

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

LEANDRO MACHADO BRIZOLA

BALANÇO DE MASSA DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO CONVENCIONAL E  
ELETRODIÁLISE PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA

PONTA GROSSA

2022

LEANDRO MACHADO BRIZOLA

BALANÇO DE MASSA DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO CONVENCIONAL E  
ELETRODIÁLISE PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, na área de recursos hídricos, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga

PONTA GROSSA

2022

B862 Brizola, Leandro Machado  
Balanço de massa de um sistema de tratamento convencional e eletrodíálise para dessalinização de água salobra / Leandro Machado Brizola. Ponta Grossa, 2022.  
75 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga.

1. Água salobra. 2. Eletrodíálise. 3. Tratamento convencional. 4. Balanço de massa. 5. Taxa de recuperação. I. Széliga, Marcos Rogério. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO****PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

Certificado nº 03/2022 PPGESA

Título da Dissertação: “**BALANÇO DE MASSA DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO CONVENCIONAL E ELETRODIÁLISE PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA SALOBRA**”.

Nome: LEANDRO MACHADO BRIZOLA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga  
Universidade Estadual de Ponta Grossa/Ponta Grossa - PR

Profª. Drª. Taiana Cestonaro  
Universidade Estadual do Maranhão/São Luís - MA

Profª. Drª. Jeanette Beber de Souza  
Universidade Estadual do Centro-Oeste/Irati - PR

Ponta Grossa, 5 de outubro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Taiana Cestonaro, Usuário Externo**, em 06/10/2022, às 17:28, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Jeanette Beber de Souza, Usuário Externo**, em 06/10/2022, às 20:33, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Rogerio Szeliga, Professor(a)**, em 13/10/2022, às 14:05, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **1164560** e o código CRC **D111912F**.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA).

Aos professores do PPGESA, pela contribuição de seus conhecimentos.

Ao Professor Dr. Marcos Rogério Széliga pela orientação e apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos membros da banca de defesa da dissertação, pela contribuição na melhoria deste trabalho.

Aos companheiros de laboratório, em especial à mestranda Meiryellen, pelo desenvolvimento das atividades em conjunto, pelas conversas enquanto esperávamos os resultados e todo o apoio.

Ao meu companheiro Cesar por todo o suporte e apoio durante toda a pós graduação.

À minha família e amigos, pelo incentivo todo o tempo e acreditarem no meu potencial.

## RESUMO

O gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis tem se destacado à medida que há uma maior demanda de água pela população e atividades produtivas, em um cenário onde existem períodos de estiagem e desperdício. Além disso, é importante a consideração da qualidade da água disponível, que nem sempre é a qualidade requisitada. Um dos parâmetros que podem dificultar o consumo da água é a presença de sais de meios naturais ou antropogênicos. Surge como uma importante alternativa os processos de dessalinização de água salobra para purificação das águas. Com o objetivo de estudar alternativas para remoção de sais, foi implantado um sistema de dessalinização de água salobra, em escala de bancada, nas dependências da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), no município de Ponta Grossa, no Paraná. Avaliaram-se os sistemas de maneira global e separadamente a partir dos dados de produção e consumo de água, calculando-se o balanço de massa para as diferentes concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT). O sistema foi constituído pelo conjunto de unidades em escala de bancada que compõem o tratamento convencional (TC), seguido da dessalinização por eletrodialise (ED). A água salobra foi obtida por meio da mistura de água salina e doce, como fonte de água salina foram utilizadas a água residuária de tratamento de osmose reversa (sólidos dissolvidos totais (SDT) = 9000 mg.L<sup>-1</sup>), disponível do Laboratório da UEPG e água do mar (SDT = 23900 mg.L<sup>-1</sup>) da cidade de Camboriú, em Santa Catarina. Como fonte de água doce foram utilizadas águas do Alagados e Rios Pitangui e Verde, no município de Ponta Grossa, Paraná. Ao todo, foram realizados 3 experimentos no TC e 9 na ED, dos quais: o primeiro experimento de TC, foi com concentração de SDT 1000 ± 180 mg.L<sup>-1</sup>, seguido dos 3 ensaios de ED para esta mesma concentração; o segundo ensaio de TC foi realizado com concentração de SDT de 2000 ± 180 mg.L<sup>-1</sup>, seguido dos 3 ensaios de ED para esta concentração de SDT; o terceiro experimento de TC foi para concentração de SDT de 3000 ± 180 mg.L<sup>-1</sup>, seguido dos 3 ensaios de ED. O volume de água tratado (taxa de recuperação) foi em média no processo global de 38,21% e separadamente da ED de 64,97%. A remoção de SDT na eletrodialise foi em média maior que 82,71% para as diferentes concentrações. Quanto maior a concentração inicial de SDT no fluxo de água a ser dessalinizada, maior a corrente elétrica inicial, conseqüentemente, maior descarga mássica na concentração de SDT de 3000 ± 180 mg.L<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** Água salobra. Eletrodialise. Tratamento convencional. Balanço de massa. Taxa de recuperação.

## ABSTRACT

The management of available water resources has been stood out as there is a greater demand for water by the population and productive activities, in a scenario where there are periods of drought and waste. In addition, it is important to consider the quality of the available water, which is not always the required quality. One of the parameters that can hinder water consumption is the presence of salts from natural or anthropogenic means. It appears as an important alternative the desalination processes of brackish water for water purification. In order to study alternatives for the removal of salts, a system of desalination of brackish water, on a bench scale, was implemented in the premises of the State University of Ponta Grossa (UEPG), in the municipality of Ponta Grossa, Paraná. The systems were evaluated globally and separately from the data of water production and consumption, calculating the mass balance for the different concentrations of total dissolved solids (TDS). The system consisted of a set of bench scale units that make up the conventional treatment (TC), followed by electrodialysis desalination (ED). Brackish water was obtained by mixing saline and fresh water, as a source of saline water were used wastewater treatment of reverse osmosis (total dissolved solids (TDS) = 9000 mg.L<sup>-1</sup>), available from the UEPG Laboratory and sea water (TDS = 23900 mg.L<sup>-1</sup>) from the city of Camboriú, Santa Catarina. Water from Alagados, Pitangui and Verde rivers were used as freshwater source in the municipality of Ponta Grossa, Paraná. In all, 3 experiments were performed in TC and 9 in ED, of which: the first TC experiment was with concentration of SDT 1000 ±180 mg.L<sup>-1</sup>, followed by 3 DE tests for this same concentration; the second CT test was performed with SDT concentration of 2000 ±180 mg.L<sup>-1</sup>, followed by 3 DE assays for this SDT concentration; the third TC experiment was for SDT concentration of 3000 ±180 mg.L<sup>-1</sup>, followed by 3 ED assays. The volume of treated water (recovery rate) was on average in the overall process of 38.21% and separately from the DE of 64.97%. The removal of SDT in electrodialysis was on average higher than 82.71% for the different concentrations. The higher the initial concentration of TDS in the water flow to be desalinated, the greater the initial electric current, consequently, the greater mass discharge at the TDS concentration of 3000 ±180 mg.L<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Brackish water. Electrodialysis. Conventional treatment. Mass balance. Recovery rate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de tratamento de água do tipo convencional.....	15
Figura 2 - Distribuição granulométrica esperada para as partículas coloidais presentes na água bruta, coagulada e floculada.....	17
Figura 3 - Eletrodialise .....	21
Figura 4 - Esquema de funcionamento da eletrodialise .....	21
Figura 5 - Curva proposta por Cowan & Brown, 1959.....	23
Figura 6 - Representação esquemática do fluxo de massa .....	25
Figura 7 - Representação esquemática do tratamento convencional.....	26
Figura 8 - Representação esquemática da eletrodialise .....	27
Figura 9 - Etapas da pesquisa.....	29
Figura 10 - Sistema de tratamento convencional de bancada .....	33
Figura 11 - Vista frontal do conjunto decantação e filtração.....	34
Figura 12 - Representação esquemática do tratamento convencional.....	35
Figura 13 - (a) Sistema de dessalinização .....	37
Figura 14 - (b) Sistema de dessalinização .....	38
Figura 15 - Representação esquemática do sistema de dessalinização .....	38
Figura 16 - Fluxograma do sistema de tratamento - Localização dos pontos de coleta e pontos de medição de volume.....	42
Figura 17 - Modelo de planilha utilizada no cálculo do balanço de massa do sistema .....	43
Figura 18 - Modelo de planilha utilizada no cálculo do balanço de massa da eletrodialise .....	45
Figura 19 - Curva de Cowan & Brown.....	47
Figura 20 Corrente elétrica para concentração de SDT 1000 mg/L .....	48
Figura 21 - Corrente elétrica para concentração de SDT 2000 mg/L .....	48
Figura 22 - Corrente elétrica para concentração de SDT 3000 mg/L .....	49
Figura 23 - Fluxograma do sistema de dessalinização na concentração de SDT 1000 mg/L - Resultados do balanço de massa .....	50
Figura 24 - Taxa de recuperação parcial da ED – 1000 mg/L.....	52
Figura 25 - Fluxograma do sistema de dessalinização na concentração de SDT 2000 mg/L - Resultados do balanço de massa .....	54
Figura 26 - Taxa de recuperação parcial da ED – 2000 mg/L.....	56
Figura 27 - Fluxograma do sistema de dessalinização na concentração de SDT 3000 mg/L - Resultados do balanço de massa .....	57
Figura 28 - Taxa de recuperação parcial da ED – 3000 mg/L.....	59



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo dos experimentos .....	30
Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água bruta .....	31
Tabela 3 - Equipamento de Jartest .....	31
Tabela 4 - Dose de coagulante .....	32
Tabela 5 - Especificações gerais da unidade ED 200 .....	36
Tabela 6 - Balanço de massa para concentração de SDT 1000 mg/L .....	51
Tabela 7 - Balanço de massa para concentração de SDT 2000 mg/L .....	55
Tabela 8 - Balanço de massa para concentração de SDT 3000 mg/L .....	58
Tabela 9 - Resumo do balanço de massa .....	61

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
3.1 ÁGUA SALINA .....	13
3.1.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) .....	13
3.1.2 Condutividade Elétrica.....	14
3.2 SISTEMA DE PRÉ TRATAMENTO CICLO COMPLETO.....	14
3.2.1 Coagulação .....	15
3.2.2 Floculação .....	16
3.2.3 Decantação .....	17
3.2.4 Filtração.....	18
3.3 TÉCNICA DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS.....	18
3.3.1 Osmose Reversa.....	19
3.3.2 Eletrodialise.....	20
3.3.1.1 Determinação da corrente limite	22
3.3.3 Eletrodialise x Osmose Reversa .....	23
3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS .....	24
3.4.1 Pressão .....	24
3.4.2 Vazão .....	24
3.4.3 Concentração .....	25
3.4.4 Descarga Mássica .....	25
3.4.5 Balanço De Massa .....	25
3.4.6 Taxa De Recuperação.....	27
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO .....	29
4.1.1 Água Salobra.....	30
4.1.2 Dosagem De Coagulante .....	31
4.1.3 Sistema De Bancada Do Tratamento Convencional .....	32
4.1.3.1 Instalação do sistema	32
4.1.3.2 Operação do sistema	35
4.1.4 Sistema De Dessalinização.....	36

4.1.4.1 Instalação do sistema	36
4.1.4.2 Operação do sistema	39
4.1.5 Determinação Da Corrente Limite .....	39
4.2 MONITORAMENTO DAS UNIDADES .....	40
4.3 BALANÇO DE MASSA.....	42
4.3.1 Sistema Completo De Tratamento .....	43
4.3.2 Eletrodiálise.....	45
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	46
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
5.1 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE LIMITE .....	47
5.2 CORRENTE ELÉTRICA NA ED.....	47
5.3 CONCENTRAÇÃO DE SDT 1000 mg.L <sup>-1</sup> .....	50
5.3.1 Balanço De Massa .....	50
5.3.2 Taxa De Recuperação.....	52
5.4 CONCENTRAÇÃO DE SDT 2000 mg.L <sup>-1</sup> .....	53
5.4.1 Balanço De Massa .....	53
5.4.2 Taxa De Recuperação.....	55
5.5 CONCENTRAÇÃO DE SDT 3000 mg.L <sup>-1</sup> .....	56
5.5.1 Balanço De Massa .....	56
5.5.2 Taxa De Recuperação.....	58
5.6 RESULTADOS GERAIS.....	59
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE A – BALANÇO DE MASSA NA ELETRODIÁLISE.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis tem se destacado à medida que há uma maior demanda de água pela população e atividades produtivas, em um cenário onde existem períodos de estiagem e desperdício.

É importante a consideração da qualidade da água disponível, que nem sempre é a qualidade requisitada. A demanda de água para consumo humano, por exemplo, deve atender o padrão de potabilidade, conforme legislação vigente. No caso do Brasil, a Portaria de Nº 888, do Ministério da Saúde (2021), que estabelece os parâmetros aceitáveis.

Um dos parâmetros que interferem na potabilidade da água é a presença de sais dissolvidos que alteram as propriedades organolépticas da água, conferindo-lhe sabor salgado, afetando a aceitação para consumo humano.

Os sais podem estar presentes nas águas por meios naturais ou ações antrópicas, como as práticas agropecuárias sem manejo adequado do solo, manejo inadequado dos sistemas de irrigação (BITTENCOURT, 2014), excessivo bombeamento de poços em regiões costeiras, provocando a salinização das águas nesses aquíferos (PNRH, 2011), efluentes industriais e domésticos.

O processo de purificação das águas que apresentam sais dissolvidos em faixa que impede o consumo humano é designado dessalinização. Os tratamentos de dessalinização surgem como uma importante opção na obtenção de água potável, pois 97% (TELLES, 2010) do volume de água do planeta é salgada.

Ações para a dessalinização e purificação de águas salobras vem ganhando destaque no semiárido brasileiro através do Programa Água Doce (PAD), que até outubro de 2020 contava com 840 sistemas de dessalinização, atendendo 1,2 mil comunidades rurais nessa região (MDR, 2020).

O tratamento direcionado à remoção de sais dissolvidos pode ocorrer por processos térmicos e os processos de membranas (SANMARTINO *et al*, 2016). A eletrodialise é um tratamento de água por membranas, possibilitado a partir de uma diferença de potencial elétrica de eletrodos na extremidade da célula (METCALF; EDDY, 2016).

O objetivo do trabalho foi empregar a técnica de tratamento convencional, no intuito de remover turbidez, cor e sólidos suspensos da água, e posterior processo de eletrodialise, para dessalinização, ambos em escala de bancada, para o tratamento

de água salobra, visando analisar o balanço de massa dos sólidos dissolvidos totais (SDT) nos processos envolvidos. A água bruta empregada consistiu na mistura de água do rio com água salina, correspondendo, dessa forma, a uma simulação de intrusão salina em água doce atingindo os valores de SDT de  $1000 \pm 180$ ,  $2000 \pm 180$  e  $3000 \pm 180$  mg.L<sup>-1</sup>. Também foi caracterizada a água bruta, por meio de alguns parâmetros indicadores de qualidade da água.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Instalar, monitorar e analisar o sistema de tratamento convencional e a técnica de eletrodialise em um sistema de dessalinização de água salobra em escala de bancada, considerando o balanço de massa nas etapas de tratamento em diferentes concentrações de sólidos dissolvidos totais.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular o balanço de massa do tratamento convencional e eletrodialise, considerando os dados de SDT e vazões de entrada e saída do sistema de dessalinização de água salobra;
- Avaliar a eficiência do processo global em diferentes concentrações de SDT, assim como as operações unitárias dos sistemas, a partir dos dados de produção e consumo de água, bem como a efluência da massa de sais dissolvidos;
- Propor condições operacionais otimizadas relacionadas à descarga mássica e taxa de recuperação de água no sistema.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ÁGUA SALINA

Como um solvente poderoso, a água pode dissolver praticamente qualquer substância, esta capacidade vem da natureza polar de sua molécula. A água dissolve sólidos inorgânicos que dão origem a água salina (GARRISON, 2016).

A salinidade dos oceanos é em média 3,5% em massa e depende de fatores como evaporação, precipitação e descarga de água doce dos continentes (GARRISON, 2016). Comumente a água salina está associada às águas oceânicas, porém esta característica não é exclusiva dessas águas. Podem ocorrer contaminações químicas e outros processos, que por exemplo, ocasionam a elevação da salinidade do solo e conseqüentemente a elevação desta característica nas águas que o percolam (BITTENCOURT, 2014).

O parâmetro usual para verificar esta propriedade quando presente na água são os sólidos dissolvidos totais (SDT), conforme a Portaria de N° 888, do Ministério da Saúde (2021), o valor máximo permitido deste é 500 mg.L<sup>-1</sup>. Outro parâmetro que possibilita a obtenção da concentração de SDT é a condutividade elétrica.

A água salobra contém alguns sais dissolvidos e pode ser utilizada para recreação de contato secundário, o teor de SDT deve estar entre 500 a 30.000 mg.L<sup>-1</sup>. Já a água do mar contém muitos sais dissolvidos, sendo o principal o cloreto de sódio, podendo ocorrer teor de SDT igual ou superior a 30.000 mg.L<sup>-1</sup>, a qual é denominada água salgada (TELLES *et al*, 2010).

São encontradas águas subterrâneas com baixa a moderada salinidade, com valores em torno de 1.000 a 5.000 mg/L de sólidos dissolvidos totais. A água salobra inviabiliza sua aplicação no abastecimento para consumo, industrial e agrícola. Dessa forma, existe o interesse na dessalinização dessas fontes para possibilitar sua aplicação (HOWE, 2017).

##### 3.1.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

A dimensão das partículas consideradas dissolvidas é inferior a 10<sup>-3</sup> µm, as partículas com dimensões superiores a 10<sup>-3</sup> µm até 1 µm são caracterizadas como partículas coloidais e superiores a 1 µm, como partículas suspensas (FERREIRA FILHO, 2017).

Os SDT são consequência de sais inorgânicos e pequenas quantidades de matéria orgânica dissolvida na água. Estes são provenientes do contato com rochas, escoamento superficial em áreas agrícolas e a descarga de águas residuárias. Os principais constituintes são cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbono, cloreto, sulfato e nitrato (DI BERNARDO, 2011).

### 3.1.2 Condutividade Elétrica

A condutividade está diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos na forma de íon, sua determinação também possibilita obter uma estimativa rápida da concentração de sólidos dissolvidos de uma amostra (RICHTER, 2018; MMA, 2015).

Portanto a salinidade pode ser medida pela condutividade elétrica (CE), quanto maior a concentração de eletrólitos maior a capacidade de condução de corrente elétrica da água. A unidade de medida deste parâmetro é o deciSiemens por metro (dS/m), microSiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ou milimós por centímetro (mmho/cm). Utilizando de fatores de conversão a condutividade elétrica pode ser expressa em miligramas por litro (mg/L) de sais dissolvidos totais no líquido (MANCUSO, 2003).

## 3.2 SISTEMA DE PRÉ TRATAMENTO CICLO COMPLETO

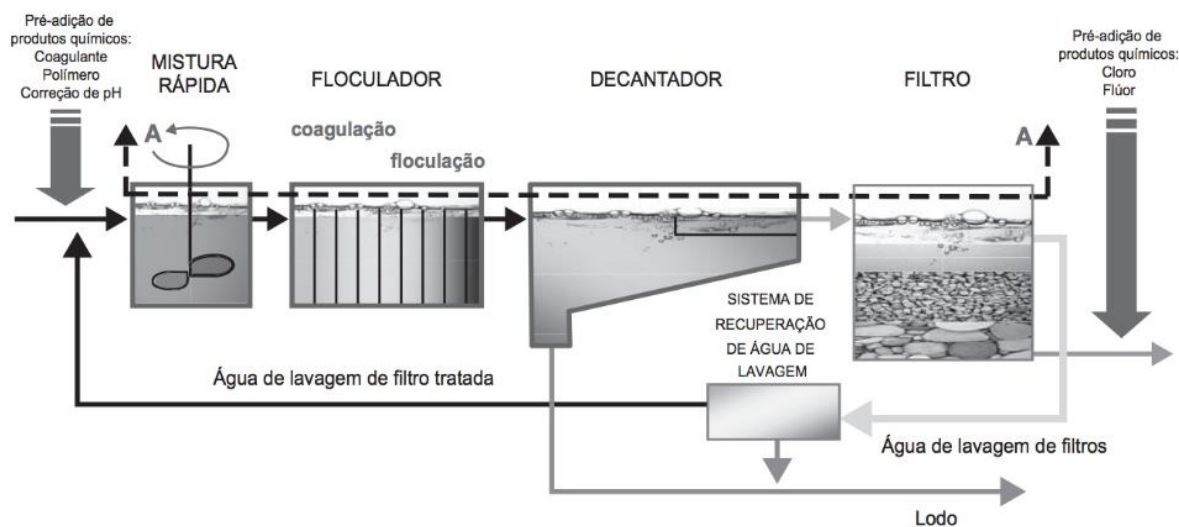
O objetivo da estação de tratamento de água é a transição da água bruta para a tratada, de maneira que seja possível atender a um padrão de potabilidade mínimo fixado pelas autoridades competentes. O tratamento convencional de águas de abastecimento, tem como propósito garantir a qualidade estética e microbiológica da água tratada, além de assegurar que eventuais subprodutos da desinfecção formados apresentem concentrações abaixo dos padrões de potabilidade vigentes (FERREIRA FILHO, 2017).

