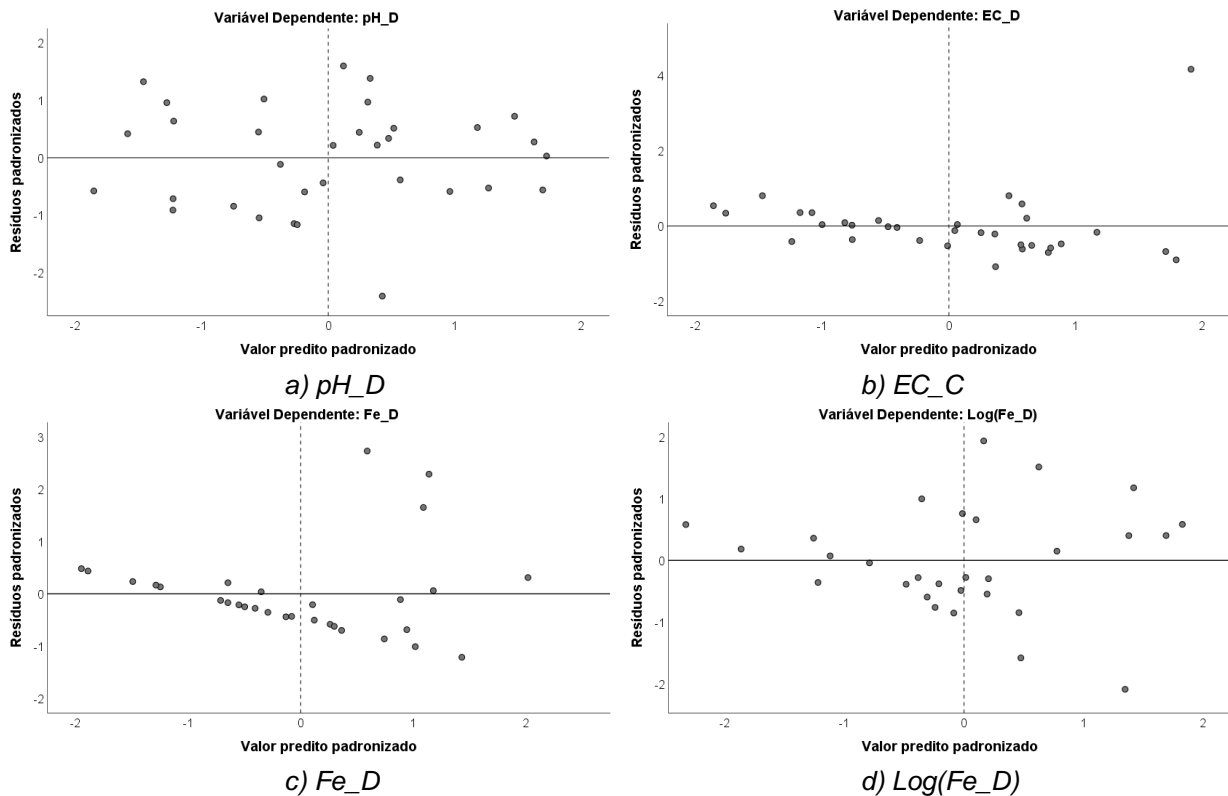


Figura 15 - Gráficos de dispersão padronizada

4.3.3. Normalidade

A normalidade dos resíduos foi testada construindo um gráfico Percentil-Percentil de distribuição normal como sugerido por Tranmer, Murphy, Elliot, & Pampaka (2020), onde os resíduos padronizados são comparados aos valores esperados de uma distribuição normal, tendo sido obtido os seguintes resultados:

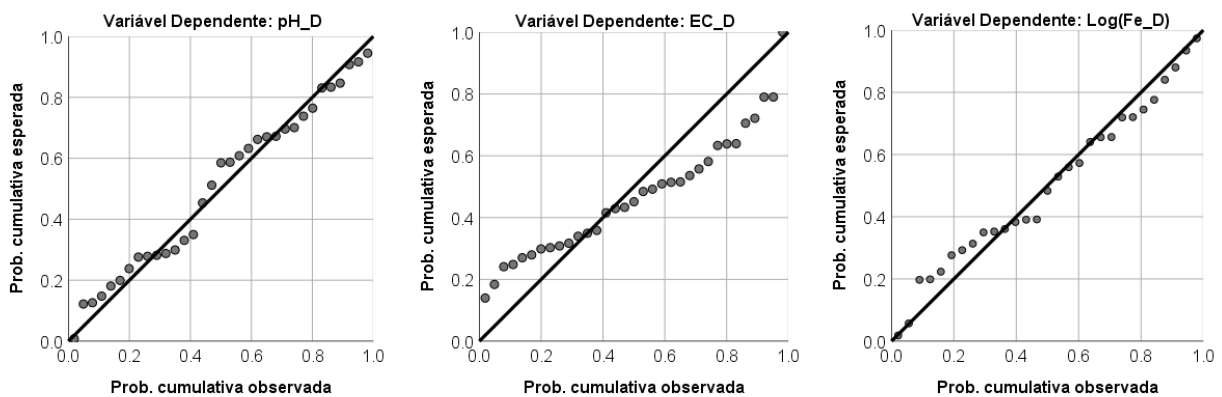


Figura 16 - Gráfico Percentil-Percentil: Distribuição Normal de Regressão Resíduos padronizados

