

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM
EQUIPAMENTO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES
DE LAVAGEM DE CARROS POR ELETRÓLISE

Raul Schenkel

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

S324d Schenkel, Raul

Desenvolvimento experimental de um equipamento para o tratamento de efluentes de lavagem de carros por eletrólise [recurso eletrônico] / Raul Schenkel. – 2022.

1,813 Kb ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier.

Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Eletrólise. 2. Projeto de produto. 3. Água - Reuso. 4. Impacto ambiental. I. Hemkemeier, Marcelo, orientador. II. Título.

CDU: 621.9

Raul Schenkel

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM EQUIPAMENTO
PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVAGEM DE CARROS
POR ELETRÓLISE**

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2022

Raul Schenkel

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM EQUIPAMENTO
PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVAGEM DE CARROS
POR ELETRÓLISE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: Dia mês de 20--.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier
Orientador

Professor Doutor Antonio Carlos Valdiero
Universidade Federal de Santa Catarina

Professora Doutora Aline Dettmer
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Márcio Walber
Universidade de Passo Fundo

Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada, especialmente a minha esposa e aos meus filhos, pois eles são a minha razão de viver.

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha esposa e a minha mãe, que em todos os momentos estiveram do meu lado me incentivando e dando animo para ir em frente.

Aos professores e orientadores que contribuíram para a construção do conhecimento.

A UPF, por ter me concedido uma bolsa de estudo, sem ela não seria possível a realização deste trabalho.

A todas as demais pessoas que de uma forma ou outra me auxiliariam na elaboração e construção deste trabalho, muito obrigado.

Treine enquanto eles dormem, estude enquanto eles se divertem, persista enquanto eles descansam, e então viva o que eles sonham.

Provérbio japonês

RESUMO

O desperdício de recursos hídricos e o aumento do consumo de água em sistemas urbanos, tem gerado problemas de escassez de água. O processo de lavagem de veículos é um dos consumidores de água e gera um volume considerável de efluentes potencialmente poluidores, sendo lançados diretamente ou com tratamentos inadequados à rede de esgoto e/ou pluvial. O processo por eletrólise é um tratamento tecnicamente viável com possibilidade de reuso do efluente, diminuindo o impacto ambiental a partir de um equipamento compacto, de baixo custo e fácil operação. Esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento experimental de um equipamento para o tratamento de efluentes de uma estação de lavagem de veículos por eletrólise de uma estação de lavagem de veículos capaz de diminuir o impacto ambiental desta atividade através do tratamento e reuso do efluente. Para elaboração do projeto, foi utilizada a metodologia de desenvolvimento de produtos proposta por PAHL (2005). O equipamento concebido foi composto por câmara eletrolítica composta com duas colmeias com eletrodos de alumínio com a capacidade de tratar 500 l/h, a alimentação é através de uma fonte de corrente contínua, o sistema de limpeza contará com um raspador de lodo seguido por decantação, além de uma bomba centrífuga que fará a sucção do efluente e um quadro de automação para realizar os demais controles operacionais. No estudo foram determinadas as variáveis do processo: custo operacional, densidade de corrente, tempo de vida do eletrodo e tensão elétrica teórica. Depois foram avaliadas a turbidez, demanda química do oxigênio (DQO), sólidos sedimentáveis, pH e condutividade elétrica do efluente bruto e do tratado. O equipamento experimental desenvolvido para o tratamento de efluentes gerados pela lavagem de veículos não atingiu valores suficientes para o lançamento do efluente, mas demonstrou ser capaz de tratar o efluente para a reutilização do processo. O protótipo apresentou um ótimo resultado na clarificação do efluente tratado.

Palavras chaves: desenvolvimento de protótipo; tratamento eletrolítico; impacto ambiental; reuso de efluentes.

ABSTRACT

The waste of water resources and the increase in water consumption in urban systems have generated water scarcity problems. The vehicle washing process is one of the water consumers and generates a considerable volume of potentially polluting effluents, being released directly or with inadequate treatments to the sewage and/or rainwater network. The electrolysis process is a technically viable treatment with the possibility of reusing the effluent, reducing the environmental impact from a compact, low-cost and easy-to-operate equipment. This research aimed at the experimental development of an equipment for the treatment of effluents from a vehicle washing station by electrolysis of a vehicle washing station capable of reducing the environmental impact of this activity through the treatment and reuse of the effluent. To design the project, the product development methodology proposed by PAHL (2005) was used. The designed equipment was composed of an electrolytic chamber composed of two hives with aluminum electrodes with the capacity to treat 500 l/h, the power supply is through a direct current source, the cleaning system will have a sludge scraper followed by decantation. , in addition to a centrifugal pump that will suction the effluent and an automation panel to carry out the other operational controls. In the study, the process variables were determined: operational cost, current density, electrode lifetime and theoretical electrical voltage. Afterwards, the turbidity, chemical oxygen demand (COD), sedimentable solids, pH and electrical conductivity of the raw and treated effluent were evaluated. The experimental equipment developed for the treatment of effluents generated by vehicle washing did not reach sufficient values for the release of the effluent, but it proved to be capable of treating the effluent for the reuse of the process. The prototype presented an excellent result in the clarification of the treated effluent.

Keywords: prototype development; electrolytic treatment; environmental impact; effluent reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo eletrolítico	25
Figura 2 - Diagrama de solubilidade do hidróxido de alumínio em função do pH	28
Figura 3 - Remoção do zinco por eletroflotação como função da tensão entre os eletrodos ...	29
Figura 4 - Eficiência remoção TOC	34
Figura 5 - Desenho ilustrativo dos eletrodos monopolar com conexões paralelas.....	35
Figura 6 - Desenho ilustrativo dos eletrodos monopolar com conexões em série	35
Figura 7 - Desenho ilustrativo dos eletrodos bipolares com conexões em série	36
Figura 8 - Custos e benefícios em diferentes estágios do processo de desenvolvimento.....	38
Figura 9 - Procedimento geral para desenvolvimento de projetos	39
Figura 10 - Fluxograma de desenvolvimento	42
Figura 11 - Linha mestra do projeto	45
Figura 12 - Função global do equipamento	48
Figura 13 - Subfunção do projeto	49
Figura 14 - Árvore de requisitos do projeto	55
Figura 15: Protótipo experimental para o tratamento do efluente (a) Reservatório / Eletrodos, (b) Válvula para controle de vazão, (c) Bomba de sucção peristáltica, (d) Fonte de energia. .	58
Figura 16 - Projeto conceitual	60
Figura 17 - – Principais partes de equipamento a) perspectiva frontal; b) perspectiva posterior	61
Figura 18 - Estação de tratamento	62
Figura 19 - Sistema de limpeza	62
Figura 20 - Reservatório para descarte de lodo	63
Figura 21 -Fluxo do efluente pelo equipamento.....	63
Figura 22 - Protótipo experimental em funcionamento.....	64
Figura 23 - Aspecto visual dos efluentes a) efluente bruto; b) efluente tratado.....	65
Figura 24 - Eficiência do equipamento eletrolítico na remoção de turbidez.....	67
Figura 25 - Resultado do equipamento na manutenção do pH.....	68
Figura 26 - Eficiência do equipamento na manutenção da condutividade elétrica	69
Figura 27 - Eficiência do equipamento eletrolítico na remoção de DQO	70

Figura 28 - Eficiência do equipamento eletrolítico na remoção de surfactantes..... 71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de requisitos para o equipamento	46
Quadro 2 - Concepções alternativas para o desenvolvimento do equipamento	51
Quadro 3 - Matriz morfológica com variantes do equipamento.....	52
Quadro 4 - Avaliação qualitativa dos componentes da matriz morfológica	54
Quadro 5 - Atribuições dos valores para avaliação	56
Quadro 6 - Avaliação quantitativa das variáveis de solução	56
Quadro 7 - Resumo da concepção V3	57

TABELAS

Tabela 1: Caracterização de efluente de lavagem de veículos	22
Tabela 2: Parâmetros para reuso de acordo com norma ABNT 13969/97	23
Tabela 3 - Abstração de ideias para o desenvolvimento do equipamento.....	47
Tabela 4 - Variáveis do processo para tratamento do efluente.....	57
Tabela 5: Caracterização da água bruta.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
DQO	Demanda de carga orgânica
EC	Eletrocoagulação
EF	Eletroflotação
MBAS	Substâncias ativas ao azul de metileno
ONU	Organização das nações unidas
SST	Sólidos suspensos totais
TOC	Carbono orgânico total
UPF	Universidade de Passo Fundo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
a	Equivalente eletroquímico do material do eletrodo
A_{anodo}	Área do ânodo
Ah	Ampere hora
Al	Alumínio
C_{eletrodo}	Consumo do eletrodo
C_f	Densidade de carga
CO	Custo do processo
d	Densidade do material do eletrodo
d	Distância entre os eletrodos
e	Elétrons
F	Constante Faraday
Fe	Ferro
g	Gramas
h	Hora
h	Horas
H ₂ O	Água
he	Hélio
I	Intensidade da corrente
J	Densidade de corrente
k	Condutividade do eletrólito
L	Litro
L	Litros
M	Massa inicial da colmeia
M	Molar
m ²	Metros quadrados
mg	Miligrama
mL	Mililitro
M_w	Massa molar relativa do eletrodo de alumínio
NaOH	Hidróxido de sódio

O	Oxigênio
OH	Hidroxila
pH	Potencial hidrogeniônico
S	Densidade da corrente
T	Tempo
T_{ec}	Tempo de retenção hidráulica
U	Tensão aplicada
V	Perda do volume
V	Volume do efluente tratado
Z	Número de elétrons em oxidação/redução
α	Custo da energia
β	Custo do quilo do eletrodo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Justificativas.....	19
1.2 Objetivos	19
1.3 Estrutura do documento.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Água – Aspectos ambientais e reuso.....	21
2.2 Características dos efluentes lançados no meio ambiente pela lavagem de veículos	21
2.3 Tratamento dos efluentes da lavagem dos veículos	23
2.4 Processo de eletrólise.....	24
2.4.1 Vantagens e limitações do processo.....	26
2.4.2 Principais reações químicas.....	27
2.4.3 Principais parâmetros de controle do processo eletrolítico	29
2.4.4 Tensão elétrica (U).....	29
2.4.5 Distância dos eletrodos	30
2.4.6 Densidade da corrente.....	31
2.4.7 Densidade da carga	32
2.4.8 Temperatura.....	32
2.4.9 pH	32
2.4.10 Tempo de eletrólise.....	33
2.4.11 Material do eletrodo	33
2.4.12 Passivação dos eletrodos	34
2.4.13 Disposição dos eletrodos	34
2.4.14 Determinação dos custos do processo	36
2.4.15 Tempo de desgaste dos eletrodos	37
2.5 Metodologia de desenvolvimento de projeto.....	38
2.5.1 Especificações de projeto	40
2.5.2 Projeto conceitual.....	40
2.5.3 Anteprojeto.....	41

2.5.4	Projeto detalhado	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Delineamento da pesquisa	42
3.2	Local da pesquisa	43
3.3	Característica do efluente bruto	44
3.4	Especificação do projeto	44
3.4.1	Lista de requisitos	45
3.5	Projeto conceitual.....	46
3.5.1	Abstração de ideias.....	46
3.5.2	Elaboração da função global.....	48
3.5.3	Elaboração das subfunções	49
3.5.4	Busca das concepções ideias	52
3.5.5	Avaliação qualitativa e quantitativas das concepções.....	53
3.6	Validação do protótipo	57
3.7	Características do equipamento idealizado	58
3.8	Principais variáveis do processo	58
3.8.1	Principais variáveis estudadas.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1	Definição do projeto conceitual	60
4.2	Desenvolvimento do projeto conceitual.....	60
4.3	Ensaio com equipamento experimental em laboratório.....	64
4.3.1	Condições gerais dos ensaios e caracterização do efluente bruto	64
4.3.2	Eficiência de tratamento do equipamento piloto.....	66
5	CONCLUSÃO	72
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	72
6	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

A água doce é um recurso essencial. Segundo a ONU, estima-se que no mundo um bilhão de pessoas não têm acesso a um abastecimento suficiente de água por dia, cerca de 20 litros por pessoa. A escassez, má distribuição e seu desperdício tem gerado grandes problemas socioeconômicos e isso faz com que o tema seja de preocupação global. A lavagem de carros é um processo que consome quantidade significativa de água e como a frota de veículos vem aumentando a cada ano, os impactos sobre os recursos hídricos devem ser considerados.