O tratamento de água dito convencional, é composto pelas operações de coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e correção de pH e fluoretação, ao final do processo a água deve apresentar as características dentro do padrão de potabilidade (BITTENCOURT, 2014).

Na Figura 1 está representada a sequência de etapas do sistema de tratamento convencional.



Figura 1 - Sistema de tratamento de água do tipo convencional



Fonte: Bittencourt, 2014.

A seleção do sistema de tratamento leva em conta a qualidade da água da fonte, a qualidade desejada para a água tratada, a quantidade de água necessária e a capacidade da instalação (HOWE *et al*, 2016).

Em princípio, as operações unitárias envolvidas no tratamento convencional em ciclo completo e suas variantes estão concentradas nas partículas em suspensão e coloidais (FERREIRA FILHO, 2017).

A maioria dessas estações de tratamento de água de superfície, têm sistemas projetados para remover fisicamente os micro-organismos, além de tanques de contato de desinfetantes projetados para desinfetar a água. Por outro lado, estes tratamentos não têm a capacidade de remoção de contaminantes dissolvidos, cujos quais são característicos de algumas fontes de águas subterrâneas (HOWE *et al*, 2016).

Dentre as soluções para redução de SDT estão os processos de membranas (nanofiltração e osmose reversa) e demais técnicas de dessalinização (FERREIRA FILHO, 2017).

### 3.2.1 Coagulação

Na etapa de coagulação ocorre a adição de um ou mais produtos químicos com o objetivo de criar condições que permitam a remoção de partículas e matéria dissolvida ou preparar a matéria suspensa, coloidal e dissolvida para o processamento na etapa seguinte (HOWE *et al*, 2016).

A coagulação pode ser descrita como um processo de transporte de fluidos, pois envolve uma mistura rápida do coagulante com a água, associado à precipitação e união de partículas primárias. A eficiência de coagulação tem relação direta com o pH e sofre influência da temperatura, por sua ação constante de equilíbrio da água, e também é influenciada por fatores, como a turbidez, cor e alcalinidade (RICHTER, 2009).

Para que os processos a jusante da etapa de coagulação sejam operados de forma adequada, é necessário que sua operação aconteça em condições ideais (FERREIRA FILHO, 2017). Denotando a importância da aplicação adequada do coagulante, esta é estudada e avaliada através do ensaio de jarros (*jar-test*, em inglês), que possibilita a definição da aplicação mais eficiente do produto químico antes de utilizar nas unidades de tratamento (BITTENCOURT, 2014).

O *jar test* simula as etapas de coagulação, floculação e decantação, este ensaio é realizado para uma faixa de produtos químicos, conforme capacidade do equipamento, este valor pode ser dosado inicialmente por faixa de valores experimentais, estações em funcionamento ou estudos existentes.

Ao final do ensaio é verificada a turbidez e/ou cor, se nenhuma das amostras tem resultado satisfatório, por exemplo, turbidez menor que 5 UNT, deve-se realizar novo teste em outra faixa de dosagem, até se obter uma coagulação satisfatória (RICHTER, 2009).

Entre os produtos químicos, responsáveis pela neutralização das cargas das partículas coloidais, destaca-se como os mais empregados os sais de alumínio (sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio) e os sais de ferro (sulfato férrico e cloreto férrico) (FERREIRA FILHO, 2017).

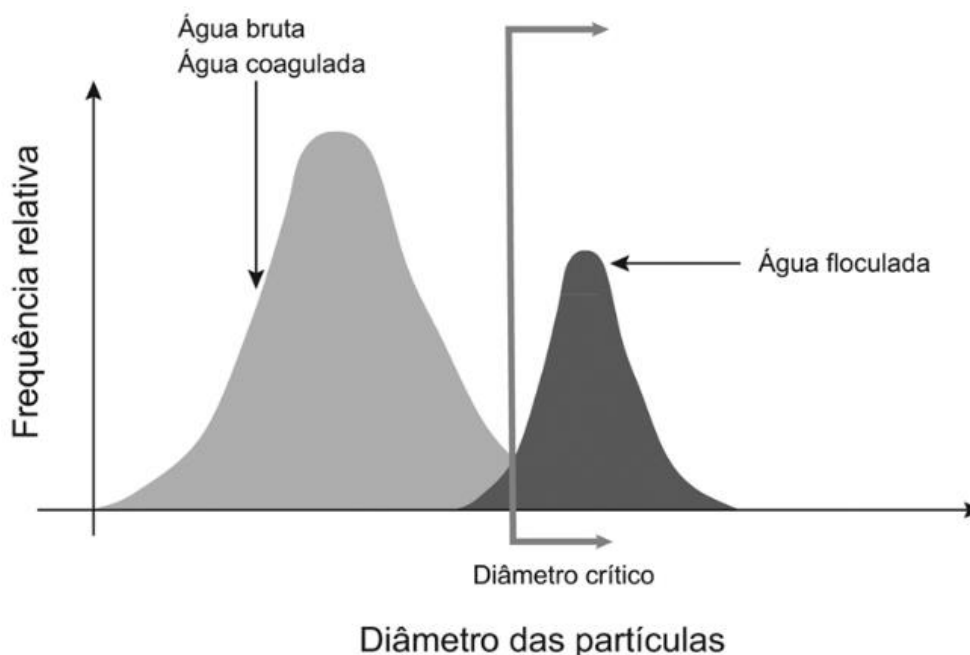
### 3.2.2 Floculação

A floculação é o processo que ocorre logo após a coagulação, sendo este o processo responsável por juntar partículas coaguladas ou desestabilizadas para formar maiores massas ou flocos, de modo a possibilitar a separação do líquido por sedimentação e/ou filtração. Nessa etapa verifica-se a alta remoção de substâncias que produzem cor e turbidez na água (RITCHER, 2009).

O floculado obtido irá se dissociar e precipitar na forma de hidróxidos, carregando consigo as impurezas presentes na água, que se depositam no fundo do tanque de tratamento (AZEVEDO *et al*, 2014).

A água submetida ao processo de floculação sofre uma alteração granulométrica das partículas coloidais, ocorrendo o aumento do diâmetro médio e diminuição da concentração de partículas, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição granulométrica esperada para as partículas coloidais presentes na água bruta, coagulada e floculada



Fonte: Ferreira Filho, 2017.

As formas de agregação das partículas coloidais ocorrem de três maneiras: floculação pericinética, na qual é provocada pelo movimento térmico aleatório das moléculas do fluído (movimento browniano); floculação ortocinética, sendo esta provocada pela indução de gradientes de velocidade e mistura suave no fluído; e floculação provocada por sedimentação diferencial, nesta ocorre o choque entre pequenas partículas para formar partículas maiores (HOWE *et al*, 2016).

### 3.2.3 Decantação

Nos sistemas de tratamento convencionais a água floculada é direcionada aos decantadores, nesta unidade o regime de escoamento da água é tranquilizado o suficiente para promover a sedimentação dos flocos em suspensão (CALIJURI *et al*, 2019).

Em geral partículas minerais sedimentam rapidamente, dado que têm densidade que variam de 2000 a 3000 kg.m<sup>-3</sup>, enquanto partículas orgânicas com densidades de 1010 a 1100 kg.m<sup>-3</sup>, podem necessitar de um longo tempo para se depositarem ao fundo do tanque (CRITTENDEN *et al*, 2005, *apud* SILVA, 2021).

É por meio dessa diferença de densidade entre as fases sólido e líquido que esta etapa funciona, o resíduo sólido sedimentado, composto por minerais e matéria orgânica, é denominado lodo (SCHWANKE, 2013). As partículas que não são removidas na sedimentação, sejam por seu pequeno tamanho ou por serem de densidade muito próxima à da água, deverão ser removidas na filtração (RITCHER, 1991).

A partícula apenas sedimentará se o movimento vertical, com determinada velocidade de sedimentação, superar o movimento aleatório das partículas. O processo é influenciado pelas forças gravitacionais, flutuantes e de arraste (HOWE *et al*, 2016). A sedimentação gravitacional ocorre principalmente de quatro tipos: discreta (Tipo I); floculenta (Tipo II); em zona (Tipo III); por compressão (Tipo IV). Entre os quais, os mais recorrentes aos decantadores convencionais são o Tipo I e II (FERREIRA FILHO, 2017).

#### 3.2.4 Filtração

As unidades anteriores ao filtro não garantem a remoção de 100% das partículas coloidais presentes na fase líquida, evidenciando a necessidade da filtração para que todas as partículas que não foram removidas nas etapas de sedimentação sejam removidas no processo de filtração. Nesse, as partículas coloidais são removidas da fase líquida mediante sua percolação por meio granular, assegurando-se a produção de água adequada aos fins de potabilidade (FERREIRA FILHO, 2017).

O transporte para superfície dos grãos do meio ocorre por difusão, sedimentação e interceptação, e a ligação ocorre por forças moleculares atrativas de curto alcance. Dado que, a etapa de coagulação foi adequada, e as partículas tenham sido desestabilizadas quimicamente com eficiência. Quando as partículas são maiores que os espaços entre os vazios, ela é removida pelo efeito de coar, já partículas menores dependem da aderência ao meio filtrante (FERREIRA FILHO, 2017; HOWE *et al*, 2016).

### 3.3 TÉCNICA DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

As técnicas de separação por membranas ocorrem pela passagem da água por uma membrana sintética, que tem por objetivo a remoção de partículas sólidas de pequeno diâmetro, bactérias, vírus, moléculas orgânicas e inorgânicas. Os processos

mais empregados são: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose reversa (OR) e eletrodialise (ED) (CALIJURI *et al.*, 2019).

Sendo os principais aplicadas na dessalinização, entre os processos de membrana, a osmose reversa e a eletrodialise. Segundo Sanmartino *et al* (2016), entre as plantas de dessalinização em operação em 2016, a osmose reversa contava com 63,7% e a destilação térmica, a qual não utiliza a tecnologia de membranas, tem 34,2%. Fica evidente como cita, Metcalf e Eddy (2016) que há menor experiência na aplicação da eletrodialise em comparação com os demais processos de dessalinização.

As membranas de filtração contam com variações que podem ser descritas pelo tamanho dos poros, peso molecular de corte, material e geometria que a compõe, pelo material que se deseja remover, qualidade da água a ser tratada e também a qualidade da água tratada (JACANGELO *et al*, 1997).

Outro fator importante nos processos de membrana é a maneira que são conduzidos, esta pode ser por pressão ou eletricamente. As membranas também são classificadas entre as quais realizam a separação de íons da solução (osmose reversa, nanofiltração e eletrodialise) e as utilizadas para separar as partículas em suspensão da água como é o caso da microfiltração e ultrafiltração (DAVIS, 2017).

Os fluxos que estão incluídos nestes processos são a alimentação, permeado (água purificada) e o concentrado (rejeito). A eletrodialise tem como força motriz a diferença de potencial elétrico, os demais processos citados acima estão sujeitos a pressão hidráulica ou o vácuo (METCALF; EDDY, 2016).

A água de alimentação da separação por membranas deve ser pré-tratada, pois valores elevados de sólidos, turbidez e algas, podem obstruir ou prejudicar a eficiência na produção de permeado (CALIJURI *et al.*, 2019).

### 3.3.1 Osmose Reversa

As membranas de osmose reversa (OR) funcionam segundo o princípio da osmose, neste a membrana semipermeável entre duas soluções de concentrações diferentes, permite a passagem das moléculas de água que diluem a solução de maior concentração até o equilíbrio, atingida a pressão osmótica. Já na OR o fenômeno é revertido, quando aplicada uma pressão contrária no lado que existe maior concentração de soluto, de modo a compensar a pressão osmótica. Assim as

moléculas de água são direcionadas para o meio de menor concentração, obtendo água purificada (CALIJURI *et al*, 2019).

As membranas aplicadas possuem restrições quanto a fatores extremos de pH, agentes oxidantes fortes e hidrocarbonetos aromáticos (DAVIS *et al*, 2016).

A pressão típica através das membranas é da ordem de 500 a 8500 kPa (HOWE *et al*, 2016), esta deve ter intensidade suficiente na direção desejada do fluxo, para promover esse fluxo reverso (BITTENCOURT, 2014).

Para um sistema de água salobra com SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> de SDT, para recuperação de 80% da água, requer pressão de alimentação de pelo menos 1000 kPa. Para água do mar com SDT de 35000 mg.L<sup>-1</sup> é possível obter taxa de recuperação em torno de 50% e as pressões de alimentação podem chegar a 8500 kPa. As bombas de alimentação em um sistema deste tipo consumiriam 30 a 40 vezes mais energia do que um sistema de filtragem de água de superfície convencional (HOWE *et al*, 2016).

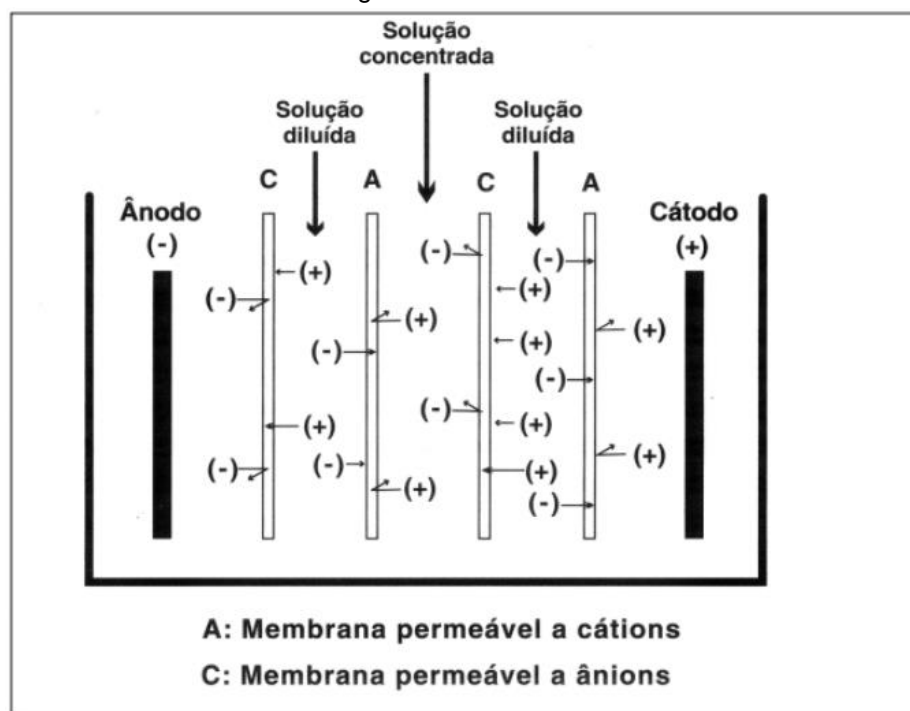
### 3.3.2 Eletrodialise

A eletrodialise é um processo que através da aplicação de uma diferença de potencial elétrico, os sais inorgânicos e outras espécies iônicas são transportadas através de uma membrana seletiva, de uma solução a outra. As membranas utilizadas nesse processo têm seletividade iônica, são chamadas de catiônicas quando permitem a passagem de íon com carga positiva e aniônicas quando permitem a passagem de íons negativos. No processo de desmineralização da solução estas membranas são colocadas de forma alternada entre espaçadores plásticos, entre dois eletrodos, o anodo e catodo (METCALF; EDDY, 2016).

Quando aplicada a corrente elétrica os cátions passam pelas membranas trocadoras de cátions, e os ânions, pelas trocadoras de ânions, ocorrendo em um compartimento a diminuição da salinidade e aumento no seguinte, isso ocorre sucessivamente ao longo do equipamento (MANCUSO, 2003).

Na Figura 3 pode se observar a disposição das membranas seletivas iônicas de um sistema de eletrodialise.

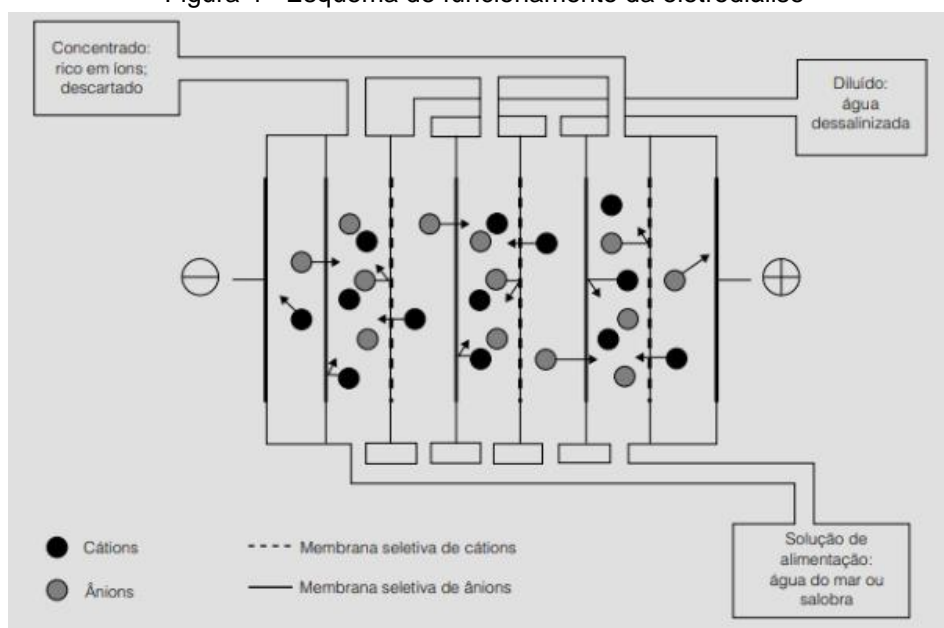
Figura 3 - Eletrodialíse



Fonte: MANCUSO, 2003.

A quantidade de células pode variar com relação ao equipamento que será utilizado, o processo pode ocorrer com apenas uma circulação em um conjunto ou com recirculação, neste caso a alimentação deve ser de fontes separadas. Diferente do que é visualizado na Figura 4, na qual a solução de alimentação está conectada a ambos os fluxos.

Figura 4 - Esquema de funcionamento da eletrodialíse



Fonte: Bancor Ambiental, 2022

Segundo Davis (2017), na maior parte dos casos a eletrodialise é eficiente para separar um efluente líquido contendo entre  $1000 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $5000 \text{ mg.L}^{-1}$  de sais inorgânicos em duas soluções, podendo o concentrado alcançar teores de até  $10000 \text{ mg.L}^{-1}$  e solução diluída entre  $100$  e  $500 \text{ mg.L}^{-1}$  de sais.

A eletrodialise tem capacidade para uma alta taxa de recuperação (TAVARES, 2020), sendo que a razão entre permeado e água bruta é de 75 a 95% (METCALF; EDDY, 2016). A energia necessária para a realização do processo é proporcional a quantidade de sais que se requer remover (TAVARES, 2020), segundo Metcalf e Eddy (2016) o consumo energético da eletrodialise é na faixa de  $1,1$  a  $2,2 \text{ kWh.m}^{-3}$  para SDT entre  $1000$  e  $2500 \text{ mg.L}^{-1}$ .

#### 3.3.1.1 Determinação da corrente limite

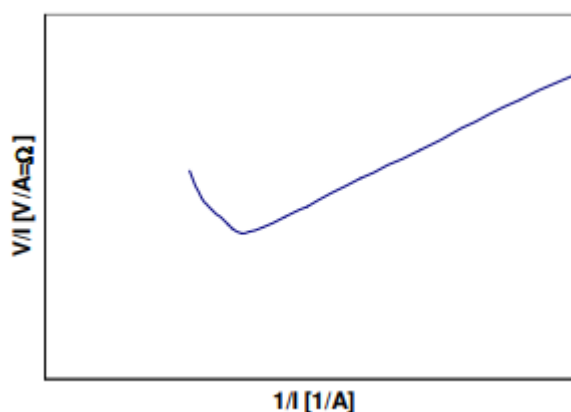
O desempenho dos sistemas que operam, com transferência de massa através de uma interface, são controlados pela polarização de concentração. O fenômeno é descrito pela teoria da corrente limite, no caso da ED, a polarização de concentração é originada pela diferença de mobilidade dos íons na solução eletrolítica e na membrana de troca iônica (BORGES, 2009).