4.4. Construção do modelo

De acordo com Hair, Black, Babin, & Anderson (2019) para determinar os termos pertencentes ao modelo, é comum começar com componentes lineares e sequencialmente ir adicionando polinómios de ordem superior até que a não-significância seja alcançada (diferença dos valores de $R^2 \leq 0.05$), assim sendo, devem ser comparados os valores R^2 do modelo com termos lineares com o R^2 da equação com os termos polinomiais (ver anexo 1.A5).

O programa SPSS dispõe de métodos de estimação para seleccionar sistematicamente as variáveis independentes a ser adicionadas no modelo, para este estudo foi seleccionado método *backward*.

Neste método, todas as variáveis independentes possíveis são adicionadas ao modelo no primeiro estágio e no segundo estágio são eliminadas do modelo com base na sua contribuição mínima para a previsão da variável dependente (segundo o teste t). No programa SPSS a análise continua até que todas as variáveis tenham valores de F maiores que o valor crítico pré-estabelecido (neste caso de 0.100). Usando o método de estimação *backward* foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 11 – Variáveis e coeficientes da regressão obtidos pelo método *backward*

Resposta	Preditor	Coeficientes não padronizados		t	Sig.
		B	Erro padrão		
pH_D	(Constante)	60.534	16.347	3.703	0.002
	TDS	-0.264	0.092	-2.865	0.012
	Tur	-26.85	5.35	-5.02	0.000
	Cl2	15.729	4.211	3.735	0.002
	TDSxFe_C	-0.34	0.082	-4.136	0.001
	TDSxTur	0.042	0.013	3.147	0.007
	TDSxCl2	-0.046	0.013	-3.588	0.003
	TDSxSO4	0.003	0.001	2.718	0.017
	TDSxCOD	0.011	0.005	2.185	0.046
	Fe_CxCOD	6.492	1.691	3.838	0.002
TurxCl2	-1.183	0.306	-3.872	0.002	

Resposta	Preditor	Coeficientes não padronizados		t	Sig.
		B	Erro padrão		
	TurxCOD	0.531	0.119	4.479	0.001
	Cl2xSO4	0.432	0.08	5.378	0.000
	Cl2xCOD	0.205	0.088	2.341	0.035
	SO4xCOD	-0.154	0.03	-5.087	0.000
	pH_CxTDS	0.012	0.006	1.898	0.078
	pH_CxTur	1.902	0.358	5.306	0.000
	pH_CxCl2	-1.421	0.621	-2.29	0.038
	pH_CxCOD	-0.4	0.177	-2.267	0.040
	(Constante)	-0.64	1.866	-0.343	0.736
	Tur	5.807	2.036	2.852	0.012
	SO4	-1.001	0.276	-3.622	0.003
	TDSxFe_C	1.702	0.199	8.546	0.000
	TDSxTur	-0.012	0.006	-1.818	0.089
	TDSxCl2	0.031	0.006	5.502	0.000
	TDSxSO4	0.007	0.002	4.565	0.000
	TDSxCOD	-0.025	0.002	-10.44	0.000
EC_D	Fe_CxTur	24.785	7.419	3.341	0.004
	Fe_CxCl2	-12.05	3.01	-4.004	0.001
	Fe_CxCOD	-7.426	0.937	-7.924	0.000
	TurxCl2	0.858	0.155	5.551	0.000
	TurxCOD	-0.642	0.064	-10.08	0.000
	SO4xCOD	0.134	0.017	7.886	0.000
	pH_CxFe_C	-45.53	6.799	-6.696	0.000
	pH_CxCl2	-0.983	0.189	-5.194	0.000
	pH_CxSO4	-0.253	0.055	-4.618	0.000
	pH_CxCOD	0.843	0.081	10.39	0.000
Log(Fe_D)	(Constante)	6.025	3.302	1.825	0.082
	pH_C	-1.59	0.567	-2.805	0.011