O reuso de água para a lavagem de carros vem ganhando destaque em vários países, pois verificou-se que milhares de litros de água potável são desperdiçados atualmente nesta prática. Alguns países como Estados Unidos e Japão já tem uma legislação própria para a regulamentação de lavagens com tratamento de efluentes com equipamentos que promovam o reuso da água utilizada (LEITÃO, 1999). No Brasil, o reuso de água na lavagem de carros está crescendo, no entanto, ainda associada a algumas iniciativas isoladas.

O desenvolvimento de novas tecnologias é essencial para conseguir fazer um bom proveito e um reuso deste recurso hídrico. O desafio para aumentar o reuso de água é o desenvolvimento de tecnologias eficientes, de fácil operação, sustentável e de baixo custo de implantação. Neste contexto, a eletrólise se apresenta como um processo promissor, mas carece de comprovação da sua aplicação em escala real.

Desta forma, o objetivo deste estudo é desenvolver e construir um equipamento experimental para o tratamento de efluentes na lavagem de carros por eletrólise que seja capaz de reutilizar a água para uma nova lavagem, evitando o desperdício e aumentando a sua sustentabilidade. O desenvolvimento deste projeto será através da metodologia sugerida por PAHL et al. (2005), que propõe a organização do projeto como um procedimento planejado e com indicações concretas de condutas a serem tomadas em seu desenvolvimento.

1.1 Justificativas

O desperdício de recursos hídricos e o aumento do consumo de água em sistemas urbanos têm gerado grandes problemas com escassez da água. No contexto geral, o estudo de métodos convencionais e alternativos para o tratamento de efluentes tem como objetivo a obtenção de um melhor aproveitamento do recurso hídrico e a diminuição do impacto poluidor no meio ambiente, busca o reuso do efluente tratado ou o seu descarte da forma correta, sem a degradação dele.

Um tratamento de efluentes por eletrólise pode vir a substituir o tratamento físico-químico que tem várias dificuldades por lidar com produtos químicos e necessitar de mão de obra especializada.

No entanto, não temos nenhum equipamento desenvolvido para a lavagem de veículos que trate o efluente gerado e o reutilize, isso é o que torna justificável o estudo, por se apresentar uma solução possível para o processo, solucionando os problemas em aberto. O processo de eletrólise tem o seu princípio estudado há muitos anos, porém a sua aplicação em grande escala atualmente é pouco dominada.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver de um equipamento experimental capaz de tratar e reutilizar o efluente gerado no processo de lavagem de veículos, contribuindo para a sustentabilidade do processo de lavagem de carros.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a) Projetar e construir um equipamento experimental com eletrólise capaz de reproduzir as condições de tratamentos já estudadas, utilizando-se de uma metodologia adequada de projeto;
- b) Obter as variáveis do processo de tratamento necessárias para o projeto conceitual;
- c) Validar o projeto conceitual através de equipamento em escala piloto;

1.3 Estrutura do documento

Este documento está estruturado da seguinte maneira:

- a) Capítulo 01: introdução a pesquisa, definição dos devidos objetivos e justificativas para o desenvolvimento do projeto;
- b) Capítulo 02: elaboração das revisões bibliográficas necessárias, sendo específico nas áreas de processos de tratamento de efluentes e metodologia de desenvolvimento de projeto;
- c) Capítulo 03: metodologia aplicada para a elaboração do projeto e análise dos resultados obtidos;
- d) Capítulo 04: apresentação dos resultados encontrados;
- e) Capítulo 05: conclusão do projeto e sugestão de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa é voltada ao desenvolvimento de um equipamento capaz de tratar o efluente gerado pelo processo de lavagem de veículos e reutilizá-lo novamente para o mesmo processo, sendo assim é uma pesquisa científica que demanda estudo sobre metodologia de projetos, capazes de atender a demanda da elaboração de um projeto inicial e pesquisa das características e determinações das variáveis inerentes aos processos de eletrólise.

2.1 Água – Aspectos ambientais e reuso

A água é fundamental para a sobrevivência de todas as formas de vida do planeta. Para o ser humano se manter vivo é necessário consumir alguns litros de água potável por dia. Porém, a água doce disponível no planeta não é abundante, pois ela representa apenas 0,01 % da água total do planeta (BAIRD, 2002).

Conforme Nema et al. (2021), a crise da água é um problema atual e muitos países enfrentam este problema. Além disso, a água é utilizada em grandes quantidades por vários estágios de processos industriais e há uma dificuldade destas empresas no reuso de água devido a suas plantas não serem bem instrumentadas e nem automatizadas. Para Hristov et al. (2021), o tratamento de águas residuais é uma proposta alternativa para resolver a escassez de água na Europa.

O reuso de água não potável é uma prática crescente em todo o mundo, principalmente em áreas que há escassez. O reuso de água ainda não é uma prática comum em muitos países e isso pode ser uma etapa fundamental para a diversificação dos mananciais (FUKASAWA e MIERZWA, 2021).

2.2 Características dos efluentes lançados no meio ambiente pela lavagem de veículos

A lavagem de carros é um serviço com bastante demanda no meio urbano. O efluente lançado no meio ambiente pela lavagem de veículos pode conter quantidades significativas de óleo e graxas, sólidos em suspensão, metais tóxicos, surfactantes e substâncias orgânicas. Os metais tóxicos nas águas residuais dos automóveis vêm geralmente das lonas de freio, com poeira e areia sendo levada e vestígios surfactantes que dificilmente são degradados no meio

ambiente (TAJUDDIN et al., 2019). O descarregamento de águas residuais da lavagem de carros no sistema de água, traz riscos à saúde humana e de outros organismos.

A característica do efluente produzido na lavagem de veículos de acordo com Bonh (2014), apresenta normalmente os seguintes aspectos físico-químicos (Tabela 1).

Tabela 1: Caracterização de efluente de lavagem de veículos

PARÂMETROS	RESULTADOS		Res. CONSEMA 355/2017 para lançamento do efluente
	Gonder et al (2017)	Bohn (2014)	
Detergentes -MBAS (mg/L)	35	6,9	2
DQO (mg/L)	560	354	360
Óleos e graxas (mg/L)	125	19,4	10
Sólidos em suspensão - SST (mg/L)	230	34	120
Materiais sedimentares (mL/L/h)	-	0,1	1
pH	8	10,3	6 a 8

Fonte: Adaptado de Bonh (2014) e Gonder et al. (2017)

De acordo com Brown (2000), para reutilizar as águas residuais de lavagem de veículos é necessário fazer a separação de areia, óleos e graxas. Podem ser empregados processos de tratamentos adicionais para melhorar a qualidade da água recuperada. Alguns desses processos são: osmose inversa e nanofiltração, ultrafiltração, adsorção de carvão ativado por ultrafiltração, adsorção de carvão ativado por ultrafiltração, oxidação eletroquímica, tratamento biológico, floculação-sedimentação e floculação-flotação.

O investimento, o custo de operação e a manutenção de algumas destas alternativas são bastante caras e geralmente apresentam uma baixa eficiência. A flotação tem mostrado mais vantagens e com um potencial mais elevado perante os outros processos (ZANETI et al. 2011). O tratamento físico-químico com adição de coagulantes apresenta boa eficiência, no

entanto a operação exige conhecimentos e treinamentos específicos. Neste contexto a eletrólise pode ser uma alternativa promissora (GONDER et al., 2017).

A classificação do reuso da água é dividida em duas categorias: potável e não potável. De acordo com a ANBT (1997), a água utilizada para a lavagem de veículos se classifica como classe 1 (não potável para usos urbanos). Os parâmetros exigidos pela norma são de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros para reuso de acordo com norma ABNT 13969/97

Descrição	Quantidades	
Turbidez	inferior a 5	unidade de turbidez
Coliforme fecal	inferior a 200	100mL de amostra
Sólidos dissolvidos	inferior a 200	mg/L
pH	entre 6 a 8	unidade de pH
	entre 0,5 a	
Cloro residual	1,5	mg/L

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997)

2.3 Tratamento dos efluentes da lavagem dos veículos

O serviço de lavagem de veículos é essencial, pois remove a sujeira de uma maneira conveniente, mas isto gera um custo para o meio ambiente. A cada veículo lavado, um grande volume de água potável é contaminado por substâncias tóxicas e acaba nos cursos de água.

As estações de lavagem de veículos utilizam uma grande quantidade de água e durante as suas operações liberam produtos químicos com detergente, óleos e graxas, estes são prejudiciais ao meio ambiente. As águas residuais desta indústria são úteis para a adoção de medidas de amparo desta água e projetar sistemas de reciclagem de águas residuais, dados os recursos cada vez menores da água doce em todo o mundo (MONNEY et al., 2020).

Conforme Almeida et al. (2010), o conceito para reutilização da água de lavagem de veículos representa um grande percentual na gestão dos recursos hídricos. Os benefícios gerados pela recuperação de água tratada para lavagem estão diretamente relacionados a preservação de recursos hídricos de melhor qualidade, proteção ambiental e vantagens econômicas.

Segundo Bossou et al. (2007), 15% das estações de lavagem da Bélgica reciclam suas águas residuais, enquanto na Alemanha e na Áustria, a reciclagem chega a 80% das águas residuais. Na Holanda e nos países escandinavos existem restrições para as indústrias de lavagem de veículos (BOSSOU et al., 2007).

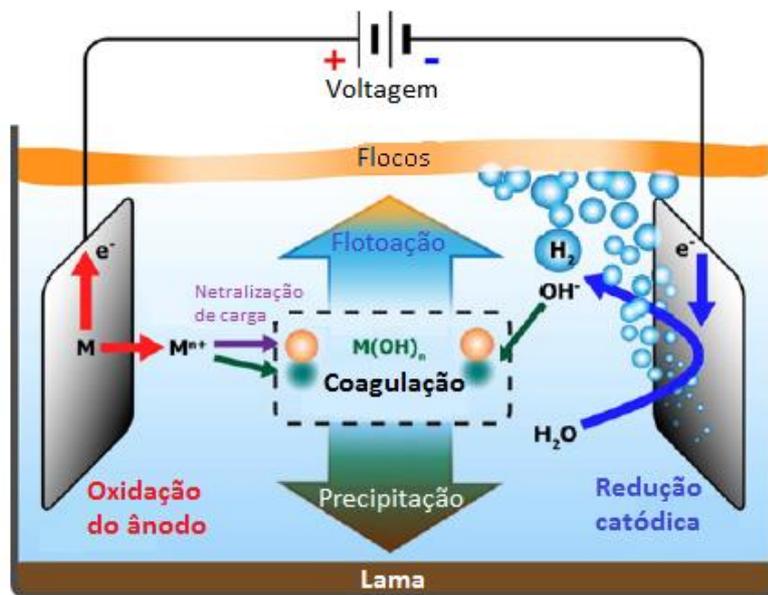
Para Asha et al. (2016), devemos considerar entre várias, as seguintes características para o tratamento de efluentes automotivos, a eficácia na redução de DQO e a comparação e análise de óleo e graxa. Garantindo a remoção justa de DQO e óleo e graxa do efluente do automóvel, nos permitirá que a água seja reutilizada para lavagem.

Conforme Bouluarte et al. (2016), poucos estudos têm sido realizados referente as águas residuais da lavagem de veículos com o objetivo de reuso de efluentes. Processos químicos, biológicos e de separação por membranas têm sido amplamente usados no tratamento de vários tipos de águas residuais, no entanto é importante considerar os custos de implementação, operação e manutenção acompanhado da eficiência do processo de tratamento.