A polarização refere-se à escassez de íons na superfície das membranas que provoca um aumento brusco na queda da tensão na região da camada limite (SANTOS, 2016). As plantas de ED devem trabalhar nessa região, aumentando-se a densidade de corrente sobre o empilhamento, aumenta o fluxo iônico através das membranas até o momento em que o transporte por difusão e transmembrânicos são iguais. Sendo este, o ponto de densidade de corrente limite (GALUCHI, 2010).

Um dos métodos utilizados para determinar o valor da corrente limite ( $I_{lim}$ ) para células de eletrodialise, é o de Cowan e Brown, no qual é traçada uma curva da relação entre o potencial total da célula e a corrente ( $V/I$ ) em função do inverso da corrente ( $1/I$ ), como representado na Figura 5.



Figura 5 - Curva proposta por Cowan &amp; Brown, 1959



Fonte: Galuchi, 2010.

Dadas as condições de operação (solução a ser tratada, configuração do equipamento, etc) a intensidade limite é determinada experimentalmente. No qual, a tensão é aumentada de ponto a ponto. A corrente limite será o ponto no qual ocorre a polarização por concentração, não há falta de íons na superfície da membrana, este corresponde ao ponto de inflexão da curva. Ultrapassada a corrente limite, ocorrerá a intensificação da polarização por concentração e o acréscimo de potencial sobre o sistema não resultará em aumento do fluxo iônico, mas em hidrólise (GALUCHI, 2010).

### 3.3.3 Eletrodialise x Osmose Reversa

Adham *et al* (2009), em sua pesquisa comparou os sistemas de osmose reversa e eletrodialise para um efluente com SDT de  $750 \pm 50 \text{ mg.L}^{-1}$ , considerando a redução para valor de  $500 \text{ mg.L}^{-1}$  ou menos durante 6 meses. O sistema de OR contou anteriormente como uma unidade de MF e a eletrodialise com filtros cartucho. Nesse estudo, a eletrodialise apresentou melhor desempenho econômico.

O autor ainda descreve as vantagens e desvantagens observadas para cada sistema:

Em comparação com a osmose reversa a eletrodialise tem como vantagens, a dispensa de anti-incrustantes e um pré-tratamento simplificado, enquanto na OR este deve ser mais robusto para minimizar a ocorrência de depósitos. Considerando as bombas de alimentação, a ED é operada em baixa pressão, o que torna além de mais econômico, mais silencioso o processo em comparação a OR que utiliza bombas de alta pressão.

A expectativa de vida útil das membranas da ED é maior e o sistema possui menor necessidade de manutenção em comparação com o sistema de OR, o qual demanda manutenção rotineira para garantir o desempenho.

Quanto as desvantagens em comparação com a OR, a ED exige maior área de instalação, tem rejeição de sais limitada a 50% por estágio e não é eficaz para remoção de micro-organismos e de outros contaminantes. Já a OR fornece uma barreira eficaz para micro-organismos e outros contaminantes orgânicos antropogênicos.

Outro fator importante é a experiência na aplicação da técnica em plantas em operação, como a OR tem maior número de unidades em funcionamento, existe maior experiência na desmineralização da água.

### 3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS

#### 3.4.1 Pressão

A pressão transmembrana, ocorre quando o fluxo através das membranas exige a aplicação de pressões que originem um gradiente entre as pressões da alimentação e permeado (GIMENEZ, 2013).

Na eletrodialise a pressão transmembrana ideal entre as membranas internas é igual a zero, as membranas terminais acabam recebendo uma certa pressão, e por isso devem ter resistência mecânica maior. Dado isso, os fluxos de diluído e concentrado da unidade não podem ser operados separados, pois isso ocasionaria pressão sobre a célula (PCCell, 2022).

#### 3.4.2 Vazão

A vazão ou descarga, descreve a quantidade de água que passa em um plano imaginário por unidade de tempo, em uma posição específica ao longo do tubo. O parâmetro vazão é medido como volume por tempo (GRIBBIN, 2014).

Para os sistemas de dessalinização a vazão será dada pela razão entre o volume (entrada e saída) e um determinado tempo, calculada através da Equação 1:

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Na qual:

Q = vazão (L.min<sup>-1</sup>);

$dV$  = variação do volume ( $m^3$ );

$dt$  = variação do tempo (h).

### 3.4.3 Concentração

A concentração de uma solução é medida da quantidade de soluto dissolvido em uma dada quantidade de solvente (RITCHER, 2009). Quando se trata de sólidos dissolvidos totais – SDT – é bastante comum a utilização da unidade miligramas por litro ( $mg.L^{-1}$ ).

A concentração em  $mg.L^{-1}$  apresenta a massa de soluto dissolvido em um determinado volume. Também pode ser expressa em porcentagem, dada a razão entre massa de soluto e massa da solução (massa de soluto + massa de solvente).

### 3.4.4 Descarga Mássica

A descarga de massa ou descarga mássica é a quantidade de massa de um fluido que escoar por uma superfície de controle em unidade de tempo considerada. Na ED se refere a massa de sólidos dissolvidos totais que transpassam as membranas em um determinado tempo. A descarga mássica é dada pela relação da Equação 2.

$$M = \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

Em que:

$M$  = descarga mássica ( $mg.min^{-1}$ );

$dm$  = variação de massa (mg);

$dt$  = variação de tempo (min).

### 3.4.5 Balanço De Massa

O balanço de massa obedece ao princípio da conservação de massa, o qual tem a finalidade de determinar a distribuição da propagação da matéria em um sistema controlado. Obtendo os fluxos de massa nos segmentos deste sistema pode-se ter a representação da Figura 6 (RODRIGUES, 2018).

Figura 6 - Representação esquemática do fluxo de massa



Fonte: O autor.

O balanço de massa representa o quantitativo de tudo que entra, acumula e sai do volume de controle, sendo o que entra e sai são as vazões mássicas e o acúmulo é a variação da massa total com o tempo (CRUZ *et al*, 2010). Logo, em termos matemáticos, é escrito como segue na Equação 3:

$$M_1 - M_2 + \frac{dM_i}{dt} = 0 \quad (3)$$

Com componentes conservativos no balanço, a fração mássica  $x_i$ , no nó de confluência  $i$ , será dada pela Equação 4:

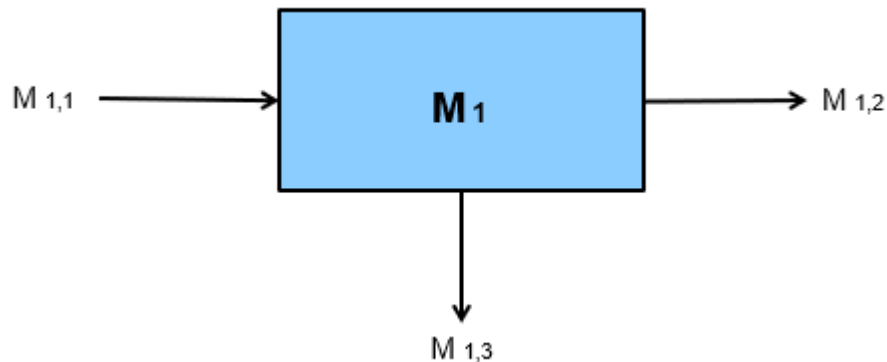
$$x_i = \frac{M_i}{M} \quad (4)$$

De forma geral, para o balanço do sistema tem-se a Equação 5:

$$M_1 \cdot x_{i1} - M_2 \cdot x_{i2} + \frac{dM_i}{dt} = 0 \quad (5)$$

Para o sistema de tratamento proposto neste trabalho, inicialmente tem-se a vazão de água salobra ( $M_{1,1}$ ) alimentando o tratamento preliminar, a qual passará pelo conjunto de tratamento convencional (volume de controle –  $M_1$ ) e resultará em duas vazões de saída: vazão efluente ( $M_{1,2}$ ) e o lodo ( $M_{1,3}$ ), como representando na Figura 7.

Figura 7 - Representação esquemática do tratamento convencional



Fonte: O autor.

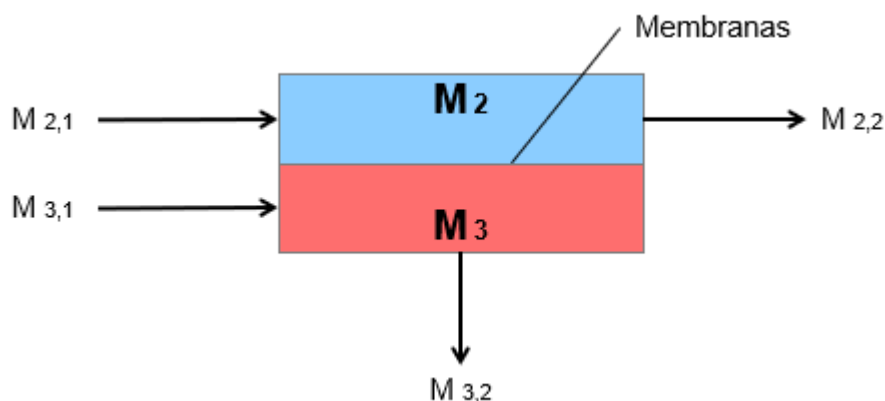
A Equação 6 representa o balanço de massa para o sistema de tratamento convencional:

$$M_{1,1} \cdot x_{1,1} - M_{1,2} \cdot x_{1,2} - M_{1,3} \cdot x_{1,3} + \frac{dM_1}{dt} = 0 \quad (6)$$

Após o tratamento convencional, segue para dessalinização por meio da eletrodialise, na qual a vazão de entrada é aplicada em dois fluxos, um dos fluxos passará pelo volume de controle diluído –  $M_2$  e o outro pelo volume de controle

concentrado –  $M_3$ , os quais resultaram em uma vazão de diluído ( $M_{2,2}$ ) e vazão de concentrado ( $M_{3,2}$ ). As vazões de entrada do diluído ( $M_{2,1}$ ) e concentrado ( $M_{3,1}$ ) são iguais. A representação do processo na eletrodialise está representado na Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática da eletrodialise



Fonte: O autor.

A soma da descarga de entrada da eletrodialise é igual à descarga de saída do tratamento convencional.

A Equação 7 a seguir modela o balanço de massa para o sistema de eletrodialise:

$$M_{2,1} \cdot x_{2,1} + M_{3,1} \cdot x_{3,1} - M_{2,2} \cdot x_{2,2} - M_{3,2} \cdot x_{3,2} + \frac{dM_2}{dt} + \frac{dM_3}{dt} = 0 \quad (7)$$

A parcela correspondente a  $\left(\frac{dM_i}{dt}\right)$  é a variação ou acúmulo de massa no volume de controle. No caso do sistema de dessalinização, será correspondente a massa retida no sistema.

O balanço de massa pode ser utilizado para otimizar sistemas de dessalinização por eletrodialise, objetivando maiores taxas de recuperação e consequentemente menor volume de concentrado gerado na ED.

É importante associar o balanço as variáveis do sistema, como o consumo energético e características da água bruta, viabilizando a elaboração de modelos teóricos que possam simular o desempenho do sistema de dessalinização.

#### 3.4.6 Taxa De Recuperação

A taxa de recuperação corresponde a porcentagem dada pela relação entre um volume tratado e volume de alimentação. Pode ser calculado pela Equação 8.

$$\%Taxa\ de\ recuperação = \frac{V_t}{V_a} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

$V_t$  = volume de água tratada (L);

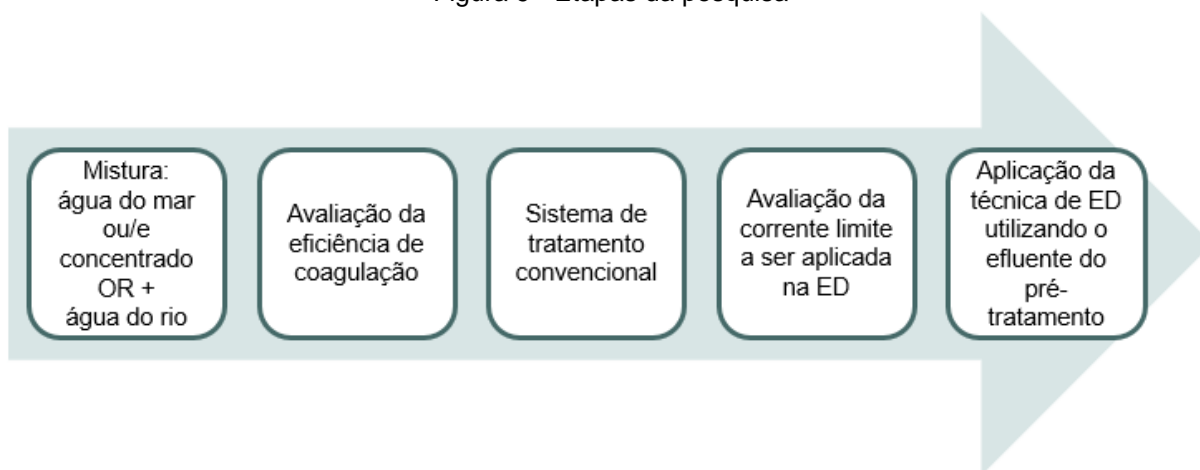
$V_a$  = volume de alimentação (L).

A taxa de recuperação pode ser utilizada como parâmetro de desempenho de técnicas de tratamento, pois quanto mais próxima a 100%, maior é o volume tratado. Em complemento a taxa de recuperação na ED, tem se as porcentagens de concentrado e perdas do sistema.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem a finalidade de avaliar as condições de operação para a técnica de tratamento convencional (TC) e eletrodialise (ED). O primeiro processo visou remover turbidez da água salobra, para possibilitar a utilização da ED, contemplado na segunda técnica o objetivo de remoção de sólidos dissolvidos totais (SDT). As etapas da metodologia que explicitam a aplicação e combinação dos processos de TC e ED são descritas na Figura 9.

Figura 9 - Etapas da pesquisa



Fonte: O autor.

##### 4.1 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

Foi implantado um sistema de dessalinização em escala de bancada, no laboratório do Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, situado no Bloco E do Campus de Uvaranas da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). O sistema é provido do TC, com as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração, seguida da eletrodialise. Este foi projetado para vazão aproximada no TC de  $0,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e na ED de  $1,75 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Os valores de SDT testados se encontram na faixa citada por Davis (2017), de 1000 a  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , de maior eficiência para eletrodialise, sendo esta também a concentração de SDT descrita por Howe (2017) em água subterrâneas de moderada salinidade.

As concentrações de SDT testadas foram de  $1000 \pm 180$ ,  $2000 \pm 180$  e  $3000 \pm 180 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Foram executados 1 ensaio de TC e 3 ensaios da técnica de ED para cada SDT, ou seja, a água coletada em 1 ensaio do TC, para cada concentração, foi utilizada para 3 tratamentos na ED. Na Tabela 1 é possível observar os tempos de duração de cada ensaio.

Tabela 1 - Tempo dos experimentos

SDT média da água salobra (mg.L <sup>-1</sup> )	Ensaio TC	Tempo TC (min)	Ensaio ED	Tempo ED (min)
987,00	1	273,58	1	105
			2	84
			3	91
1996,67	2	280,43	1	118
			2	106
			3	104
3033,33	3	274,33	1	154
			2	123
			3	135

Fonte: O autor.

#### 4.1.1 Água Salobra

A água salobra foi obtida da mistura entre águas fluviais, água do mar e o concentrado salino proveniente do processo de tratamento por osmose reversa (OR) de pesquisa anterior realizada no mesmo programa. A mistura foi dosada para que se obtivesse a concentração de SDT desejada.

A água doce, do Rio Pitangui e Alagados, foi captada antes da entrada no sistema da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Sanepar, localizada no Jardim Carvalho em Ponta Grossa - Pr. Também foi utilizada água do Rio Verde, esta foi captada com a utilização de caminhão pipa, nas proximidades do Bairro Rio Verde em Ponta Grossa – Pr. O armazenamento foi feito em tanques de polietileno de 310 L e bombonas, do mesmo material, de 70 L.

O rejeito da OR com concentração de SDT aproximada de 9000 mg.L<sup>-1</sup>, estava armazenado em bombona de 70 L no laboratório do Programa de Pós Graduação na UEPG. A água do mar, com SDT de 23800 mg.L<sup>-1</sup>, foi coletada em garrafas pet de 5 L, no Balneário Camboriú – Sc.

Para a concentração de 1000 mg.L<sup>-1</sup>, a mistura foi da água do Rio Pitangui e Alagados e concentrado da OR. A mistura da concentração de SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> foi realizada entre água do Rio Verde e concentrado da OR. Para a concentração de SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup>, também foi utilizada água do Rio Verde e concentrado da OR, acrescido da água do mar, para se obter a concentração desejada.

Os demais parâmetros da água salobra estão presentes na Tabela 2, sendo estes, a média de 3 valores para cada concentração de SDT estudada. Todos os



ensaios foram realizados em laboratório com temperatura ambiente controlada a 25°C.

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água bruta

Água salobra			
	SDT = 1000 mg/L	SDT = 2000 mg/L	SDT = 3000 mg/L
<b>pH</b>	7,22	7,63	8,08
<b>Turbidez (UNT)</b>	12,89	8,49	7,44
<b>SST (mg/L)</b>	20,32	9,86	7,67
<b>Cor aparente (uC)</b>	27,90	23,37	22,89

Fonte: O autor.

#### 4.1.2 Dosagem De Coagulante

Para este estudo foi utilizado como agente coagulante o policloreto de alumínio (PAC), sua aplicação foi condicionada ao melhor desempenho no ensaio de jarros (*Jartest*)

O PAC utilizado foi doado a UEPG pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), o qual foi adquirido da empresa *Ambientaly* Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA. Segundo especificações do fornecedor, o coagulante possui massa específica de 1260,00 kg.m<sup>-3</sup> a 25°C e teor de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de 10,26% de sua composição.

As informações referentes ao equipamento de *Jartest* utilizado podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equipamento de Jartest

<b>Modelo</b>	<b>FlocControl III</b>
<b>Marca / Fabricante</b>	PoliControl (Brasil). Empresa certificada pela ISO9001/2008-IEC
<b>Velocidade</b>	10 a 600 rpm ou 10 a 2000 s <sup>-1</sup>
<b>Precisão de velocidade</b>	< 5 rpm
<b>Hastes e pás</b>	Material resistente (aço inox série 300) à oxidação, processos corrosivos e atração magnética. Com altura ajustável.
<b>Capacidade das cubas</b>	2 L
<b>Dimensão aproximada</b>	110 x 48 x 17 cm

Fonte: Adaptado Policontrol, 2022.

Para cada SDT em estudo foram testadas 6 concentrações de (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) em mg.L<sup>-1</sup>. 1. Para SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> o intervalo testado foi de 10 a 20 mg.L<sup>-1</sup> (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup>, a faixa de 20 a 30 mg.L<sup>-1</sup>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> de 30 a 40 mg.L<sup>-1</sup>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A faixa de concentração inicial para SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> foi baseada na concentração utilizada pela Sanepar para água doce. Para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> foi utilizada a mesma faixa, porém não foi obtido resultado satisfatório de turbidez ao final

do ensaio, sendo assim, foi adotada nova faixa, considerando que a presença de sais dissolvidos pode aumentar a demanda de coagulante. O mesmo foi realizado para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup>. Na Tabela 4 está resumida as concentrações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adotada e vazão de coagulante utilizada nos diferentes experimentos.

Tabela 4 - Dose de coagulante

SDT (mg/L)	Concentração de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> no PAC (mg/L)	Concentração de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> no jarro adotada (mg/L)	Vazão de coagulante (ml/min)
1000.00	1338.12	14	5.23
2000.00	3000.00	26	4.33
3000.00	3000.00	34	5.67

Fonte: O autor.

O ensaio tem como padrão para avaliar a entrada de energia nos processos de mistura, o gradiente de velocidade. No caso da mistura rápida Howe (2016), descreve que são necessários gradientes de velocidade de 600 a 5000 s<sup>-1</sup>, já a floculação requer um gradiente de velocidade de 20 a 50 s<sup>-1</sup>, o objetivo é ser alto o suficiente para contatar as partículas, com a finalidade de que floculem sem sedimentar, e ainda baixo o suficiente para impedir que as partículas se quebrem devido as forças de cisalhamento causadas pela mistura.