Resposta	Preditor	Coeficientes não padronizados		t	Sig.
		B	Erro padrão		
	TDSxCl2	0.006	0.003	2.274	0.034
	TurxSO4	-0.108	0.044	-2.458	0.023
	TurxCOD	-0.152	0.051	-2.985	0.007
	Cl2xSO4	-0.101	0.059	-1.722	0.100
	SO4xCOD	0.042	0.013	3.255	0.004
	pH_CxTur	0.335	0.129	2.604	0.017

4.4.1. Modelo de regressão linear

A seguir são apresentados os modelos lineares correspondentes aos coeficientes de determinação e desvio padrão de apresentados na tabela 11.

$$\text{pH_D} = 60.534 - 0.264[\text{TDS}] - 26.85[\text{Tur}] + 15.729[\text{Cl2}] - 0.34[\text{TDSxFe_C}] + 0.042[\text{TDSxTur}] - 0.046[\text{TDSxCl2}] + 0.003[\text{TDSxSO4}] + 0.011[\text{TDSxCOD}] + 6.492[\text{Fe_CxCOD}] - 1.183[\text{TurxCl2}] + 0.531[\text{TurxCOD}] + 0.432[\text{Cl2xSO4}] + 0.205[\text{Cl2xCOD}] - 0.154[\text{SO4xCOD}] + 0.012[\text{pH_CxTDS}] + 1.902[\text{pH_CxTur}] - 1.421[\text{pH_CxCl2}] - 0.4[\text{pH_CxCOD}] \quad (\text{Equação 7})$$

$$\text{EC_D} = - 0.64 + 5.807[\text{Tur}] - 1.001[\text{SO4}] + 1.702[\text{TDSxFe_C}] - 0.012[\text{TDSxTur}] + 0.031[\text{TDSxCl2}] + 0.007[\text{TDSxSO4}] - 0.025[\text{TDSxCOD}] + 24.785[\text{Fe_CxTur}] - 12.05[\text{Fe_CxCl2}] - 7.426[\text{Fe_CxCOD}] + 0.858[\text{TurxCl2}] - 0.642[\text{TurxCOD}] + 0.134[\text{SO4xCOD}] - 45.53[\text{pH_CxFe_C}] - 0.983[\text{pH_CxCl2}] - 0.253[\text{pH_CxSO4}] + 0.843[\text{pH_CxCOD}] \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{Log(Fe_D)} = 6.025 - 1.59[\text{pH_C}] + 0.006[\text{TDSxCl2}] - 0.108[\text{TurxSO4}] - 0.152[\text{TurxCOD}] - 0.101[\text{Cl2xSO4}] + 0.042[\text{SO4xCOD}] + 0.335[\text{pH_CxTur}] \quad (\text{Equação 9})$$

4.5. Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA - *Analysis of variance*) é usada para determinar se o modelo de regressão linear se ajusta aos dados e se as variáveis independentes do modelo têm um efeito significativo na variável dependente. A ANOVA testa a hipótese nula de que as médias populacionais da variável dependente para todos os grupos são iguais, contra a hipótese alternativa de que pelo menos uma média é diferente. Os

resultados da análise da variância para os três modelos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 12 - Teste ANOVA das regressões

Resposta		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
pH_D	Regressão	24.853	18	1.381	4.573	0.003
	Resíduo	4.227	14	0.302		
	Total	29.080	32			
EC_D	Regressão	35.467	17	2.086	14.354	0.000
	Resíduo	2.180	15	0.145		
	Total	37.648	32			
Log(Fe_D)	Regressão	8.991	7	1.284	3.266	0.017
	Resíduo	8.260	21	0.393		
	Total	17.250	28			

4.6. Validação dos modelos

A última etapa da construção de um modelo é garantir que ele representa a população geral e não apenas a amostra usada para construir o modelo e que também seja apropriado para as situações em que será usado. A tabela a seguir mostra os parâmetros R^2 e R^2_{Ajustado} , para cada modelo Kumar (2023), o coeficiente de determinação (R^2) representa a proporção de variação da variável independente que é previsível a partir das variáveis dependentes.

Entretanto, o coeficiente de determinação é apenas valido para regressão linear simples, para regressão linear múltipla o valor de R^2 é elevado mesmo se a variável independente não for significativa, enquanto o R^2_{Ajustado} eleva-se apenas quando a variável independente é significativa e afecta a variável dependente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

\hat{y}_i - representa o valor previsto;

\bar{y} - representa a medida da variável independente, e;

y_i - representa os valores dos pontos.

$$R_{Ajustado}^2 = 1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-m-1} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde N = tamanho da amostra, m = número de variáveis

Tabela 13 - Coeficientes de determinação e desvio padrão das regressões

Resposta	R	R ²	R ² ajustado	Erro padrão
pH_D	0.924	0.855	0.668	0.54946
EC_D	0.971	0.942	0.876	0.381246
Log(Fe_D)	0.722	0.521	0.362	0.62715

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Análise de regressão múltipla é a técnica que foi usada para estudar as relações entre o pH, condutividade e teor de ferro da água desmineralizada com os parâmetros de água bruta recebida na planta de desmineralização. Importa referir que todos os testes realizados neste trabalho são analisados a 5% de significância, assim sendo, se a significância associada ao valor for menor que 0.05, rejeita-se a hipótese nula, caso contrário não se rejeita a hipótese nula. Todas as análises estatísticas foram feitas com o auxílio do programa IBM SPSS Statistics.

