

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Maira Geane Birgeier Brenner

**ESCALONAMENTO DA UNIDADE PILOTO DE  
ELETROCOAGULAÇÃO-FLOTAÇÃO PARA SUA VIABILIDADE  
COMERCIAL COMO UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA  
COMPACTA**

Santa Maria, RS  
2023

**Maira Geane Birgeier Brenner**

**ESCALONAMENTO DA UNIDADE PILOTO DE ELETROCOAGULAÇÃO-  
FLOTAÇÃO PARA SUA VIABILIDADE COMERCIAL COMO UMA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA COMPACTA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Elvis Carissimi

Santa Maria, RS  
2023

**Maira Geane Birgeier Brenner**

**ESCALONAMENTO DA UNIDADE PILOTO DE ELETROCOAGULAÇÃO-  
FLOTAÇÃO PARA SUA VIABILIDADE COMERCIAL COMO UMA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA COMPACTA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

**Aprovado em 22 de julho de 2023:**

---

**Elvis Carissimi, Dr. (UFSM)**  
(Orientador)

---

**Leandro Conceição Pinto, Dr. (UFSM)**

---

**Gustavo Holz Bracher, Dr. (Saniente/Prefeitura de Porto Belo/SC)**

Santa Maria, RS  
2023

*Aos meus pais, Mara e Gean, pelo amor incondicional, incentivo e carinho, dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço imensamente aos meus pais, Mara e Gean, por todo suporte e importância dada a minha educação. Vocês sempre serão a minha fonte de alegria, aconchego e motivação. Agradeço também à minha irmã Marina, ao meu vô Adenir e minha tia Carla, por estarem sempre presentes, mesmo à distância, me apoiando fortemente.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UFSM, pelos ensinamentos transmitidos durante a graduação, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Elvis Carissimi, por ter me apresentado ao tema desse estudo, pelo suporte e apoio no desenvolvimento do mesmo.

Aos amigos que fiz durante a graduação, Junior, Eduardo, Amanda, Jéssica e Leonardo, que me acompanharam por toda essa jornada acadêmica. O dia a dia com a presença de vocês tornou tudo mais leve.

Ao Bruno, pela paciência em me instruir na escrita, pelo companheirismo e incentivo. Teu apoio foi essencial nesta etapa.

Ao grupo do Departamento de Obras da CORSAN e aos colegas do Apoio, os quais tive o privilégio de conhecer e passar esse período final da minha graduação, agradeço por terem despertado em mim esse carinho pela área do saneamento.

Aos colegas e parceiros de trabalho da Sustembio, pela oportunidade de me desenvolver profissionalmente junto a vocês.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, que me proporcionou um estudo de excelência e a chance de conhecer pessoas incríveis durante toda essa trajetória.

Sou eternamente grata!

## RESUMO

### ESCALONAMENTO DA UNIDADE PILOTO DE ELETROCOAGULAÇÃO-FLOTAÇÃO PARA SUA VIABILIDADE COMERCIAL COMO UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMPACTA

AUTOR: Maira Geane Birgeier Brenner

ORIENTADOR: Elvis Carissimi

A necessidade de água potável e acessível é um dos maiores problemas enfrentados mundialmente. Nas grandes cidades, o tratamento da água é realizado por estações de tratamento de água convencionais, comumente utilizadas, mas que são restritas por necessitarem de uma ampla área para instalação e uma grande demanda de abastecimento. Novas tecnologias vêm sendo estudadas para desenvolvimento de sistemas (ETA's compactas) fáceis de instalar e operar, compactos e que possuem grande viabilidade em atender locais de difícil acesso e/ou distantes de grandes centros. Como objetivo principal desse trabalho, tem-se o escalonamento de uma tecnologia inovadora desenvolvida na UFSM e que vem sendo estudada: o sistema de eletrocoagulação-flotação (ECF). Para ampliação do sistema em escala comercial, foi realizado seu dimensionamento para uma vazão de  $11,88 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  e uma posterior comparação em relação à área e altura ocupada do sistema escalonado com uma ETA compacta de coagulação-sedimentação, projetada para a mesma vazão do sistema ECF, instalada na cidade de Garibaldi/RS. Para o escalonamento, foram realizados estudos prévios e uma revisão de literatura para compreender todos os parâmetros que englobam o sistema e sua funcionalidade. O sistema ECF final é composto por 4 linhas, onde cada uma atende a uma vazão de  $2,98 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , possuindo um eletrocoagulador seguido de dois módulos de um floculador tubular helicoidal. A comparação dos sistemas citados mostrou que o sistema ECF utiliza uma área 16,36% menor do que a ETA compacta coagulação-sedimentação, e uma altura 8,95% menor, ocupando um volume 23,85% menor se comparado ao volume total da ETA.

**Palavras-chave:** Tratamento de água. Escalonamento. Eletrocoagulação-flotação.

## ABSTRACT

### SCALING UP THE ELECTROCOAGULATION-FLOTATION PILOT UNIT FOR COMMERCIAL VIABILITY AS A COMPACT WATER TREATMENT PLANT

AUTHOR: Maira Geane Birgeier Brenner

ADVISOR: Elvis Carissimi

The need for clean and affordable water is one of the biggest problems faced worldwide. In large cities, water treatment is carried out by conventional water treatment plants, commonly used, but which are restricted by requiring a large area for installation and a large demand for supply. New technologies have been studied for the development of systems (compact WTPs) that are easy to install and operate, compact and have great viability in serving places of difficult access and / or distant from large centers. The main objective of this work is the scaling up of an innovative technology developed at UFES and which has been studied: the electrocoagulation-flotation (ECF) system. To scale up the system to a commercial scale, it was designed for a flow rate of  $11.88 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  and a subsequent comparison was made in relation to the area and height occupied by the scaled system with a compact coagulation-sedimentation WTP, designed for the same flow rate of the ECF system, installed in the city of Garibaldi/RS. For the scaling, previous studies and a literature review were carried out to understand all the parameters that encompass the system and its functionality. The final ECF system consists of 4 lines, where each one serves a flow rate of  $2.98 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , having an electrocoagulator followed by two modules of a helical tubular flocculator. The comparison of the mentioned systems showed that the ECF system uses an area 16.36% smaller than the compact coagulation-sedimentation WTP, and a height 8.95% smaller, occupying a volume 23.85% smaller compared to the total volume of the WTP.

**Keywords:** Water treatment. Scaling. Electrocoagulation-flotation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interações existentes durante a coagulação eletroquímica. ....	14
Figura 2 - Combinação FTH com flotação por ar dissolvido para a geração de floco aerado. 15	
Figura 3 - Reator ECF batelada em fluxo descontínuo. (a) representação gráfica; (b) real. ....	17
Figura 4 - Reator ECF serpentina em fluxo contínuo. (a) representação gráfica; (b) real. ....	18
Figura 5 - Representação gráfica do sistema ECF em fluxo contínuo. ....	19
Figura 6 - Representação Gráfica do sistema ECF. ....	21
Figura 7 - Unidade Piloto ECF. ....	23
Figura 8 - Cronologia do desenvolvimento da Unidade ECF: 2018 a 2023. ....	24
Figura 9 - Influência da densidade de corrente na quantidade de alumínio eletro-dissolvido para uma mesma densidade de carga elétrica. ....	26
Figura 10 - Características básicas de um FTH (L: comprimento; DTH: diâmetro da tubulação helicoidal; DA: diâmetro anelar; Q: vazão de trabalho. ....	28
Figura 11 - Representação das extremidades do eletrocoagulador, arranjo dos eletrodos: Monopolar em paralelo. ....	32
Figura 12 - Planta baixa: Sistema ECF X ETA coagulação-sedimentação. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições ideais determinadas em experimentos de bancada para a configuração do Sistema ECF. ....	20
Tabela 2 - Síntese das condições de tratamento adotadas para o sistema ECF – MVP. ....	22
Tabela 3 - Opções de diâmetro de tubulação para água disponíveis no mercado, seus respectivos raios de curvatura, comprimento mínimo necessário para atingir um TDH de 6,36 m, quantidade de unidades anelares e altura total dos anéis para um único módulo de FTH. ....	35
Tabela 4 - Síntese da configuração e condições adotadas no sistema ECF.....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS

CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
ECF	Eletrocoagulação-flotação
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por ar-dissolvido
FTH	Floculador Tubular Helicoidal
MVP	Mínimo Produto Viável
TDH	Tempo de detenção hidráulico
pH	Potencial Hidrogeniônico
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
2.1	COMPONENTES DO SISTEMA ECF: REATOR ECF E FTH.....	14
2.2	CONCEPÇÃO DO SISTEMA ECF .....	16
2.2.1	<b>Sistema ECF: Modelo em Escala de bancada</b> .....	<b>16</b>
2.2.2	<b>Sistema ECF: Produto Mínimo Viável</b> .....	<b>20</b>
2.2.3	<b>Histórico da evolução do sistema ECF</b> .....	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
3.1	CONFIGURAÇÃO DO REATOR ECF .....	25
3.1.1	<b>Velocidade de Escoamento</b> .....	<b>25</b>
3.1.2	<b>Densidade de Corrente</b> .....	<b>26</b>
3.1.3	<b>Corrente Elétrica</b> .....	<b>27</b>
3.1.4	<b>Área Ativa e Tempo de Contato</b> .....	<b>27</b>
3.1.5	<b>Tempo de Detenção Hidráulico – Reator ECF e FTH</b> .....	<b>28</b>
3.2	CONFIGURAÇÃO DO FTH.....	28
3.2.1	<b>Parâmetros Geométricos e Vazão</b> .....	<b>28</b>
3.2.2	<b>Gradiente de Velocidade</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>
4.1	ESCALONAMENTO DO SISTEMA ECF .....	31
4.1.1	<b>Eletrocoaguladores</b> .....	<b>31</b>
4.1.2	<b>Floculador Tubular Helicoidal</b> .....	<b>34</b>
4.2	SISTEMA ECF: ANÁLISE COMPARATIVA E MANUAL DE OPERAÇÃO .....	36
4.2.1	<b>Configuração e condições – Sistema ECF</b> .....	<b>36</b>
4.2.2	<b>Análise comparativa: sistema ECF X ETA compacta coagulação-sedimentação</b> ...	<b>38</b>
4.2.3	<b>Manual de operação: informações relevantes</b> .....	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>41</b>
5.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	41
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>43</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e desempenha um papel fundamental em diversos aspectos do nosso cotidiano. O acesso à água potável de maneira mundial deveria ocorrer de forma suficiente, segura, aceitável e fisicamente acessível. A Agenda 2030 da ONU (2015), que tem como objetivo de desenvolvimento sustentável n.º 6 assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, declara que:

Os recursos hídricos, bem como os serviços a eles associados, sustentam os esforços de erradicação da pobreza, de crescimento econômico e da sustentabilidade ambiental. O acesso à água e ao saneamento importa para todos os aspectos da dignidade humana: da segurança alimentar e energética à saúde humana e ambiental.

Segundo a “Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios” realizada pelo IBGE (2009), no Brasil, as áreas rurais abrigam aproximadamente 30 milhões de pessoas. De acordo com este estudo, cerca de 2 milhões de indivíduos não possuem acesso à rede geral de abastecimento de água. Num âmbito global, estima-se que uma em cada dez pessoas ainda não possuem acesso à água potável segura. Da população rural, a estimativa de pessoas que são afetadas pela deficiência de acessibilidade à água potável é de oito em cada dez habitantes (UNICEF, 2019). Essa é uma realidade que afeta principalmente às populações excluídas dos centros urbanos, das quais compõem pequenas comunidades rurais que normalmente também carecem de energia elétrica para sustentar uma Estações de Tratamento de Água convencional.

A água apresenta uma capacidade notável de dissolver e incorporar partículas suspensas e impurezas (FUNASA, 2014), as quais necessitam ser removidas para torná-la adequada ao consumo humano, mediante um rigoroso padrão de potabilidade impostos por legislações específicas. As Estações de Tratamento de Água realizam todo esse processo de tratamento para purificação das águas, existindo no Brasil cerca de 7.500 unidades (IBGE, 2010), sendo em sua maioria projetadas de forma convencional com ciclo completo, incluindo as seguintes etapas: i) unidades de pré-tratamento (coagulação, floculação e decantação ou flotação); ii) filtração rápida; e iii) desinfecção e fluoretação.

Apesar de ser amplamente utilizado, o modelo convencional de tratamento da água possui algumas restrições, como a necessidade de um amplo espaço físico, utilização de produtos químicos e sua consequente geração de resíduos, além do consumo de energia elétrica. Para contornar algumas dessas restrições, as ETA's compactas se tornam uma alternativa ideal para aplicação em cidades com pouca área disponível ou também, em comunidades distantes

da zona urbana, utilizando alternativas de energia limpa como painéis solares, podendo ser personalizadas para atender diversos empreendimentos que necessitam de uma grande ou variada demanda de água.