Cada amostra de 2 L no jarro foi homogeneizada por 30 s a um gradiente de velocidade médio (G) de 125 s<sup>-1</sup> (100 rpm), a seguir ocorreu a adição e mistura do coagulante durante 10 s a G = 600 s<sup>-1</sup> (300 rpm), logo após foi iniciada a etapa de floculação contando com tempo de 5 min e G = 20 s<sup>-1</sup> (32 rpm). A próxima etapa sem rotação mecânica no jarro, foi o tempo de sedimentação de 60 min, concluído este, foram coletadas amostras para análise de desempenho das diferentes doses. A concentração adotada foi a que apresentou menor valor de turbidez (UNT) nos intervalos testados.

Os valores adotados para gradiente de velocidade, além das recomendações da literatura, levaram em conta dados obtidos da SANEPAR. Para o tempo considerou-se vazão e o conjunto de tratamento convencional instalado.

#### 4.1.3 Sistema De Bancada Do Tratamento Convencional

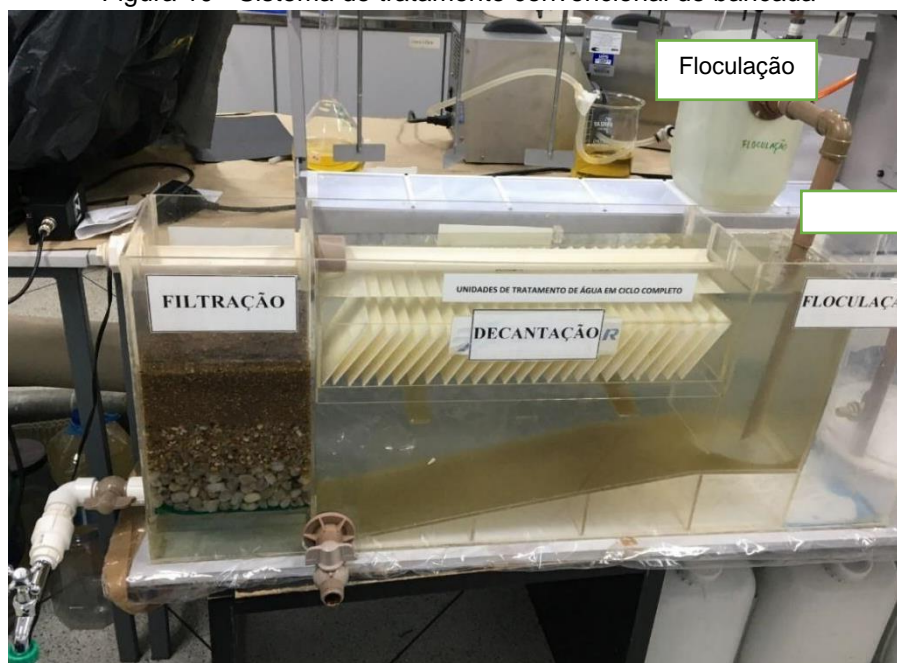
##### 4.1.3.1 Instalação do sistema

A água salobra foi armazenada em 2 tanques de polietileno de 100 L cada, no tanque utilizado para alimentação do sistema foi adicionado uma bomba hidráulica de

recirculação da água para a homogeneização da mistura e sua vazão no foi controlada.

O outro tanque foi utilizado para abastecimento do tanque com recirculação. A unidade de tratamento convencional que pode ser visualizada na Figura 10 foi fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) para UEPG, e esta é composta por unidade de floculação, decantação e filtro de areia, além das bombas, tubulações e conexões.

Figura 10 - Sistema de tratamento convencional de bancada



Fonte: O autor.

A água salobra e o coagulante, policloreto de alumínio (PAC), foram bombeados através de bombas peristálticas para unidade de floculação. A vazão utilizada na entrada do TC foi de  $500 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ , porém apresentou uma variação de até  $45 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  nos ensaios realizados. Na bomba peristáltica de coagulante, em vista de obter vazão próxima a  $5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  nos diferentes ensaios, foi utilizado PAC na concentração de  $1.338,12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Al}_2\text{O}_3$  para SDT  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , e  $3.000,00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Al}_2\text{O}_3$  para SDT  $2000$  e  $3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , como indicado na Tabela 4 apresentada anteriormente.

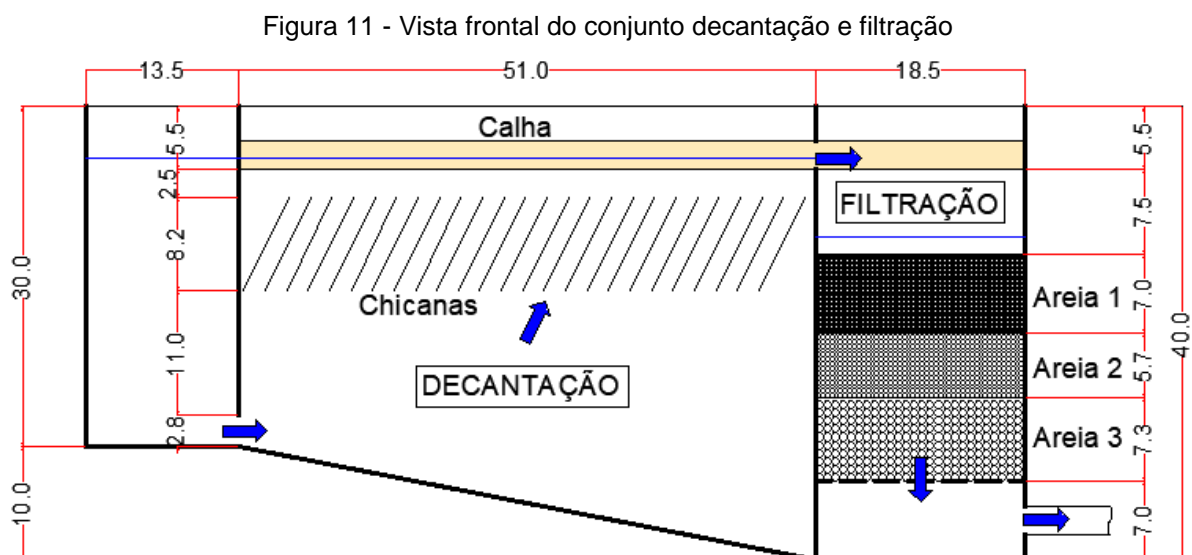
Para a ligação do tanque de água salobra até a primeira unidade de tratamento foi utilizada mangueira de silicone, neste percurso foi dosado o coagulante em linha. Para ambos os fluxos foi utilizado bombas do modelo SL-64, Solab Científica, com faixa de vazão de  $0$  a  $1400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ . O líquido bombeado não tem contato com a

bomba somente com o tubo, ou seja, não há interação entre o mecanismo da bomba com o fluido.

Foi considerado volume útil, o volume de água adicionado e medido na unidade de forma específica para a determinação em seus compartimentos. A floculação foi realizada em recipiente de propileno contendo volume útil de 3,54 L, este foi alocado no suporte do *Jar-test*, possibilitando o uso da pá do equipamento, em gradiente de velocidade médio de  $20 \text{ s}^{-1}$  (32 rpm).

Em seguida, a água foi direcionada ao conjunto sedimentador e filtro, foram utilizados tubos de PVC nas ligações entre as unidades. Ambas as unidades são constituídas de material acrílico, o volume útil do sedimentador foi de 35,46 L e do filtro 4,73 L.

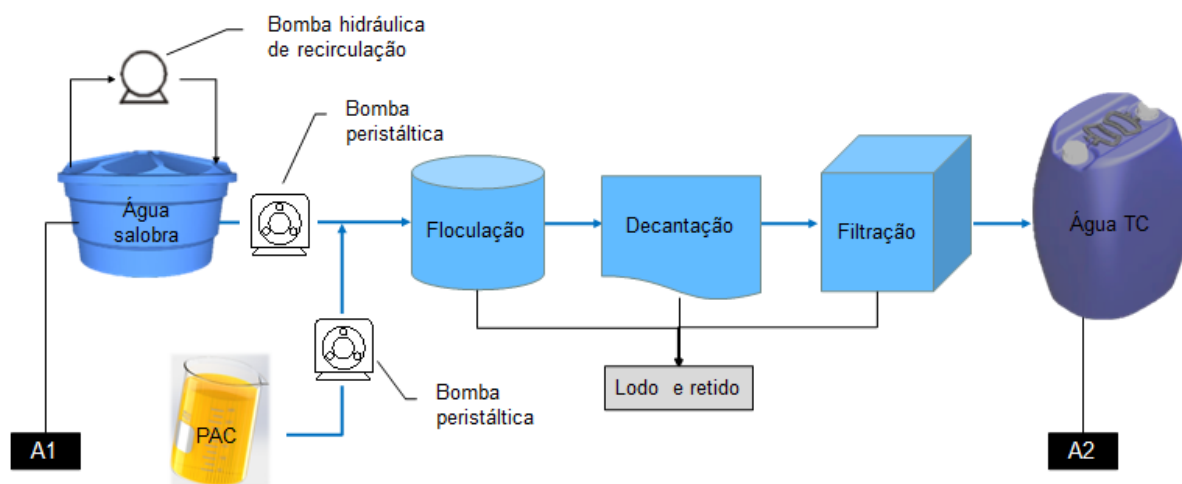
Na Figura 11 está representado a vista frontal do conjunto decantação e filtração, com os elementos que o compõem e suas dimensões em cm. A camada de areia 1 representada é composta por grãos passantes na peneira #2,36 mm, a areia 2 é composta por material passante na peneira #6,3 mm e retido na peneira #2,36 e a areia 3 contém material retido na peneira #6,3.



Fonte: O autor.

Após a etapa de filtração a água foi depositada em recipiente plástico e posteriormente armazenada em bombona etiquetada. A representação esquemática do sistema de tratamento convencional está apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Representação esquemática do tratamento convencional



Fonte: O autor.

#### 4.1.3.2 Operação do sistema

Antes do início da aplicação da técnica de TC, a areia do filtro foi lavada e peneirada, durante os ensaios foi verificada a turbidez da água tratada por esse processo, analisando assim, a necessidade de limpeza da areia contida no filtro.

As bombas peristálticas do sistema, tiveram a vazão calibrada, pelo método da balança especificado em manual próprio, utilizando-se uma vazão na calibração próxima a de ensaio.

No tanque de água bruta foi ligada a bomba hidráulica de recirculação, com 5 min de antecedência, em seguida, foram acionadas as bombas de alimentação de água salobra e dosadora de coagulante, logo depois se iniciou a cronometragem do tempo de ensaio.

Para a contagem do tempo de ensaio, foi definido como tempo zero o início do enchimento da unidade de floculação. A contagem foi registrada ao preenchimento total da floculação, que corresponde ao início da unidade de decantação, na sequência a etapa de decantação foi preenchida e após o filtro de areia estar completo. A partir do conjunto de TC estar preenchido com a água bruta, foi iniciada a coleta dos volumes de água tratada pelas unidades. O tempo foi anotado a cada 15 L, apenas na quarta coleta, o volume de água foi de 10 L. Obtido o volume de aproximadamente 100 L, o tratamento foi interrompido. O volume de água e lodo, contido no conjunto foi descartado, possibilitando a preparação deste para o próximo ensaio.

Cada volume de 30 L foi armazenado em bombona plástica, etiquetadas como coleta 1, 2 e 3, sendo que, coleta 1 contou com o primeiro e segundo volumes captados, a coleta 2, continha o terceiro e quinto volumes e coleta 3, o sexto e sétimo volume de água tratada. O quarto volume de 10 L foi utilizado para realização do ensaio de corrente limite.

#### 4.1.4 Sistema De Dessalinização

##### 4.1.4.1 Instalação do sistema

A unidade de dessalinização utilizada foi a eletrodialise em escala de laboratório da *PcCell*, modelo ED 200, suas especificações gerais da configuração utilizada constam na Tabela 5. Como solução eletrolítica (eletrólito), que alimenta o compartimento dos eletrodos, foi empregada o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), com peso molecular de 142,04 g/mol. Foi aplicado 0,25 mol/L, resultado em 35,51 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  para cada litro, a diluição foi realizada para 5 L.

Tabela 5 - Especificações gerais da unidade ED 200

Características	Unidade	Especificações do equipamento
Tamanho da membrana	cm	12,5 x 26
Área efetiva por membrana	cm <sup>2</sup>	207
Tipo de espaçador	mm	0,35 / 0,45
Vazão nominal por célula	L.h <sup>-1</sup>	8
Pares de membranas	unidade	20
Área efetiva do equipamento	m <sup>2</sup>	0,393
Largura x profundidade x altura da unidade	mm	165 x 150 x 300
Conexão de corrente plug banana	mm	4
Intensidade de corrente máxima	A	16
Tensão máxima	V	30
Vazão do eletrólito	L.min <sup>-1</sup>	2,5
Vazão do concentrado / diluído	L.min <sup>-1</sup>	1,67 a 3,33

Fonte: Adaptado PCCell, 2018.

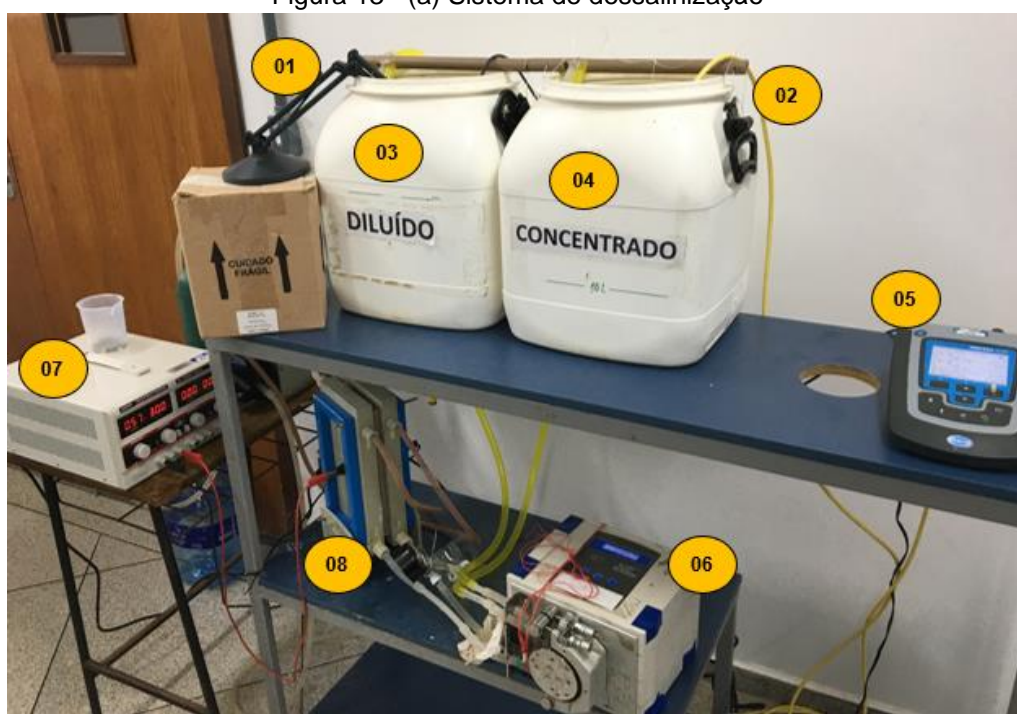
A água salobra de alimentação da ED foi disposta nos recipientes de capacidade 30 L, representados na Figura 13 pelos números 03 e 04. Os pontos 01 e 02 da Figura 13 representam as sondas de medição de SDT, ambas conectadas ao medidor multiparâmetro digital, representado pelo número 05 da mesma figura.

A ligações dos recipientes, nomeados como diluído e concentrado, até o módulo de ED (ponto 08 da Figura 13), foram executadas através de mangueiras de silicone, com diâmetro interno de 8 mm, e passando por bomba peristáltica de

cabeçote duplo modelo LPD-302-4, MS TECNOPON – Instrumentação, com faixa de vazão de 1 a 3000 ml.min<sup>-1</sup> (ponto 06 da Figura 13), esta foi operada a 1750 ml.min<sup>-1</sup>.

O percurso de retorno da unidade de ED até os recipientes 03 e 04 também foram utilizadas mangueiras de silicone de mesmo diâmetro. O elemento 07 representa a fonte de alimentação digital de 2 canais, modelo FA-3050 – Instrutherm Instrumentos de Medição Ltda, podendo ser aplicada tensão de até 32 V e corrente até 5 A, por canal. Foi utilizado apenas 1 canal, sendo fio vermelho positivo ligado ao cátodo no módulo ED e fio preto negativo ligado ao ânodo.

Figura 13 - (a) Sistema de dessalinização



Fonte: O autor.

Na Figura 14 pode ser visualizado a bomba peristáltica (09) de recirculação do eletrólito, a qual foi operada na vazão de 1250 ml.min<sup>-1</sup>, e também o recipiente plástico de 5 L (10), utilizado para seu armazenamento. Assim como nas demais as ligações contaram com mangueiras de silicone, porém para o eletrólito o diâmetro interno da mangueira foi de 5 mm.



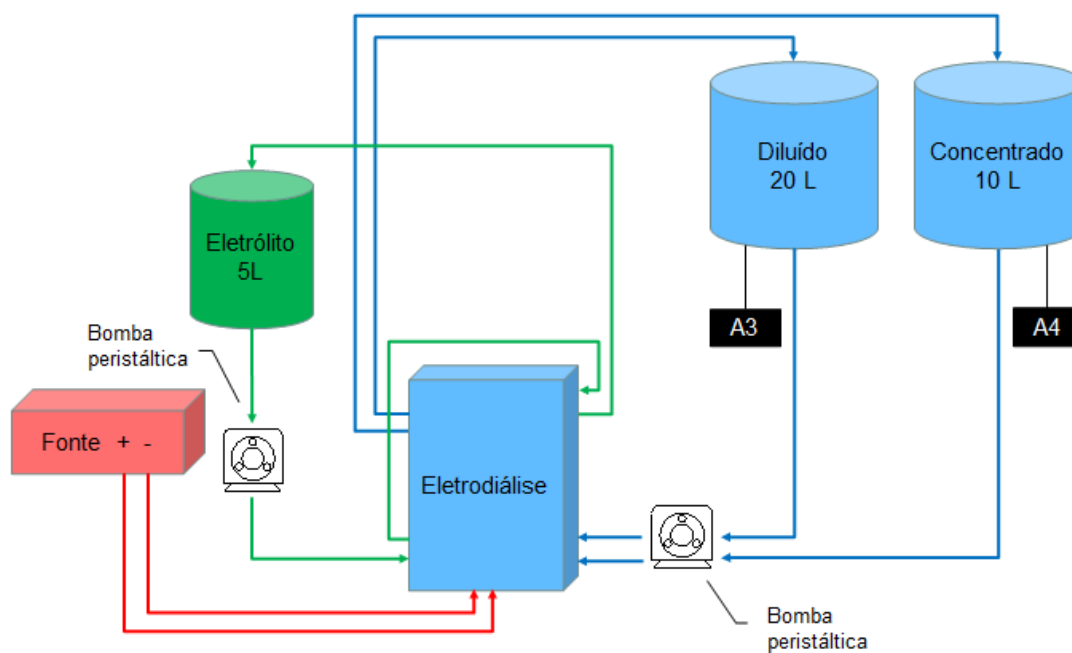
Figura 14 - (b) Sistema de dessalinização



Fonte: O autor.

Na Figura 15 pode-se observar a representação esquemática do sistema de dessalinização operado. As setas em azul representam o fluxo de água, as setas em verde o fluxo do eletrólito e as setas em vermelho a corrente elétrica.

Figura 15 - Representação esquemática do sistema de dessalinização



**A3 e A4:** Pontos de coleta de amostra de água;

Fonte: O autor.



#### 4.1.4.2 Operação do sistema

Os recipientes de recirculação da eletrodialise, nomeados como concentrado e diluído, foram preenchidos com 10 e 20 L, respectivamente. Foi utilizado metade do volume do recipiente diluído no concentrado, com objetivo de obter mais água tratada do que rejeito. O recipiente de eletrólito foi preenchido com 5 L do sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) a  $0,25 \text{ mol.L}^{-1}$ . Antes e após o tratamento foi verificada temperatura, pH e SDT do eletrólito.

Nos recipientes diluído e concentrado foram instaladas sondas conectadas ao medidor multiparâmetro digital, para verificação de SDT e temperatura a cada minuto. Posto isso, as bombas peristálticas foram ligadas até que não houvesse mais ar nas mangueiras de diluído, concentrado e eletrólito. Verificada essa situação, foi ativada a fonte de corrente elétrica na tensão de 30 V, juntamente com o medidor de SDT.

Durante todo o ensaio foi inspecionado se não haveria variação de tensão, nos casos de mudança, esta foi ajustada manualmente para 30 V, novamente. A cada 5 min do ensaio na ED, foi anotada a corrente elétrica observada no visor digital da fonte.