A análise de dados iniciou-se com o resumo dos resultados experimentais obtidos apresentados na tabela 7, onde foram apresentados o desvio padrão, valor máximo, valor mínimo, o valor médio, o valor de dados faltantes e a percentagem correspondente dos dados faltantes. O pH da água desmineralizada varia entre 6 e 9.89, o teor de ferro de água desmineralizada entre 0 e 0.641 mg/l e a condutividade da água desmineralizada varia entre 0.05 e 6.61 $\mu\text{s}/\text{cm}$. A margem de condutividade pode ser explicada pela diferença dos sensores usados na mediação da condutividade, há tendência de se obter valores mais elevados quando as amostras foram testadas usando o conductímetro embutido no Hach HQ40d e valores mais baixados quando os valores são obtidos do conductímetro embutidos no interior do Mixed Bed, em parte este fenómeno pode ser justificado pela reacção da água desmineralizada com o dióxido de carbono presente no ar durante a mediação usando o Hach HQ40d, que gera ácido carbónico a partir do qual iões de hidrogénio se dissociam originando a elevação da condutividade da água, como observado na equação abaixo:



A figura 13 mostra que a turvação é o parâmetro que mais evidencia variações sazonais com um pico em Dezembro de 2021, seguido por um declínio nos meses seguintes até Julho de 2022, com um novo aumento observado em Dezembro de 2022 e Janeiro de 2023, reflectindo a influência das chuvas intensas que ocorrem principalmente nos meses de Dezembro a Março, que aumentam o escoamento superficial e a consequentemente turbidez.

Seguidamente prosseguiu-se com a eliminação das variáveis dependentes com mais de 35% de dados faltantes (ver tabela 7) e posteriormente foram eliminados os dos casos com dados faltantes superior a 50% (ver anexo 1. A2), como explicado no capítulo 4.1.

A realização das análises com a presença destes casos pode levar a interpretações errôneas e decisões incorrectas baseadas nos resultados das análises.

Desta análise foram eliminados dez (10) casos nomeadamente os casos: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 21 e 33, foram também eliminadas duas (2) variáveis independentes, nomeadamente: cloretos e sílica. Neste estudo, os dados faltantes foram resultados da indisponibilidade de reagentes na CTM para a realização dos testes em causa, bem como da indisponibilidade dos equipamentos para a realização dos testes seja por avaria, realização de manutenção ou calibração.

Seguidamente foi realizado do teste *little MCAR (Missing Completely at random – completamente perdidos ao acaso)*, onde a hipótese nula é que os dados foram são faltantes ao acaso. Os resultados são apresentados na tabela 8, de onde pode se observar uma significância de valor de 0.074, que é maior que a significância de 0.05, o que significa que se aceita a hipótese nula, isto é, os dados são faltantes ao acaso e não estão relacionados a nenhuma variável entre os dados deste modo não afectando de forma significativa os resultados das análises.

Com a certeza de que os dados faltantes não alteram o resultado das análises foi feita a atribuição de valores para os casos faltantes das variáveis independentes usando o método de maximização de estimativa, sendo este um método computacional que onde os resultados podem ser observados na tabela 9, e estes valores foram usados nas etapas subsequentes da análise.

Na figura 14 apresenta um gráfico quantil-quantil onde são comparadas as distâncias entre as distâncias de Mahalanobis calculadas e a distribuição qui-quadrado esperadas, para o grau de liberdade igual ao número de variáveis independentes (8). A distância de Mahalanobis é a distância de cada observação ao centro da nuvem de dados, levando em conta a forma da nuvem. A partir da mesma figura pode se observar que os dados na sua maioria seguem uma distribuição linear quando relacionados os qui-quadrado esperado e as distâncias de Mahalanobis calculados, com excepção de alguns casos gritantes como os casos 6 e 38, atendendo que valores maiores de distância de Mahalanobis indicam que uma observação está mais longe de onde a maioria dos pontos se agrupa, assim sendo, foram considerados *outliers* e foram eliminados.