2.4 Processo de eletrólise

O processo de eletrólise da água baseia-se na decomposição química dela e de seus elementos, hidrogênio e oxigênio, com a utilização da eletricidade (ESPÍNULA, 2008 *apud* ULLMANN'S, 1989). O processo de eletrólise ocorre quando uma corrente elétrica contínua atravessa dois elétrons, fazendo a dissociação da água em oxigênio e hidrogênio, utiliza-se um eletrólito assegure a condutividade, permitindo a realização do processo (ZENG et al., 2010). A Figura 1 mostra a representação esquemática do processo de eletrólise.

Figura 1 - Processo eletrolítico



Fonte: Adaptado de An et al. (2016)

A passagem da corrente elétrica gera uma força eletromotriz capaz de provocar uma série de reações químicas, no caso característico para o tratamento de água, contribuem para a desestabilização das moléculas contaminantes, provocando a sua precipitação e/ou oxidação, podendo alterar para compostos biodegradáveis (BAZRAFESHAN et al., 2013).

Para o processo por meio de eletrólise existem diversas designações. Elas podem ser classificadas de acordo com o seu princípio:

- a) **Eletrocoagulação** – Neste processo a remoção de poluentes começa com o ânodo metálico de sacrifício que atua como agente coagulante na água. A eletrocoagulação induz cátions metálicos *in situ*, ao invés da dosagem externa feita normalmente com coagulantes inorgânicos (HOLT et al., 2002).
- b) **Eletroflotação** – De acordo com Chen (2003) e Leite (2007), a eletroflotação é um processo em que os poluentes flutuam para a superfície da água, através de minúsculas bolhas de gases hidrogênio e oxigênio ou cloro, gerados por eletrólise da água através de um reator eletroquímico.

- c) **Eletrofloculação** – É a união dos processos de eletrocoagulação e eletroflotação. Segundo Mollah et al. (2001), o processo de eletrofloculação é altamente dependente da química do meio aquoso, especialmente pela condutividade.

2.4.1 Vantagens e limitações do processo

O tratamento de efluentes por processo eletroquímico estão sendo cada vez mais utilizados quando o comparamos com outras tecnologias de tratamento, isto não é somente devido ao seu baixo custo, mas também a sua grande eficiência.

Para Crespilho e Rezende (2004), o processo eletroquímico apresenta vantagens e desvantagens no tratamento de efluentes, sendo elas:

Vantagens

- a) Requer equipamento simples e de fácil operação, em que a corrente e o potencial podem ser monitorados de maneira automatizada.
- b) Há um maior controle no agente coagulante se comparado com um processo convencional.
- c) Os flocos são mais estáveis, podendo ser removido por filtração mais facilmente.
- d) O processo de EF remove as partículas coloidais menores, devido ao campo elétrico aplicado que promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação.
- e) As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem levar o contaminante ao topo da solução, onde pode ser concentrado e removido facilmente por flotação.
- f) Requer menos manutenção, pois a célula eletrolítica de EF é eletricamente controlada, não necessitando de equipamentos secundários.
- g) A técnica de EF pode ser utilizada em áreas rurais onde não há disponibilidade de energia elétrica, desde que seja acoplado um painel solar à unidade.

Desvantagens

- a) Os eletrodos precisam ser substituídos constantemente, caso sofram passivação.
- b) O custo com o consumo de energia elétrica pode se tornar caro em alguns lugares.
- c) Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, gerando uma perda de eficiência.
- d) É requerida uma alta condutividade do efluente.

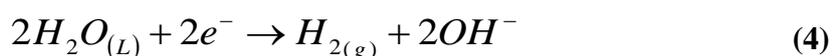
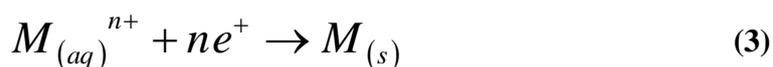
2.4.2 Principais reações químicas

Mollah et al. (2004) descreve as reações ocorridas num metal M resumidamente da seguinte maneira:

- No anodo



- No catodo



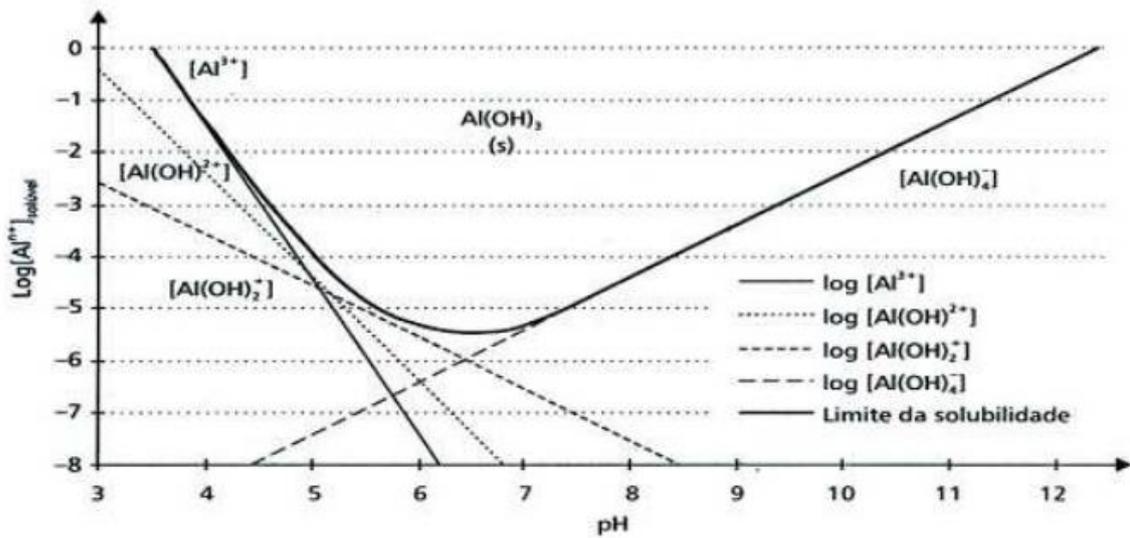
Ao se utilizares eletrodos de ferro ou de alumínio, os íons de $Fe_{(aq)}^{3+}$ ou $Al_{(aq)}^{3+}$ gerados submeter-se-ão imediatamente a reações espontâneas adicionais para produzir hidróxidos e/ou poli hidróxidos correspondentes, que realizam a coagulação dos contaminantes no efluente (MOLLAH et al., 2004; GONDER et al., 2017).

A densidade de corrente, o tempo e o tipo de eletrodo costumam ser as principais variáveis de estudo do processo eletrolítico aplicado ao tratamento de diferentes efluentes. Gonder et al. (2017) aplicou a eletrólise para tratar efluente de lavagem de carros obtendo remoção de DQO e de Óleos e Graxas de 88% e 68%, respectivamente. Para esses resultados foram utilizados pH 6, Densidade de Corrente de 1 mA/cm² e tempo de 30 min.

Segundo Mollah et al. (2004), quando utilizamos eletrodo de alumínio os íons Al^{3+} em larga escala de pH são submetidos a reações espontâneas que produzem hidróxidos e/ou poli hidróxidos. Os produtos da hidrólise podem formar diversas formas monoméricas e poliméricas, que possuem a capacidade de coagular partículas dispersas.

A Figura 2 representa o diagrama de solubilidade do hidróxido de alumínio, assumindo espécies monoméricas, em função do pH.

Figura 2 - Diagrama de solubilidade do hidróxido de alumínio em função do pH

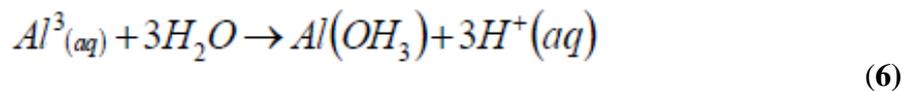


Fonte: Crespilho e Rezende (2004)

As seguintes reações se destacam quando utilizamos eletrodos de alumínio, são elas:

a) Anodo

A dissolução eletrolítica no anodo de alumínio produz umas espécies catiônicas manométricas tais com Al^3 e $Al(OH)_2^+$ em pH baixos, os quais em valores apropriados de pH são transformados inicialmente em $Al(OH)_3$ e finalmente polimerizadas para $Al_n(OH)_{3n}$, como é mostrado nas reações a seguir:

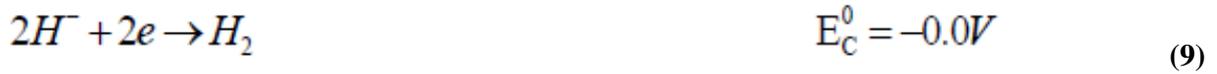


b) Catodo

Acompanhado da reação anódica, acontece uma reação catódica associada, geralmente a evolução de hidrogênio. A reação ocorre no cátodo e é dependente do pH. No pH neutro ou alcalino, o hidrogênio é produzido através da equação:



Em circunstâncias ácidas a equação 9 descreve melhor a evolução do hidrogênio no catodo:



2.4.3 Principais parâmetros de controle do processo eletrolítico

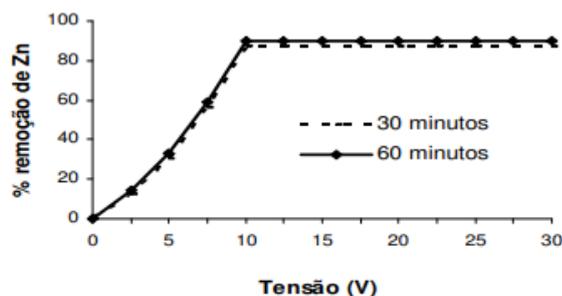
Para que o equipamento seja dimensionado são necessários compreender os principais parâmetros do processo eletrolítico. Estes parâmetros estão diretamente relacionados a eficiência do processo e nos custos operacionais

2.4.4 Tensão elétrica (U)

A tensão elétrica é um fator de muita influência no desempenho da eletrofloculação, pois para o processo existe uma condição mínima de energia, encontrada geralmente de maneira empírica, para que as partículas em suspensão se desestabilizem completamente.

Segundo Casqueira et al. (2006), observou na realização do seu trabalho que os valores de tensão superiores a 10V promoviam um aglomerado denso e homogêneo de bolhas, sugerindo que sob estas condições haveria uma quantidade suficiente de gases disponíveis para o arraste eficiente dos contaminantes, o que não ocorreu quando utilizado o valor de 5V, pois neste ponto a eficiência de remoção do zinco foi somente de 30%, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Remoção do zinco por eletroflotação como função da tensão entre os eletrodos



Fonte: Casqueira et al. (2006)

A tensão é dependente da densidade da corrente, da condutividade do efluente, do espaçamento entre os eletrodos e do estado da superfície deles (CHEN et al., 2000) e uma forma de calcular seu valor necessário que uma determinada corrente elétrica passe pela solução pode ser feita pela equação abaixo (PRETORIUS et al., 1991, citado por HEMKEMEIR (2001); LARUE et al., 2003):

$$U = \frac{\delta \cdot d}{k} \quad (10)$$

Sendo:

U= tensão aplicada, V.

S= densidade da corrente, A/m².

d= distância entre os eletrodos, m.

k= condutividade do eletrólito, S/m.

A condutividade da solução afeta a tensão da célula e que experimentos feitos em efluentes contendo até 3,5% em massa de NaCl, ou seja, com um maior valor de condutividade, mostraram uma diminuição no valor da tensão elétrica da célula e conseqüentemente no consume de energia (MANSOUR e CHALBI, 2006).

2.4.5 Distância dos eletrodos

A distância entre os eletrodos desempenha um papel significativo em uma operação de CE. Tahreen et al. (2020) concluiu que campo eletrostático é maior quanto menor for a distância entre os eletrodos. Devido à forte colisão eletrostática, os hidróxidos de metal que auxiliam na formação de flocos para suportar a coagulação degradam.