Alcançado o valor de SDT menor que  $100 \text{ mg.L}^{-1}$  no diluído o processo foi interrompido, desligando a fonte, bomba peristáltica de circulação do eletrólito e medidor multiparâmetro digital. A bomba peristáltica do diluído e concentrado foi mantida ligada até se realizar o esvaziamento das mangueiras.

Enfim, os volumes de água do concentrado e diluído foram medidos utilizando a balança digital. Foram coletadas amostras da água tratada e rejeito, para realização de ensaios de qualidade. Encerrada estas etapas, os elementos foram reposicionados para o próximo ensaio.

#### 4.1.5 Determinação Da Corrente Limite

Para determinação da corrente limite foi modificada a instalação das mangueiras de entrada e saída do diluído, colocou-se em recipiente único as 2 captações (diluído e concentrado) e as 2 saídas. Também não foram instaladas as sondas de leitura de SDT. Os demais elementos foram alocados da mesma forma da instalação para o processo de dessalinização.

O teste de corrente limite foi realizado logo após a captação do volume de 10 L para as diferentes concentrações de SDT, durante a ocorrência do TC. Realiza as etapas de início da eletrodialise que serão descritas a frente, o ensaio foi realizado em 15 min, ligada a fonte no modo tensão constante, com valor inicial zero, variou-se a tensão de 1 em 1 Volt a cada 30 segundos, até alcançar 30 V, foi anotado o valor de corrente a cada tensão. Com os dados obtidos foi verificada a corrente limite, na qual observa-se maior eficiência de tratamento para a condição estudada, este valor foi utilizado na técnica de ED.

#### 4.2 MONITORAMENTO DAS UNIDADES

A vazão inicial do tratamento convencional foi a soma do volume de água salobra e coagulante, esta soma foi verificada em recipiente de volume conhecido, por seu tempo de preenchimento.

Para facilitar o manuseio a coleta dos volumes no tratamento convencional ocorreram a cada 15 L, exceto a quarta coleta de 10 L, sendo 7 coletas de volumes totalizando um volume de aproximadamente 100 L.

As amostras foram coletadas em 4 pontos, sendo eles: A1 = água salobra (bruta); A2 = água tratada pelo TC; A3 = pré-eletrodialise e água tratada final ou diluído (eletrodialise); A4 = pré-eletrodialise e concentrado salino final (rejeito da eletrodialise). Os pontos de coleta estão representados em azul no fluxograma da Figura 16, na qual também é possível observar sua localização.

Nos pontos A1 e A2, pertencentes ao TC foram coletadas 3 amostras de cada ponto, para A1 a primeira amostra foi no início do ensaio, a segunda e terceira no intervalo de 1 h entre elas. Para A2, ocorreram entre o primeiro e segundo, o quarto e quinto, e sexto e sétimo volumes coletados. Para os pontos A3 e A4 foi realizada coleta após o término de cada operação da ED.

Destas amostras foram verificados: pH, turbidez, cor aparente, SS e SDT. Foi empregado o medidor multiparâmetros digital duplo, modelo HQ440d – *Hach – Hexis Científica*, para medição de SDT e pH, através da utilização de sondas *intelliCAL™* com conector M12. Este medidor tem 3 modos de leitura, sendo eles: medição contínua; modo intervalo e pressione para ler. Os dois últimos modos de leitura possibilitam a transferência de dados via dispositivo USB.

Foram utilizadas sondas dos modelos CDC40101 e CDC40105, ambas da marca *Hach* – Hexis Científica. Estas possuem faixa de leitura de SDT de 0 a 50 g/L como NaCl e acuracidade de 0,5% da leitura.

Para verificação de turbidez foi utilizado turbidímetro portátil, modelo 2100Q – *Hach* – Hexis Científica. O equipamento realiza a determinação da turbidez com o princípio de medição nefelométrica e é aplicado para amostras na faixa de leitura de 0 à 1000 NTU.

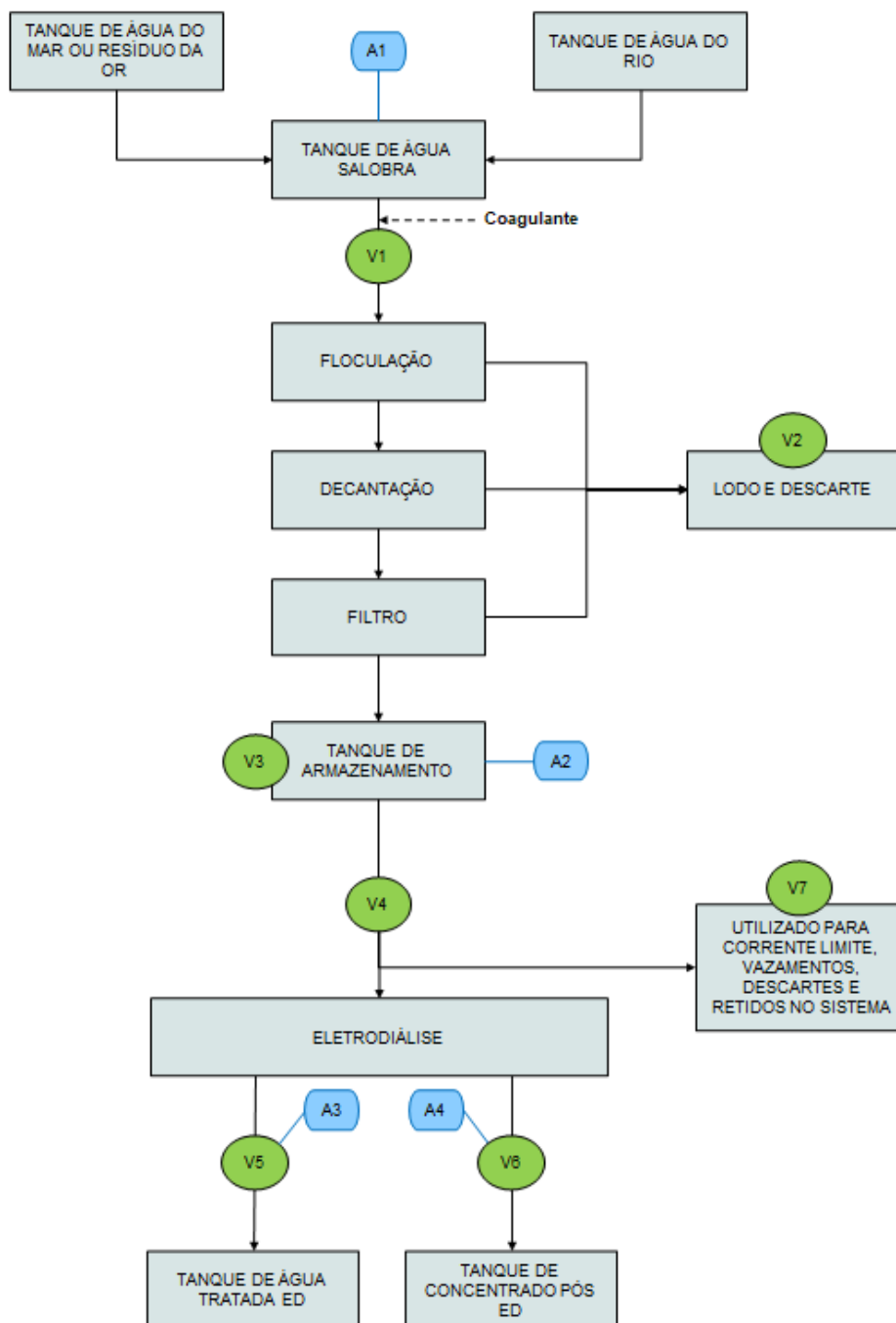
As amostras para verificação de cor aparente foram encaminhadas ao laboratório de recursos hídricos da UEPG, no qual foi utilizado colorímetro da marca Digimed, modelo DM, com acurácia de  $\pm 3\% + 1 \text{ Pt-Co}$ .

O ensaio de SS foi realizado pelo método gravimétrico, descrito pela *American Public Health Association* – APHA, 1998 – Método 2540 D. Este foi realizado para A1, A2, A4 e A5.

Os volumes de água envolvidos no processo estão representados em verde na Figura 16. Sendo eles: V1 = volume de entrada no TC (bomba peristáltica); V2 = Lodo e retido no conjunto TC; V3 = volume de água tratada no TC (Balança digital); V4 = volume de alimentação da ED; V5 = volume do diluído após ED; V6 = volume do concentrado após ED; V7 = volume utilizado para ensaio da corrente limite, vazamentos, retidos no sistema da ED, coleta de amostras e descarte.

Para medir o volume de água foi utilizada a balança digital, modelo AD5000 – Marte científica, com sensibilidade de 0,10 g.

Figura 16 - Fluxograma do sistema de tratamento - Localização dos pontos de coleta e pontos de medição de volume



Fonte: O autor.

### 4.3 BALANÇO DE MASSA

Após a coleta dos dados realizados em laboratório, foram elaboradas planilhas de cálculo de balanço mássico com o auxílio de software de planilha eletrônica. Foram realizados os cálculos do sistemas global, incluindo TC e ED, e também foram

realizados os cálculos separados para os ensaios de ED. Para evidenciar toda a vazão fornecida e retirada ou retida no sistema, foi adotada convenção de sinais, na qual a vazão de entrada no sistema é positiva e de saída é negativa.

#### 4.3.1 Sistema Completo De Tratamento

O modelo de planilha utilizado no cálculo de balanço de massa do tratamento convencional, juntamente com a eletrodialise está representado na Figura 17. Dado que, as letras de A a H indicam as colunas que se localizam e os números, as linhas.

Figura 17 - Modelo de planilha utilizada no cálculo do balanço de massa do sistema

<b>Balanço mássico do sistema TC e ED</b>									
		<b>Volume medido (L)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Vazão (L/min)</b>	<b>SDT (mg/L)</b>	<b>Decarga de massa (mg/min)</b>	<b>Massa total (mg)</b>	<b>%Massa parcial</b>	<b>%Massa total</b>
<b>Tratamento Convencional</b>	V1 - Volume de entrada	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1
	V2 - Água residuária	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2
	V3 - Efluente	A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3
<b>Eletrodialise</b>	V4 - Afluente	A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4
	V5 - Água tratada	A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5	H5
	V6 - Concentrado	A6	B6	C6	D6	E6	F6	G6	H6
	V7 - Água residuária	A7	B7	C7	D7	E7	F7	G7	H7
<b>Balanço</b>	$\Sigma V$	A8							
<b>%Erro</b>	Erro de leitura e/ou mistura inadequada	A9							H9

Fonte: O autor.

A coluna representada pela letra A foi preenchida com os dados referentes ao volume medido através dos recipientes de volume conhecido e balança digital em litros.

A coluna representada pela letra B foi preenchida com o tempo total cronometrado de ensaio do tratamento convencional em minutos.

A coluna representada pela letra C foi preenchida com os valores calculados de vazão regularizada, considerando a relação dada pela equação do item 3.4.2 Vazão, desse trabalho. Nesse caso pode ser representado por:  $Coluna C = \frac{Coluna A}{Coluna B}$ .

A coluna representada pela letra D, foi preenchida com a média de 3 valores de SDT verificados durante a primeira coleta de 30 L, em seguida no período dos 40 L e finalmente durante os 30 L de água tratada do TC. Para ED, foi a média de 6 valores do início do ensaio dos recipientes concentrado e diluído.

A coluna preenchida pela letra E representa os dados referentes às descargas mássicas (mg.min), baseada na relação da equação do item 3.4.4 Descarga mássica desse trabalho. Nesse caso:  $coluna E = coluna C \times coluna D$ .

A coluna preenchida pela letra F, representa os dados referentes a massa total (mg). Foi calculada pelo produto:  $coluna F = coluna A \times coluna D$ .

A coluna preenchida pela letra G representa a porcentagem de massa parcial, contabilizando separadamente cada técnica de tratamento. Foi calculado para o TC por:  $coluna G = \frac{coluna F}{posição F1}$ , e para ED por:  $coluna G = \frac{coluna F}{posição F4}$ .

A coluna preenchida pela letra H representa a porcentagem de massa do sistema completo. Foi calculado por:  $coluna H = \frac{coluna F}{posição F1}$ .

Todas as letras seguidas pelo número 1 representam os dados coletados e calculados para a entrada no TC - ponto V1 indicado no fluxograma da Figura 16, os dados de SDT utilizados foram obtidos das amostras coletadas no ponto A1, antes de receber o coagulante.

Todas as letras seguidas pelo número 2 representam os dados da água residuária do tratamento convencional – ponto V2 indicado no fluxograma da Figura 16 e consideram a SDT remanescente do processo.

As letras seguidas pelo número 3 representam os dados coletados e calculados para o ponto V3 (Figura 16), efluente do TC. O valor de SDT foi obtido através da média de 3 coletas durante a operação no ponto A2 da mesma figura.

Todas as letras seguidas pelo número 4 representam os dados coletados e calculados para a água afluyente ao processo de ED, no ponto V4 (Figura 16). Os dados de SDT foi a média dos primeiros valores armazenados no medidor mutiparâmetro no início dos ensaios.

Todas as letras seguidas pelo número 5 representam os dados coletados e calculados para a água tratada (V5), indicado na Figura 16 . Os dados de SDT referem-se a média dos 3 ensaios ao final do tratamento.

Todas as letras seguidas pelo número 6 representam os dados coletados e calculados para o concentrado, indicado no ponto V5 (Figura 16). Os dados de SDT referem-se a média dos 3 ensaios realizados para cada concentração ao final do tratamento.

Todas as letras seguidas pelo número 7 representam os dados da água residuária da técnica de eletrodialise (V7), indicado na Figura 16. O valor de SDT utilizado foi o remanescente a etapa de tratamento.

A célula A8 representa a soma dos volumes e deve ser igual a zero. A célula A9 é o resultado da razão entre o erro e o volume total. A célula H9 representa o erro entre a massa do volume afluente e efluente da ED. Sendo resultado da soma entre ambos.

#### 4.3.2 Eletrodialise

O modelo de planilha utilizado para o cálculo do balanço de massa separadamente da eletrodialise está representado na Figura 18. As colunas de A a H são preenchidas com as grandezas descritas no item anterior, os números representam as linhas.

Figura 18 - Modelo de planilha utilizada no cálculo do balanço de massa da eletrodialise

Eletrodialise								
	VOLUME medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	A10	B10	C10	D10	E10	F10	G10	H10
Entrada no concentrado	A11	B11	C11	D11	E11	F11	G11	H11
Saída do diluído	A12	B12	C12	D12	E12	F12	G12	H12
Saída do concentrado	A13	B13	C13	D13	E13	F13	G13	H13
Água residuária	A14	B14	C14	D14	E14	F14	G14	H14
Balanço: $\Sigma V$	A15						G15	H15

Fonte: O autor.

Todas as letras seguidas pelo número 10 representam os dados calculados e coletados para o volume de 20 L de recirculação do diluído.

Todas as letras seguidas pelo número 11 representam os dados calculados e coletados para o volume de 10 L de recirculação do concentrado.

As letras seguidas dos números 12 e 13 representam, respectivamente, os dados coletados e calculados para os volumes de diluído e concentrado, após a finalização do ensaio.

Todas as letras seguidas pelo número 14 representam os dados do volume retido no sistema.

Todas as letras seguidas pelo número 15 representam o somatório das linhas de 10 a 14, contando com a consideração de que tudo que alimenta o sistema tem sinal positivo e o que sai é negativo.

#### 4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os ensaios de eletrodiálise foram realizados em triplicata. Foram realizados os testes de homogeneidade das variâncias de cada variável pelo teste F ( $p\text{-value} \geq 0,01$ ). A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste *shapiro-wilk*. Os resultados foram expressos pela média. Os efeitos dos diferentes tratamentos aplicados foram verificados através da Análise de Variância (ANOVA), por delineamento inteiramente causalizado, foram considerados significativos quando  $p\text{-value} < 1\%$ , quando houve diferença significativa será aplicado o teste de médias de *TukeyHSD*. Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software* R, no ambiente *R.Studio*.

Os cálculos realizados através do *software* podem ser verificados no Apêndice B.

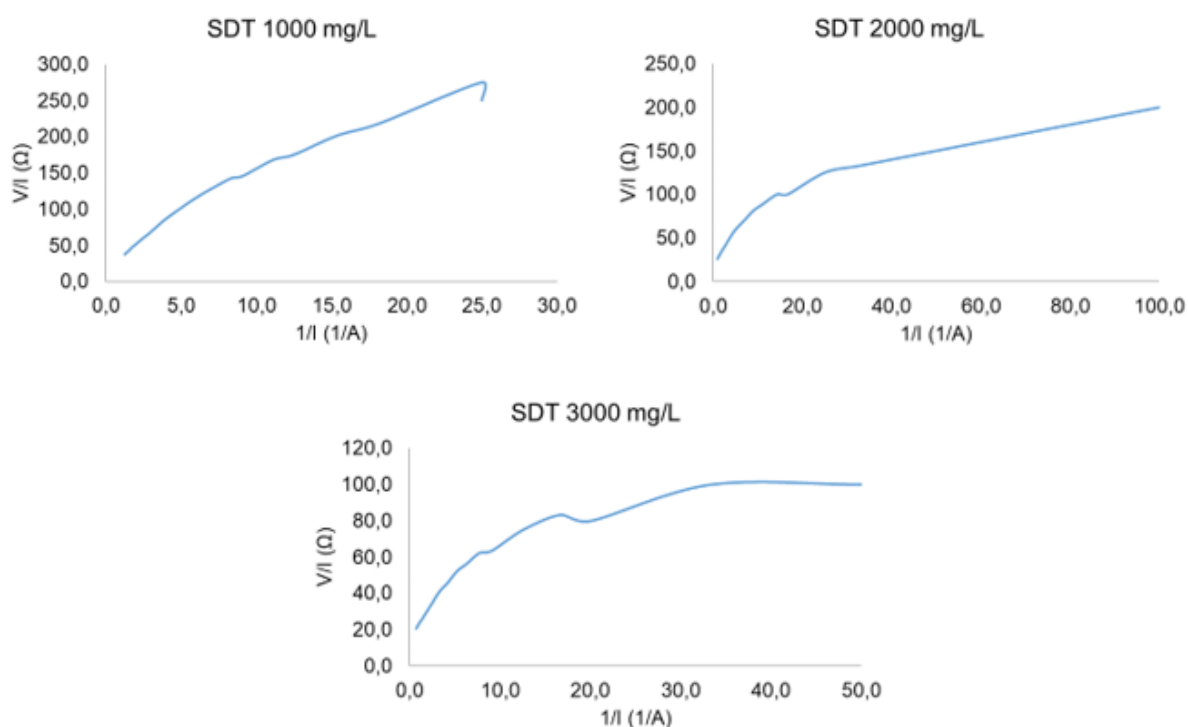


## 5 RESULTADOS

### 5.1 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE LIMITE

Para determinação da corrente limite foi utilizado o método Cowan e Brown descrito no item 3.3.1.1 Determinação da corrente limite. Na Figura 19 observa-se que não há ponto de inflexão definido pelo método nas condições testadas, identificando assim, que o ponto de inflexão é condizente a uma tensão maior que 30 V, ou seja, não houve déficit de desempenho das membranas por excesso de corrente elétrica para o intervalo.

Figura 19 - Curva de Cowan & Brown



Fonte: O autor.

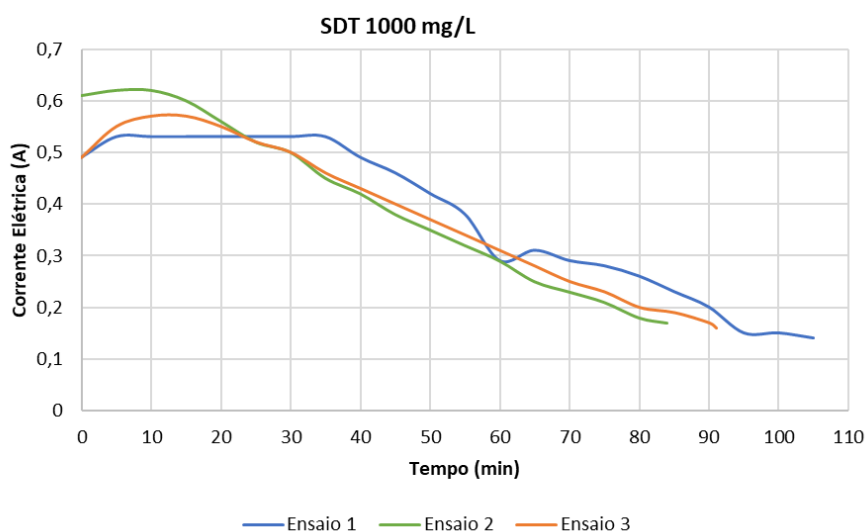
Dessa forma, foi adotado para as condições testadas a tensão limite, do equipamento, de 30 V.