Perante a necessidade da demanda de água tratada em zonas remotas, além da crescente preocupação frente aos impactos ambientais causados pelas tecnologias convencionais utilizadas e a urgência em minimizá-los, novos recursos vêm sendo explorados para a ampliação do sistema de saneamento. O sistema de Eletrocoagulação-flotação (ECF) descrito e dimensionado neste trabalho é uma tecnologia recente que vem sendo estudada para aplicação na área de saneamento, apresentando relevância no tratamento de efluentes graças à utilização de processos eletroquímicos, tendo aspectos positivos de operação, custo, vantagens quanto à sua utilização em áreas relativamente pequenas e a não adição de produtos químicos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi o escalonamento do sistema de eletrocoagulação-flotação (sistema ECF), visando alcançar aplicação em escala comercial.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Revisão de estudos prévios de concepção e desenvolvimento do reator ECF e do FTH visando compreender as características hidrodinâmicas;
- O dimensionamento do sistema de eletrocoagulação-flotação através do escalonamento do reator ECF e do FTH para atender a uma vazão mínima de  $10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- Comparação da área utilizada entre o sistema ECF escalonado e uma ETA compacta (coagulação-sedimentação) instalada na cidade de Garibaldi - RS.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

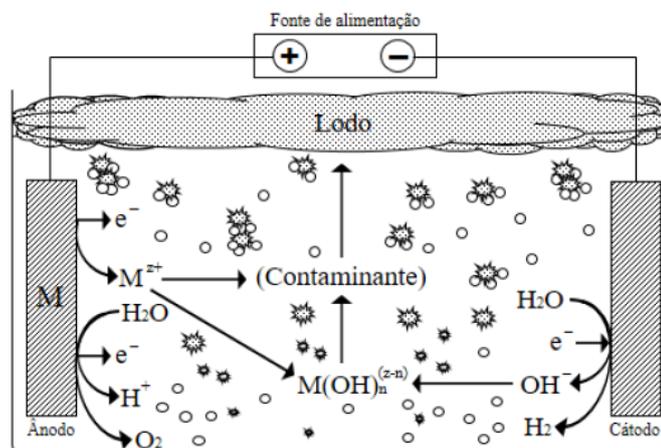
### 2.1 COMPONENTES DO SISTEMA ECF: REATOR ECF E FTH

O sistema ECF é uma tecnologia que se apresenta como uma alternativa atraente à ser aplicado no tratamento da água, por possuir um método diferenciado comparado à coagulação química convencional comumente utilizada nas estações de tratamento. O sistema chama atenção por sua multifuncionalidade, tendo em vista que o processo gera coagulantes *in situ* com uma grande eficiência de remoção de poluentes, descartando o transporte, armazenamento e a adição de suprimentos químicos.

Outros fatores que se destacam no sistema ECF são a sua adequação ambiental, “[...] simplicidade de equipamento, facilidade de operação, menor tempo de retenção, rápida sedimentação dos flocos eletrogerados e menor produção de lodo” (MENESES, 2012), além da sua capacidade de aplicação em diversos tipos de efluentes, dentre os quais se destacam: indústrias têxteis, esgotos sanitários, siderúrgicas, além de facilitar a remoção de íon fluoreto, de boro e de óleos (CERQUEIRA et al., 2011).

O sistema ECF é composto por reatores de ECF combinados com um FTH. O processo eletroquímico (Figura 1) existente nos reatores ocorre quando eletrodos de ferro e/ou alumínio são submetidos a uma corrente elétrica em uma solução aquosa (CERQUEIRA et al., 2011). A interação dos eletrodos gerada pela descarga do cátodo na solução causa um efeito de coagulação, anulando as cargas negativas das partículas dispersas na água e potencializando a reação do processo, juntamente com a formação de bolhas e a consequente flotação dos flocos formados (TAUCHERT, 2012).

Figura 1 - Interações existentes durante a coagulação eletroquímica.



Fonte: Bracher et al. (2018).

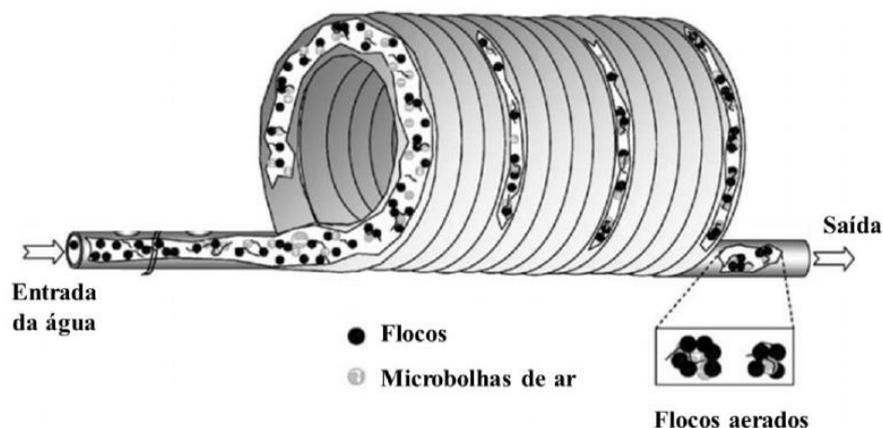
A redução eletroquímica da água no cátodo propicia uma leve turbulência no sistema através da produção das microbolhas de hidrogênio, ocasionando na ligação entre as partículas poluentes e o coagulante gerado, por adsorção (ELAZZOUZI et al., 2017) e auxiliando na separação sólido-líquido através da flotação.

O Floculador Tubular Helicoidal (FTH) é uma tecnologia compacta de floculação que aproveita a energia cinética do fluxo hidráulico para promover agitação suficiente do meio líquido para dispersão do coagulante, interação entre as partículas e geração dos flocos formados (CARISSIMI, 2003), além de servir como um agregador floco-bolha, formando um floco aerado.

As características hidrodinâmicas do FTH influenciam diretamente na eficiência da floculação. A geometria da unidade de agregação e a intensidade em que as partículas se misturam podem causar a formação de flocos maiores ou a desintegração dos mesmos (CARISSIMI e RUBIO, 2015). Para controle desse processo, alguns parâmetros são importantes: gradiente de velocidade ( $g$ ), que define o grau de agitação no FTH; o número de Reynolds ( $Re$ ), que determina o regime de escoamento; e o número de Camp ( $Ca$ ), que indica a probabilidade de contato entre as partículas no FTH.

Estudos realizados mostraram que a utilização do FTH combinado a um processo de flotação por ar dissolvido (FAD) auxilia na obtenção de uma rápida separação de fases, incorporando as bolhas de ar que se aderem as partículas floculadas existentes no líquido (Figura 2) (CARISSIMI e RUBIO, 2005).

Figura 2 - Combinação FTH com flotação por ar dissolvido para a geração de floco aerado.



Fonte: Carissimi e Rubio (2005).

Através da combinação do reator ECF com o FTH, a eficiência do tratamento do efluente é aumentada, juntamente com a redução da formação de produtos excessivos no processo da eletrocoagulação.

## 2.2 CONCEPÇÃO DO SISTEMA ECF

A concepção do sistema ECF adotado nesse estudo foi desenvolvida através de pesquisas e experiências anteriores com várias configurações de reatores de eletrocoagulação-flotação. A partir de estudos iniciais que demonstravam a eficácia da técnica para a utilização do processo de coagulação, flotação e floculação de forma síncrona, começou a ser explorado o processo de ECF em apenas uma única etapa, contendo um único reator (CARISSIMI et al., 2017; BRACHER et al., 2018; GRAEPIN et al., 2019; GRAEPIN et al., 2020; BRACHER et al., 2021; BRACHER et al., 2022). Contudo, reatores desenvolvidos com base nesse estudo se mostraram pouco eficientes em relação à grande demanda de corrente elétrica, elevado consumo de alumínio, e conseqüentemente elevadas concentrações de alumínio residual após o tratamento utilizando essa configuração, comparando com processos de tratamento já existentes.

Com o intuito de encontrar uma forma mais eficiente de utilizar o alumínio liberado na técnica ECF, foi explorado por Bracher (2022) e Graepin (2020) a utilização do processo de eletrocoagulação e separação de fases de forma individual, realizando experiências com o sistema em modo contínuo e em bateladas, empregando uma configuração de reator ECF acompanhado de um FTH (BRACHER, GRAEPIN e CARISSIMI, 2022).

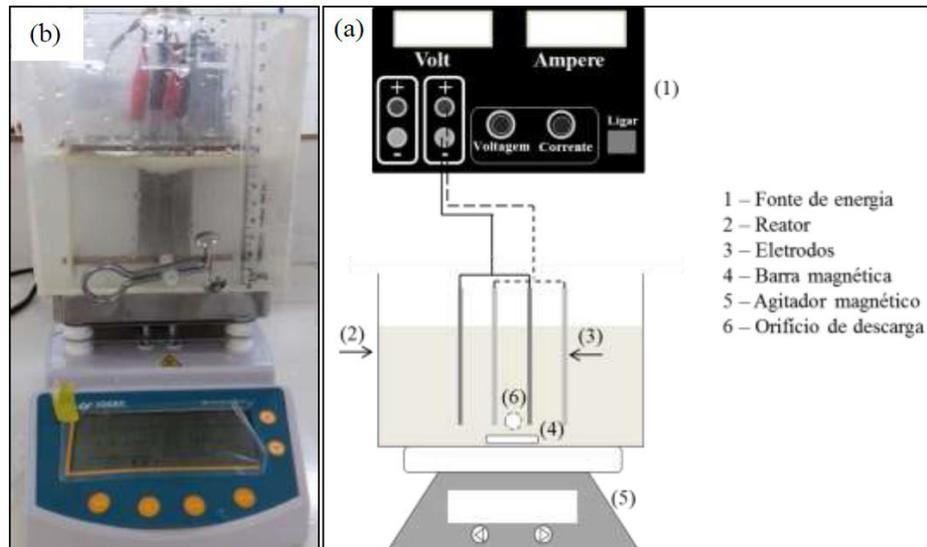
### 2.2.1 Sistema ECF: Modelo em Escala de bancada

Antes de chegar no modelo de sistema ECF descrito neste trabalho, inicialmente o mesmo foi desenvolvido e estudado por Graepin et al. (2020) utilizando um protótipo em escala de bancada. Os modelos estudados eram compostos por um reator ECF e um sistema serpentino, moldados e estudados a partir de duas etapas: Etapa I – Estudos preliminares de ECF em fluxo descontínuo; Etapa II - Estudos preliminares de ECF em fluxo contínuo. A etapa final após os estudos foi o desenvolvimento de um sistema ECF em fluxo contínuo e o escalonamento desse sistema.

A Etapa I foi utilizada para avaliar os efeitos das variáveis que influenciam na ECF e determinar a configuração operacional ideal para o reator de fluxo descontínuo. Para realizar o

estudo, foi utilizado um reator ECF através de bateladas, composto por um recipiente cúbico de acrílico, com volume de 1,5 L por batelada (Figura 3).

Figura 3 - Reator ECF batelada em fluxo descontínuo. (a) representação gráfica; (b) real.



Fonte: Graepin (2020).

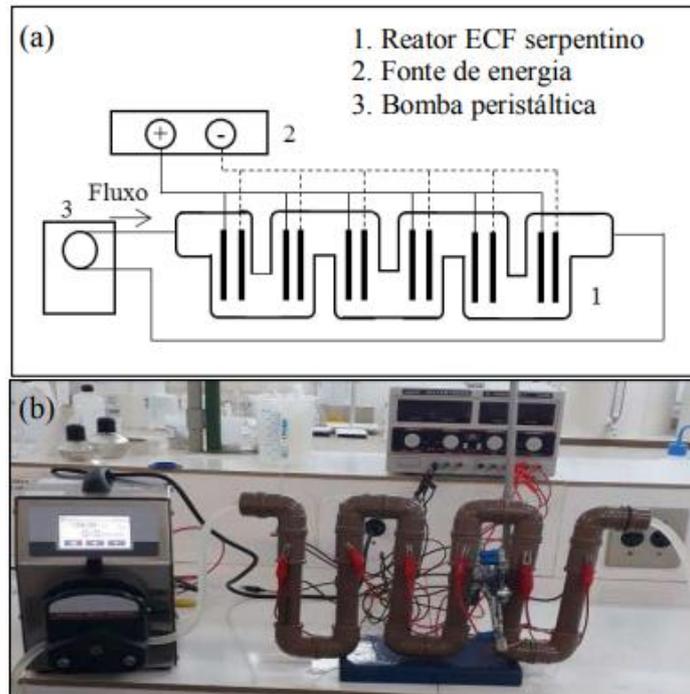
Para os eletrodos de alumínio alocados na posição vertical (dimensão de 6,0 cm (altura) x 10,5 cm (largura) x 0,05 cm (espessura)), com área efetiva de 63 cm<sup>2</sup>, a configuração inicial adotada foi a monopolar em paralelo. Neste arranjo, os ânodos e cátodos são conectados em paralelo alternadamente no mesmo potencial anódico/catódico. A diferença de potencial é distribuída igualmente entre todos os eletrodos, tendo-se para a corrente elétrica total do sistema, a soma das individualidades que percorrem cada par de eletrodos (KOBYA; BAYRAMOGLU; EYVAZ, 2007; HAKIZIMANA et al., 2017). A configuração monopolar em paralelo pode ser considerada mais atrativa por consumir menos energia que os arranjos em série, além de um baixo desgaste de eletrodos e baixa produção de lodo (KOBYA et al., 2011).