Verificação de suposições

Importa referir que a violação de uma das suposições não implica que não se possa usar um modelo de regressão multivariada, apenas que deve-se considerar limitações e/ou adaptar os dados para realizar a modelação. A transformação logarítmica das variáveis é uma forma muito comum de transformar variáveis que não seguem uma distribuição normal em uma distribuição mais próxima de normal para melhorar a adequação do modelo (Erego, 2013).

No que diz respeito a multicolinearidade, quando duas variáveis estão altamente correlacionadas (maior que 0.7) fazendo com que uma variável possa prever a outra, gerando desta forma redundância, diz-se que são variáveis colineares. O coeficiente de Pearson foi usado para determinar a grau de correlação entre as variáveis em que os resultados são encontrados na tabela 10. A partir desta tabela verifica-se que existe uma relação alta entre a condutividade eléctrica da água da rede e o total de sólidos dissolvidos ($r = 0.942$), o que é explicado pelo facto de quando a água contém uma maior concentração de iões dissolvidos ela se torna um melhor condutor de electricidade, porque os iões carregados facilitam a condução de corrente eléctrica. A variável EC_C foi removida com o objectivo de eliminar a redundância, desde modo reduzir a probabilidade de ocorrência de instabilidade na estimação das variáveis através do modelo de regressão multivariado.

Homocedasticidade se refere a distribuição uniforme de erros, se esta suposição for verdadeira os erros para cada observação não depende de nenhuma variável no modelo. A figura 15 mostra os gráficos de dispersão padronizada entre os resíduos e os valores preditos para as três variáveis, onde pode se observar que os gráficos referentes ao pH da água desmineralizada (pH_D) e a condutividade eléctrica da água desmineralizada (EC_D) apresentam uma distribuição de resíduos uniformes ao longo do gráfico, indicando que cumpre a suposição de homocedasticidade. Por sua vez, o gráfico do teor de ferro (Fe_D) não cumpre a esta suposição, apresentando uma dispersão de dados no formato de um cone, facto este que levou a adaptação dos dados através da transformação logarítmica valor do teor de ferro (LogFe_D), de onde obteve-se o gráfico 14. d) onde a distribuição cumpre o princípio da homocedasticidade.

Quanto a independência, se esta suposição for verdadeira os erros padronizados devem estar distribuídos aleatoriamente ao longo do eixo das ordenadas. Olhando para a figura

15, há evidências de independência em todos os gráficos, dado que os pontos apresentam uma distribuição relativamente aleatória ao longo do eixo dos resíduos padronizados.

Na assunção de linearidade, assume-se que a relação entre as variáveis dependentes e independentes é linear. Analisando para a figura 15 pode se observar que os resíduos para as variáveis pH_D, EC_D e Log(Fe_D) não apresentam nenhuma curvatura significativa, sugerindo que a assunção de linearidade é verdadeira para estas variáveis.

A assunção de normalidade considera que a distribuição dos dados tem a forma de uma distribuição normal, que é uma condição necessária para a aplicação dos testes estatísticos de variância (F) e teste de hipóteses *t student*. Deste modo se a variação da distribuição normal for elevada todos os resultados estatístico serão inválidos para os testes mencionados. A figura 16 apresenta os gráficos p-p de probabilidade normal para as três variáveis dependentes, onde pode se observar que os variáveis dependentes pH_D e Log(Fe_D) os pontos assentam-se na linha diagonal continua, sugerindo a normalidade dos dados. Os pontos da variável EC_D não assentam na linha diagonal, no entanto, como mencionado anteriormente este facto não implica que a análise multivariada não possa ser usada, pois apesar do desvio apresentado, os dados não fogem de forma significativa a tendência linear.

Construção do modelo

Para a construção do modelo foram realizadas interações a partir de diferentes modelos atreves da criação de novas variáveis (ver anexo 1.A5), o que proporciona a possibilidade de representar uma vasta quantidade de relações através do modelo.

Através da comparação dos valores do incremento de R^2 que o modelo que melhor caracteriza as variações dos parâmetros de qualidade da água desmineralizada com base na qualidade de água da rede recebida é o seguinte:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ji} + \sum_{j=1}^k \sum_{n=j+1}^k \beta_{jn} X_{ji} X_{ni} + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 10})$$

O modelo acima foi escolhido pelo facto do R^2 não apresentar um incremento significativo quando se eleva a complexidade da equação. Do modelo acima observa-se a existência do efeito moderador ($X_{ji} X_{ni}$), que é quando a relação entre uma variável dependente e independente é afectada por uma variável independente.

A tabela 11 mostra os coeficientes para os diferentes modelos e os testes de significância para cada variável. A coluna B na tabela mostra os coeficientes para cada variável independente no modelo, sendo que estes coeficientes não podem ser comprados por serem apresentados em escalas diferentes. Os modelos contruídos podem ser observados no capítulo 4.7.