### 5.2 CORRENTE ELÉTRICA NA ED

Para os ensaios de ED na concentração de SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> foram observados os valores da Figura 20 no decorrer do tempo. No ensaio 1 desta concentração, ocorrem vazamentos aos 43 e 90 min, em ambos, o ensaio teve que ser interrompido.

Posto isto, nota-se variações na curva do ensaio 1 próximo aos vazamentos, pois o ensaio foi reiniciado e a corrente foi novamente estabilizada na tensão de 30 V.

Figura 20 Corrente elétrica para concentração de SDT 1000 mg/L

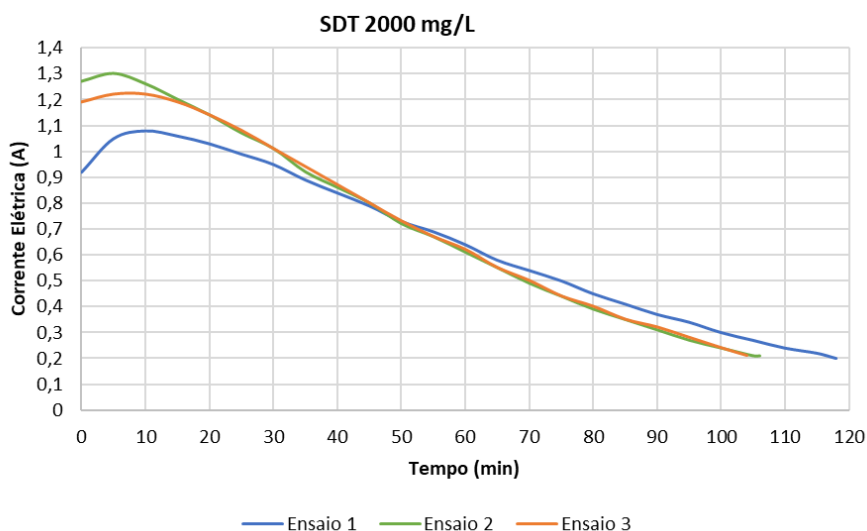


Fonte: O autor.

A corrente elétrica máxima observada para SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> foi em média 0,57 A, está ocorreu entre 5 e 10 min de operação. A corrente elétrica na qual o ensaio foi paralisado, foi em média 0,17 A.

A Figura 21 representa a curva de corrente elétrica versus tempo para os ensaios 1, 2 e 3 da concentração de 2000 mg.L<sup>-1</sup>. A corrente elétrica máxima foi em média de 1,20 A, está também ocorreu entre os 5 e 10 min de ensaio. O tempo médio de ensaio para essa concentração foi de 109,33 min, na corrente média de 0,21 A. Não foram identificados vazamentos durante este processo.

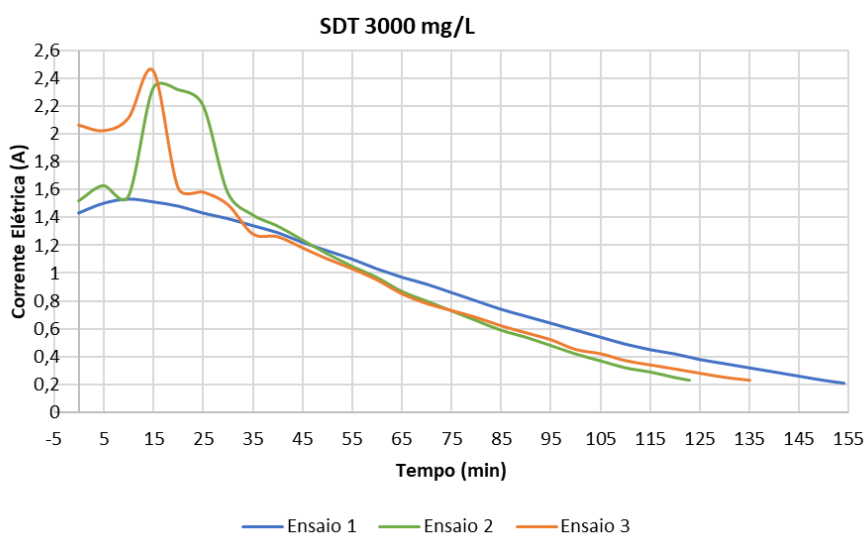
Figura 21 - Corrente elétrica para concentração de SDT 2000 mg/L



Fonte: O autor.

A corrente elétrica máxima da concentração de SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> foi em média 2,10 A. A corrente elétrica durante a realização dos ensaios pode ser visualizada na Figura 22. No início dos ensaios 2 e 3 ocorreu instabilidade de corrente elétrica, porém não ocorreu decréscimo na transferência de íons nesse intervalo, ou seja, a corrente não ultrapassou a limite

Figura 22 - Corrente elétrica para concentração de SDT 3000 mg/L



Fonte: O autor.

Nota-se que houve diferença no tempo entre os ensaios de cada concentração, o desvio padrão do tempo dos 3 ensaios para cada concentração foi 8,73; 6,18 e 12,76 min, respectivamente a 1000, 2000 e 3000 mg.L<sup>-1</sup>, ou seja, a dispersão dos dados de tempo de ensaio foi maior para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> e teve menor valor para SDT de 2000 mg.L<sup>-1</sup>.

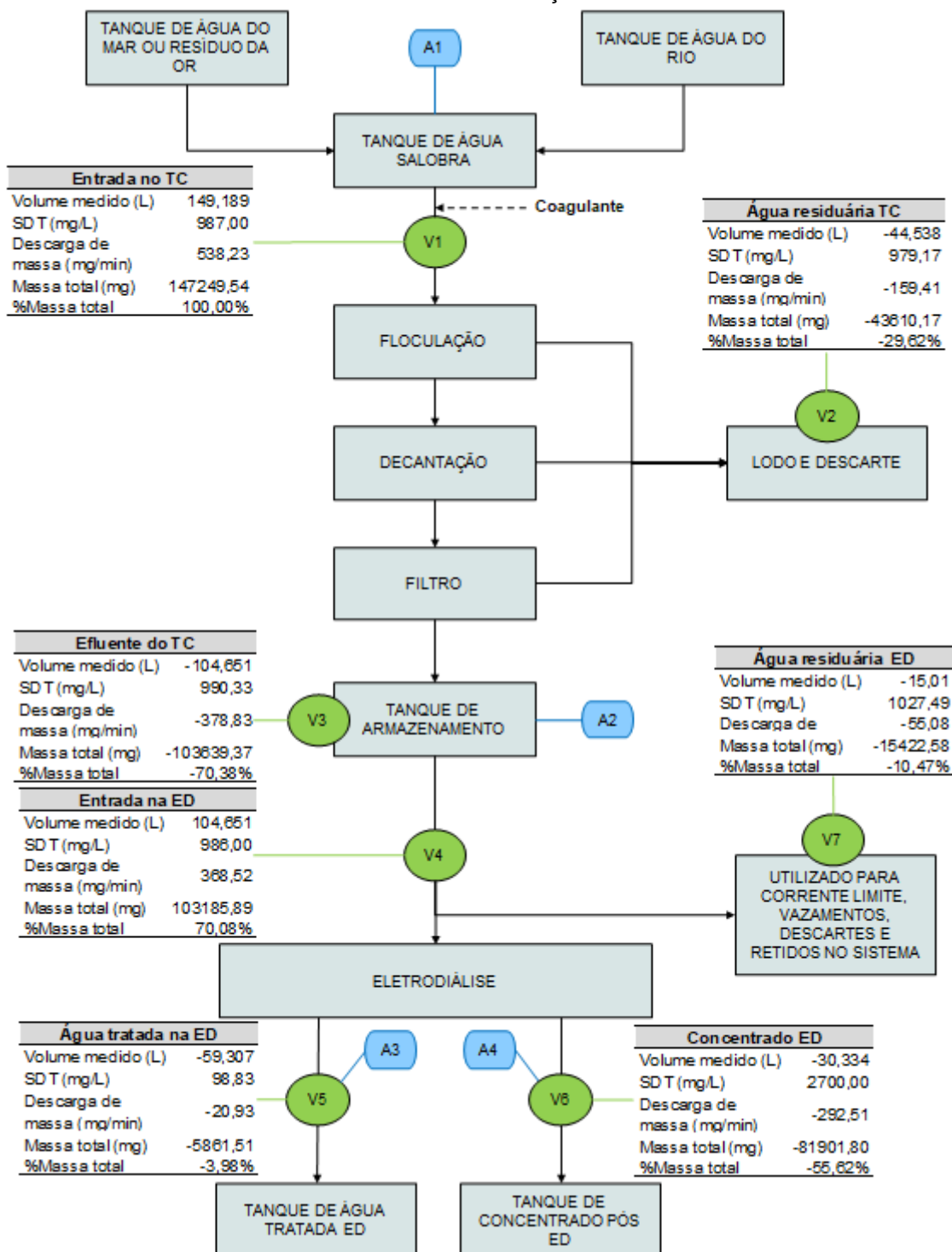
Como verificado por Cavalcanti (1991), a densidade de corrente decresce, enquanto a resistência ôhmica do sistema aumenta, em função do tempo de dessalinização para uma dada concentração inicial. Denota-se em seu estudo que o consumo de energia se encontra relacionado com o tempo de dessalinização e a diferença de potencial aplicado nos eletrodos. Assim como no presente estudo, as curvas de densidade de corrente apresentaram um comportamento linear e decrescente com o tempo em todos os casos.

### 5.3 CONCENTRAÇÃO DE SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup>

#### 5.3.1 Balanço De Massa

A Figura 23 refere-se ao fluxograma com os resultados do balanço de massa geral dos experimentos realizados com SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> na entrada do sistema de tratamento convencional.

Figura 23 - Fluxograma do sistema de dessalinização na concentração de SDT 1000 mg/L - Resultados do balanço de massa



Fonte: O autor.

O sistema foi alimentado com água salobra com SDT de 987 mg.L<sup>-1</sup>, este valor se refere a média de 3 amostras coletadas em tempos intermediários durante o ensaio. A descarga mássica de SDT na aplicação da técnica de TC foi de 538,23 mg.min<sup>-1</sup>, somando ao final do ensaio 147.249,54 mg, sendo este valor correspondente a 100%.

A SDT média do efluente do TC, verificada em 3 amostras, foi de 990,33 mg.L<sup>-1</sup>, com massa total de 103639,37 mg, correspondendo a 70,38% da massa de alimentação. Dado isto, tem-se que 43610,17 mg compõem a água residuária dessa técnica. Pode ser visualizado na Tabela 6, que do total da massa, 70,08% foi direcionado a 3 ensaios de dessalinização na ED, dos quais foram verificadas a concentração de SDT, a média de 6 valores correspondeu a 986 mg.L<sup>-1</sup>. Observa-se que há uma diferença de 0,31% entre a massa de SDT efluente do TC e afluente a ED, tal situação pode ser considerada erro de leitura do equipamento, pois as sondas utilizadas tem acurácia de 0,5% (HEXIS, 2022) da leitura. Como esperado, não houve nenhuma remoção de SDT no TC.

Tabela 6 - Balanço de massa para concentração de SDT 1000 mg/L

		Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa parcial	%Massa total
<b>Tratamento Convencional</b>	V1 - Volume de entrada	149,189	273,58	0,545	987,00	538,23	147249,54	100,00%	100,00%
	V2 - Água residuária	-44,538	273,58	-0,163	979,17	-159,41	-43610,17	-29,62%	-29,62%
	V3 - Efluente	-104,651	273,58	-0,383	990,33	-378,83	-103639,37	-70,38%	-70,38%
<b>Eletrodialíse</b>	V4 - Afluente	104,651	280,00	0,374	986,00	368,52	103185,89	100,00%	70,08%
	V5 - Água tratada	-59,307	280,00	-0,212	98,83	-20,93	-5861,51	-5,68%	-3,98%
	V6 - Concentrado	-30,334	280,00	-0,108	2700,00	-292,51	-81901,80	-79,37%	-55,62%
	V7 - Água residuária	-15,010	280,00	-0,054	1027,49	-55,08	-15422,58	-14,95%	-10,47%
<b>Balanço</b>	ΣV	0							
<b>%Erro</b>	Erro de leitura e/ou mistura inadequada	0,00%							-0,31%

Fonte: O autor.

O volume total de água bruta de alimentação foi de 149,189 L, o ensaio 1 foi finalizado após obter, aproximadamente, 104,651 L de água com qualidade suficiente para alimentação do sistema ED, que conforme verificado por Telles (2010) deve apresentar baixa turbidez e cor, minimizando as incrustações na membrana. Segundo a Portaria de N° 888, do Ministério da Saúde (2021), o valor máximo de turbidez é 5 UNT e cor aparente 15 uH, o efluente do TC apresentou turbidez e cor aparente abaixo desses valores, o que indica uma água com estas propriedades organolépticas próprias para consumo.

A massa e concentração de SDT que permaneceu, respectivamente, no diluído corresponde a 3,98% e 98,83 mg.L<sup>-1</sup>, e no concentrado 55,62% e 2700 mg.L<sup>-1</sup>. Além destes, a água residuária apresentou massa total de 15422,58 mg e concentração de SDT de 1027,49 mg.L<sup>-1</sup>.

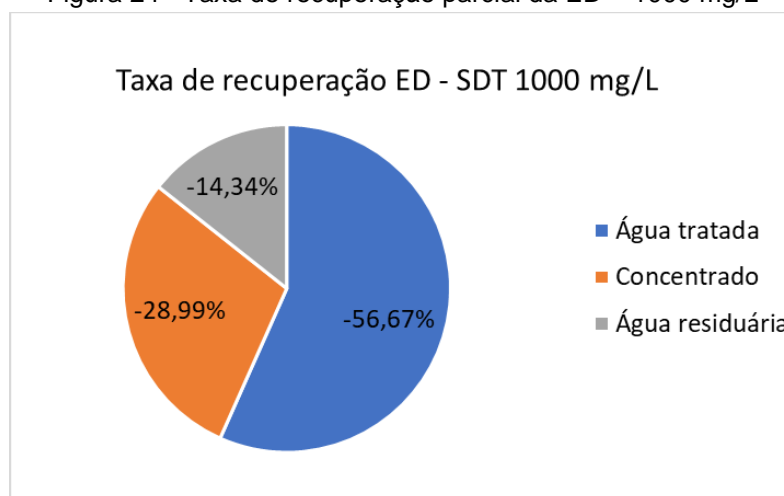
O ensaio foi finalizado para SDT abaixo de 100 mg.L<sup>-1</sup> no diluído, Telles (2010) descreve que na eletrodialise a concentração da solução diluída pode ser reduzida a valores entre 100 e 200 mg.L<sup>-1</sup>, mas deve ser alta suficiente para permitir a condutividade elétrica apropriada, ou seja, para concentrações abaixo dessa faixa a descarga mássica decai.

### 5.3.2 Taxa De Recuperação

A taxa de recuperação no tratamento convencional foi de 70,15%, gerando 29,85% de água residuária, na qual soma-se o lodo e água retida no sistema após finalização do ensaio. O valor da taxa de recuperação de água ficou abaixo da produção de água de 85 a 97%, descrito por Martins Júnior (2020), para estações de tratamento de água no sistema convencional.

Para a ED, quando considerado 100% o volume que alimenta apenas este processo, apresenta taxa de recuperação de 56,67%, valor dado pela média de volume dos 3 ensaios realizados. Do volume restante, 28,99% foi o concentrado, 14,34% retidos no sistema e utilizado para determinação da corrente limite, conforme pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Taxa de recuperação parcial da ED – 1000 mg/L



Fonte: O autor.

Quando considerado de forma global, ou seja, sendo alimentado a técnica de ED por 70,15% do volume, tem-se taxa de recuperação, concentrado e água residuária, respectivamente de, 39,75%, 20,33% e 10,06%, respectivamente.

Segundo Metcalf e Eddy (2016), baseado no tratamento de efluente com concentração de SDT variando entre 1000 e 2500 mg.L<sup>-1</sup>, a taxa de recuperação de água por processo em ED é de 75 a 90%. O valor encontrado ficou abaixo da capacidade de recuperação da técnica de tratamento.

Telles (2010), denota a dependência da qualidade da carga a ser tratada e define a taxa de recuperação de água no intervalo de 50 a 94%. Avaliando em separadamente o processo de ED, o valor de recuperação da água fica dentro do intervalo.

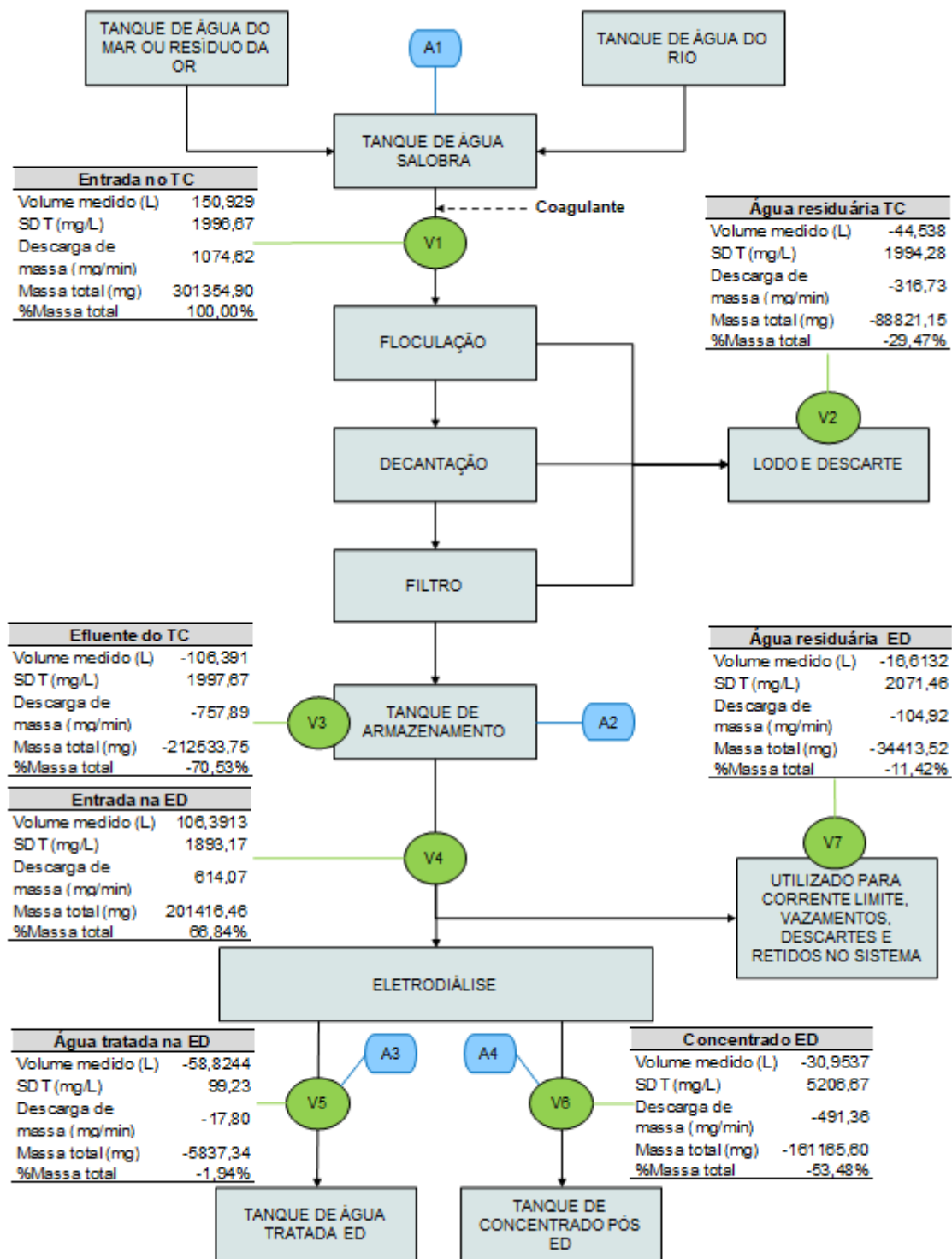
As tabelas com o balanço de massa de cada ensaio na eletrodialise para SDT de 1000 mg.L<sup>-1</sup>, podem ser consultadas no Apêndice A. Observa-se que nos ensaio 2 e 3, houve aumento no volume do concentrado após o tratamento, como descrito por Galuchi (2010), pode ter ocorrido um ou ambos os mecanismos de transferência de massa: eletro-osmótico, solvatação dos íons e osmose. Além ainda da convecção, que se dá por força mecânica, geralmente por diferença de pressão hidrostática.