Os experimentos realizados por Graepin (2020), utilizaram uma agitação de 280 rpm, com 4 eletrodos de alumínio e distância de 1 cm entre cada um, condições determinadas e baseadas nas melhores eficiências de tratamento. As variáveis estudadas foram: pH inicial, corrente elétrica, tempo de eletrólise, a agitação, a distância entre os eletrodos e o número de eletrodos.

Para a etapa II foi desenvolvido um sistema ECF serpentino de fluxo contínuo (Figura 4) composto de dois eletrodos de alumínio em cada módulo, distanciados em 0,3 cm, tendo um total de 6 módulos. Essa configuração foi instalada em uma tubulação em formato serpentino

de diâmetro de 26 mm. As variáveis estudadas sobre a eficiência do tratamento de água em um reator foram: vazão, altura dos módulos e densidade de corrente elétrica.

Figura 4 - Reator ECF serpentino em fluxo contínuo. (a) representação gráfica; (b) real.



Fonte: Graepin (2020).

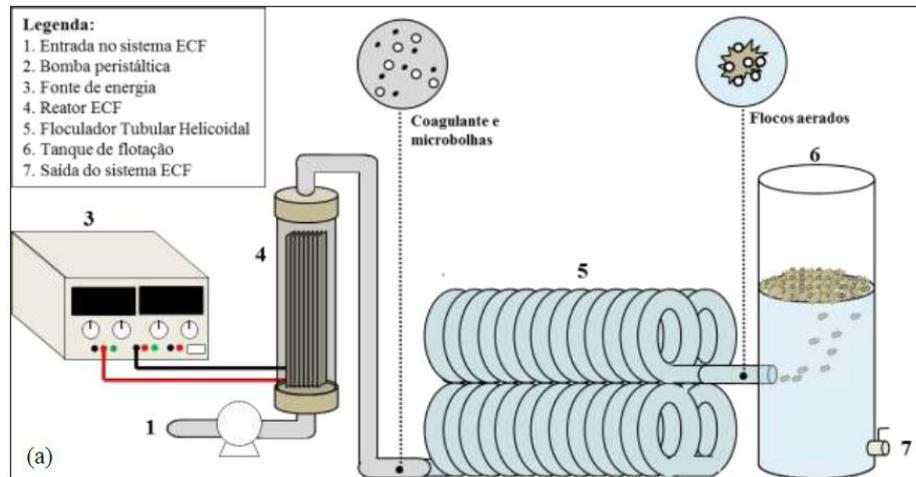
Utilizando essa combinação em formato serpentino, Graepin (2020) observou que menores alturas para os módulos acabam tendo um efeito significativo na remoção de cor, turbidez e coliformes totais. Isso aconteceu devido a uma maior agitação na água causada pela menor altura dos módulos, ocasionando na colisão entre as partículas e o coagulante, favorecendo a formação de flocos (IFILL e ETSELL, 2011) e facilitando na remoção da turbidez.

No estudo seguinte, a autora explorou uma configuração mais próxima da configuração utilizada neste trabalho. Os experimentos foram conduzidos em um reator ECF combinado a um FTH, mantendo o fluxo contínuo (Figura 5). O diferencial dessa configuração em comparação com outros sistemas apresentados na literatura está na combinação do eletrocoagulador seguido de um floculador tubular helicoidal, possibilitando a utilização mais eficiente dos coagulantes e microbolhas gerados in situ para formação de flocos aerados flotáveis.

O reator estudado foi confeccionado com diâmetro de 3,6 cm e altura de 35,5 cm. No seu interior, foi instalado 8 unidades de eletrodos de alumínio conectados em uma fonte de

energia, mantendo a configuração monopolar em paralelo, com distância entre 0,3 cm e densidade de corrente de  $1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

Figura 5 - Representação gráfica do sistema ECF em fluxo contínuo.



Fonte: Graepin (2020).

A tubulação utilizada para compor o FTH possui diâmetro de 9 mm e diâmetro anelar de 60 mm, visto que, de acordo com a autora, diâmetros anelares menores causaram deformação da tubulação do FTH. A separação das fases foi feita em um tanque de flotação, através de bateladas durante um período de 15 minutos, tempo estimado para que ocorresse a flotação dos flocos formados.

Nesse experimento foram avaliados: diferentes comprimentos para o FTH, diferentes vazões, densidade de corrente, distância entre os eletrodos, pH inicial e concentração de alumínio, baseando-se em testes preliminares e delineamento experimental.

Através dos testes realizados por Graepin (2020) foi verificado que maiores comprimentos de tubulação e vazão próxima de 0,8 L/min no FTH, favoreceram para a obtenção de menores valores de cor aparente, turbidez e coliformes totais na água tratada. Esse aumento do comprimento provocou um maior tempo de contato entre o coagulante com as partículas em suspensão, aumentando a probabilidade de formação de coágulos.

Com base nos experimentos realizados pela autora, a configuração final do sistema ECF foi definida conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Condições ideais determinadas em experimentos de bancada para a configuração do Sistema ECF.

<b>Configuração do sistema ECF</b>	
Componentes do sistema ECF	Reator ECF + FTH
<b>Condições Operacionais do eletrocoagulador</b>	
Fluxo	Ascendente
Material dos eletrodos	Alumínio
Conexão dos eletrodos	Monopolar em paralelo
Densidade de corrente	1 mA. cm <sup>-2</sup>
Distância dos eletrodos	0,3 cm
Velocidade do fluxo	≥ 0,01 m/s
TDH	≥ 27,3 s
Tempo de contato com os eletrodos	≥ 21,2 s
<b>Condições Operacionais do FTH</b>	
Orientação	Horizontal
TDH	≥ 2,3 min
Gradiente de velocidade	≤ 350 s <sup>-1</sup>

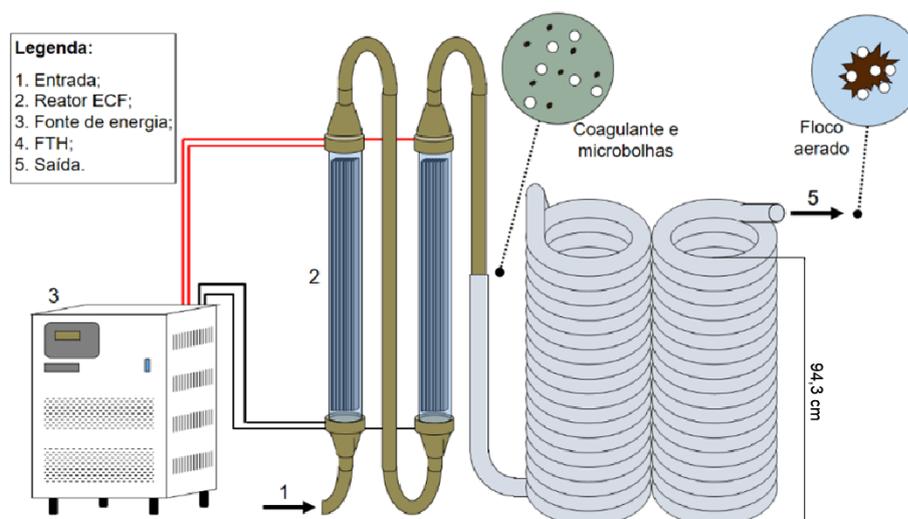
Fonte: Adaptado de Graepin (2020).

### 2.2.2 Sistema ECF: Produto Mínimo Viável

O primeiro MVP (mínimo produto viável) do sistema ECF foi desenvolvido em estudos para a defesa de tese de doutorado de Bracher (2022) em parceria com a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). O sistema foi desenvolvido a partir da necessidade da Companhia por uma unidade de tratamento modular que pode ser aplicado em cidades com alta população flutuante e em locais de difícil acesso.

O sistema construído pelo autor é composto por dois módulos de eletrocoaguladores em série, seguidos por um FTH em posição vertical (Figura 6), sendo projetado para atender a uma vazão de 20 L. min<sup>-1</sup> e tendo como objetivo reproduzir as melhores condições obtidas em estudo de escala de bancada, apresentados na Tabela 1.

Figura 6 - Representação Gráfica do sistema ECF.



Fonte: Adaptado de Bracher (2022).

O reator ECF foi dimensionado com uma largura de 10,4 cm, altura total de 188,6 cm e 20 unidades de eletrodos de alumínio em formato retangular com 6 cm de largura e 7 mm de espessura. Com a intenção de diminuir e facilitar a montagem e limpeza do reator, o mesmo foi dividido em dois módulos conectados em série, com altura de 94,3 cm para cada módulo.

A partir de testes preliminares na conformação vertical, as dimensões adotadas pelo autor para o FTH foram de diâmetro da tubulação helicoidal de 6,35 cm, diâmetro anelar de 30 cm e comprimento total da tubulação helicoidal de 45 m. A posição horizontal para o FTH utilizada nos experimentos de Graepin (2020) não se mostrou viável para maiores vazões (BRACHER, 2022). A tubulação apresentou pressões de trabalho, perdas de carga e gradientes de velocidade elevados, além do aprisionamento de ar em seu interior e a consequente presença de microbolhas nas curvas superiores da unidade, prejudicando a formação do floco aerado. Apesar da alteração, a nova conformação na vertical adotada pelo autor apresenta vantagens em comparação com a inicialmente adotada: área ocupada 2,4 vezes menor, menor acúmulo de lodo e maior facilidade de limpeza e esvaziamento da unidade de FTH.

Bracher (2022) ressalta que o sistema apresentou maior eficiência se comparado às outras configurações que foram estudadas pelo grupo de pesquisa, podendo ser observado pelos melhores valores na remoção de cor e turbidez utilizando um valor menor para o TDH, se comparado com os estudos realizados por Graepin et al. (2020) e Graepin (2020). Contudo, os valores gastos com os custos operacionais (custo com eletrodos, com energia elétrica e ácido clorídrico para correção de pH) gerados durante o estudo do MVP foram elevados, tendo aproximadamente metade dos custos referente ao consumo de energia. Para reduzir esse

consumo, podem ser utilizadas fontes de energia renováveis, como o emprego de painéis fotovoltaicos para produção de energia in situ.

A configuração final dos parâmetros definida para o sistema ECF – modelo MVP está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Síntese das condições de tratamento adotadas para o sistema ECF – MVP.

<b>Configuração do sistema ECF</b>	
Componentes do sistema ECF	Eletrocoaguladores + FTH
<b>Condições Operacionais dos eletrocoaguladores</b>	
Fluxo	Ascendente
Material dos eletrodos	Alumínio
Conexão dos eletrodos	Monopolar em paralelo
Densidade de corrente	0,43 – 1,28 <sup>a</sup> mA. cm <sup>-2</sup>
Distância dos eletrodos	0,3 cm
Velocidade do fluxo	0,04 m/s
TDH	51 s
Tempo de contato com os eletrodos	43,3 s
<b>Condições Operacionais do FTH</b>	
Orientação	Vertical
Fluxo	Ascendente
TDH	6,36 min
Gradiente de velocidade	71,7 – 182,8 s <sup>-1</sup>
<b>Condições da água a ser tratada</b>	
pH inicial	6,4

<sup>a</sup> Valor mínimo – Valor máximo

Fonte: Adaptado de Bracher (2022).

Através dos estudos realizados pelo grupo de pesquisa e o trabalho de Bracher (2022) com a transformação do sistema em um MVP, pôde ser produzida a primeira unidade compacta ECF de tratamento de água de abastecimento em escala real (Figura 7) com vazão de 30 L. min<sup>-1</sup>, contendo automação da correção do pH e a inclusão dos sistemas de filtração e desinfecção.

Figura 7 - Unidade Piloto ECF.



### 2.2.3 Histórico da evolução do sistema ECF

A unidade de eletrocoagulação-flotação dimensionada neste trabalho possui um caráter totalmente inovador. O sistema foi desenvolvido a partir de uma demanda da CORSAN pela necessidade de uma unidade de tratamento de água portátil e compacta.

Para chegar no sistema utilizado atualmente, estudos foram iniciados no ano de 2018 por uma equipe de estudantes formada na UFSM. A primeira fase da pesquisa foi realizar uma revisão de literatura e aquisição dos materiais necessários para posteriormente executar testes e estudos de efeitos sobre as variáveis que poderiam influenciar nas etapas de tratamento do ECF, determinando as melhores condições para tratamento da água. Através desses experimentos, uma configuração inicial para o sistema foi encontrada (Graepin, 2020).

O sistema ECF piloto foi instalado no ano de 2019 na ETA convencional pertencente à CORSAN, localizada na cidade de Santa Maria. A unidade foi base para criação do primeiro MVP em julho de 2021, que se tornou pesquisa da tese de doutorado de Bracher (2022), sendo monitorado durante 9 meses e obtendo resultados satisfatórios. Além da avaliação do sistema perante o tratamento da água, o impacto ambiental causado pela unidade e os custos operacionais da mesma também entraram em análise, em comparação com o sistema convencional amplamente empregado.