Hakizamana et al. (2017) afirma que, a distância entre eletrodos define o tempo de residência entre o ânodo e o cátodo para um sistema contínuo e o tempo de tratamento para um reator descontínuo atingir uma eficiência de EC desejável e que para um arranjo complexo, a distância entre os eletrodos determina o número de eletrodos para colocar na eletrocoagulação quando o volume já está definido.

Para Shahedi et al. (2020), a distância entre os eletrodos é um parâmetro importante para a otimização do processo e está relacionado diretamente com os custos operacionais. Quando o efluente tem uma alta condutividade elétrica e uma densidade de corrente constante é usada para reduzir o consumo de energia, o espaçamento entre os eletrodos deve ser aumentado, no entanto, quando o efluente tem uma condutividade elétrica fraca, a distância entre os eletrodos deve ser reduzida para minuir o consumo (SHAHEDI et al., 2020).

2.4.6 Densidade da corrente

A densidade da corrente é um fator chave para a eficiência do processo eletrolítico, pois é através dele que a taxa de liberação de elétrons é determinada como consequência da dissociação dos íons metálicos dos elétrons.

O tempo de resposta do sistema eletrolítico está diretamente relacionado com a densidade da corrente, este parâmetro influencia também o modo dominante de separação do poluente. Para Tahreen et al. (2020), O excesso de corrente pode afetar negativamente a eficiência da EC, pois permite reação secundária e uma dosagem excessiva de coagulantes, podendo causar uma reversão de carga do colóides.

Através da equação abaixo pode ser calculada a densidade da corrente:

$$J = I/A_{anodo} \quad (11)$$

Sendo:

J : densidade da corrente (A/m^2),

I : intensidade da corrente (A),

A_{anodo} : área do anodo (m^2).

Conforme Shahedi et al. (2020), a densidade da corrente determina a taxa de produção de bolhas e o crescimento de flocos, que podem afetar a eficiência da EC. A dissolução do ânodo aumenta conforme a corrente é aumentada, com isso, os flocos de hidróxido de metal aumentam e a eficiência da remoção de contaminantes do efluente tem melhores resultados. A densidade da corrente é um parâmetro importante que requer otimização para realizar EC para o tratamento de água residual (TAHREEN et al., 2020).

2.4.7 Densidade da carga

A densidade de carga é um parâmetro que pode ser utilizado para projeto na eletrofloculação (KUMAR et al., 2004). O autor fez esta conclusão ao realizar um estudo na eficiência do processo de eletrólise na remoção de arsênio utilizando três diferentes tipos de eletrodos, aço, titânio e alumínio. A densidade de carga é definida pela equação 6:

$$C_f = I.t/F.v \quad (12)$$

Sendo:

C_f : densidade de carga (F/m^3),

I : intensidade da corrente (A),

t : tempo de aplicação (s),

F : constante de Faraday (96500 C/mol),

v : volume do efluente tratado (m^3).

2.4.8 Temperatura

Não existem muitas pesquisas referentes ao estudo do efeito da temperatura no processo de EF. Conforme Crespilho e Rezende (2004), alguns trabalhos realizados na Rússia mostraram que com uma temperatura até $60^\circ C$ a eficiência de EF com eletrodos de alumínio aumenta e acima desse valor ela diminui, porém, com o aumento da temperatura a condutividade aumenta diminuindo o consumo de energia elétrica.

2.4.9 pH

O pH é um fator chave que influencia o desempenho da EC, principalmente no mecanismo da coagulação porque governa o metal hidrolisado, espécies geradas em meios reativos influenciam os mecanismos prevalentes da CE (HAKIZIMANA et al., 2017).

Conforme Tahrren et al. (2020), o pH afeta a condutividade, potencial zeta, bem como a dissolução do eletrodo na solução de água residual. O pH precisa ser mudado ao longo do processo para relacionar a ligação direta entre ele e a EC. Medir o pH é a etapa mais

apropriada para determinar seu efeito na EC. Geralmente o pH de águas residuais é testado com a adição de bases comuns como a solução de NaOH e ácidos diluídos com os ácidos sulfúricos e clorídrico.

Para Shahedi et al. (2020), criando condições alcalinas e mudando o pH, hidróxidos de metal são produzidos aumentando a eficiência da remoção de contaminantes. Bener et al. (2019), estudou os diferentes efeitos de pH entre valores de 5,8 e 10 da remoção de TOC. A eliminação máxima de TOC em pH 5 foi de 65%, o resultado do teste mostrou que a eficiência de eliminação diminui com o aumento do pH, a razão para isso pode ser atribuída para a produção de gás hidrogênio no cátodo.

2.4.10 Tempo de eletrólise

Segundo Tahrren et al. (2020), a eficiência da remoção dos poluentes depende muito do tempo de eletrólise. Com tempos mais longos uma maior taxa de remoção é alcançada devido a geração de mais coagulantes metálicos em uma densidade de corrente constante.

Shahedi et al. (2020) afirma que, se tivermos um aumento no tempo de eletrólise haverá um número maior de hidróxido de metal e conseqüentemente uma maior eficiência na remoção de poluentes.

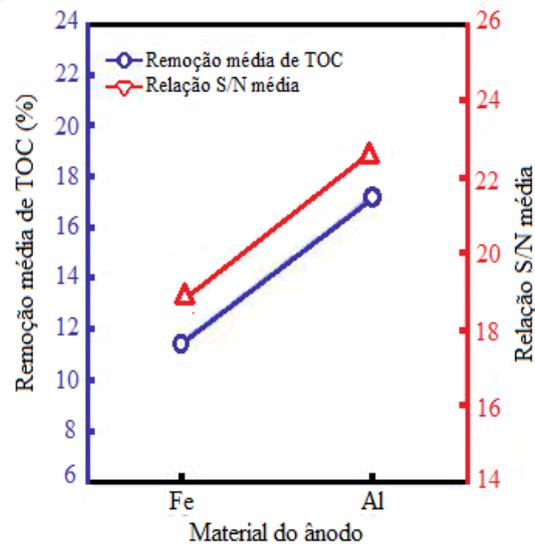
2.4.11 Material do eletrodo

O material do eletrodo tem uma grande influência em qualquer processo de eletrólise. Devido a fácil obtenção e o baixo custo, os materiais mais utilizados são o ferro e o alumínio.

O eletrodo de alumínio é um dos mais eficientes para a remoção de flocos e para remoção de poluentes, ressalta Tegladza et al. (2020). O autor ainda explana que, a solubilidade de flocos de Al é mínima em pH 6 e 7, o que indica que o tratamento das águas residuais pode ser executado de forma eficiente em soluções neutras e os flocos de Al geram complexos hidrolíticos polinucleares que garantem uma melhor adsorção de solúveis e espécies coloidais de águas residuais (TEGLADZA et al., 2020).

A Figura 4 mostra a eficiência de remoção de carbono orgânico total (TOC) entre eletrodos de alumínio e ferro.

Figura 4 - Eficiência remoção TOC



Fonte: Adaptado de Teglada et al. (2020)

2.4.12 Passivação dos eletrodos

Para Wiendl (1998), a passivação dos eletrodos é causada por um filme invisível de óxido na superfície metálica do eletrodo ou por um estado oxidado desta superfície. Segundo Crespilho e Rezende (2004), durante o processo de eletrólise, há um excesso de OH^- na região próxima ao cátodo fazendo com que a superfície seja atacada por ânions promovendo assim a formação do filme passivo.

A formação deste filme passivo compromete o tratamento pois leva a um aumento na resistividade do eletrodo, prejudicando assim a sua eficiência. A inversão de polaridade é uma tratativa dada para minimizar este fenômeno.

2.4.13 Disposição dos eletrodos

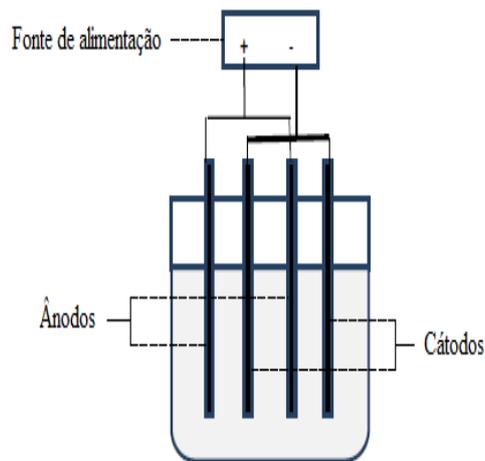
Conforme Hakizamana et al. (2017), a eficiência do processo de EC pode ser afetada pelo sistema de eletrodos através da disposição do seu arranjo e da distância entre os eletrodos.

Os principais arranjos de eletrodos se classificam com:

- a) Arranjo monopolar

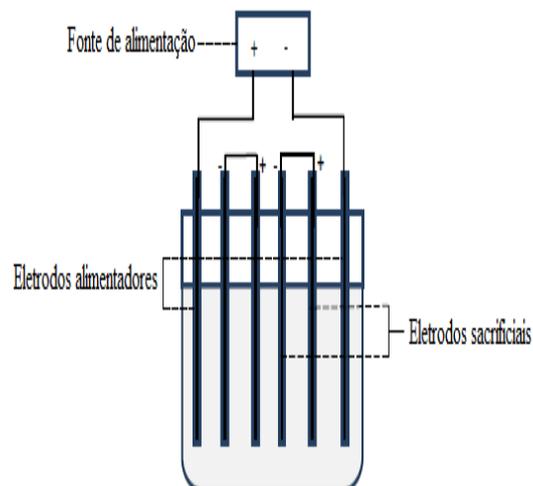
Nesta disposição eles podem ser conectados tanto em série quanto em paralelo, conforme demonstra abaixo as figuras 5 e 6. Segundo Hemkemeir (2001), o arranjo de eletrodos monopolar com células em série é eletricamente similar ao arranjo de uma célula simples, porém com mais componentes em seu conjunto.

Figura 5 - Desenho ilustrativo dos eletrodos monopolar com conexões paralelas



Fonte: Adaptado de Hakizamana et al. (2017)

Figura 6 - Desenho ilustrativo dos eletrodos monopolar com conexões em série

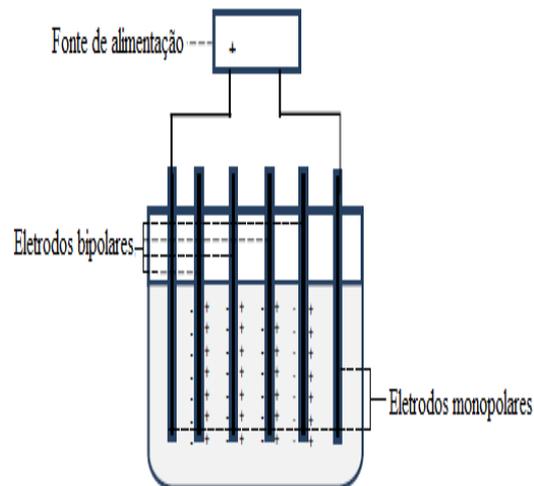


Fonte: Adaptado de Hakizamana et al. (2017)

b) Arranjo bipolar

Nesta disposição, os eletrodos de sacrifício são colocados no meio do arranjo e somente os eletrodos das extremidades são ligados a uma fonte de corrente, conforme ilustrado na figura. A vantagem deste esquema está na praticidade de manutenção do sistema (HEMKEMEIER, 2001).

Figura 7 - Desenho ilustrativo dos eletrodos bipolares com conexões em série



Fonte: Adaptado de Hakizamana et al. (2017)

2.4.14 Determinação dos custos do processo

Conforme Kobya (2015), a determinação dos custos do processo está diretamente ligada ao consumo de energia e os desgastes dos eletrodos e podem ser obtidos através da equação abaixo:

$$CO = \alpha \cdot C_{energia} + \beta \cdot C_{eletrodo} \quad (13)$$

Sendo:

CO= custo do processo

α = custo de energia

$C_{energia}$ = consume de energia (W/m^3)

β = custo do kilo do eletrodo

$C_{eletrodo}$ = consumo do eletrodo (g/m^3)

Estes dois fatores são obtidos pela utilização da lei de Faraday, sendo definidas pelas seguintes fórmulas propostas por Kobya (2015).