## 5.4 CONCENTRAÇÃO DE SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup>

### 5.4.1 Balanço De Massa

O balanço de massa geral para SDT inicial de 2000 mg.L<sup>-1</sup> está representado no fluxograma da Figura 25, desde a alimentação de água salobra no TC até a etapa de ED.

Figura 25 - Fluxograma do sistema de dessalinização na concentração de SDT 2000 mg/L - Resultados do balanço de massa



Fonte: O autor.

A média de SDT de alimentação foi  $1996,67 \text{ mg.L}^{-1}$ , contando ao final do ensaio com massa total de  $301354,90 \text{ mg}$ , correspondente a 100% da massa. Teve-se nestas condições descarga mássica de entrada no TC de  $1074,62 \text{ mg.min}^{-1}$ .



A massa que compôs a água residuária e não fez mais parte da próxima etapa foi de 88821,15 mg. O restante 70,53%, foi efluente do TC, contabilizado 212533,75 mg, porém a massa total afluente na ED foi de 201416,46 mg, observa-se na Tabela 7 o erro de 3,69%, ou seja, maior do que o ocasionado pela precisão do equipamento de 0,5%. Houve um erro operacional no armazenamento da água efluente do TC, sendo está contaminada com água tratada, o que acabou diluindo a concentração. O volume não foi afetado, pois foi contabilizado no TC.

A massa afluente a técnica de ED foi de 66,84% da massa total, com descarga mássica de 614,07 mg.min<sup>-1</sup>, resultado de SDT média de entrada de 1893,17 mg.L<sup>-1</sup>.

Tabela 7 - Balanço de massa para concentração de SDT 2000 mg/L

		VOLUME medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Descarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa parcial	%Massa total
<b>Tratamento Convencional</b>	V1 - Volume de entrada	150,929	280,43	0,538	1996,67	1074,62	301354,90	100,00%	100,00%
	V2 - Água residuária	-44,538	280,43	-0,159	1994,28	-316,73	-88821,15	-29,47%	-29,47%
	V3 - Efluente	-106,391	280,43	-0,379	1997,67	-757,89	-212533,75	-70,53%	-70,53%
<b>Eletrodialíse</b>	V4 - Afluente	106,391	328,00	0,324	1893,17	614,07	201416,46	100,00%	66,84%
	V5 - Água tratada	-58,824	328,00	-0,179	99,23	-17,80	-5837,34	-2,90%	-1,94%
	V6 - Concentrado	-30,954	328,00	-0,094	5206,67	-491,36	-161165,60	-80,02%	-53,48%
	V7 - Água residuária	-16,613	328,00	-0,051	2071,46	-104,92	-34413,52	-17,09%	-11,42%
<b>Balanço</b>	ΣV	0							
<b>%Erro</b>	Erro de leitura e/ou mistura inadequada	0,00%							-3,69%

Fonte: O autor.

O tratamento foi finalizado quando obtido concentração de SDT abaixo de 100 mg.L<sup>-1</sup>, pois os valores de corrente são reduzidos e o tratamento a concentrações menores tornam-se inviáveis por tempo e gasto energético. Lembrando que esta concentração é 10% do valor máximo para SDT estabelecido na Portaria de Consolidação N° 5, do Ministério da Saúde (2017), no Anexo 10 do Anexo XX.

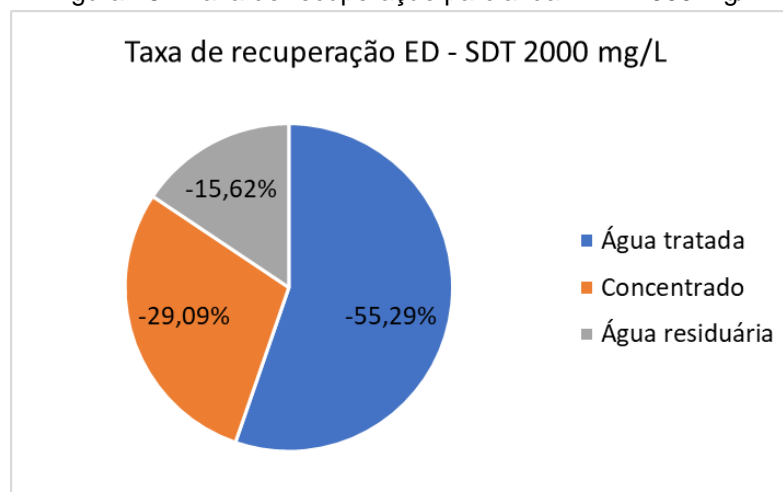
Da massa total 1,94% constituiu a água tratada, correspondente a 5837,34 mg, para concentrado e água residuária somam-se 53,48 e 11,42% da SDT de entrada no sistema de dessalinização.

#### 5.4.2 Taxa De Recuperação

O volume total de água que entrou no sistema foi de 150,929 L, correspondente a 100% do volume. Deste 29,51% ficou retido no TC, o volume utilizado para os 3 ensaios de ED foi o efluente do TC de 70,49%. Também foi obtido valor menor que a faixa de 85 a 97% (MARTINS JUNIOR, 2020) de recuperação da água.

O volume condizente de água tratada obtida na ED foi 38,97% do total, 20,51% constituiu o concentrado e 11,01% a água residuária. Quando considerado o processo de ED com entrada de volume de 100%, gerou taxa de recuperação de água igual a 55,29% do volume de 106,391 L, como pode ser observado no gráfico da Figura 26. Seguida a mesma configuração do sistema inicial na ED, a taxa de recuperação ficou abaixo da capacidade de recuperação do processo.

Figura 26 - Taxa de recuperação parcial da ED – 2000 mg/L



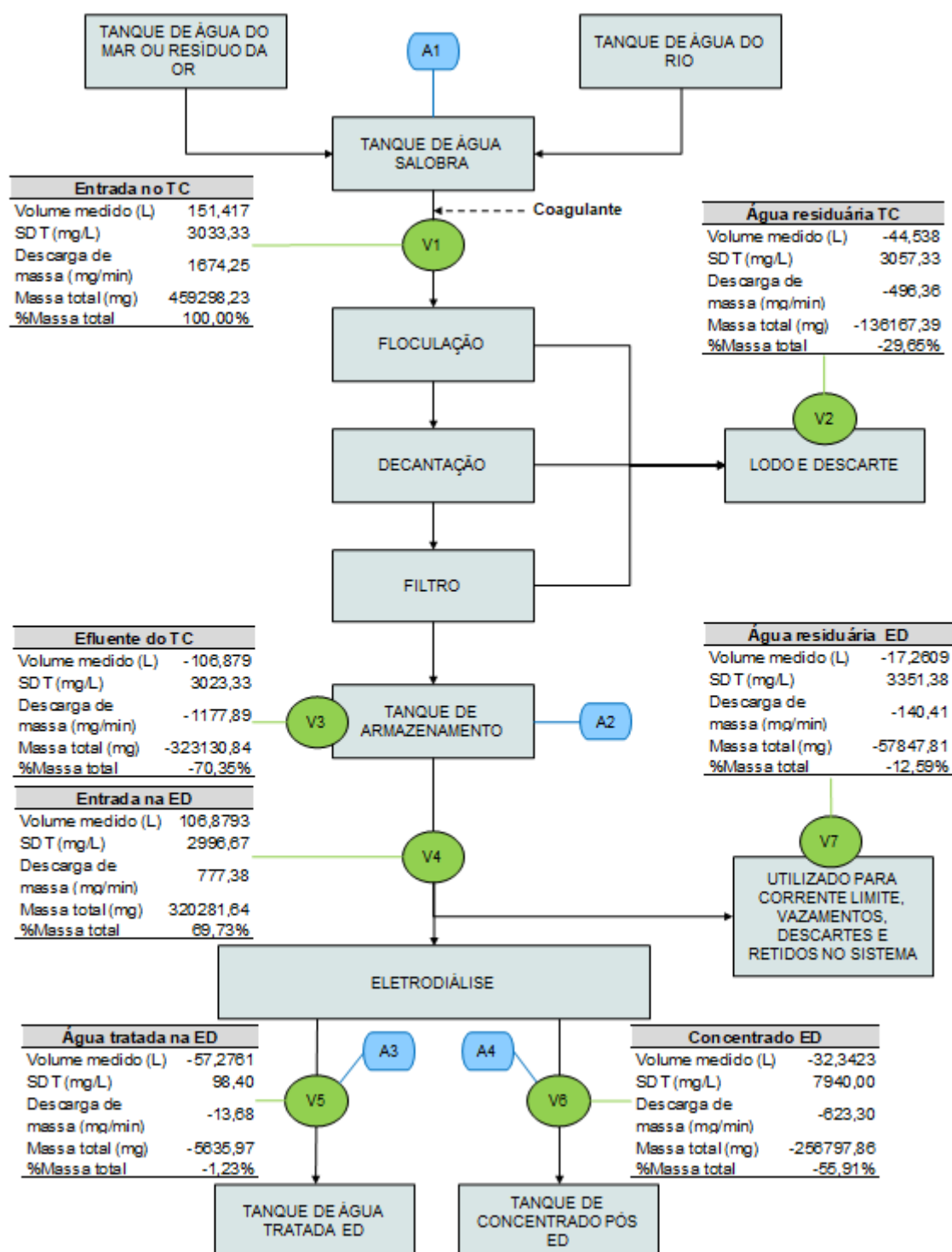
Fonte: O autor.

## 5.5 CONCENTRAÇÃO DE SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup>

### 5.5.1 Balanço De Massa

A Figura 27 refere-se ao balanço de massa geral para o sistema de dessalinização com SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup>. Para esta concentração a massa total do sistema foi 459298,23 mg, correspondente a 100%.

Figura 27 - Fluxograma do sistema de dessalinização na concentração de SDT 3000 mg/L - Resultados do balanço de massa



Fonte: O autor.

A vazão total foi composta por água salobra e coagulante. A SDT média na entrada foi de 3033,33 mg.L<sup>-1</sup>, com descarga mássica de 1674,25 mg.min<sup>-1</sup>. Neste tratamento 29,66% (136167,39 mg) da massa constituiu a água residuária e 70,35% o efluente do TC.

Conforme Tabela 8 o erro entre o volume afluente do TC e afluente na ED foi de 0,62%, condiz a um erro maior do que o de precisão da sonda utilizada. Durante a medição de SDT efluente a temperatura do líquido foi em média 18°C e no início da ED foi em média 22,8°C, o que pode ter ocasionado esse erro entre as massas de SDT, pois a condutividade da água varia conforme temperatura.

Tabela 8 - Balanço de massa para concentração de SDT 3000 mg/L

Balanço mássico do sistema TC e ED para SDT 3000 mg/L		Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa parcial	%Massa total
Tratamento Convencional	V1 - Volume de entrada	151,417	274,33	0,552	3033,33	1674,25	459298,23	100,00%	100,00%
	V2 - Água residuária	-44,538	274,33	-0,162	3057,33	-496,36	-136167,39	-29,65%	-29,65%
	V3 - Efluente	-106,879	274,33	-0,390	3023,33	-1177,89	-323130,84	-70,35%	-70,35%
Eletrodíálise	V4 - Afluente	106,879	412	0,259	2996,67	777,38	320281,64	100,00%	69,73%
	V5 - Água tratada	-57,276	412	-0,139	98,40	-13,68	-5635,97	-1,76%	-1,23%
	V6 - Concentrado	-32,342	412	-0,079	7940,00	-623,30	-256797,86	-80,18%	-55,91%
	V7 - Água residuária	-17,261	412	-0,042	3351,38	-140,41	-57847,81	-18,06%	-12,59%
Balanço	ΣV	0							
%Erro	Erro de leitura e/ou mistura inadequada	0,00%							-0,62%

Fonte: O autor.

A massa de SDT que permaneceu na água tratada foi de 1,23% (5635,97 mg) do total de alimentação, 55,91% compôs o concentrado e 12,59% a água residuária da etapa de ED. A média de SDT da água tratada foi de 98,4 mg.L<sup>-1</sup>, do concentrado de 7940 mg.L<sup>-1</sup> e na água residuária foi calculado em 3351,38, indicando um possível acúmulo de íons nas membranas da ED.

### 5.5.2 Taxa De Recuperação

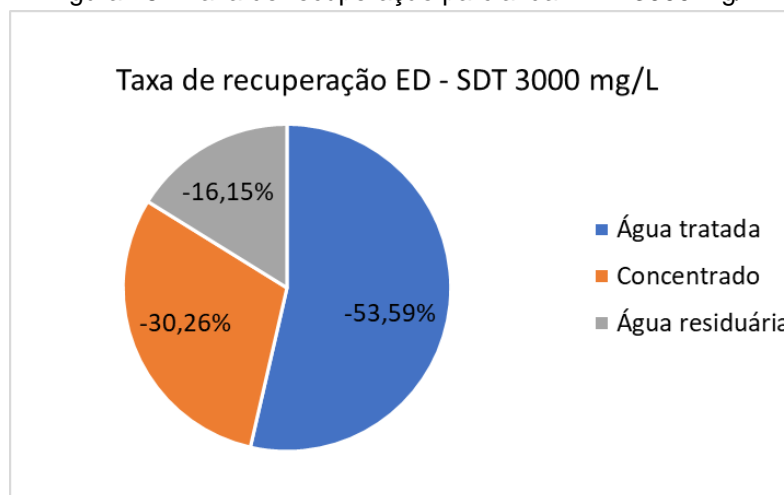
No tratamento convencional foi obtida taxa de recuperação de 70,59% os 29,41% compuseram a água residuária, assim como nos demais tratamentos o valor alcançado foi menor que a faixa de 85 a 97% (MARTINS JUNIOR, 2020) de recuperação da água.

A taxa de recuperação do global do sistema foi de 37,83%, no terceiro ensaio para esta concentração ocorreu um vazamento de pouca intensidade na mangueira do diluído ao final do tratamento, o sistema operou por aproximadamente 30 min, até que fosse obtido SDT menor que 100 mg.L<sup>-1</sup>. Assim, a menor média de taxa de recuperação entre os tratamento foi nesta concentração.

Do volume de 70,59% que foram utilizados para ED, 21,36% constituiu o concentrado e 11,40% foram caracterizados como água residuária.

Avaliando apenas o processo de ED, tem-se taxa de recuperação de 53,59% como representado na Figura 28.

Figura 28 - Taxa de recuperação parcial da ED – 3000 mg/L



Fonte: O autor.

## 5.6 RESULTADOS GERAIS

Foi possível, variando-se a concentração de SDT na água bruta, realizar os testes fazendo a comparação e avaliação do desempenho do equipamento por meio do balanço de massa, taxa de recuperação e corrente elétrica.

A partir da análise da descarga mássica do recipiente concentrado das diferentes concentrações, através da ANOVA por delineamento inteiramente causalizado, constatou-se que existe diferença significativa na descarga mássica entre os tratamentos propostos. A concentração de SDT de 1000 mg.L<sup>-1</sup> diferiu significativamente das concentrações de SDT de 2000 e 3000mg.L<sup>-1</sup> ao nível de significância de 1%.

Ao nível de significância de 1% não houve diferença significativa entre as concentrações 2000 e 3000 mg.L<sup>-1</sup>, porém para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> foi obtida a maior descarga mássica no concentrado, a partir da vazão regularizada. Sendo assim, na concentração de SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> existe maior capacidade de transferência de íons por minuto, ou seja, mesmo que demorou mais tempo para atingir SDT de 100 mg.L<sup>-1</sup> na água tratada na ED, é apenas porque tinha maior concentração inicial. Todavia, a corrente elétrica é maior do que nos demais casos (Figuras 20, 21 e 22), havendo maior consumo de energia.

A descarga mássica corresponde neste caso, a massa de SDT que o concentrado da ED recebe em um intervalo de tempo, submetido ao potencial elétrico.

Como a descarga mássica não diferiram significativamente para SDT de 2000 e 3000 mg.L<sup>-1</sup>, deve ser avaliado o consumo energético e tempo de tratamento entre estas concentrações, para se definir o intervalo de tratamento mais adequado ao equipamento.

Na Tabela 9 contém o resumo do balanço de massa para as diferentes concentrações testadas, note-se que a média da descarga mássica para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup>, foi superior que as demais.

Assim como verificou Cavalcanti (1991), a resistência do fluxo concentrado não tem importância relativa na resistência total, pois tem redução para baixos valores, em comparação com o aumento da resistência do fluxo diluído. A resistência do sistema é inversamente proporcional a corrente elétrica aplicada, ou seja, quanto maior a resistência do diluído em uma dada tensão, menor será a corrente elétrica.

Sabendo disso Borges (2009), desenvolveu equações que estimaram o desempenho das membranas em função dos parâmetros operacionais, como: a densidade de corrente e a concentração inicial de sal na alimentação.

Além dos parâmetros utilizados por Borges (2009), Metcalf e Eddy (2016), acrescenta que a remoção de sais dissolvidos também é função da temperatura do fluido, da seletividade das membrana, do potencial de depósitos da água de alimentação, da vazão a ser tratada, da área de membranas e da configuração dos estágios.

Neste estudo foi possível verificar a influência descrita por Borges (2009), pois não houve alteração de vazão e da configuração do equipamento.

Tabela 9 - Resumo do balanço de massa

<b>CONCENTRAÇÕES (mg/L)</b>			
	<b>1000,00</b>	<b>2000,00</b>	<b>3000,00</b>
<b>Entrada no TC</b>			
Volume medido (L)	149,19	150,93	151,42
SDT (mg/L)	987,00	1996,67	3033,33
Descarga de massa (mg/min)	538,23	1074,62	1674,25
Massa total (mg)	147249,54	301354,90	459298,23
%Massa total	100,00%	100,00%	100,00%
<b>Água residuária TC</b>			
Volume medido (L)	-44,54	-44,54	-44,54
SDT (mg/L)	979,17	1994,28	3057,33
Descarga de massa (mg/min)	-159,41	-316,73	-496,36
Massa total (mg)	-43610,17	-88821,15	-136167,39
%Massa total	-29,62%	-29,47%	-29,65%
<b>Efluente do TC</b>			
Volume medido (L)	-104,65	-106,39	-106,88
SDT (mg/L)	990,33	1997,67	3023,33
Descarga de massa (mg/min)	-378,83	-757,89	-1177,89
Massa total (mg)	-103639,37	-212533,75	-323130,84
%Massa total	-70,38%	-70,53%	-70,35%
<b>Entrada na ED</b>			
Volume medido (L)	104,65	106,39	106,88
SDT (mg/L)	986,00	1893,17	2996,67
Descarga de massa (mg/min)	368,52	614,07	777,38
Massa total (mg)	103185,89	201416,46	320281,64
%Massa total	70,08%	66,84%	69,73%
<b>Água tratada na ED</b>			
Volume medido (L)	-59,31	-58,82	-57,28
SDT (mg/L)	98,83	99,23	98,40
Descarga de massa (mg/min)	-20,93	-17,80	-13,68
Massa total (mg)	-5861,51	-5837,34	-5635,97
%Massa total	-3,98%	-1,94%	-1,23%
<b>Concentrado ED</b>			
Volume medido (L)	-30,33	-30,95	-32,34
SDT (mg/L)	2700,00	5206,67	7940,00
Descarga de massa (mg/min)	-292,51	-491,36	-623,30
Massa total (mg)	-81901,80	-161165,60	-256797,86
%Massa total	-55,62%	-53,48%	-55,91%
<b>Água residuária ED</b>			
Volume medido (L)	-15,01	-16,61	-17,26
SDT (mg/L)	1027,49	2071,46	3351,38
Descarga de massa (mg/min)	-55,08	-104,92	-140,41
Massa total (mg)	-15422,58	-34413,52	-57847,81
%Massa total	-10,47%	-11,42%	-12,59%

Fonte: O autor.

Também foi comparada a eficiência de remoção de SDT das diferentes concentrações para um mesmo tempo de ensaio, neste caso de 84 min. Dado que, a média de remoção para concentração de SDT de 1000 mg.L<sup>-1</sup> foi de 87,42%, para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> foi de 87,36% e para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> foi de 82,71%. A análise foi realizada por ANOVA em delineamento inteiramente causalizado. Foi possível

observar que não houve diferença significativa a 1% entre os tratamentos, quanto a eficiência de remoção para um mesmo tempo, ou seja, o tempo para tratar a água salobra com SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> é o mesmo para se tratar as concentrações de 2000 e 3000 mg.L<sup>-1</sup>. Denota-se novamente a relevância da avaliação do consumo de energia pelo processo. Em sua pesquisa no tratamento de efluentes Alborno (2017), obteve remoção de 79,6% dos SDT, para uma concentração inicial de 530 mg.L<sup>-1</sup>. Assim, como a taxa de recuperação Telles (2010), descreve a taxa de remoção de sais na ED no intervalo de 50 a 94%. Os valores obtidos foram entre 82,71 e 87,42%.