No ano de 2020, graças à originalidade do sistema para tratamento de água, uma *Startup* C&G Soluções Ambientais foi criada, sendo o primeiro passo para alavancar a unidade ECF. Em abril de 2021, um pedido de patente de invenção foi depositado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), relativo à configuração e ao processo de tratamento adotado

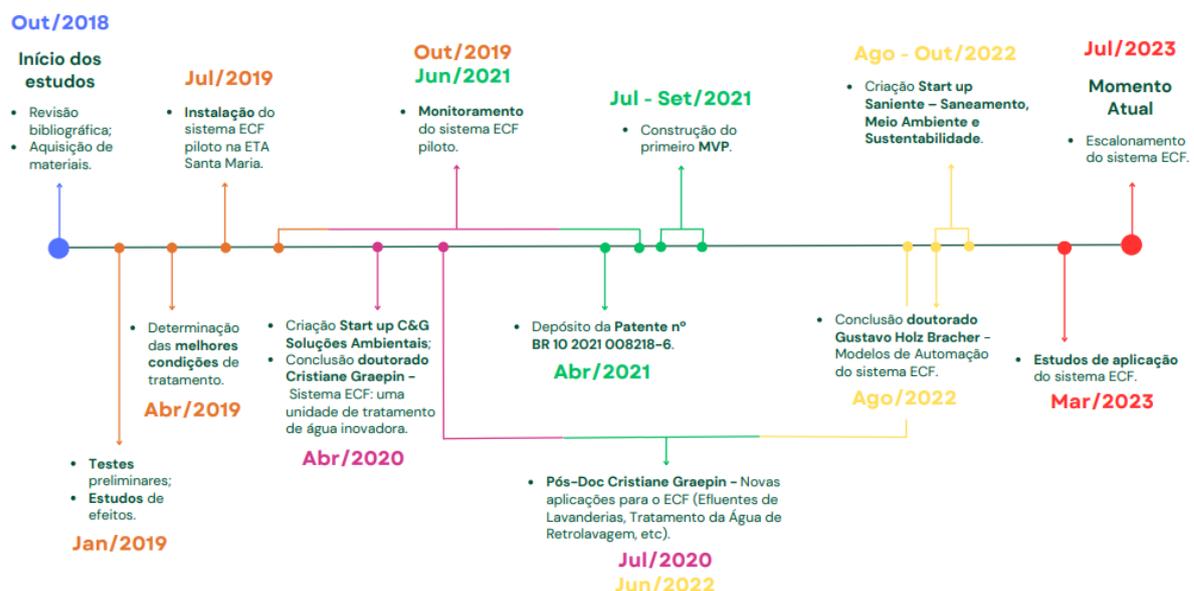
no sistema ECF. Este pedido foi depositado sob o número BR 10 2021 008218-6, com cotitularidade entre UFSM e CORSAN.

Além do tratamento da água, estudos foram realizados entre 2020 e 2022 para aplicação do sistema em outros tipos de tratamento de efluentes, como efluentes de lavanderias, lavagens de automóveis, águas cinzas em geral, no tratamento de efluentes de filtros de ETA's para fins de reuso, dentre outras aplicações. Para essas adaptações, a empresa *Startup Saniente – Saneamento, Meio Ambiente e Sustentabilidade* foi criada em 2022.

No presente momento, o grupo tem como objetivo avançar nas aplicações e desenvolvimento da unidade ECF (Figura 8), tendo como metas futuras o monitoramento do sistema ECF escalonado em uma unidade completa de tratamento e o incremento do sistema através da inserção de microbolhas FAD.

Através do Edital Finep de Comercialização de Propriedade Intelectual (CPI), empresas interessadas no sistema e em suas diversas aplicações podem receber recursos de subvenção econômica para adquirir ou licenciar ativos de Patente de Invenção (PI) com a intenção de testar a sua viabilidade comercial, acompanhando o desenvolvimento do projeto e fornecendo subsídios para a execução das atividades. Esse edital permite que empresas interessadas possam investir no desenvolvimento científico e tecnológico, gerando a possibilidade de introduzir no mercado tecnologias totalmente inovadoras como o sistema ECF, promovendo grandes avanços em diversas áreas.

Figura 8 - Cronologia do desenvolvimento da Unidade ECF: 2018 a 2023.



Fonte: A autora (2023).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As condições adotadas para o escalonamento do sistema ECF seguiram como base as condições experimentais obtidas por Graepin (2020), apresentadas na Tabela 1 e posteriormente, por Bracher (2022), apresentadas na Tabela 2, ao passo que a conformação do sistema foi ajustada a partir dos estudos realizados por Bracher (2022) em seu sistema ECF piloto. A vazão mínima de  $10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  definida para o sistema foi solicitada a partir de uma demanda da CORSAN por uma unidade de tratamento de água compacta capaz de ser aplicada em escala comercial.

No processo de eletrocoagulação, ocorrente no reator, todos os parâmetros de operação são inter-relacionados de alguma forma, não podendo ser considerados de forma isolada. Alguns parâmetros de projeto essenciais para o dimensionamento de um reator de eletrocoagulação, são: a velocidade de fluxo, densidade de corrente, corrente elétrica, tempo de contato (área ativa dos eletrodos com o fluido) e o tempo de detenção hidráulico. O principal foco do reator são as interações entre as espécies presentes e o contato entre elas para que ocorra uma efetiva agregação.

Segundo Di Bernardo e Sabogal Paz (2009), o processo de coagulação-floculação ocorrente no FTH, depende fundamentalmente das dimensões das partículas desestabilizadas e da gradual formação e crescimento dos flocos, sendo influenciado por dois parâmetros principais: o gradiente de velocidade médio (G) e o tempo de floculação ou tempo de detenção hidráulico.

#### 3.1 CONFIGURAÇÃO DO REATOR ECF

##### 3.1.1 Velocidade de Escoamento

A velocidade de escoamento é um parâmetro que influencia diretamente no tempo de reação entre as partículas coloidais, as microbolhas e o coagulante gerado, podendo ser calculada definindo-se a vazão de trabalho do sistema e a área do reator que será ocupada pela água. Nos estudos realizados no sistema em escala de bancada (GRAEPIN, 2020), a velocidade mínima definida para o fluxo foi de  $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , operando o reator no sentido vertical e fluxo ascendente. Utilizando uma velocidade de escoamento maior, as chances de ocorrência de acúmulo de lodo no reator ECF e a passivação dos eletrodos são reduzidas, favorecendo o sistema.

### 3.1.2 Densidade de Corrente

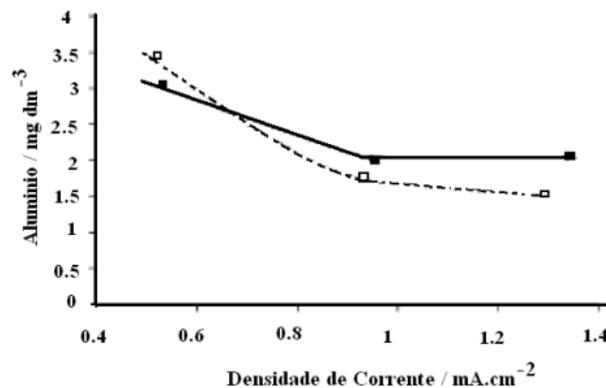
A densidade de corrente ( $J$ ) é um parâmetro que pode ser determinado pela corrente elétrica de operação ( $i$ ) e a área superficial dos eletrodos ( $A_{\text{eletrodos}}$ ) (Equação 1). Na eletrocoagulação, ela determina a taxa de oxidação do ânodo e, conseqüentemente, a quantidade de coagulante gerado e a evolução do gás hidrogênio no cátodo (HOLT et al., 2005).

$$J = \frac{i}{A_{\text{eletrodos}}} \quad (1)$$

No sistema em questão, a utilização de uma alta densidade de corrente resultou em uma significativa diminuição da eficiência do sistema (GRAEPIN, 2020; BRACHER 2022). Dentre alguns motivos estão no excesso da quantidade de bolhas geradas na célula eletrolítica que conduz à coalescência entre as mesmas, aumentando de tamanho e não se aderindo aos contaminantes existentes na solução e o desgaste mais rápido dos eletrodos, consumindo mais energia e acarretando em um aumento desnecessário no custo de operação (MANSOUR et al., 2006).

Outra explicação para a diminuição da eficiência do sistema de remoção de partículas pode ser atribuída à competição entre a dissolução do alumínio e a evolução do oxigênio (CAÑIZARES et al., 2005). Utilizando de baixos valores de densidade de corrente somente irá existir a dissolução do alumínio, enquanto em elevados valores ambos os processos competem, ocasionando na perda de eficiência na geração do alumínio (Figura 9).

Figura 9 - Influência da densidade de corrente na quantidade de alumínio eletro-dissolvido para uma mesma densidade de carga elétrica.



Fonte: Cañizares et al. (2005).

Nos estudos realizados por Bracher (2022), o intervalo encontrado para a densidade de corrente mantendo a eficiência do sistema foi de 0,43 (valor mínimo) – 1,28 (valor máximo) mA. cm<sup>-2</sup>. Para os cálculos, foi preferível manter o valor de 1 mA. cm<sup>-2</sup>, definido por Graepin (2020).

### 3.1.3 Corrente Elétrica

A corrente elétrica (i) pode ser calculada através dos seguintes parâmetros: vazão do sistema, dose de alumínio empregada na solução, massa molar do alumínio, constante Faraday e número de elétrons liberados pelo elemento alumínio (NOX = +3).

O tipo selecionado de corrente elétrica para ser aplicada no tratamento eletroquímico foi a corrente alternada. Apesar de muito utilizada em tratamentos eletroquímicos, a utilização da corrente contínua consome rapidamente o eletrodo, podendo ocasionar em uma camada de passivação sobre o metal. Contudo, isso pode ser superado na adoção da corrente alternada, tendo uma única desvantagem: o aumento do custo energético se comparado à corrente contínua.

Nos estudos realizados por Graepin (2020), a concentração de alumínio liberada também apresentou influência significativa no consumo energético. Desse modo, a concentração do coagulante irá variar dependendo da qualidade da água bruta que será tratada: uma maior concentração de contaminantes suspensos e dissolvidos demandará de uma maior dose de alumínio para o tratamento e, conseqüentemente, de maior corrente elétrica, tensão e consumo de energia elétrica.

### 3.1.4 Área Ativa e Tempo de Contato

Para alcançar uma eficiência adequada no tratamento, determinar a área ativa necessária de contato do efluente com os eletrodos é muito importante, já que esse tempo de contato define a geração de agentes coagulantes e microbolhas e sua conseqüente reação com as partículas coloidais existentes na água.

Após definir a densidade de corrente que será utilizada, a área ativa pode ser calculada encontrando o valor da corrente elétrica e aplicando-o na Equação 1. Tendo-se o valor da área, é calculado o tempo de contato entre o efluente e as placas dos eletrodos. O valor mínimo definido nos experimentos de bancada (GRAEPIN, 2020) para o tempo de contato foi de 23,2 s, enquanto Bracher (2022) encontrou o valor de 43,3 s. Um valor maior para o tempo de contato

e para o TDH acaba promovendo maior eficiência, devido à maior probabilidade de contato entre o coagulante gerado e as partículas coloidais existentes na água.

### 3.1.5 Tempo de Detenção Hidráulico – Reator ECF e FTH

O tempo de detenção hidráulico é um importante parâmetro que define o tempo médio em que o efluente permanece retido no reator e na tubulação, para que as reações aconteçam na unidade de tratamento. A avaliação do TDH ocorre a partir da razão entre o valor do volume do reator ECF ou da tubulação utilizada para o FTH e a vazão do sistema.

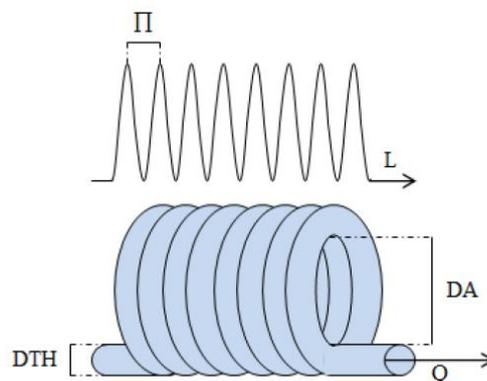
Nos estudos realizados por Bracher (2022), o valor encontrado para esse parâmetro nos estudos do FTH foi de 6,36 min para atender ao Gradiente de Velocidade requerido. Neste presente dimensionamento, o valor do TDH foi mantido com a intenção de se aproximar ao máximo do Gradiente de Velocidade encontrado pelo autor entre 71,7 e 182,8 s<sup>-1</sup>.

## 3.2 CONFIGURAÇÃO DO FTH

### 3.2.1 Parâmetros Geométricos e Vazão

Os parâmetros geométricos que foram adotados para o FTH seguiram a mesma formulação adotada por Oliveira (2014) em seus estudos, sendo o seu dimensionamento dependendo basicamente do diâmetro de enrolamento (diâmetro anelar), do diâmetro do tubo, do seu comprimento e da vazão utilizada. Para controle da formação dos flocos e coágulos, os parâmetros hidráulicos utilizados são o tempo de detenção hidráulico (TDH), o gradiente médio de velocidade (G), o número de Reynolds (Re) e o número de Camp (Ca).

Figura 10 - Características básicas de um FTH (L: comprimento; DTH: diâmetro da tubulação helicoidal; DA: diâmetro anelar; Q: vazão de trabalho).



Fonte: Bracher (2022).