Para o consumo de energia:

$$C_{energia} = \frac{U.I.t_{ec}}{v} \quad (14)$$

Sendo:

U = tensão de corrente utilizada

I = intensidade da corrente (A)

t_{ec} = tempo de retenção hidráulica (h)

v = volume a ser tratado (m^3)

Para o consumo do eletrodo:

$$C_{eletrodo} = \frac{I.t_{ec}.M_w}{z.F.v} \quad (15)$$

Sendo:

I = intensidade da corrente (A),

t_{ec} = tempo de retenção hidráulica (s),

v = volume a ser tratado (m^3),

M_w = massa molar relativa do eletrodo de alumínio,

Z = número de elétrons em oxidação/redução=3,

F = constante de Faraday's= 96487 (C/mole).

2.4.15 Tempo de desgaste dos eletrodos

Um fator de grande importância para a elaboração de um equipamento de eletrólise é o tempo de desgaste dos eletrodos, pois ele definirá uma estimativa de tempo necessário para a troca dos eletrodos.

Segundo Wiendl (1998), o tempo pode ser determinado através da equação 6:

$$T = M/(a.l) \text{ ou } T = (d.V)/(a.l) \quad (16)$$

Sendo:

T : tempo de desgaste dos eletrodos (h),

M : massa inicial da colmeia (g),

α : equivalente eletroquímico do material do eletrodo (g/ A.h),

I : intensidade da corrente (A),

d : densidade do material do eletrodo (g/L),

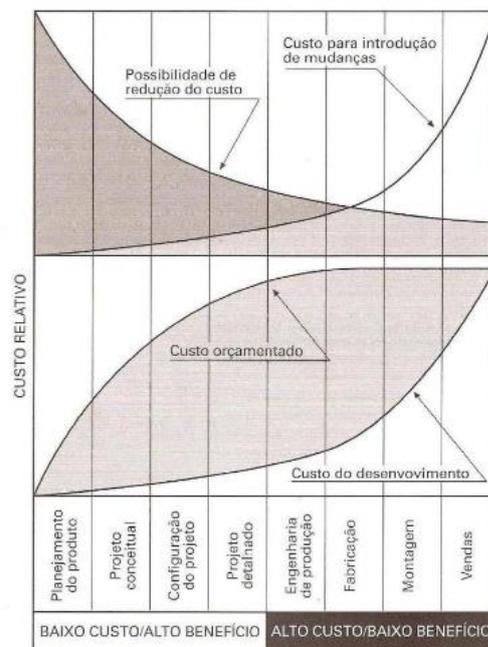
V : perda de volume do eletrodo (L).

2.5 Metodologia de desenvolvimento de projeto

Muitas expectativas são criadas ao desenvolver um novo projeto e para obtermos êxito neste desenvolvimento é necessário iniciar o projeto com boas especificações iniciais. Devemos seguir uma metodologia para termos um bom planejamento e eliminar ao máximo a possibilidades de falhas.

Baxter (2011) assegura que os estágios iniciais são os mais importantes para o desenvolvimento de novos produtos, o autor também afirma que os custos nos estágios iniciais são pequenos e que eles vão crescendo até o início da fabricação, conforme demonstra a Figura 8.

Figura 8 - Custos e benefícios em diferentes estágios do processo de desenvolvimento



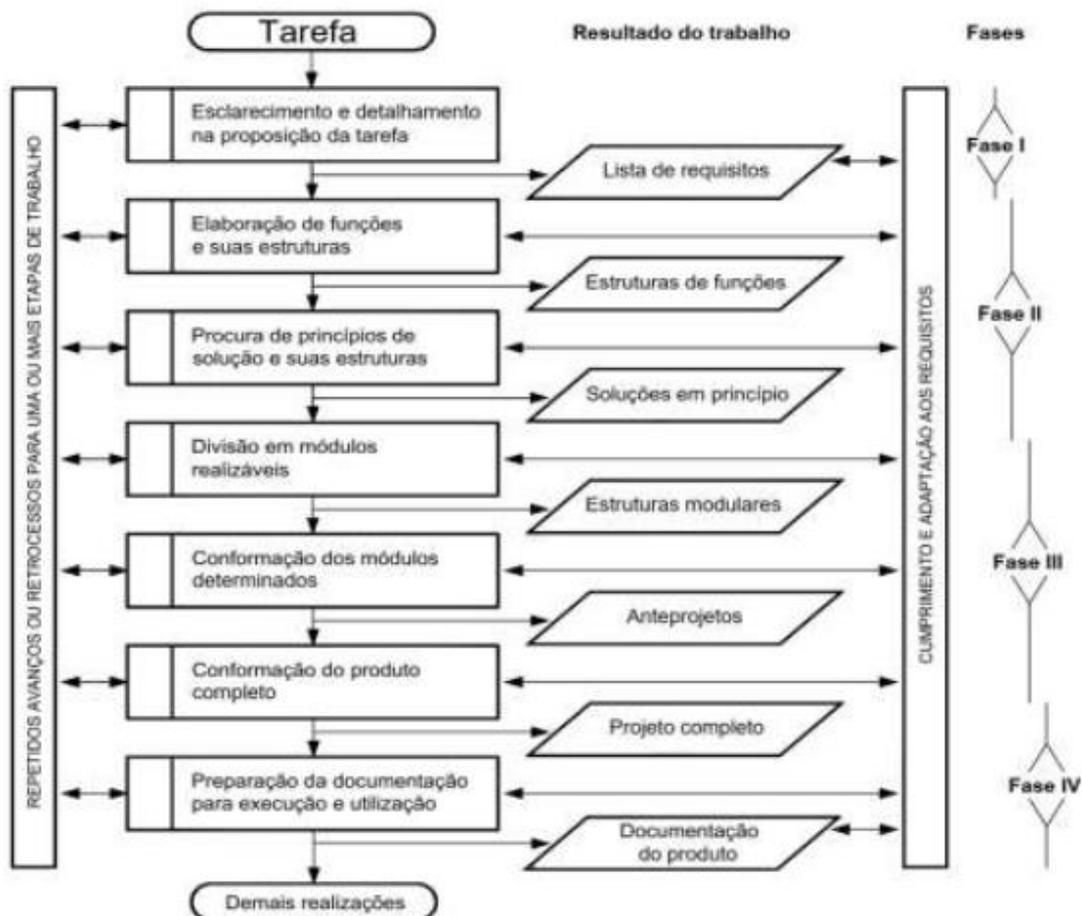
Fonte: Baxter (2011)

O estudo em específico se condiz na metodologia conforme Pahl et al. (2005), onde o desenvolvimento de projeto é seguido de quatro fases que pode ser observada na Figura 9, que tem como objetivo atender as demandas mecânicas da estrutura, sendo elas:

- a) Especificação do projeto;
- b) Projeto conceitual;
- c) Anteprojeto;
- d) Projeto detalhado;

A metodologia sugerida por Pahl et al. (2005) é mais sólida, sendo mais apropriada para projetos mecânicos. A metodologia aborda um projeto como uma atividade sistemática estruturada, com pontos bem estabelecidos e métodos a serem empregados em cada uma delas.

Figura 9 - Procedimento geral para desenvolvimento de projetos



Fonte: Pahl et al. (2005).

2.5.1 Especificações de projeto

O esclarecimento e a determinação das especificações, são extremamente necessários para obter um bom resultado na elaboração e na execução de um projeto Pahl et al. (2005), nesta etapa as necessidades do projeto são alcançadas através de uma lista de requisitos.

Conforme Pahl et al. (2005), a lista de requisitos busca a explicação para as seguintes questões:

- Qual é a finalidade da solução objetivada?
- Quais características ela deve apresentar?
- Quais as características ela não deve ter?

Nesta etapa, a lista de requisitos é o documento mestre e para que ela tenha êxito é necessário a participação de todas as pessoas envolvidas no desenvolvimento do projeto. Um ponto muito essencial para a elaboração da lista é o registro das sugestões feitas pelas pessoas envolvidas no projeto, pois quando surgirem dúvidas ao decorrer do projeto fica fácil de identificar a quem consultar.

2.5.2 Projeto conceitual

A definição de conceito para Pahl et al. (2005) é a parte do projeto que após, a explicação do problema, por isolamento dos problemas principais, a elaboração de estruturas da função e a busca de princípios de funcionamento adequados, junto com a sua combinação na estrutura de funcionamento, determina a solução preliminar da concepção e a definição de uma solução inicial.

A fase de projeto conceitual é composta das seguintes etapas:

1. Abstração para identificação dos problemas essenciais;
2. Elaboração da estrutura de funções, função global – Subfunções principais e secundárias;
3. Procura de princípio de trabalho para atendimento das subfunções;
4. Combinação dos princípios de trabalho para a estrutura de funções;
5. Seleção de combinações apropriadas;
6. Concretização de variantes de soluções de ideias;
7. Avaliação segundo critérios técnicos e econômicos;

8. Determinação de solução inicial.

2.5.3 Anteprojeto

De acordo com Pahl et al. (2013), esta fase parte-se de uma estrutura de funcionamento e constrói-se de maneira clara e completa a estrutura do produto

Nesta fase são definidas as configurações da solução segundo critérios técnicos e econômicos tendo em vista a estrutura de funcionamento ou a solução básica. A principal premissa desta fase é que projeto seja suficientemente definido para que possa ser avaliado todos os fatores que o envolvem. Esta fase não é exclusivamente utilizada no desenvolvimento de novos produtos, ela pode ser utilizada na correção de falhas e na melhoria de projetos e produtos já existentes.

Segundo Back (1993), para realização do anteprojeto é necessário que um protótipo seja testado, assim as viabilidades técnicas, econômicas e as necessidades de melhorias poderão serem analisadas.

2.5.4 Projeto detalhado

Na fase do projeto detalhado, precisa ser determinado o conjunto geral e as melhores soluções construtivas para os processos de produção. Para Pahl et al. (2005), a etapa do detalhamento de projeto contém determinações decisivas para a forma e o dimensionamento de todos os componentes.

A elaboração dos documentos para a fabricação de peças e conjuntos, desenhos técnicos, procedimentos de montagem, manual de instruções, entre outros, são os principais pontos desta fase.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo a apresentação da metodologia empregada para se obter os resultados do desenvolvimento do equipamento para o tratamento do efluente da lavagem de veículos, com o escopo de reutilizar o efluente gerado por este processo.

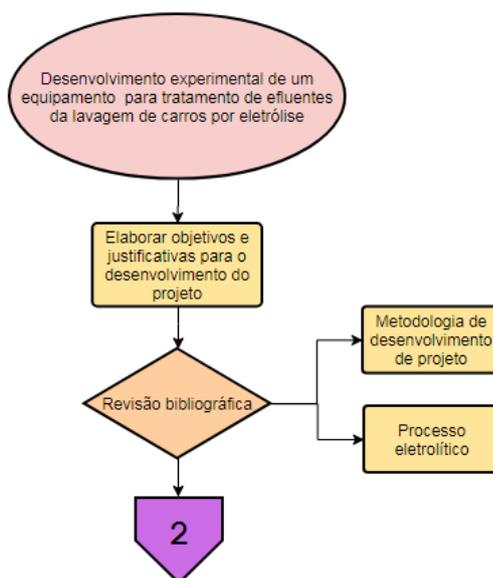
O projeto do equipamento foi desenvolvido seguindo o procedimento metódico proposto por Pahl et al. (2005), resultando em um protótipo experimental e um projeto conceitual.