A coluna Sig contem o valor p (que indica a probabilidade de se obter uma diferença tão grande ou maior do que a observada na hipótese nula) para cada variável, sendo que a hipótese nula testada é a de que não há impacto significativo da variável independente na variável dependente. Assim sendo, para $\text{sig} < 0.05$, rejeita-se a hipótese nula e fornece evidências de que a variável independente é significativa na variação do modelo contruído. Dos modelos construídos algumas variáveis foram determinadas como não significativas, sendo descritas a seguir:

- Para a variável dependente pH_D, o coeficiente pH_CxTDS possui um coeficiente de 0.012, com um erro padrão de 0.006 e uma significância de 0.078;
- No caso de EC_D, a constante tem um coeficiente de -0.64, erro padrão de 1.866 e significância de 0.736. Outro coeficiente não significativo é TDSxTur, com um B de -0.012, erro padrão de 0.006 e significância de 0.089;
- Para a variável dependente Log(Fe_D), a constante possui um coeficiente de 6.025, erro padrão de 3.302 e significância de 0.082. Além disso, a variável Cl2xSO4 apresenta um coeficiente de -0.101, erro padrão de 0.059 e significância de 0.100.

Os coeficientes não significativos indicam que não há evidência estatística suficiente para afirmar que esses preditores têm um efeito real sobre as variáveis dependentes analisadas. Isso pode ocorrer por várias razões, como falta de relação real entre as variáveis preditoras e dependentes e variabilidade nos dados que pode ocultar a verdadeira relação entre as variáveis.

Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) apresentada na tabela 12 tem como objectivo verificar a significância estatística dos modelos de regressão para três variáveis dependentes em estudo. Para pH_D, o valor F de 4.573 compara a variabilidade explicada pelo modelo com a variabilidade residual. Um p-valor de 0.003 indica que há uma forte evidência de que o modelo de regressão é significativo, ou seja, o modelo explica significativamente

a variabilidade na variável dependente. Para EC_D, o valor F de 14.354 é relativamente elevado, indicando uma alta relação entre as variáveis independentes e EC_D. O p-valor menor que 0.001 sugere que o modelo é altamente significativo. Log(Fe_D), o valor F de 3.266 também é significativo, e o p-valor de 0.017 confirma que há uma evidência estatística suficiente para considerar o modelo de regressão significativo para esta variável.

Os modelos de regressão são estatisticamente significativos para todas as variáveis dependentes analisadas, indicando que os preditores utilizados explicam uma porção substancial da variabilidade observada nas variáveis pH_D, EC_D e Log(Fe_D). Estes achados destacam a eficácia dos modelos em capturar a relação entre as variáveis preditoras e as variáveis dependentes.

Adequação do modelo

A tabela 13 apresenta os coeficientes de determinação e o erro padrão das regressões para três variáveis dependentes, esta análise permite avaliar a eficácia dos modelos de regressão e a precisão das previsões.

Para a variável pH_D, o coeficiente de correlação de 0.924 indica uma forte relação linear entre as variáveis independentes e pH_D. O coeficiente de determinação (R^2) de 0.855 sugere que 85.5% da variabilidade na variável dependente pH_D é explicada pelo modelo de regressão. Esta percentagem indica um modelo robusto. No entanto, o R^2 ajustado de 0.668, que corrige o R^2 pela quantidade de variáveis independentes no modelo, é menor. Isso pode indicar que algumas variáveis independentes não contribuem significativamente para a explicação da variabilidade de pH_D.

Para EC_D, o coeficiente de correlação de 0.971 indica uma relação linear extremamente forte entre as variáveis independentes e a variável dependente. O R^2 de 0.942 revela que 94.2% da variabilidade em EC_D é explicada pelo modelo de regressão, sugerindo que 5.8% das variações da variável dependente não são explicadas pelo modelo. O R^2 ajustado de 0.876, embora menor que o R^2 , ainda indica que o modelo é eficaz, com a maior parte das variáveis independentes contribuindo significativamente para a previsão.

Para Log(Fe_D), o coeficiente de correlação de 0.722 indica uma correlação moderada entre as variáveis independentes e a variável dependente. O R^2 de 0.521 mostra que 52.1% da variabilidade em Log(Fe_D) é explicada pelo modelo, indicando um ajuste

moderado. O R^2 ajustado de 0.362 é consideravelmente menor, sugerindo que muitas variáveis independentes podem não ser significativas.

De modo geral, os modelos para as variáveis independentes pH_D e EC_D explicam melhor a variabilidade destas variáveis em comparação com o modelo para Log(Fe_D).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Neste estudo, foi feita uma pesquisa com o objectivo de estabelecer equações múltiplas lineares para prever a variação de pH, condutividade e o teor de ferro na água desmineralizada com base na variação da qualidade da água bruta recebida na Central Termoeléctrica de Maputo.