O comprimento da tubulação tem influência no tempo de contato do coagulante gerado no reator com os contaminantes presentes no fluido, fator importante para determinar a eficiência do tratamento. Para o sistema ECF, comprimentos maiores são mais favoráveis na eliminação de impurezas na água, ocasionando em menores valores para os parâmetros de cor aparente, turbidez e coliformes totais.

Além do comprimento, tem-se também a influência da vazão no sistema, atuando na agitação e no choque entre as partículas. De acordo com a intensidade da vazão, pode-se ter um ambiente propício para a formação de flocos e coágulos ou, a capacidade de gerar uma situação contrária de quebra dos mesmos ao se colidirem, formando pequenos flocos difíceis de serem removidos (KHANDEGAR e SAROHA, 2013).

A posição mantida para o dimensionamento do FTH foi a mesma adotada por Bracher (2022), que adotou a conformação vertical do FTH após identificar microbolhas presentes nas curvas superiores da unidade, que prejudicaram na formação de flocos aerados.

### **3.2.2 Gradiente de Velocidade**

O gradiente de velocidade é um dos principais parâmetros de projeto de flocladores, responsável pela colisão ou encontro entre os flocos gerados e as microbolhas, e a consequente aderência permanente entre estas duas fases. Ele é calculado através da taxa de variação da velocidade por unidade de comprimento ao longo de determinada direção, sendo diretamente influenciado pela curvatura da unidade (diâmetro de enrolamento) e pelo tempo de operação/contato.

Para cada sistema, há uma necessidade de estudos para se obter uma melhor eficiência no processo, otimizando tanto o gradiente de velocidade quanto o tempo de operação. Para velocidades e tempos de contato pequenos pode ocorrer a diminuição do tamanho dos flocos formados, dificultando a sedimentação/flotação. Para velocidades e tempos de operação muito elevados, após a formação dos flocos, pode haver a quebra parcial desses, resultando em partículas menores que retardam o processo de sedimentação/flotação (GEWEHR, 2012).

Apesar do grande conjunto de trabalhos publicados sobre FTH's, ainda não se tem uma metodologia concreta para dimensionar o sistema a partir do gradiente de velocidade. Porém, sabe-se que a variação da curvatura, representada pelo diâmetro de enrolamento, afeta consideravelmente na eficiência do processo. Estudos realizados por Oliveira (2022) indicaram que as mudanças obtidas no perfil de velocidade com alteração do diâmetro de enrolamento da unidade promoveram alterações significativas na interação entre as partículas previamente desestabilizadas, variando na eficiência do sistema. As maiores eficiências de remoção de

turbidez foram encontradas através da utilização de um maior diâmetro de enrolamento. Da mesma forma, foram identificados maiores valores para o gradiente de velocidade empregando menores diâmetros de enrolamento, propiciando a quebra dos flocos previamente formados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ESCALONAMENTO DO SISTEMA ECF

#### 4.1.1 Eletrocoaguladores

O sistema ECF piloto utilizado como base nesse trabalho possui uma vazão de  $0,33 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , sendo necessário ampliá-lo em 30 vezes a sua capacidade de vazão até atingir a vazão almejada mínima de  $10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ . Para alcançar esta vazão sem a necessidade de aumentar o eletrocoagulador em um tamanho excessivo, o sistema foi dimensionado tendo um total de quatro reatores de diâmetro interno igual a 312 mm, visando a facilidade no transporte de materiais, montagem do sistema e principalmente sua manutenção. Para os próximos cálculos, a vazão determinada de cada eletrocoagulador equivale a  $2,97 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , totalizando  $11,88 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ . Com o diâmetro fixado, a velocidade de fluxo em cada reator encontrada foi de  $0,04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Equação 2) estando de acordo com a condição exposta para a velocidade de escoamento, onde  $V_e \geq 0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$V_e = \frac{Q}{A_{st} - A_e} \quad (2)$$

sendo:

$V_e$ : Velocidade de escoamento ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

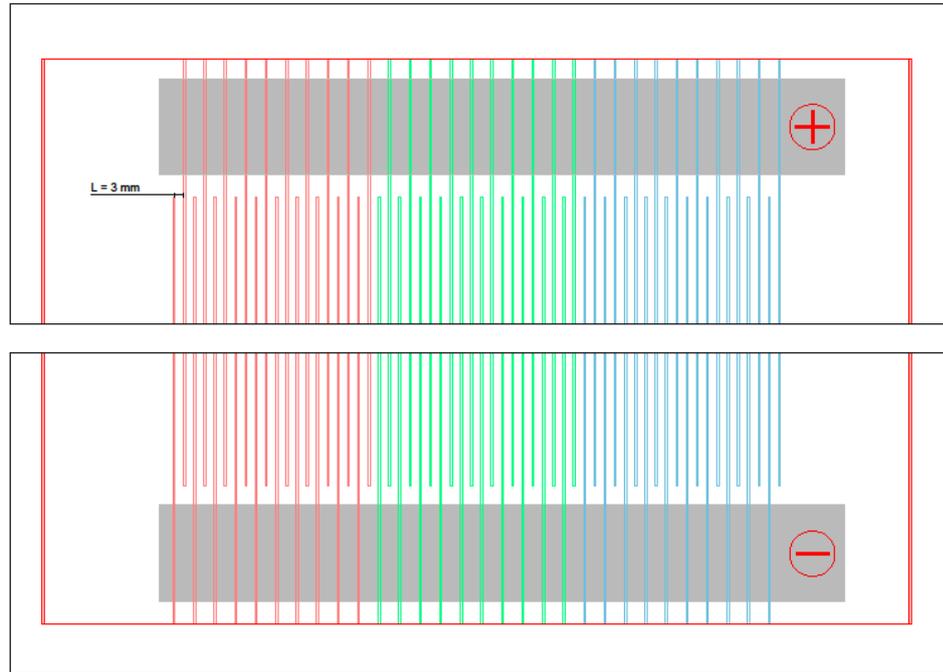
$Q$ : Vazão de trabalho do eletrocoagulador ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$A_{st}$ : Área da secção transversal dos eletrocoaguladores ( $\text{m}^2$ )

$A_e$ : Área da secção transversal dos eletrocoaguladores ocupada por eletrodos ( $\text{m}^2$ )

As placas de eletrodos foram escalonadas mantendo o formato retangular, de acordo com o escolhido para o sistema em bancada e mantido também para o piloto. A largura adotada para as placas foi de 18 cm, tendo um aumento de 3 vezes comparado com a largura de 6 cm dos eletrodos utilizados no sistema piloto. O total de eletrodos calculados para instalação nos eletrocoaguladores foi de 60 eletrodos (30 pares) em cada reator, com 3 mm de distância entre ânodos e cátodos, utilizando a configuração monopolar em paralelo (Figura 11), condição mantida nos estudos anteriores, que mostrou possuir uma elevada remoção de contaminantes e baixo consumo energético (KOBAYASHI et al., 2011).

Figura 11 - Representação das extremidades do eletrocoagulador, arranjo dos eletrodos: Monopolar em paralelo.



Fonte: A autora (2023).

A área ativa dos eletrodos foi dimensionada para atingir a densidade de corrente próxima ou inferior a  $1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , visto em estudos anteriores que o menor consumo de energia e as maiores remoções de constituintes presentes na água foram provocados pelo uso de baixas densidades (GRAEPIN et al., 2020). Para a determinação da corrente máxima (Equação 3), foi definida uma concentração de  $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  de alumínio, resultando em um valor de  $I$  igual a 223,03 A, para a vazão de  $2,97 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  em cada eletrocoagulador.

$$I = \frac{D \cdot Z \cdot F \cdot Q}{M} \quad (3)$$

sendo:

$I$ : Corrente elétrica (A)

$D$ : Concentração de alumínio ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

$Z$ : Número de elétrons liberados na oxidação de alumínio ( $Z = 3$ )

$F$ : Constante de Faraday ( $96.485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

$M$ : Massa molar do alumínio ( $26982 \text{ mg} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

Através do valor da corrente máxima de 223,03 A, se obteve o valor da área ativa mínima de eletrodos, conforme a Equação 4. Com o valor fixado para a largura dos eletrodos e a quantidade de placas que serão instaladas em cada eletrocoagulador, calculou-se a altura necessária para manter a área ativa de 223030 cm<sup>2</sup>, resultando em 210 cm (Equação 5). Com esse resultado, as placas de eletrodos foram fixadas em 220 cm, mantendo o comprimento excedente de 10 cm para estabelecer a conexão interna entre cátodos e anodos.

$$A_{\text{ativa}} = \frac{I}{J} \quad (4)$$

sendo:

I: Corrente elétrica (mA)

A<sub>ativa</sub>: Área ativa dos eletrodos (cm<sup>2</sup>)

J: Densidade de corrente elétrica (mA.cm<sup>-2</sup>)

$$H_{\text{eletrodos}} = \frac{A_{\text{ativa}}}{L_{\text{eletrodos}} \cdot (n_{\text{eletrodos}} - 1)} \quad (5)$$

sendo:

H<sub>eletrodos</sub>: Altura dos eletrodos (cm)

L<sub>eletrodos</sub>: Largura dos eletrodos (cm)

n<sub>eletrodos</sub>: Número de eletrodos

Utilizando o valor encontrado da altura dos eletrodos de 210 cm, o tempo de contato da água com os eletrodos foi calculado (Equação 6), totalizando aproximadamente 49 s, satisfazendo a condição determinada no experimento de bancada com tempo mínimo de contato de 21,2 s.

$$t_{\text{contato}} = \frac{H_{\text{eletrodos}}}{V} \quad (6)$$

sendo:

t<sub>contato</sub>: Tempo de contato entre água e eletrodos (s)

V: Volume total do reator ECF (m.s<sup>-1</sup>)

Para descobrir o tempo de detenção hidráulico, a espessura dos eletrodos utilizada no sistema piloto foi mantida, equivalente a 0,7 mm. Para o cálculo do TDH (Equação 7), calculou-

se o volume de cada eletrocoagulador ( $0,168 \text{ m}^3$ ) e o volume que as 60 unidades de eletrodos ocupam dentro do reator ( $0,016 \text{ m}^3$ ), totalizando em um TDH de  $51,03 \text{ s}$  para cada eletrocoagulador, satisfazendo o tempo mínimo determinado de  $27,3 \text{ s}$ .

$$\text{TDH}_{\text{reatores ECF}} = \frac{V_{\text{eletrocoagulador}} - V_{\text{eletrodos}}}{Q} \quad (7)$$

sendo:

$\text{TDH}_{\text{reatores ECF}}$ : Tempo de detenção hidráulico (min)

$V_{\text{eletrocoagulador}}$ : Volume do eletrocoagulador ( $\text{m}^3$ )

$V_{\text{eletrodos}}$ : Volume ocupado pelos eletrodos ( $\text{m}^3$ )

O Apêndice A, feito através do software AutoCAD, apresenta a configuração dos eletrodos dentro de cada eletrocoagulador juntamente com suas dimensões. Através da divisão do sistema em quatro eletrocoaguladores, a manutenção dos eletrodos de alumínio (limpeza e troca de eletrodos) pode ser feita em partes, mantendo o sistema funcional e contínuo.

#### 4.1.2 Floculador Tubular Helicoidal

O escalonamento do FTH em maior escala foi realizado mantendo o mesmo valor para o TDH mínimo obtido no sistema piloto ECF, equivalente a  $6,36 \text{ min}$ . Como o reator ECF foi dividido em quatro unidades, foi mantida também a sequência para a tubulação do FTH. Essa configuração foi preservada para casos em que seja necessária a realização de manutenção em algum reator ou no FTH, com a intenção de manter o restante do sistema em funcionamento. A tubulação foi mantida em posição vertical, igualmente utilizada por Bracher (2022), mostrando-se ser mais viável em grandes escalas.

Para a escolha do diâmetro da tubulação foi levado em conta a disponibilidade comercial do mesmo. A Tabela 3 apresenta os diâmetros existentes no mercado para tubulação em espiral rígido, que possui indicação de aplicação para serviços médios de sucção e descarga de água e é considerada eficaz para aplicação em águas industriais.

Tabela 3 - Opções de diâmetro de tubulação para água disponíveis no mercado, seus respectivos raios de curvatura, comprimento mínimo necessário para atingir um TDH de 6,36 min, quantidade de unidades anelares e altura total dos anéis para um único módulo de FTH.

<b>Diâmetro da tubulação (cm)</b>	<b>Raio de Curvatura (cm)</b>	<b>Comprimento mínimo (m)</b>	<b>Unidades Anelares (un)</b>	<b>Altura total (m)</b>
5	0,10	577,21	919	46
7,62	0,25	248,52	159	12
10,16	0,40	139,79	56	5,65

Fonte: A autora (2023).