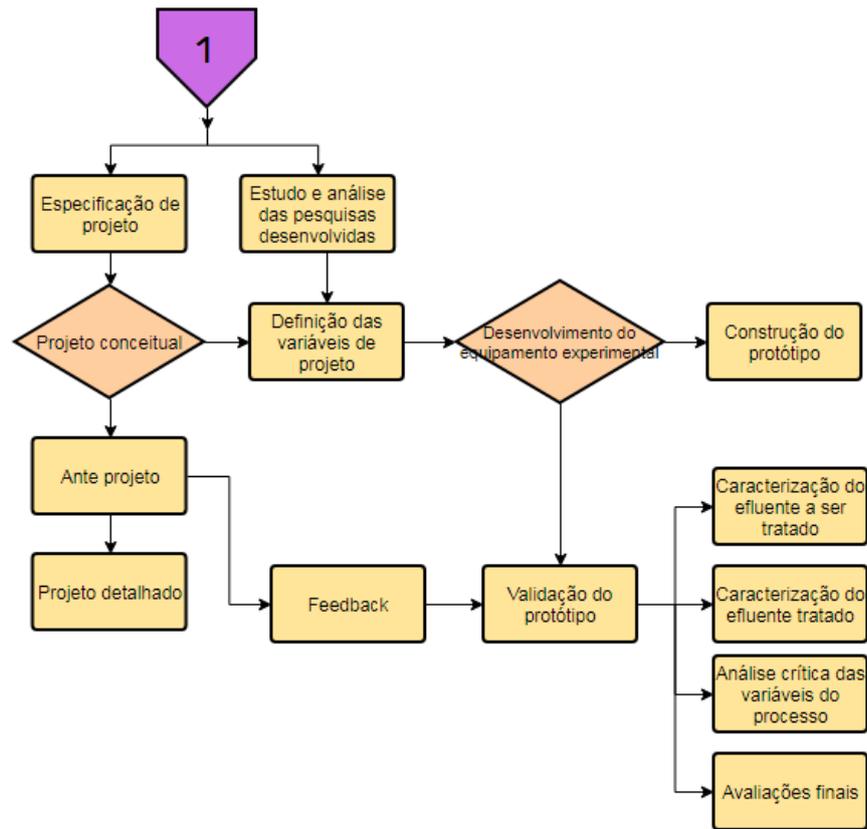
O Primeiro passo ao iniciar a pesquisa foi analisar o efluente a ser tratada e de como funciona o processo eletrolítico. Em seguida iniciou-se a fase de planejamento do equipamento proposta pelo procedimento metódico de Pahl et al. (2005), este planejamento resultou na lista de requisitos. Terminando a fase de planejamento, iniciou-se a fase de concepção a qual obteve como resultado a matriz morfológica,

3.1 Delineamento da pesquisa

A pesquisa, elaboração e o desenvolvimento do sistema de tratamento foram realizados na Universidade de Passo Fundo, especificamente nos laboratórios da faculdade de engenharia. Para o desenvolvimento da pesquisa foi criado um fluxograma contendo as principais atividades de desenvolvimento do equipamento (Figura 10).

Figura 10 - Fluxograma de desenvolvimento





Fonte: Autor (2021)

O projeto foi estruturado por uma metodologia adequada para a obtenção de subsídios mínimos para iniciar o desenvolvimento do trabalho.

Por apresentar melhores propostas de desenvolvimento, a metodologia escolhida foi a proposta por Pahl et al. (2005), sendo ela composta pelas seguintes etapas: especificação do projeto e a elaboração do projeto conceitual.

3.2 Local da pesquisa

O estudo foi realizado na Universidade de Passo Fundo, todas as análises foram feitas nos laboratórios da faculdade de engenharia onde tínhamos à disposição os equipamentos phametro, turbidímetro, bloco digestor e espectrofotômetro necessários para a realização das análises das amostras.

3.3 Característica do efluente bruto

O efluente analisado nos testes foi fornecido por uma concessionária da região do planalto médio. Esta empresa tem um grande comprometimento com o meio ambiente. A concessionária já conta com um bom sistema de tratamentos para os efluentes gerados, sendo composto de caixa de areia e caixa separadora Água/Óleo, mas o efluente tratado não é reusado. O efluente tratado pelo sistema da concessionária de veículos foi denominado nesta pesquisa de efluente bruto e o efluente após passar pelo sistema eletrolítico denominado de efluente tratado.

O efluente a ser tratado foi caracterizado pelos padrões definidos pela Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. As amostras coletadas foram caracterizadas pelos parâmetros de turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), pH e condutividade elétrica. Os ensaios foram realizados com dois tipos de amostras (efluente bruto e efluente tratado). O efluente considerado bruto na pesquisa é um efluente já tratado que foi coletado da saída da caixa separadora água/óleo de uma concessionária. O efluente tratado é referente ao obtido a partir dos experimentos com o protótipo do equipamento eletrolítico.

3.4 Especificação do projeto

Conforme Pahl et al. (2005), a segurança, ergonomia, produção, controle, montagem, transporte, emprego, manutenção, reciclagem e gastos, são consideradas essenciais para o desenvolvimento do projeto. O ponto de partida para o desenvolvimento do projeto é a criação de uma linha mestra de requisitos que delimitará o projeto e com o atendimento das condições delimitadas se obtêm o êxito na elaboração e na implementação do projeto (PAHL et al., 2005).

Como etapa de início do desenvolvimento, foi elaborada uma linha mestra com a função de especificar os atributos para o planejamento do projeto, então realizou-se uma pesquisa para buscar as características que iriam delinear as propriedades que mais influenciariam no equipamento. A Figura 11 está representando a linha mestra de desenvolvimento do projeto, procedida das condicionantes gerais para o projeto e com base nos principais atributos e necessidades do equipamento.

Figura 11 - Linha mestra do projeto



Fonte: Autor (2021)

3.4.1 Lista de requisitos

Depois de definida a linha mestra de delineamento do projeto, com menciona Pahl et al. (2005), cada linha mestra deve ser separada por requisitos de devem, serem adotadas e analisadas no projeto. Os requisitos se classificam como desejáveis (D) e exigidos (E).

Após a elaboração da linha mestra do projeto, ela deve se transformar em uma lista de requisitos mínimos, que necessitam de um acompanhamento durante todo o desenvolvimento do projeto, podendo ser modificado durante as fases de desdobramento dos elementos da linha mestra.

A lista de requisitos foi uma das principais fases do projeto, sendo formada com alicerce na revisão bibliográfica estudada e na linha mestre do projeto. Esta lista foi fundamental para o desenvolvimento do projeto servindo como base de referência, contando todas as características do mesmo classificadas em desejáveis e exigidas.

O Quadro 1 apresentado a seguir, é o resultado do desmembramento das linhas mestres do projeto apresentando se seus requisitos são desejados (D) ou exigido (E).

Quadro 1 - Lista de requisitos para o equipamento

Projeto: Equipamento para o tratamento de efluentes de lavagem de carros			
Linha mestra	Requisito	D/E	Responsável
Controle	Controlar pH do efluente	E	Schenkel
	Controlar tensão do tratamento (V)	E	Schenkel
	Controlar corrente do tratamento (A)	E	Schenkel
	Controlar volume dos reservatórios	E	Schenkel
	Monitorar desgaste dos eletrodos	D	Schenkel
Operação	Fácil operação	E	Schenkel
	Possibilitar regulagem dos parâmetros	E	Schenkel
	Operação manual	E	Schenkel
	Operação automática	D	Schenkel
Segurança	Atender normativas existentes (NR 10,12...)	E	Schenkel
	Garantir segurança dos operadores	E	Schenkel
Manutenção	Utilizar itens padrões	D	Schenkel
	Possibilitar remoção e substituição	E	Schenkel
	Possibilitar remoção e reinstalação	E	Schenkel
Estrutura do equipamento	Ser leve	D	Schenkel
	Poder tratar 500 l/h	E	Schenkel
	Fácil movimentação	E	Schenkel
	Fácil instalação	E	Schenkel
Produção e montagem	Produto modulável	E	Schenkel
	Utilizar processos de produção simples e baratos	D	Schenkel
Elaborado:	Raul Schenkel	Data:	13/05/2020
Revisado:	Raul Schenkel	Data:	27/11/2021

Fonte: Autor (2021)

3.5 Projeto conceitual

Segundo Pahl et al. (2005), a fase do projeto conceitual é seguida pelas seguintes etapas: abstração de ideias, elaboração da função global, busca de soluções e avaliações quantitativas e qualitativas das concepções.

Na etapa do projeto conceitual deve-se considerar todas as sugestões, é nesta fase do projeto que os conceitos inovadores são idealizados através da criatividade.

3.5.1 Abstração de ideias

A abstração de ideias tem como principal objetivo entender e definir a função global do projeto, procurando atingir o foco do problema. Pahl et al. (2005) menciona que, se a abstração de ideias for bem-sucedida teremos como resultado uma função básica inicial bem

delineada sem existência de uma solução particular. A abstração de ideias é composta por cinco etapas, são elas:

1° etapa: necessita-se suprimir vontades mentalmente;

2° etapa: necessita-se focar apenas nos requisitos que afetam as funções principais;

3° etapa: necessita-se converter requisitos quantitativos em qualitativos;

4° etapa: necessita-se adicionar o que foi constatado;

5° etapa: necessita-se elaborar o problema de forma imparcial relacionado diretamente com a solução.

No processo de abstração de ideias, obteve-se o resultado mostrado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Abstração de ideias para o desenvolvimento do equipamento

Resultado da 1ª etapa
Controlar a tensão do tratamento (V)
Controle corrente do tratamento (A)
Monitorar desgastes do eletrodo (g)
Regulagem dos parâmetros
Resultado da 2ª etapa
Atender as normas de segurança
Fácil remoção e substituição dos componentes
Reservatório com capacidade de tratar 500l
Produto modulável
Resultado da 3ª etapa
Diferentes variações de parâmetro do efluente a ser tratado
Projeto de equipamento modulável
Resultado da 4ª etapa
Eficiência no tratamento de efluentes
Resultado da 5ª etapa
Garantir o tratamento do efluente proveniente da lavagem de veículos, através de um equipamento de fácil operação, modulável e que tenha eficiência no processo.

Fonte: Autor (2021)

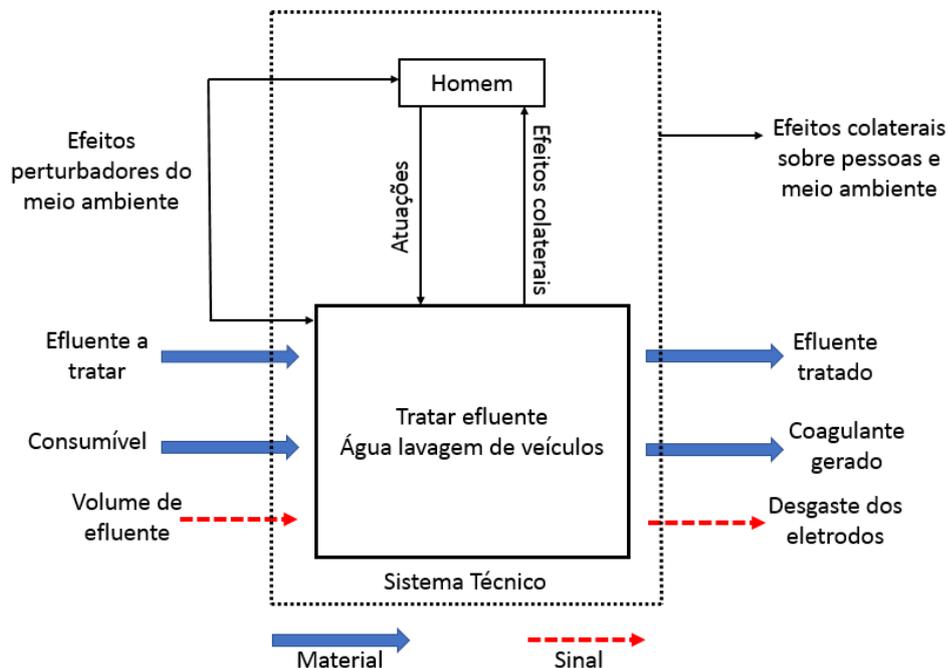
O resultado final da etapa de abstração de ideias, norteia o estabelecimento da função global que é apresentado a seguir.