Analisando cada concentração no processo de ED a média de remoção de sais para as concentrações de SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> para tempo de tratamento de 84 min foi 87,42%, para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> com tempo de 104 min foi de 93,59% e com SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> com duração do ensaio de 123 min foi de 95,00%.

A taxa de recuperação de água média do TC para as diferentes concentrações foi de 70,55%, o valor ficou abaixo do valor da produção de água de 85 a 97%, descrito por Martins Júnior (2020). Avaliado ambos os tratamentos a média da taxa de recuperação foi de 38,21%. Contando apenas com o processo de ED, tem média de recuperação da água de 64,97%, ainda inferior ao valor de 75 a 90% (METCALF; EDDY, 2016) para produção de água purificada.

A vazão do diluído e concentrado indicada pelo fabricante (PCCell, 2018) para o equipamento de ED do estudo é de 100 a 200 L.h<sup>-1</sup>, a vazão utilizada foi de 105 L.h<sup>-1</sup>, valor próximo ao limite inferior do sistema, devido a limitação da bomba peristáltica. A vazão utilizada para a recirculação do eletrólito foi de 75 L.h<sup>-1</sup>, porém a vazão indicada por PCCell (2018) é de 150 L.h<sup>-1</sup>. Isto significa, que o estudo foi realizado a baixas vazões, tem-se como ponto positivo trabalhar com vazões mais baixas em um sistema, o menor consumo energético nas bombas.

Com relação ao fluxo de água Galuchi (2010), em seu experimento denotou a influência da diferença de concentração e densidade de corrente como principais fatores responsáveis por este fluxo, o transporte ocorreu por osmose e solvatação de íons. Dependendo da faixa de diferença de concentração entre os compartimentos, há influência positiva ou negativa sobre o transporte de água. Nesse trabalho também foi possível identificar o transporte de água pela membrana, pois houve alteração do volume nos recipientes de diluído e concentrado, indicando que além do fluxo salino, ocorreu o fluxo de água.



## 6. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos estabelecidos para esse trabalho, os resultados possibilitaram obter as seguintes conclusões.

Quanto a instalação do sistema de tratamento convencional e sua finalidade, os objetivos foram alcançados. A técnica mostrou-se eficiente na remoção de turbidez, cor aparente e sólidos suspensos totais, fatores que são desencadeantes de processos que podem diminuir a eficiência da etapa de eletrodialise. Sendo assim, o sistema foi adequado para posterior utilização do processo de eletrodialise na água salobra.

Com relação a instalação da eletrodialise, chegou-se ao objetivo pretendido. A utilização de bombas peristálticas para o diluído, concentrado e eletrólito, possibilitou que o fluído tivesse contato apenas com a mangueira de silicone. Uma das formas de verificar a eficiência do processo na transferência de massa é a verificação de pressão na entrada da eletrodialise, pois o aumento de pressão pode indicar incrustações na membrana. Para este estudo, como pontos negativos teve-se a impossibilidade de medir a pressão de entrada na eletrodialise, pois a propulsão provocada na água, não permitiu uma leitura precisa. Também ocorreram dificuldades em igualar os fluxos de concentrado e diluído, pois a bomba peristáltica utilizada tem regulador de pressão com ajuste manual.

Foram utilizadas vazões e tensões iguais para diferentes concentrações de sólidos dissolvidos totais na eletrodialise, porém a corrente elétrica no sistema se mostrou mais alta no início do ensaio para as concentrações iniciais mais elevadas no diluído. Fato que elevou a transferência de sal por tempo, ou seja, a descarga mássica é diretamente influenciada pela concentração inicial e corrente elétrica.

O processo de eletrodialise foi eficiente em todas as concentrações testadas na remoção de sólidos dissolvidos totais, com taxas superiores a 82% no tempo mínimo de ensaio. Foi observado que para maior concentração analisada a corrente elétrica e descarga mássica foram em média maiores que das demais concentrações.

Com relação, a taxa de recuperação da água no sistema de tratamento convencional, que foi operado em batelada, resultou em taxa de recuperação média 70,55%, este valor ficou abaixo dos descritos em estações de tratamento de água. Com relação ao sistema global a média de recuperação da água para as concentrações testadas foi de 38,21%. Observa-se o valor abaixo do encontrado na literatura, porém ressalta-se que o sistema operado em ciclos teve descartes e

retenções que não existiriam ou seriam minimizados em um sistema contínuo de tratamento.

A técnica de eletrodialise também foi operada em batelada, para a taxa de recuperação da água considerando apenas este processo, obteve-se taxa de recuperação média de 64,97%, um valor ainda julgado baixo, neste foi desconsiderado a água salobra utilizada para determinação da corrente limite, em média de 11,27% do volume efluente do tratamento convencional. A água utilizada para o ensaio da corrente limite foi descartada para que não ocorresse a diminuição de sólidos dissolvidos totais, devido a retenção no sistema. Porém, recomenda-se utilizar a água empregada na determinação da corrente limite no processo de tratamento, minimizando assim, o volume de água residuária, e refletindo diretamente na taxa de recuperação e água residuária dos 2 sistemas em conjunto. Também é válido a utilização de menor volume de concentrado, respeitando o limite de saturação do líquido.

Sugere-se para trabalhos futuros, a realização de estudos com abordagens: experimental e computacional. A primeira com a faixa de concentração de sólidos dissolvidos totais de 1000 a 5000 mg.L<sup>-1</sup> e análise do consumo energético do processo de eletrodialise. Também realizar ações como citadas acima que aumentem a taxa de recuperação de água. A última, visando equacionar a eficiência do processo a partir das variáveis consumo energético e concentração inicial do diluído, para esta faixa de sólidos dissolvidos totais. Também realizar a projeção de resíduos, para posterior tratamento ou descarte adequado.

## REFERÊNCIAS

ADHAM, S. *et al.* Comparison of Advanced Treatment Methods for Partial Desalting of Tertiary Effluents. **Desalination and Water Purification Research and Development**, Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO, 2009.

ALBORNOZ, L. L. **Eletrodialise como tratamento terciário em uma estação de tratamento de efluentes de um campus universitário visando o reuso de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2017. 160 p.

AZEVEDO, J. de S.; FRESQUI, M.; TRSIC, M. **Curso de Química para Engenharia**. Barueri, SP: Editora Manole, 2014.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20.ed. Washington. 1998.

BANCOR AMBIENTAL. **Eletrodialise reversa para vinhaças de destilaria de álcool**. Disponível em: [http://www.bancor.com.br/edr-v\\_catalogue.htm](http://www.bancor.com.br/edr-v_catalogue.htm). Acesso em: agosto de 2022.

BITTENCOURT, C.; PAULA, M. A. S. de. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. São Paulo: Érica, 2014.

BORGES, F.J. **Integração dos processos de eletrodialise e de degradação fotoquímica para o tratamento de efluentes salinos contendo fenol**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. 139 p.

BRASIL, **Ministério do Desenvolvimento Regional (PAD)**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/programa-agua-doce-do-mdr-e-destaque-em-webinar-internacional>. Acesso em 25 de março de 2021.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: 2011.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistemas de abastecimento de água** / Ministério do Meio Ambiente, Agência Nacional das Águas e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Fortaleza: 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde (MS). Gabinete do Ministro. **Portaria nº 888, de 04 de maio de 2017**. Brasília, 2021. 29 p.

BUZZI, D. C. **Aplicação da eletrodialise no tratamento da drenagem ácida de minas visando a recuperação de ácido sulfúrico**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. 137 p.

CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologias e Gestão**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CAVALCANTI, E. B. **Avaliação de um reator eletrodialítico, para fins de dessalinização de hidrolizado protéico por eletrodialise**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1991. 144 p.

CRUZ *et al.* **Balanços de massa e energia na análise de processos químicos**. São Paulo: Departamento de Produção Gráfica – UFSCar, 2010.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios de Engenharia Ambiental**. 3.ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

DAVIS, M. L. **Tratamento de águas de abastecimento e residuárias: princípios e práticas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

DI BERNARDO, L. *et al.* **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos, SP: LDiBe, 2011. 454 p.

FARIAS NETO, S. R. de. **Estudo e avaliação de alguns parâmetros de dessalinização a partir de um reator eletro-dialítico via eletrodialise**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba - Campus II Campina Grande - Brasil, 1992. 143p.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

GALUCHI, T. P. D. **Montagem e caracterização de unidade de eletrodialise em escala de laboratório para tratamento de soluções salinas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 78 p.

GARRISON, T. **Fundamentos de oceanografia**. 2.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 480 p.

GIMENEZ, J. R. **Efeitos da concentração de biomassa e pressão transmembrana na filtração com membranas de fibras ocas em biorreatores**. Tese (Doutorado em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, RS, 2013.

GRIBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**: Tradução da 4.ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014.

HOWE, K. J. *et al.* **Princípios de tratamento de água**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016.

JACANGELO, J. G *et al.* **Membrane Filtration for Microbial Removal**, AWWA Research Foundation and American Water Works Association. 1997.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. dos. **Reuso de água**. Barueri, SP: Manole, 2003.

MARTINS JÚNIOR, J. A. **Determinação do coeficiente de consumo e perdas de estações de tratamento de água**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

METCALF; EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5.ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

PCCELL. **Micro ED, ED 64002, ED 64004 and ED 200**: Operation and Maintenance Instruction, 2018. Disponível em: [www.pccell.de/publi/index.html](http://www.pccell.de/publi/index.html). Acesso em: agosto de 2022.

RICHTER, C. A. **Água**: Métodos e Tecnologia de Tratamento. 5.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

RICHTER, C. A. **Tratamento de água**. 13.ed. São Paulo: Editora Blucher, 1991.

RODRIGUES, A. C. M. **Balço de massa de um sistema de ultrafiltração e osmose reversa para dessalinização de água salobra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019. 90f.

SANMARTINO *et al.* **Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment**. Elsevier Science, 2016.

SANTOS, C. S. L. **Aplicação do processo de eletrodialise na remoção de cromo em efluente sintético advindo de biorreator anaeróbio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2016.

SCHWANKE, C. **Ambiente: tecnologias**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SILVA, P. A. G. **Velocidade de sedimentação de agregado fractal em tratamento de água: o efeito do tamanho, forma, orientação e permeabilidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Estadual Paulista (Unesp), Bauru, 2021. 120 f.

TAVARES, J. P. V. **Estudo da viabilidade do uso de fontes renováveis para a dessalinização de água na Ilha de Santiago**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia Solar), Universidade de Évora, Évora, 2020. 91p.

TELLES, D. D.; COSTA, R. P. **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

## APÊNDICE A – BALANÇO DE MASSA NA ELETRODIÁLISE

Tabela A.1 – Balanço de massa na ED para SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 1

Eletrodiálise - SDT 1000 mg/L - Ensaio 1								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	105	0,190	1010,00	192,381	20200,000	66,29%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	105	0,095	1027,00	97,810	10270,000	33,71%	33,33%
Saída do diluído	-19,895	105	-0,189	97,70	-18,512	-1943,742	-6,38%	-66,32%
Saída do concentrado	-9,996	105	-0,095	2850,00	-271,331	-28489,740	-93,50%	-33,32%
Água residuária	-0,109	105	-0,001	336,27	-0,348	-36,519	-0,12%	-0,36%
Balanço: ΣV	0						0,00%	0,00%

Tabela A.2 – Balanço de massa na ED para SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 2

Eletrodiálise - SDT 1000 mg/L - Ensaio 2								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	84	0,238	947,00	225,476	18940,000	66,67%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	84	0,119	947,00	112,738	9470,000	33,33%	33,33%
Saída do diluído	-19,701	84	-0,235	99,80	-23,407	-1966,160	-6,92%	-65,67%
Saída do concentrado	-10,170	84	-0,121	2570,00	-311,154	-26136,900	-92,00%	-33,90%
Água residuária	-0,129	84	-0,002	2379,38	-3,654	-306,940	-1,08%	-0,43%
Balanço: ΣV	0						0,00%	0,00%

Tabela A.3 – Balanço de massa na ED para SDT 1000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 3

Eletrodiálise - SDT 1000 mg/L - Ensaio 3								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	91	0,220	993,00	218,242	19860,000	66,69%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	91	0,110	992,00	109,011	9920,000	33,31%	33,33%
Saída do diluído	-19,711	91	-0,217	99,00	-21,444	-1951,389	-6,55%	-65,70%
Saída do concentrado	-10,167	91	-0,112	2680,00	-299,424	-27247,560	-91,50%	-33,89%
Água residuária	-0,122	91	-0,001	4762,71	-6,385	-581,051	-1,95%	-0,41%
Balanço: $\Sigma V$	0						0,00%	0,00%

Tabela A.4 – Balanço de massa na ED para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 1

Eletrodiálise - SDT 2000 mg/L - Ensaio 1								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	118	0,169	1941,00	328,983	38820,000	67,07%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	118	0,085	1906,00	161,525	19060,000	32,93%	33,33%
Saída do diluído	-19,549	118	-0,166	99,80	-16,534	-1950,990	-3,37%	-65,16%
Saída do concentrado	-10,347	118	-0,088	5260,00	-461,231	-54425,220	-94,03%	-34,49%
Água residuária	-0,104	188	-0,001	14459,52	-7,999	-1503,790	-2,60%	-0,35%
Balanço: $\Sigma V$	0						0,00%	0,00%



Tabela A.5 – Balanço de massa na ED para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 2

Eletrodiálise - SDT 2000 mg/L - Ensaio 2								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	106	0,189	1921,00	362,453	38420,000	66,66%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	106	0,094	1922,00	181,321	19220,000	33,34%	33,33%
Saída do diluído	-19,674	106	-0,186	99,80	-18,523	-1963,465	-3,41%	-65,58%
Saída do concentrado	-10,210	106	-0,096	5350,00	-515,316	-54623,500	-94,77%	-34,03%
Água residuária	-0,116	106	-0,001	9077,89	-9,934	-1053,035	-1,83%	-0,39%
Balanço: ΣV	0						0,00%	0,00%

Tabela A.6 – Balanço de massa na ED para SDT 2000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 3

Eletrodiálise - SDT 2000 mg/L - Ensaio 3								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	104	0,192	1845,00	354,808	36900,000	66,92%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	104	0,096	1824,00	175,385	18240,000	33,08%	33,33%
Saída do diluído	-19,601	104	-0,188	98,10	-18,489	-1922,858	-3,49%	-65,34%
Saída do concentrado	-10,397	104	-0,100	5010,00	-500,855	-52088,970	-94,47%	-34,66%
Água residuária	-0,002	104	0,000	564086,00	-10,848	-1128,172	-2,05%	-0,01%
Balanço: ΣV	0						0,00%	0,00%

Tabela A.7 – Balanço de massa na ED para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 1

Eletrodiálise - SDT 3000 mg/L - Ensaio 1								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	154	0,130	3030,00	393,506	60600,000	66,89%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	154	0,065	3000,00	194,805	30000,000	33,11%	33,33%
Saída do diluído	-19,267	154	-0,125	98,00	-12,261	-1888,166	-2,08%	-64,22%
Saída do concentrado	-10,673	154	-0,069	8030,00	-556,521	-85704,190	-94,60%	-35,58%
Água residuária	-0,060	154	0,000	50127,40	-19,530	-3007,644	-3,32%	-0,20%
Balanço: ΣV	0						0,00%	0,00%

Tabela A.8 – Balanço de massa na ED para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 2

Eletrodiálise - SDT 3000 mg/L - Ensaio 2								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	123	0,163	3020,00	491,057	60400,000	66,74%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	123	0,081	3010,00	244,715	30100,000	33,26%	33,33%
Saída do diluído	-19,179	123	-0,156	98,00	-15,281	-1879,542	-2,08%	-63,93%
Saída do concentrado	-10,737	123	-0,087	7980,00	-696,596	-85681,260	-94,68%	-35,79%
Água residuária	-0,084	123	-0,001	34990,45	-23,896	-2939,198	-3,25%	-0,28%
Balanço: $\Sigma V$	0						0,00%	0,00%

Tabela A.9 – Balanço de massa na ED para SDT 3000 mg.L<sup>-1</sup> – Ensaio 3

Eletrodiálise - SDT 3000 mg/L - Ensaio 3								
	Volume medido (L)	Tempo (min)	Vazão (L/min)	SDT (mg/L)	Decarga de massa (mg/min)	Massa total (mg)	%Massa total	%Volume
Entrada no diluído	20,000	135	0,148	2970,00	440,000	59400,000	66,82%	66,67%
Entrada no concentrado	10,000	135	0,074	2950,00	218,519	29500,000	33,18%	33,33%
Saída do diluído	-18,830	135	-0,139	99,20	-13,837	-1867,936	-2,10%	-62,77%
Saída do concentrado	-10,933	135	-0,081	7810,00	-632,494	-85386,730	-96,05%	-36,44%
Água residuária	-0,237	135	-0,002	6942,34	-12,188	-1645,334	-1,85%	-0,79%
Balanço: $\Sigma V$	0						0,00%	0,00%

## APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA

### 1. DELINEAMENTO INTEIRAMENTE CAUSALIZADO PARA DESCARGA MÁSSICA

#### 1.1 Dados dos experimentos:

Tabela B.1 – Descarga mássica do concentrado na ED

	Concentração (mg/min)		
	C1	C2	C3
Ensaio 1	271.331	461.244	556.495
Ensaio 2	311.154	515.296	696.576
Ensaio 3	299.424	500.846	632.5

#### 1.2 Nível de significância

$$\alpha = 1\%$$

#### 1.3 Hipóteses:

H<sub>0</sub>: C1= C2 = C3. A descarga mássica é igual para as diferentes concentrações;

H<sub>1</sub>: Pelo menos uma das descargas mássicas difere das demais.

#### 1.4 Teste de normalidade dos dados:

shapiro.test(Desc\$C1): p-value=0,5551

shapiro.test(Desc\$C2): p-value=0,4987

shapiro.test(Desc\$C3): p-value=0,9062

Os dados de resíduo seguem distribuição normal, pois p-value maior que  $\alpha$ .

#### 1.5 Análise de variância

anova\_Desc=aov(Dados~Trat,Desc\_AOV)

summary(anova\_Desc): p-value=0,000304

Tem significância a 0,001, pelo menos uma das descargas mássicas diferem entre si.

#### 1.6 Normalidade dos dados de resíduo

shapiro.test(residuo): p-value= 0,7806

Os dados de resíduo seguem distribuição normal, pois p-value maior que  $\alpha$ .

#### 1.7 Homogeneidade de variâncias

bartlett.test(Dados~Trat,Desc\_AOV): p-value=0,257

As variâncias não diferem entre si, pois p-value maior que  $\alpha$ .

### 1.8 Análise de dados: 2 a 2.

TukeyHSD(anova\_Desc,conf.level = 0.99)

Interações: C2-C1 – p-value = 0,0040733

C3-C1 – p-value = 0,0002474

C2-C3 – p-value = 0,0238007

## 2. DELINEAMENTO INTEIRAMENTE CAUSALIZADO PARA REMOÇÃO DE SDT

### 2.1 Dados dos experimentos:

Tabela B.2 – Remoção de SDT na ED

	Remoção de SDT (%)		
	C1	C2	C3
Ensaio 1	85.51	84.23	76.86
Ensaio 2	89.46	88.78	86.79
Ensaio 3	87.29	89.07	84.48

### 2.2 Nível de significância

$\alpha = 1\%$

### 2.3 Hipóteses:

$H_0$ : C1 = C2 = C3. A descarga mássica é igual para as diferentes concentrações;

$H_1$ : Pelo menos uma das descargas mássicas difere das demais.

### 2.4 Teste de normalidade dos dados:

shapiro.test(Rem\$C1): p-value=0,8912

shapiro.test(Rem\$C2): p-value=0,1021

shapiro.test(Rem\$C3): p-value=0,4281

Os dados de resíduo seguem distribuição normal, pois p-value maior que  $\alpha$ .

### 2.5 Análise de variância

anova\_Rem=aov(Dados~Trat,Rem\_AOV)

summary(anova\_Rem): p-value=0,257

Hipótese nula aceita.

## 2.6 Normalidade dos dados de resíduo

`shapiro.test(residuo)`: p-value= 0,4563

Os dados de resíduo seguem distribuição normal, pois p-value maior que  $\alpha$ .

## 2.7 Homogeneidade de variâncias

`bartlett.test(Dados~Trat,Rem_AOV)`: p-value=0,4479

As variâncias não diferem entre si, pois p-value maior que  $\alpha$ .