Através dos diâmetros selecionados, foi calculado o comprimento mínimo necessário (Equação 8) para permitir um TDH de no mínimo 6,36 min, considerando a vazão de 2,97 L. s<sup>-1</sup> para cada unidade.

$$L_{\text{mín}} = \frac{\text{TDH}_{\text{mín}} \cdot Q}{\pi \cdot \left(\frac{DT}{2}\right)^2} \quad (8)$$

sendo:

$L_{\text{mín}}$ : Comprimento mínimo da tubulação (m)

$\text{TDH}_{\text{mín}}$ : Tempo de detenção hidráulico mínimo (min)

Q: Vazão (m<sup>3</sup>. min<sup>-1</sup>)

DT: Diâmetro da tubulação (m)

Dentre as opções existentes, a melhor opção de diâmetro adotada foi a de 4" (10,16 cm). Nos experimentos realizados por Graepin (2020) e Bracher (2022), os autores encontraram valores mais altos do que o máximo recomendado para o gradiente de velocidade, ocorrendo a formação de flocos, mas não em dimensões adequadas para uma rápida separação de fases via flotação, sendo necessário modificações nas condições de operação para atingir o gradiente necessário. Dentre essas modificações realizadas, consta a diminuição da vazão de trabalho, o aumento das unidades anelares e modificação da concentração de alumínio aplicada. A fim de atingir um valor para o gradiente de velocidade mais próximo do valor determinado por Bracher (2022), foi preferível aumentar o diâmetro anelar para 80 cm, considerando uma consequente maior perda de carga no FTH.

Para escalonamento do sistema, optou-se então por utilizar aproximadamente 140 m de tubulação com diâmetro interno de 10,16 cm, diâmetro externo de 11,42 cm e diâmetro anelar de 80 cm. Foi preferível dividir o FTH em 2 módulos para cada reator ECF, com 28 unidades anelares para cada módulo, totalizando 8 módulos de FTH (Apêndice B). O TDH encontrado para o comprimento de 140 m foi de 6,37 min para uma vazão de  $2,97 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , atendendo ao valor encontrado por Bracher (2022) para o TDH (Equação 9).

$$\text{TDH}_{\text{FTH}} = \frac{A \cdot L}{Q} \quad (9)$$

sendo:

$\text{TDH}_{\text{FTH}}$ : Tempo de detenção hidráulico mínimo (min)

A: Área da tubulação ( $\text{m}^3$ )

L: Comprimento da tubulação (m)

## 4.2 SISTEMA ECF: ANÁLISE COMPARATIVA E MANUAL DE OPERAÇÃO

### 4.2.1 Configuração e condições – Sistema ECF

A Tabela 4 apresenta uma síntese da configuração e das condições adotadas no sistema ECF para tratamento da água.

O sistema ECF dimensionado possui 4 reatores ECF e 4 unidades de FTH com 2 módulos cada. A título de facilitar a visualização e entendimento do sistema dimensionado, foi elaborada a planta baixa (Apêndice C) e o corte lateral (Apêndice D) com uma possível configuração do sistema, utilizando os resultados obtidos e relatados neste trabalho. Inserindo o sistema em uma ETA compacta completa, inicialmente deve-se ocorrer a alteração do pH da água, que varia de acordo com o contaminante a ser removido. Em seguida, o efluente percorre a tubulação até chegar nos eletrocoaguladores, com uma vazão de  $2,97 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ . Após aproximadamente 49 s de tempo de contato do líquido com os eletrodos de alumínio, seguindo fluxo ascendente, o efluente entra nos floculadores tubulares helicoidais, percorrendo 140 metros de tubulação em um período de 6,37 min para formação de flocos maiores que serão retirados nas etapas seguintes. Finalizando o sistema de ECF, o efluente passará pela etapa de separação de fases e flotação dos flocos gerados, onde o lodo será eliminado e posteriormente, a água clarificada terá correção do seu pH, encerrando o processo.

Tabela 4 - Síntese da configuração e condições adotadas no sistema ECF.

<b>Sistema ECF</b>	
Componentes do Sistema ECF	Eletrocoaguladores + FTH
Vazão total do sistema	11,98 L. s <sup>-1</sup>
<b>Configuração dos Eletrocoaguladores</b>	
Vazão por eletrocoagulador	2,97 L. s <sup>-1</sup>
Diâmetro interno da tubulação	312 mm
Altura da tubulação	2,20 m
Espessura dos eletrodos	0,7 mm
Largura dos eletrodos	180 mm
Distância entre os eletrodos	3 mm
Comprimento útil dos eletrodos	2,10 m
Comprimento excedente dos eletrodos	0,10 m
Total de eletrodos por EC	60 unidades
Unidades Totais de EC	4 unidades
<b>Condições Operacionais dos Eletrocoaguladores</b>	
Fluxo	Ascendente
Material dos eletrodos	Alumínio
Conexão dos eletrodos	Monopolar em paralelo
Densidade de corrente	1 mA. cm <sup>-2</sup>
Velocidade de escoamento	0,04 m. s <sup>-1</sup>
Tempo de contato com os eletrodos	48,71 s
TDH	51 s
<b>Configuração do FTH</b>	
Diâmetro interno da tubulação	101,6 mm
Diâmetro anelar	800 mm
Comprimento	140 m
Módulos por FTH	2 módulos
Total de unidades	4 unidades com 2 módulos
<b>Condições Operacionais do FTH</b>	
Orientação	Vertical
Fluxo	Ascendente
TDH	6,37 min

Fonte: A autora (2023).

#### 4.2.2 Análise comparativa: sistema ECF X ETA compacta coagulação-sedimentação

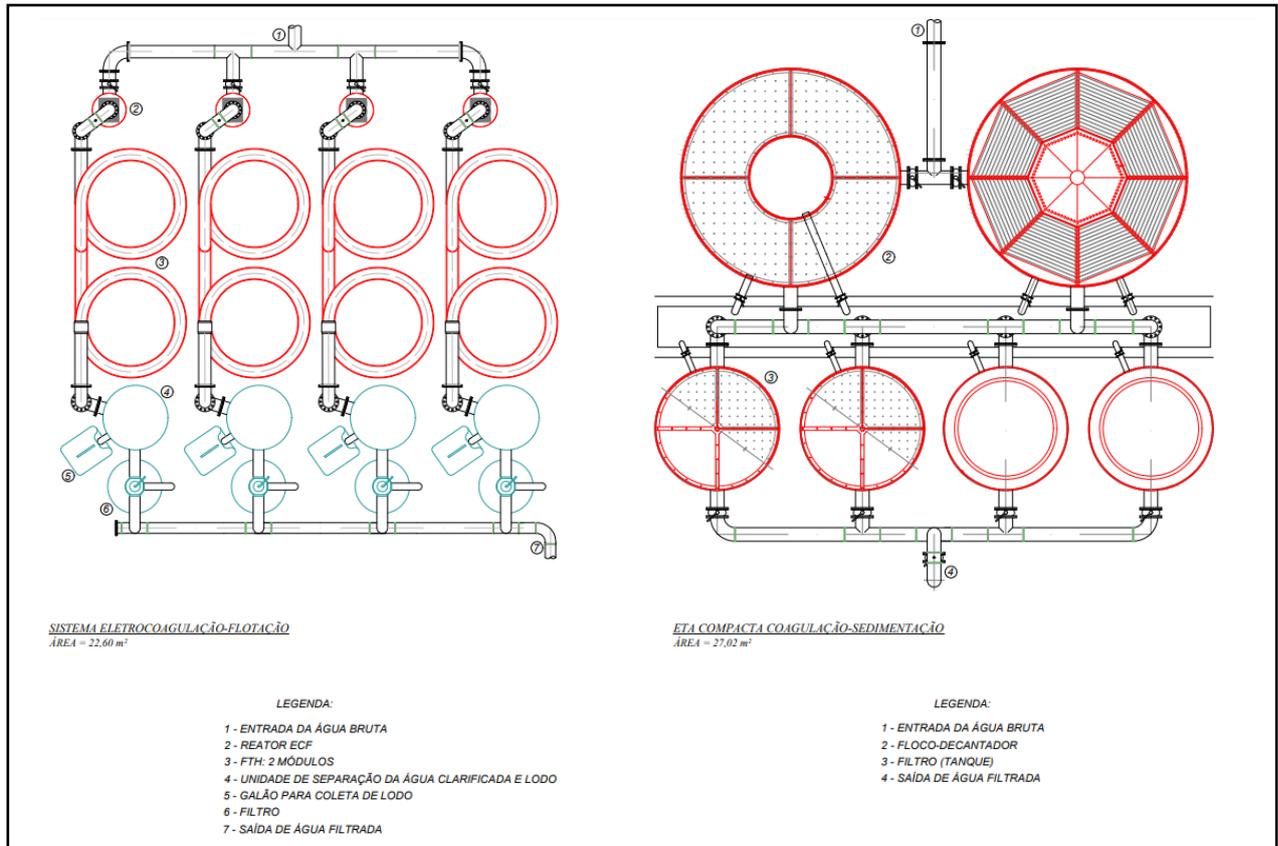
Uma das questões mais relevantes quando se compara dois sistemas compactos distintos é a capacidade de produção por área ocupada. As estações compactas são muito utilizadas em cidades litorâneas turísticas, onde possui restrição de espaço e necessidade de ampliar a produção de água potável nos meses de verão, tendo uma vazão variável durante o ano. Frente a isso, buscou-se realizar uma comparação entre o sistema ECF escalonado e uma ETA compacta instalada na cidade de Garibaldi, no estado do Rio Grande do Sul.

Através do Edital nº. 0185/2020, a CORSAN realizou a proposta de contratação de uma empresa para a ampliação do abastecimento de água do município de Garibaldi, através da execução de uma ETA compacta composta por 2 floco-decantadores e 4 filtros (tanques), com capacidade de vazão para 30 L/s. A estação de tratamento possui dispositivos tipo misturador rápido para aplicação de produtos químicos como coagulante, flúor, produto para auxílio de floculação e alcalinização, dentre outros.

Para uma comparação justa entre a área de ambos os sistemas, foi realizado um dimensionamento da ETA coagulação-sedimentação para atender a mesma vazão do sistema ECF, de  $11,88 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ . Além disso, para se ter o tratamento completo da água como a ETA coagulação-sedimentação apresentada, foi inserido no final de cada linha ECF uma unidade de separação de água e lodo, um galão com capacidade para 50 L para coleta do lodo interligada à unidade de separação e um filtro como última fase de tratamento. Dessa forma, as duas estações puderam ter suas áreas analisadas de maneira equitativa. Traçando um retângulo englobando todas as unidades de tratamento para cada sistema, a ETA coagulação-sedimentação totalizou  $27,02 \text{ m}^2$  de área ocupada, enquanto que a ETA de ECF utilizou  $22,60 \text{ m}^2$ , representando apenas 83,64% da área total da ETA coagulação-sedimentação. A Figura 12 apresenta uma planta baixa dos sistemas analisados e suas composições.

Outra observação importante que deve ser levada em conta é a altura do sistema que será implantado. Com a intenção de aumentar a vida útil do sistema, é necessário que o mesmo seja instalado em um local livre de interferências externas, como a ação do clima e de umidade. Para a ETA compacta de coagulação-sedimentação, tem-se uma altura máxima da unidade de  $3,80 \text{ m}$ . Para o sistema ECF escalonado, a altura máxima é de  $3,46 \text{ m}$ ,  $0,34 \text{ cm}$  abaixo da unidade de coagulação-sedimentação, mostrando ser um sistema mais compacto tanto em relação à área, quanto à altura se comparado à ETA em questão.

Figura 12 - Planta baixa: Sistema ECF X ETA coagulação-sedimentação



Fonte: A autora (2023).

Apesar das comparações apresentadas, é necessária uma análise mais profunda e abrangente sobre os gastos com instalação e manutenção dos sistemas citados, incluindo utilização de produto químico, gastos com energia elétrica, troca e manutenção dos filtros (para a ETA coagulação-sedimentação) e dos eletrodos (para o sistema ECF), além da produção de lodo. Dentre as questões levantadas, cabe salientar que algumas se destacam na utilização do sistema ECF, como: a geração de coagulantes *in situ*, dispensando a necessidade de produção, estoque e transporte de produtos químicos comumente utilizados no processo de coagulação, e a conseqüente geração de uma baixa quantidade de lodo, ocasionando na redução do valor do custo operacional para tratamento e disposição do lodo produzido (MOLLAH et al., 2001; CHEN, 2004).

#### 4.2.3 Manual de operação: informações relevantes

Algumas informações devem ser levadas em conta para uma futura instalação do sistema ECF escalonado:

- I. Nos estudos realizados pelos autores Graepin (2020) e Bracher (2022), uma maior eficiência do tratamento foi encontrada quando se utilizou um pH inicial próximo de 6,4, apresentando menores valores de cor aparente, turbidez e coliformes totais na água tratada. Porém, o desempenho do tratamento dependerá da natureza do poluente, podendo ser necessárias variações no valor inicial do pH.
- II. Apesar de haver muitos trabalhos realizados utilizando modelos do reator ECF, o FTH ainda não possui critérios e metodologias concretas para auxiliar em seu dimensionamento, necessitando de uma demanda por avanços na compreensão da relação entre sua hidrodinâmica e o processo de floculação, embora se mostrar promissor como alternativa à floculação pelos estudos já feitos. Frente a isso, o valor encontrado para o gradiente de velocidade utilizando a configuração determinada neste trabalho pode necessitar de alterações, o que inclui mudança no valor da vazão (diminuindo a mesma para que não ocorra a desestruturação dos flocos previamente formados) e/ou nas unidades anelares.
- III. Devem ser realizados testes no reator ECF para definir o tempo de vida médio dos eletrodos de alumínio, estabelecendo o momento necessário para a limpeza e/ou troca das placas com a intenção de manter a eficiência energética do sistema. A concentração de alumínio presente no efluente irá variar de acordo com a qualidade da água bruta a ser tratada. Bracher (2022) relatou em estudos que o consumo energético mostrou ser um bom indicador para determinar o momento de realizar essa manutenção.
- IV. É essencial que ocorra a inversão de polaridade dos eletrodos de alumínio para evitar a passivação dos mesmos e geração da camada proveniente de corrosão, garantindo maior vida útil dos eletrodos (MOLLAH et al. 2011).