3.5.2 Elaboração da função global

Segundo Pahl (2005), a estrutura da função global deve possuir variáveis de entrada e saída, conversão e transformação para delimitar a função global do equipamento. Esta função deve ser o mais simples possível, para que seja produzido um sistema simples e viável nos sentidos econômicos, financeiros e operacionais.

A elaboração da função global foi realizada com foco nas principais funções do equipamento, baseando-se na abstração de ideias, tendo como variável de entrada o efluente a ser tratado, o volume do efluente a ser tratado e o consumível. A função principal foi definida como sendo o tratamento do efluente gerado pelo processo de lavagem de veículos. A variável de saída foi definida como sendo a qualidade do efluente tratado e o volume, a energia elétrica consumida foi estabelecida como o sinal de saída. A configuração da função global pode ser verificada na Figura 12.

Figura 12 - Função global do equipamento



Fonte: Autor (2021)

Depois da elaboração da função global, ela foi desmembrada em subfunções que tiveram como objetivo atender e garantir a função global e a compatibilidade com as soluções experimentadas.

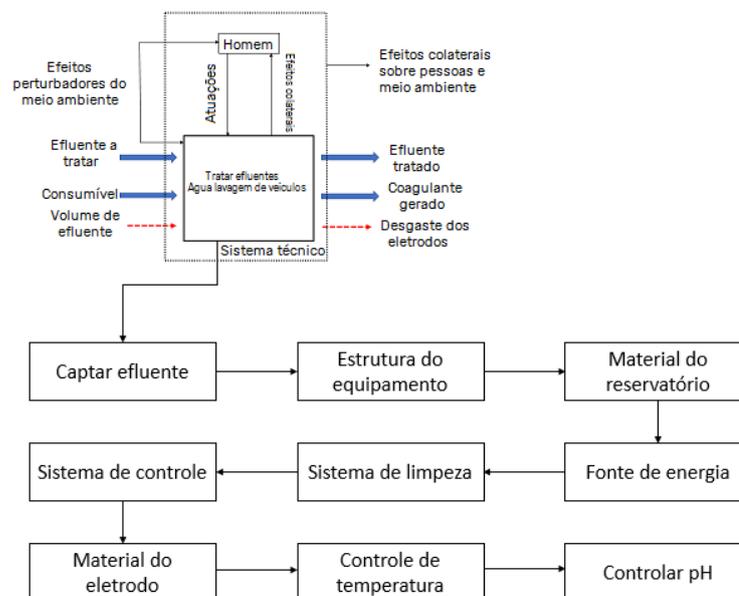
Para o projeto do equipamento foram definidas as seguintes subfunções: captar o efluente, controlar a entrada do efluente, prover estrutura, transportar efluente, armazenar o efluente, prover material e controlar o pH. Na Figura 12, estão mostradas as subfunções do projeto em estudo.

3.5.3 Elaboração das subfunções

Conforme Pahl et al. (2005), para a elaboração das subfunções deve-se dividir a função global com o objetivo de desenvolver inúmeras soluções de fácil e resolução. Com isto, transformamos um problema de alta complexidade em pequenos problemas de fácil solução. Quanto maior for o número de subfunções delimitadas, maior será o detalhamento do processo de concepção de projeto.

Para as subfunções desenvolvidas do projeto, foram estudadas no mínimo duas soluções, estas foram fundamentadas em aplicações que teoricamente atenderiam adequadamente os atributos de cada subfunção conforme especificada na Figura 13.

Figura 13 - Subfunção do projeto



Fonte: Autor (2021)

O quadro com as subfunções (Quadro 2) está montado com 9 linhas e 3 colunas de soluções, algumas não possuem uma solução ideal, por este motivo não estão preenchidas. As soluções foram mostradas de uma forma clara, para obter um melhor entendimento.

Apresentamos de forma sucinta as soluções propostas para cada subfunção:

a) **Sistema de captação de efluente:** Três possibilidades foram pensadas para a captação do efluente a ser tratado, podendo ser com bomba centrífuga, bomba submersa e bomba pneumática.

b) **Estrutura do equipamento:** Para a estrutura do equipamento foram levantadas duas opções, uma estrutura em aço carbono e uma estrutura em alumínio. A estrutura em aço carbono precisa de um revestimento superficial para evitar a corrosão, já a em alumínio não ocorre problemas com corrosão e é mais leve, porém tem maior custo.

c) **Material do reservatório:** Três possibilidades foram estudadas, reservatório em polipropileno, fibra de vidro e inox, sendo o reservatório de polipropileno e de fibra de vidro possível de fabricação ou compra, já no caso do reservatório de inox teria que ser um conjunto soldado.

d) **Fonte de energia:** A fonte de energia que alimentará os eletrodos, pode ser gerada através de uma fonte chaveada que tem melhor custo/benefício ou uma fonte regulável que permite uma maior variação dos parâmetros.

e) **Sistema de limpeza:** Para fazer a remoção da camada floculada será utilizado um sistema de limpeza podendo ser ele com acionamento mecânico ou pneumático, este sistema irá movimentar duas pás raspadoras e estas irão remover o lodo gerado pelo processo para um reservatório de descarte do resíduo.

f) **Sistema de controle:** O controle poderá ser utilizado de maneira manual, com acionamento individuais e devidos sensores ou por sistema de CLP que poderá ser criado um controle programável podendo vir a monitorar o equipamento a distância.

g) **Material dos eletrodos:** Os eletrodos aplicados na eletrólise podem ser de aço ou alumínio ambos têm resultados semelhantes, o aspecto que deve ser avaliado é o valor de cada material.

h) **Controle de temperatura:** É uma das condições que podem influenciar no processo, sendo assim, podemos idealizar o equipamento com ou sem controle.

i) **Controle de pH:** Semelhante ao controle de temperatura, é uma condição que pode influenciar o processo conceber com ou sem controle.

Quadro 2 - Concepções alternativas para o desenvolvimento do equipamento

Subfunções	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Sistema de captação de efluente	Bomba centrífuga	Bomba submersa	Bomba pneumática
Estrutura do equipamento	Alumínio	Aço	
Material do reservatório	Fibra de vidro	Polipropileno	Aço inox
Fonte de energia	Fonte chaveada	Fonte regulável	
Sistema de limpeza	Mecânico	Pneumático	
Sistema de controle	Manual	CLP	
Material dos eletrodos	Alumínio	Aço	
Controle de temperatura	Sem controle de temperatura	Termopar	
Controle pH do efluente	Sem controle de pH	Com controle de pH	

Fonte: Autor (2021)

Com a terminação da etapa de montagem das subfunções realizou-se a busca de soluções para cada subfunção criada. Nesta etapa, buscou-se o maior número de alternativas para o atendimento de cada subfunção criada, tendo em mente que todas as soluções encontradas são executáveis. As soluções são apresentadas em um quadro com ilustrações das soluções encontradas.

Realizou-se uma combinação das opções de cada subfunções com as possíveis combinações para o projeto, com a finalidade de encontrar variações que atendam a função global. Para a realização destas combinações foram analisados parâmetros que atendam aos requisitos do equipamento, que sejam de fácil processo de fabricação e também foi considerado o custo de cada opção para cada subfunção.

O Quadro 3 apresenta quatro versões de possíveis concepções para o projeto conceitual que atende a função global, V1, V2, V3 e V4, correspondem a solução apresentada na matriz morfológica.

Quadro 3 - Matriz morfológica com variantes do equipamento

Subfunções	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Sistema de captação de efluente	Bomba centrífuga	Bomba submersa	Bomba pneumática
Estrutura do equipamento	Alumínio	Aço	
Material do reservatório	Fibra de vidro	Polipropileno	Aço inox
Fonte de energia	Fonte chaveada	Fonte regulável	
Sistema de limpeza	Mecânico	Pneumático	
Sistema de controle	Manual	CLP	
Material dos eletrodos	Alumínio	Aço	
Controle de temperatura	Sem controle de temperatura	Termopar	
Controle pH do efluente	Sem controle de pH	Com controle de pH	

V1
V2
V3
V4

Fonte: Autor (2022)

3.5.4 Busca das concepções ideias

Coletadas as soluções de cada subfunção, obteve-se segundo Pahl (2005), a interligação entre as soluções levantadas, sendo buscadas todas as combinações teoricamente aplicáveis no atendimento da função global do equipamento.

3.5.5 Avaliação qualitativa e quantitativas das concepções

Com as concepções do projeto levantadas, necessitou-se de um método qualitativo e quantitativo para descartar as alternativas não desejáveis para o equipamento. Foi utilizado o método qualitativo recomendado por Pahl (2005), onde a continuidade do desenvolvimento da proposta de solução do projeto precisa atender a lista de requisitos, encontrar uma possibilidade de construção, permitir a antecipação dos custos envolvidos e principalmente as subfunções sejam compatíveis entre si e entre a função global.

Para a avaliação quantitativa das concepções desejáveis, através da diretriz VDI2225, utilizou-se uma análise numérica técnico-econômica segundo a indicação de Pahl et al. (2005). Grande parte deste método baseia-se na lista de requisitos do projeto e de requisitos intuitivos, onde seus critérios e pesos são adotados por suposições.

Para cada característica almejado no projeto, atribui-se um peso, sendo que a soma absoluta destes pesos não exceda a 1 e cada característica devidamente pontuada foi multiplicada pelos critérios definidos pela VDI2225. A concepção com a maior soma é aquela que apresenta uma melhor condição inicial para o desenvolvimento de um projeto.

Ao fazer o questionamento divulgado no Quadro 4 obteve-se como consequência duas concepções que acataram totalmente a função global, sendo elas a concepção denominada V3 e a concepção denominada V4. As outras concepções foram descartadas pois não ofereceram parâmetros para a regulação da fonte de energia.

O próximo passo é uma avaliação numérica destas concepções, pelo meio da diretriz VDI2225, sendo a pontuação fundamentada na lista de requisitos e requisitos intuitivos.

A Figura 14 exibe a árvore de requisitos e o peso de cada valor, pelo qual as concepções foram conceituadas.

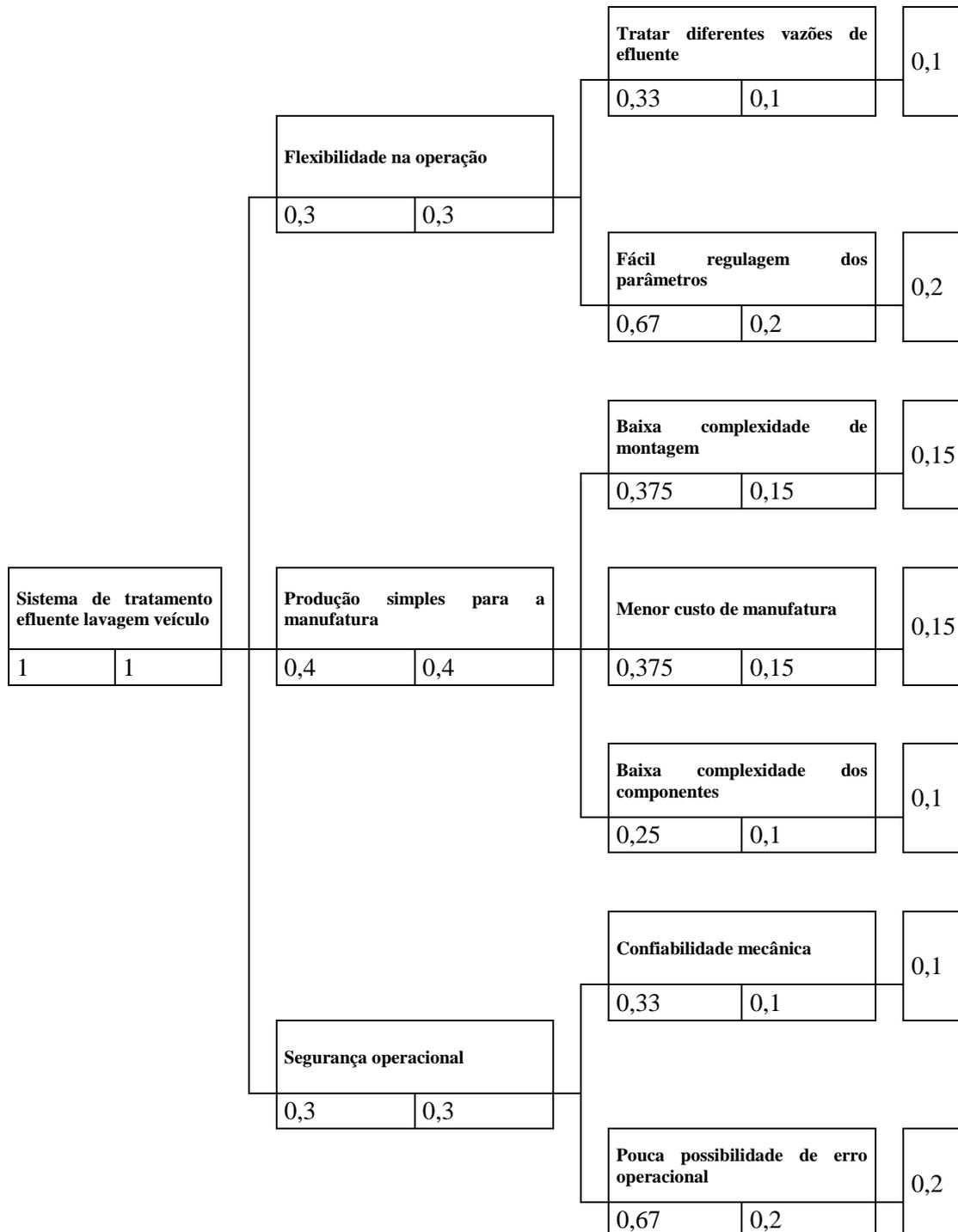
Contudo é imprescindível que cada um dos seis requisitos levantados, sejam avaliados quantitativamente e qualitativamente. Para cada requisito, foram estabelecidas notas de 0 a 4 segundo o atendimento ou não da função descrita no Quadro 5.