No final deste trabalho foi descrito o processo desmineralização da água realizado na Central Termoeléctrica de Maputo, que inclui as etapas de pré-tratamento, osmose reversa e troca iónica pelos Mixed Beds, que demonstrou ser eficiente na produção de água desmineralizada a uma vazão de 16 m³/h.

As suposições para a construção do modelo de regressão multivariado foram cumpridas na sua maioria, apesar de ter havido a necessidade de logaritmicar os dados da variável Fe_D de modo a adequar os dados a suposição de homocedacidade.

A análise dos resultados da ANOVA para as variáveis pH_D, EC_D e Log(Fe_D) revela que todos os modelos são estatisticamente significativos, com valores de p menores que 0.05. O modelo para pH_D apresenta um valor de p de 0.003, indicando que a variabilidade explicada pelo modelo é considerável. Para EC_D com um valor de p de 0.000, sugerindo que o modelo é altamente significativo. Já para Log(Fe_D), a soma dos quadrados de regressão é 8.991, com um valor de p de 0.017, indicando que o modelo é moderadamente significativo.

Os coeficientes de determinação fornecem uma avaliação quantitativa da eficácia dos modelos de regressão. Para pH_D e EC_D, os altos valores de R² e os relativamente baixos erros padrão da estimativa indicam que os modelos são eficazes em explicar a variabilidade das variáveis dependentes e são precisos em suas previsões. No caso de Log(Fe_D), o valor de R² moderado e o maior erro padrão da estimativa sugerem que o modelo é menos eficaz e menos preciso. A diferença entre R² e R²_{ajustado} para todas as variáveis sugere que a revisão dos preditores utilizados poderia potencialmente melhorar a eficácia dos modelos, especialmente para Log(Fe_D).

De modo geral todos os modelos são capazes de explicar mais de 50% das variações das suas respectivas variáveis dependentes, com destaque para o EC_D com melhor adequação, tendo um coeficiente de determinação de 94.2%.

6.2. Recomendações

- Avaliar tendências longas dos dados laboratoriais para identificar instabilidades e/ou tendências operacionais;
- Ajustar regularmente a operação dos equipamentos de acordo com a qualidade da água da rede recebida na planta, de modo a evitar sobrecargas dos equipamentos e prolongar a sua vida útil;
- Usar os dados laboratoriais para avaliar a capacidade da planta que permite visualizar a capacidade que o processo tem de consistentemente produzir água desmineralizada dentro das especificações de qualidade requeridas.

7. BIBLIOGRAFIA

- Applebaum, S. B. (1968). *Demineralization by Ion Exchange in water treatment and chemical processing of other liquids*. New York: Academic Press.
- Aqua Pure Filters. (s.d.). *Methods of Treatment for Water Contaminants*. Obtido em 26 de June de 2023, de <https://www.aquapurefilters.com/contaminants/118/chloride.html>
- Ashish. (23 de February de 2022). *Science ABC*. Obtido em 10 de June de 2023, de Science ABC: <https://www.scienceabc.com/pure-sciences/why-does-water-expand-when-it-freezes.html>
- Barbieri, M., Ricolfi, L., Vitale, S., Muteto, P. V., Nigro, A., & Sappa, G. (2018). Assessment of groundwater quality in the buffer zone of Limpopo National Park, Gaza Province, Southern Mozambique.
- Bradley, E. (29 de November de 2022). *Dober*. Obtido em 17 de July de 2023, de Wastewater Coagulation: [dober.com/water-treatment/resources/wastewater-coagulation](https://www.dober.com/water-treatment/resources/wastewater-coagulation)
- Buecker, B. (2006). *Power plant water chemistry : a practical guide*. Oklahoma, USA: PennWell.
- Chant, J. (28 de July de 2022). *Monarch Chemicals*. Obtido em 05 de July de 2023, de What is Poly Aluminium Chloride?: <https://www.monarchchemicals.co.uk/Information/News-Events/873-/What-is-Poly-Aluminium-Chloride>
- Cheremisinoff, N. P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatments and Technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Erego, F. (2013). *Multiple Linear Regression Models for Estimating Microbial Load in a Drinking Water Source Case from the Glomma River, Norway*. Master Thesis, Norwegian University of Life Sciences, Department of Mathematical Sciences and Technology.
- Filzmoser, P. (s.d.). *A Multivariate Outlier Detection Method*. Vienna.
- Fondriest Environmental, Inc. (3 de March de 2014). *Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids*. Obtido em 29 de June de 2023, de Fondriest Environmental Learning Center: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>
- Gama, P. S. (2017). *Clarificação, dessalinização e desmineralização da água do mar para geração de vapor em caldeiras*. Trabalho de conclusao de curso, Universidade Federal de Maranhao, Centro de Ciencias Exactas e Tecnologia, Sao Luis.
- Google Maps. (2023). Obtido em 23 de July de 2023, de <https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1hIbarptOO7XxArLvMgIIbelEEhvO5YU&ll=-25.938675390537878%2C32.528445299999998&z=18>