## 5 CONCLUSÕES

Após a revisão de um prévio estudo de informações sobre o conteúdo proposto, pôde-se dimensionar o sistema ECF presente nesse trabalho, que atende a uma vazão total de 11,88 L. s<sup>-1</sup> e é composto por 4 linhas ECF que recebem uma vazão de 2,97 L. s<sup>-1</sup>. Cada linha detém de um reator ECF (eletrocoagulador) seguido de dois módulos de FTH, possuindo as seguintes condições/configuração:

- Para cada reator ECF: fluxo ascendente, composto por eletrodos de alumínio em conexão monopolar em paralelo, com distância de 3 mm entre cada eletrodo. As placas de eletrodos foram dimensionadas com largura de 180 mm, espessura de 0,7 mm, comprimento útil de 2,10 m, com um total de 60 unidades de eletrodos. O diâmetro interno escolhido para os reatores é de 312 mm com altura de 2,20 m, velocidade de escoamento de 0,04 m. s<sup>-1</sup>, densidade de corrente adotada de 1 mA. cm<sup>-2</sup>, TDH de 51 s e tempo de contato da água com os eletrodos de 48,71 s.
- Para o FTH em cada linha do sistema: fluxo ascendente com orientação no sentido vertical, diâmetro interno da tubulação de 101,6 mm, diâmetro anelar de 800 mm e comprimento de 140 m. Cada linha do sistema contém 2 módulos com 28 unidades anelares cada, que totalizaram em um TDH de 6,37 min.

A comparação entre o sistema ECF e a ETA compacta coagulação-sedimentação mostrou que o sistema ECF escalonado utiliza uma área 16.36% menor que a ETA e uma altura 8.95% menor, utilizando a mesma vazão para ambos os sistemas. Além de ser mais compacto, o sistema ECF tem a vantagem de não necessitar de produtos químicos para coagulação e uma conseqüente menor produção de lodo. Contudo, outros fatores devem ser estudados para realizar uma comparação completa e efetiva em relação ao gasto com energia elétrica, instalação e manutenção dos sistemas.

### 5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Tendo em vista a necessidade de aperfeiçoar o sistema, propõe-se para trabalhos futuros:

- estudos com o sistema ECF em escala de bancada utilizando o FTH na conformação vertical, em razão de só existirem trabalhos realizados com a conformação na horizontal, que se mostrou não ser uma forma viável de implementar em maiores escalas.

- estudos com a combinação do sistema ECF escalonado e o processo de flotação por ar dissolvido (FAD) através da sua aplicação pelo FTH, sendo uma alternativa para aumentar a eficiência de flotação dos flocos e separação das fases.

- análise de custos relacionados ao consumo de energia total do sistema, além do orçamento do maquinário e peças necessárias.

## REFERÊNCIAS

- BRACHER, G. H; GRAEPIN, C.; CARISSIMI, E. Sistema e processo de eletrocoagulação-flotação para tratamento de água e efluentes. Depositante: Universidade Federal de Santa Maria (BR/RS); Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN (BR/RS). BR 10 2021 008218 6 A2. Depósito: 29/04/2021. Publicação: 08/11/2022.
- BRACHER, G. H. Desenvolvimento de um sistema de eletrocoagulação-flotação para o tratamento de água para abastecimento público. 2022. 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.
- BRACHER, G. H. et al. Electrocoagulation and ozonation: A hybrid technique to treat colored effluents from the textile industry. *Desalination and Water Treatment*, 2020.
- BRACHER, G. H. et al. Análise do desempenho de um sistema eletroquímico no tratamento de esgoto doméstico. *Scientia cum Industria*, v. 6, p. 12-16, 2018.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde – Funasa. Manual de controle de qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. Brasília; Funasa, 2014. 112 p.
- CAÑIZARES P., CARMONA M., LOBATO J., MARTINEZ F., RODRIGO M. A. Electrodeposition of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. *Ind. Eng. Chem.*, v. 44, p. 4178 – 4185, 2005.
- CARISSIMI, E.; RUBIO, J. Polymer-bridging flocculation performance using turbulent pipe flow. *Minerals Engineering*. v. 70, p. 20-25, 2015.
- CARISSIMI, E.; RUBIO, J. The flocc generator reactor-FGR: a new basis for flocculation and solid–liquid separation. *International Journal of Mineral Processing*. v. 75, n. 3-4, p. 237-247, 2005.
- CARISSIMI, E. Reator gerador de flocos – RGF: concepção e desenvolvimento básico. 2003. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- CERQUEIRA, A. A. et. al. *Quim. Nova*, 2011, v. 34, 59.
- CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, v. 38, n.1, p. 11-41, 2004.
- CORSAN. Edital de licitação nº. 0185/2020. Fornecimento com instalação de estação de tratamento de água compacta metálica de 30 L/s para ampliação de abastecimento de água no município de Garibaldi / RS. Disponível em [https://pregaobanrisul.com.br/editais/0185\\_2020/266679](https://pregaobanrisul.com.br/editais/0185_2020/266679). Acesso em 25 mai. 2023.
- DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. Seleção de tecnologias de tratamento de água. 2 ed. São Carlos: ABES, RiMa, 2009. v.1

ELAZZOUI, M.; HABOUBI, KH.; ELYOUBI, M. S. Electrocoagulation-flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 117, p. 614-626, 2017.

GEWEHR, A. G. (2012), Tratamento por coagulação-floculação de lixiviado bruto de aterro sanitário com e sem pré tratamento biológico em reator sequencial em batelada. *Processamento de Urucum em Leito de Jorro – Estudos Fluidodinâmicos*. PPGRH. Porto Alegre - RS, 163 p. (dissertação de mestrado).

GRAEPIN, C. Sistema de eletrocoagulação-flotação: uma unidade de tratamento de água inovadora para demandas eventuais e remotas do saneamento básico. 2020. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

GRAEPIN, C. et al. Electrocoagulation-flotation: A novel proposal for Latin-American Water Treatment Facilities. *Desalination and Water Treatment*, 2020.

HAKIZIMANA, J. N. et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, v. 404, p. 1-21, 2017.

HOLT P. K., BARTON G. W., MITCHELL C. A. The future of Electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere* 59, p. 355-367, 2005.

IBGE. – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD 2009. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home>. Acesso em 22 mai. 2023.

IBGE. – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro. Brasil. 397 p.

IFILL, R. O.; ETSSELL, T. H. Effect of agitation on the settling behavior of electrocoagulated silica. *International Journal of Mineral Processing*, v. 99, p. 61-69, 2011.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A. K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—a review. *Journal of Environmental Management*, v. 128, p. 949-963, 2013.

KOBYA, M. et al. Treatment of potable containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: different connections mode and Fe-Al electrodes. *Sep. Purif. Technol.*, v. 77, p. 283–293, 2011.

KOBYA, M.; BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M. Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, v. 148, p. 311–318, 2007.

MANSOUR L. BEN; CHALBI S. Removal of oil from oil/water emulsions using electroflotation process. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 36, p. 577–581, 2006.

MOLLAH, M. Y. A. et al. Electrocoagulation (EC) – science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, v. 84, p. 29-41, 2001.

OLIVEIRA, D. S. Helically Coiled Tube Flocculators for Water Clarification: Evaluation of Winding Diameter in Turbidity Removal Efficiency. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 08, n. 06, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/14683/7476>. Acessado em: 09/06/2023

OLIVEIRA, D. S. Proposição de modelo de previsão de desempenho de unidades de floculação tubulares helicoidais. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

PIHL, E.; KUSHNIR, D.; SANDÉN, B.; JOHNSON, F. Material constraints for concentrating solar thermal power. *Energy*, v. 44, n. 1, p. 944–954, 2012.

TAUCHERT, T. A. Desenvolvimento de um Sistema de Eletrocoagulação Aplicado ao Tratamento de Efluentes de Curtume. Monografia para Conclusão de Curso. Novo Hamburgo, 2012.

UN (United Nations). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. Geneva: United Nations, 2015. 41 p.

UNICEF – Progress on household drinking water, sanitation and hygiene, 2000 – 2017: special focus on inequalities. New York, USA, 2019. 140 p.

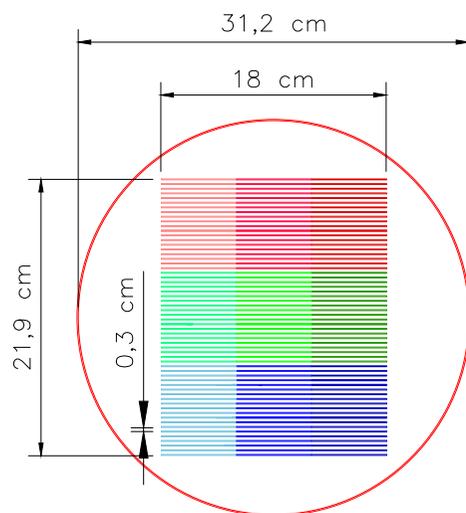
## APÊNDICES

Apêndice A – Dimensões do reator ECF e configuração dos eletrodos

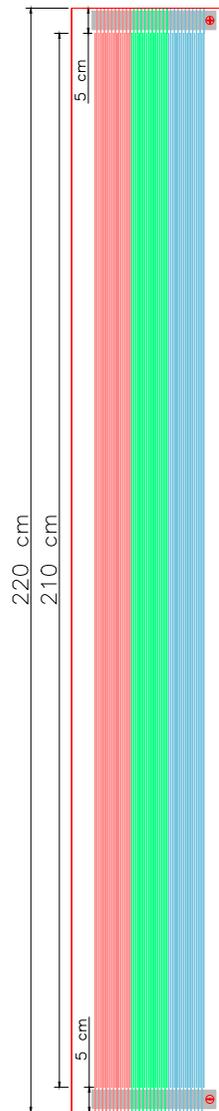
Apêndice B – Dimensões do FTH

Apêndice C – Representação da Configuração do Sistema ECF - Planta Baixa

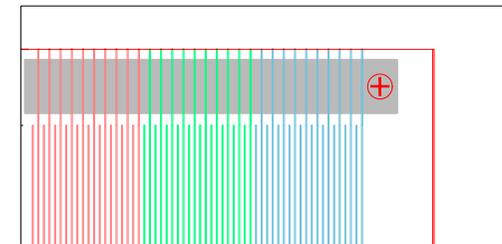
Apêndice D – Representação da Configuração do sistema ECF - Corte Lateral



PLANTA BAIXA  
ESC.: 1/6



CORTE LATERAL  
ESC.: 1/15



CONFIGURAÇÃO DOS ELETRODOS  
ESC.: 1/5

DIMENSÕES ADOTADAS POR REATOR ECF	
Q = 2,97 L/s	
REATOR ECF	
Diâmetro interno da tubulação	312 mm
Altura da tubulação	2,2 m
ELETRODOS DE ALUMÍNIO	
Quantidade total	60 unidades
Espessura	0,7 mm
Largura	180 mm
Distância entre eletrodos	3 mm
Comprimento útil	2,1 m
Comprimento Excedente	0,10 m

TÍTULO:

**REATOR DE ELETROCOAGULAÇÃO-FLOTAÇÃO**  
PLANTA BAIXA E VISTA LATERAL

FOLHA:

**01/04**

ASSUNTO:

ESCALONAMENTO DO SISTEMA ECF

DATA:

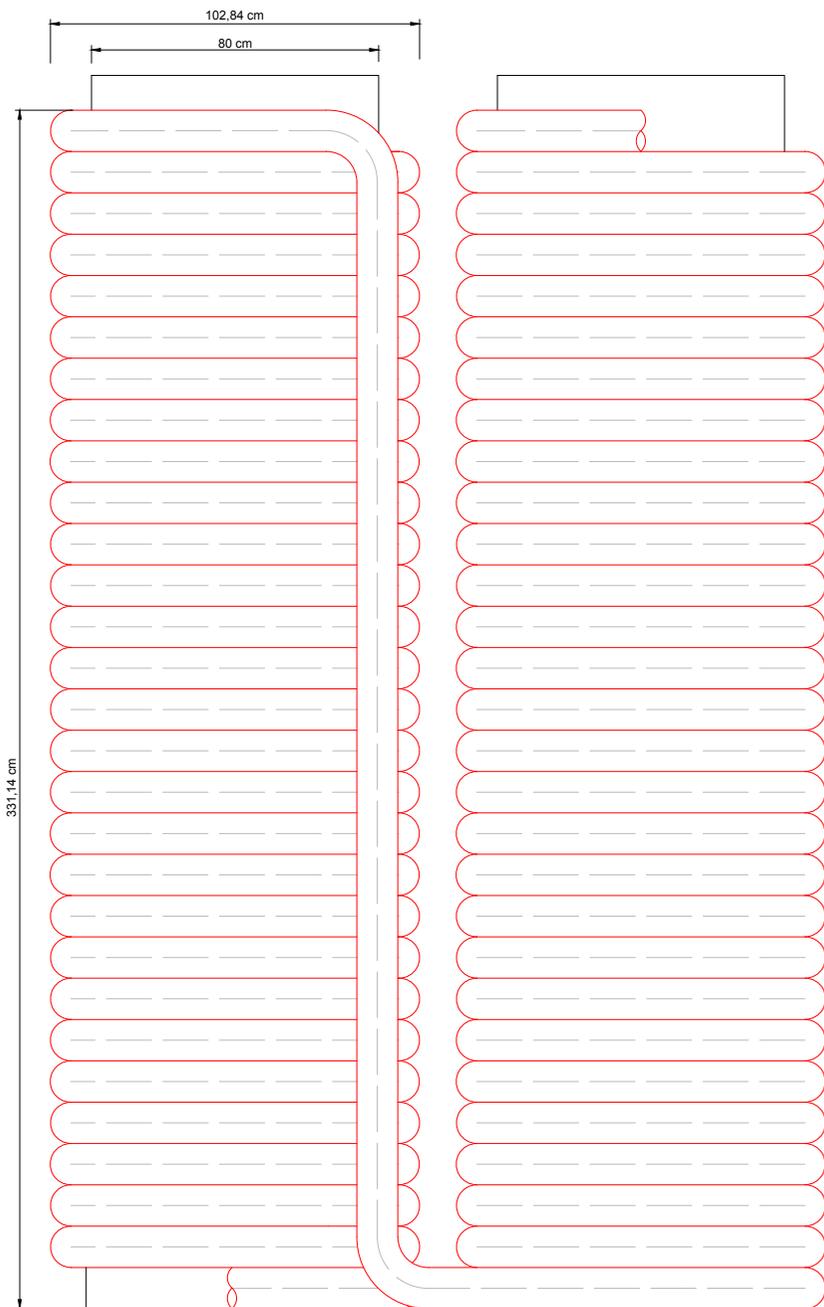
01/06/2023

DESENHO:

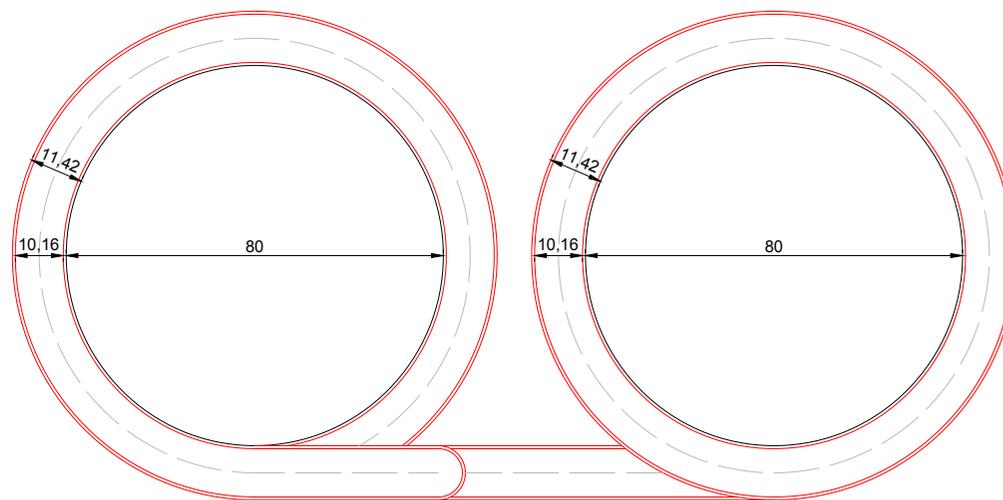
MAIRA BRENNER

ESCALA:

ESPECIFICADA



VISTA LATERAL  
ESC.: 1/21



Nota: Dimensões em cm

PLANTA BAIXA  
ESC.: 1/16

DIMENSÕES ADOTADAS POR FTH Q = 2,97 L/s	
Diâmetro interno da tubulação	101,6 mm
Diâmetro externo da tubulação	114,2 mm
Diâmetro anelar	800 mm
Comprimento	aprox. 140 m
Total de anéis por módulo	28 anéis
Total de anéis p/unidade FTH	56 anéis

TÍTULO:

**FLOCULADOR TUBULAR HELICOIDAL**  
PLANTA BAIXA E VISTA LATERAL

FOLHA:

**02/04**

ASSUNTO:

ESCALONAMENTO DO SISTEMA ECF

DATA:

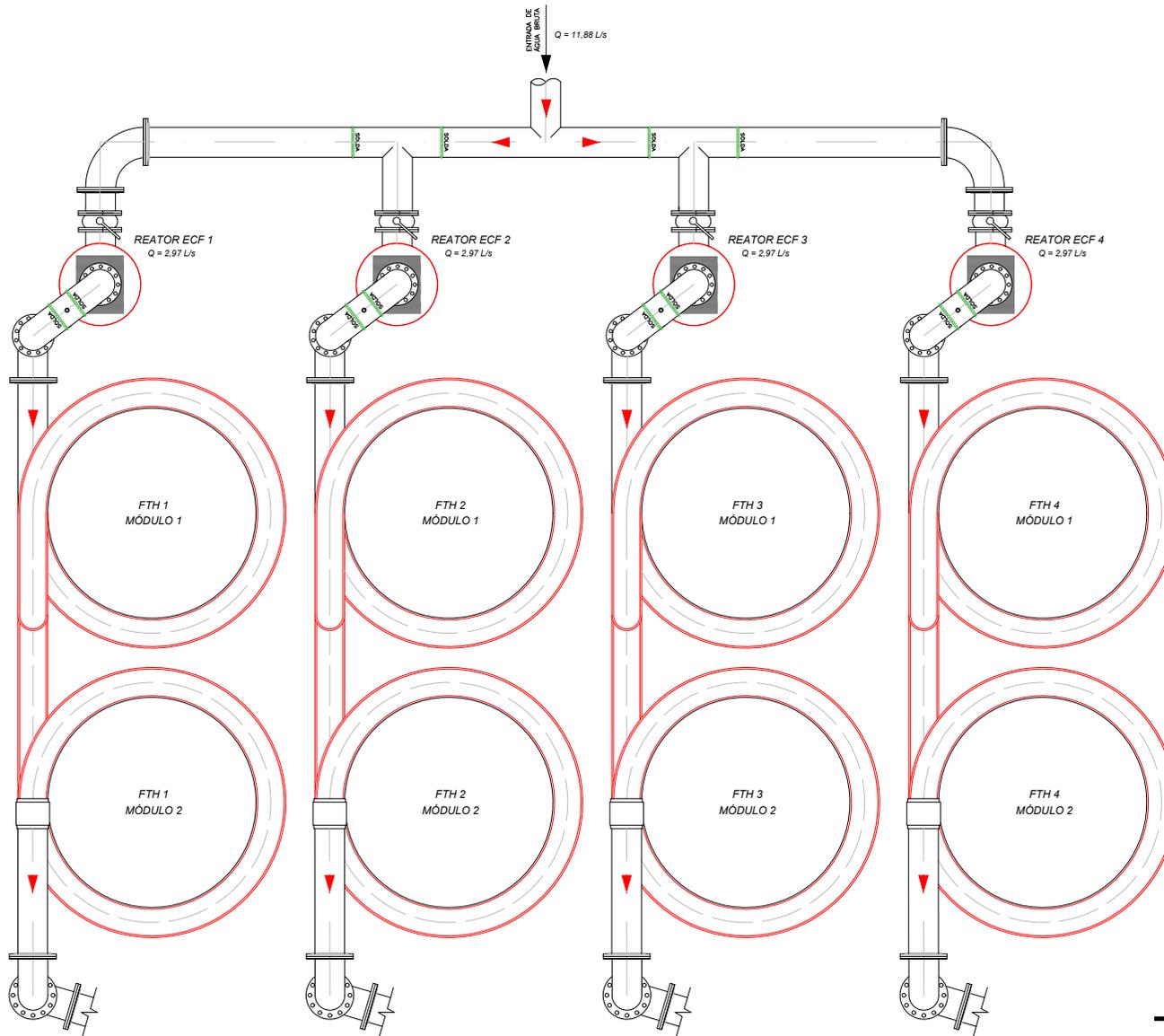
01/06/2023

DESENHO:

MAIRA BRENNER

ESCALA:

ESPECIFICADA



Nota: Após a água bruta percorrer o sistema ECF, a água floculada é direcionada a uma unidade de separação água-lodo, passando posteriormente em um filtro para tratamento final.

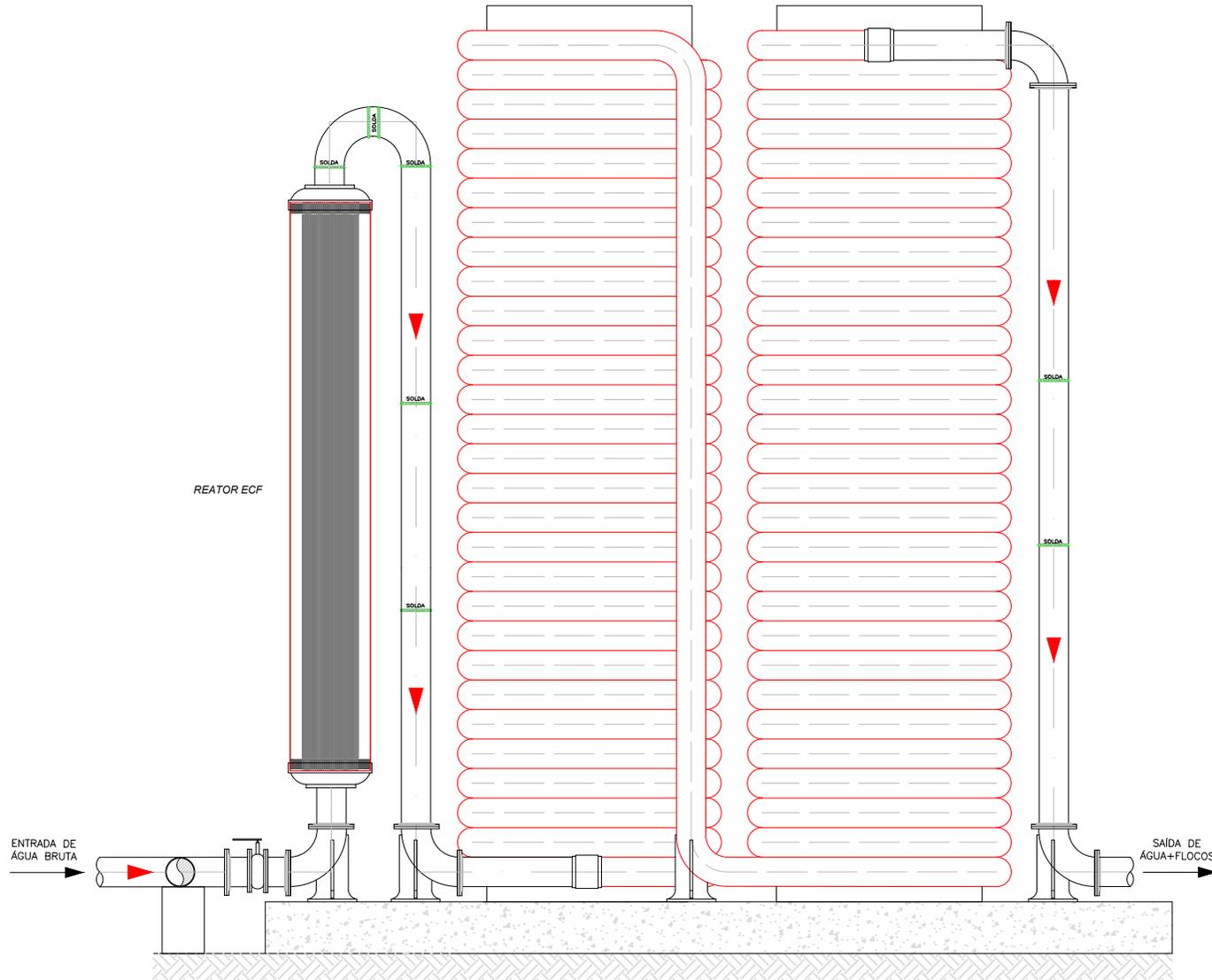
PLANTA BAIXA  
ESC.: 1/26

TÍTULO:	<b>SISTEMA ECF</b> PLANTA BAIXA	FOLHA:	<b>03/04</b>
ASSUNTO:	ESCALONAMENTO DO SISTEMA ECF	DATA:	01/06/2023
DESENHO:	MAIRA BRENNER	ESCALA:	ESPECIFICADA

FLOCULADOR TUBULAR HELICOIDAL

MÓDULO 1

MÓDULO 2



VISTA LATERAL  
ESC.: 1/26

TÍTULO:

**SISTEMA ECF**  
VISTA LATERAL

FOLHA:

**04/04**

ASSUNTO:

ESCALONAMENTO DO SISTEMA ECF

DATA:

01/06/2023

DESENHO:

MAIRA BRENNER

ESCALA:

ESPECIFICADA