- Hahs-Vaughn, D. L. (2017). *Applied Multivariate Statistical Concepts*. New York: Routledge.
- Hair, J., Black, W., Babin, B., & Anderson, R. (2019). *Multivariate Data Analysis*. Andover, Hampshire, United Kingdom: Annabel Ainscow.
- Haiyuan Water Treatment Plant. (24 de November de 2021). *LinkedIn*. Obtido em 16 de July de 2023, de Introduction and Instruction about Cartridge Filter in RO Plant: https://www.linkedin.com/pulse/introduction-instruction-cartridge-filter-ro-plant-bella-chen?utm_source=share&utm_medium=member_android&utm_campaign=share_via
- Helen E. Diggs, J. M. (2009). Aquatic Facilities. Em N. L. Jack Hessier, *Planning and Designing Research Animal Facilities* (pp. 323-331). London: Elsevier Inc.
- Hendricks, D. (2011). *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes - Physical, Chemical, and Biological*. Boca Raton: CRC Press.
- Hoyt, W. T., Leierer, S., & Millington, M. J. (2006). Analysis and Interpretation of Findings Using Multiple Regression Techniques. *Rehabil Couns Bull*, 49. doi:DOI: 10.1177/00343552060490040401
- Jha, J., & Jha, S. (s.d.). *Water chemistry practices in thermal power stations*. India.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (6th ed.). London: Pearson Education, Inc.
- Kucera, J. (2010). *Reverse Osmosis - Design, Processes, and Applications for Engineers*. Salem, USA: Scrivener Publishing.
- Kumar, A. (13 de November de 2023). *R-squared in Linear Regression Models: Concepts, Examples*. Obtido de Analytics Yogi: <https://vitalflux.com/r-squared-explained-machine-learning/>
- LawnStarter. (s.d.). *Water Consumption Statistics 2023*. Obtido em 23 de June de 2023, de <https://www.lawnstarter.com/blog/statistics/water-consumption-statistics/>
- MN Editors. (11 de October de 2022). *Chemical Oxygen Demand (COD) - Definition, Measurement, Uses*. Obtido em 2 de July de 2023, de Microbiology Note: <https://microbiologynote.com/chemical-oxygen-demand-cod/>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2011). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (5th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Mukherjee, N. (14 de October de 2020). *LinkedIn*. Obtido em 05 de July de 2023, de Coagulants - Aluminium sulphate vs Poly aluminium chloride: How basicity of coagulant does miracle?: <https://www.linkedin.com/pulse/coagulants-aluminium-sulphate-vs-poly-chloride-how-does-mukherjee>
- Nalco Company. (2009). *The Nalco Water Handbook* (3rd ed.). New York: McGraww Hill.

- Omer, N. H. (2020). Water Quality Parameters. Em *Water Quality - Science, Assessments and Policy*. IntechOpen.
- Pattamon, J., & Tangjitsitcharoen, S. (2018). Reduction of Breakdown for Gas Turbine in Combined Cycle Power Plant. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 7, 630-634.
- PrePara Enem. (s.d.). Obtido em 19 de June de 2023, de Poluição térmica: <https://www.preparaenem.com/biologia/poluicao-termica.htm>
- Sharp, K. (2001). *Water: Structure and Properties*.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics* (6th ed.). New York, United States of America: Pearson Education, Inc.
- Tranmer, M., Murphy, J., Elliot, M., & Pampaka, M. (January de 2020). Multiple Linear Regression. *Cathie Marsh Institute Working Paper*.
- USAID. (s.d.). Mozambique Water Resources Profile.
- Venkateswarlu, K. S. (1996). *Water Chemistry - Industrial and Power Station Water Treatment*. New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Voutchkov, N. (2017). *Pretreatment for Reverse Osmosis Desalination*. Kidlington: Elsevier.
- Water Science School. (6 de June de 2018). *Turbidity and Water*. Obtido em 2 de July de 2023, de USGS: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/turbidity-and-water#overview>
- Wilson, F. B. (2010). *Tratamento de Valores Omissos Num Conjunto de Dados*. Trabalho de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Matemática e Informática, Maputo.
- YSI. (August de 2015). *The pH Handbook: a practical guide to pH measurement*. Yellow Springs.