Quadro 4 - Avaliação qualitativa dos componentes da matriz morfológica

Lista de seleção das variantes de solução				Folha 1 de 1			
Projeto: Equipamento para tratamento de efluente da lavagem de veículos							
Variantes da solução	Simbologia dos critérios de avaliação			Decidir			
	(+ Sim			Simbologia			
	(- Não			(+ Continuar desenvolvimento			
	(?) Faltam informações			(- Eliminar a solução			
	(!) Verificar lista de requisitos			(?) Obter informações reavaliar solução			
	Atende a lista de requisitos			(!) Verificar lista de requisitos sobre alterações			
	Satisfeitas exigências da lista de requisitos						
	Flexibilidade nos testes						
	Em princípio realizável						
	Tem funcionalidade						
	A	B	C	D	Observações / Sugestões / Justificativas / Impacto	Decisão	
V1	+	-	+	+	Fonte chaveada não permite variabilidade nos parâmetros para testes	-	
V2	+	-	+	+	Fonte chaveada não permite variabilidade nos parâmetros para testes	-	
V3	+	+	+	+	Baixo custo para fazer a estrutura do equipamento em aço carbono e o reservatório em polipropileno	+	
V4	+	+	+	+	Alto custo para fazer a estrutura do equipamento em alumínio e o reservatório em aço inox	+	

Fonte: Autor (2022)

Figura 14 - Árvore de requisitos do projeto



Fonte: Autor (2022)

Quadro 5 - Atribuições dos valores para avaliação

Escala de valores	Magnitude						
VDI 2225							
Pontos	Tratar diferentes vazões de efluente	Fácil regulagem de parâmetros	Baixa complexidade de montagem	Menor custo de manufatura	Baixa complexidade dos componentes	Confiabilidade mecânica	Pouca possibilidade de erro operacional
0	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
1	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
2	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
3	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
4	Bem elevada	Bem elevada	Bem elevada	Bem elevada	Bem elevada	Bem elevada	Bem elevada

Fonte: Autor (2022)

Ao fazer a multiplicação do fator de peso do requisito, Figura 14, pelo fator qualitativo do Quadro 6, conseguiu-se alcançar uma nota para cada um dos requisitos listados, sendo assim realizado a soma. Foi escolhido a solução que conseguiu a máxima pontuação (Quadro 6). A concepção que alcançou a máxima pontuação foi a concepção V3, ela é composta pelos seguintes princípios de solução (Quadro 7).

Quadro 6 - Avaliação quantitativa das variáveis de solução

Critérios selecionados		Parâmetro avaliativo	Variante V3			Variante V4		
Valor			Magnitude	Pontuação	Valor ponderado	Magnitude	Pontuação	Valor ponderado
Tratar diferentes vazões de efluente	0,1	Variabilidade	Média	2	0,2	Média	2	0,2
Fácil regulagem de parâmetros	0,2	Variabilidade	Bem elevada	4	0,8	Baixa	1	0,2
Baixa complexidade de montagem	0,15	Simplicidade de montagem	Elevada	3	0,45	Elevada	3	0,45
Menor custo de manufatura	0,15	Investimento	Média	2	0,3	Baixa	1	0,15
Baixa complexidade dos componentes	0,1	Investimento	Baixa	1	0,1	Baixa	1	0,1
Confiabilidade mecânica	0,1	Segurança operacional	Elevada	3	0,3	Elevada	3	0,3
Pouca possibilidade de erro operacional	0,2	Confiabilidade	Média	2	0,4	Média	2	0,4
Soma	1		Soma	17	2,55	Soma	13	1,8

Fonte: Autor (2022)

Quadro 7 - Resumo da concepção V3

Variante		Concepção
1	Sistema de captação do efluente	Bomba centrífuga
2	Estrutura do equipamento	Aço carbono
3	Material do reservatório	Polipropileno
4	Fonte de energia	Regulável
5	Sistema de limpeza	Mecânico
6	Sistema de controle	Manual
7	Material dos eletrodos	Alumínio
8	Controle de temperatura	Sem
9	Controle de pH do efluente	Sem

Fonte: Autor (2022)

3.6 Validação do protótipo

Para validação do protótipo experimental idealizado dentro dos laboratórios da UPF, foram estipuladas duas variáveis para verificar as condições operacionais em processo contínuo do equipamento, sendo elas:

- a) Tempo de eletrólise (TDH);
- b) Qualidade do efluente bruto;

A vazão foi variada para verificar a influência do TDH na qualidade do efluente tratado e os testes foram feitos com amostras de diferentes qualidades.

As variáveis do processo foram agrupadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis do processo para tratamento do efluente

Teste	Vazão	TDH
1	5 L/h	1 h
2	6 L/h	0,83 h
3	9 L/h	0,55 h
4	20 L/h	0,25 h

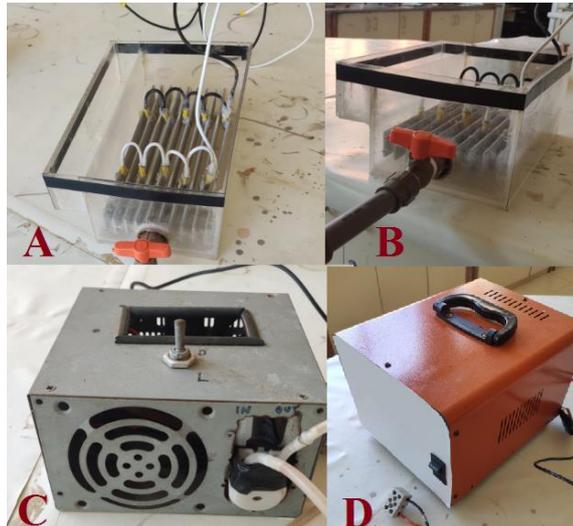
Fonte: Autor 2022

3.7 Características do equipamento idealizado

O protótipo experimental (Figura 15) é composto pelos seguintes itens:

- a) 1 reservatório confeccionado de acrílico com a capacidade de 5 l;
- b) 1 colmeia de eletrodos fabricada em alumínio, sendo as placas ligadas em série;
- c) 1 fonte inversora de 220 v, responsável pelo fornecimento de corrente aos eletrodos, com variação de 6 A, sendo a tensão escrava da corrente;
- d) 1 conjunto de tubulação em PVC rígido;
- e) 1 válvula para ajuste das vazões;

Figura 15: Protótipo experimental para o tratamento do efluente (a) Reservatório / Eletrodos, (b) Válvula para controle de vazão, (c) Bomba de sucção peristáltica, (d) Fonte de energia.



Legenda: Fonte: Autor (2021)

3.8 Principais variáveis do processo

O estudo e a determinação das variáveis foram através do trabalho realizado por Wegener (2019), sendo descrito abaixo os principais resultados encontrados e que deverão ser aferidos no teste de campo para a validação do protótipo.

3.8.1 Principais variáveis estudadas

Conforme Wegener (2019), foram estudadas algumas variáveis de processo, em especial a densidade da corrente e tempo de eletrólise ou TDH. Com estes dados podemos obter as seguintes informações, consumo de energia, consumo do eletrodo e densidade de carga. Os valores e resultados encontrados por Wegener (2019) foram os seguintes: Densidade de corrente 40 A/m^2 , área do eletrodo alumínio $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, tempo de eletrólise 2400s, volume a ser tratado $0,0016 \text{ m}^3$, espaçamento entre eletrodos 10mm e tensão de alimentação 30v.

Com estes dados buscou-se o dimensionamento do projeto conceitual buscando equivalência entre o protótipo experimental executado em laboratório que foi desenvolvido em uma escala menor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A discussão dos resultados obtidos pela pesquisa está dividida pelos seguintes tópicos: definição do projeto conceitual, elaboração e construção do protótipo, definição das variáveis de processo e avaliação do efluente tratado pelo protótipo.

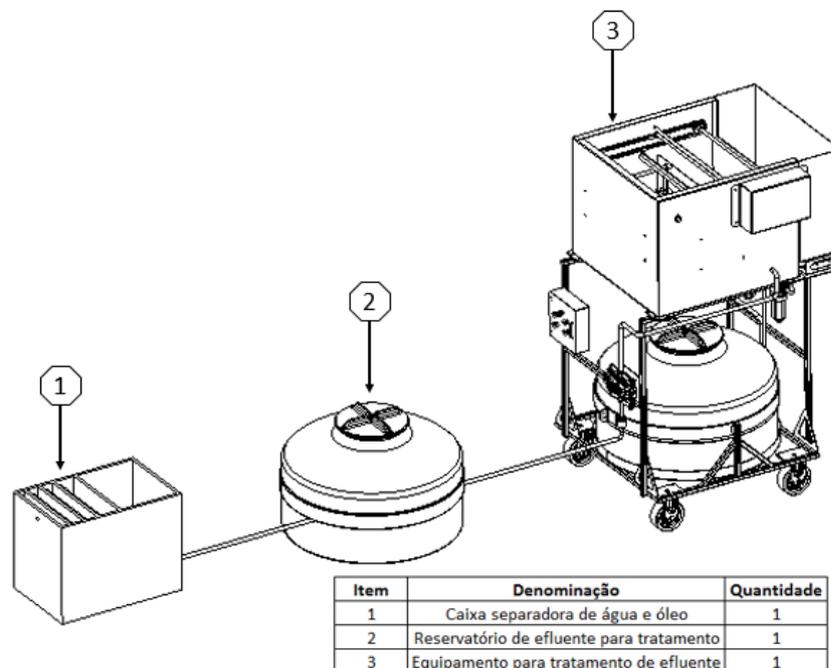
4.1 Definição do projeto conceitual

Será exibido nesta fase o resultado da elaboração do projeto conceitual, que foi desenvolvido conforme a metodologia proposta por Pahl (2005).

4.2 Desenvolvimento do projeto conceitual

Como principal resultado da aplicação da metodologia de Pahl et al. (2005) obteve-se o projeto conceitual (Figura 16), o equipamento foi determinado com as configurações observadas na lista de requisitos.

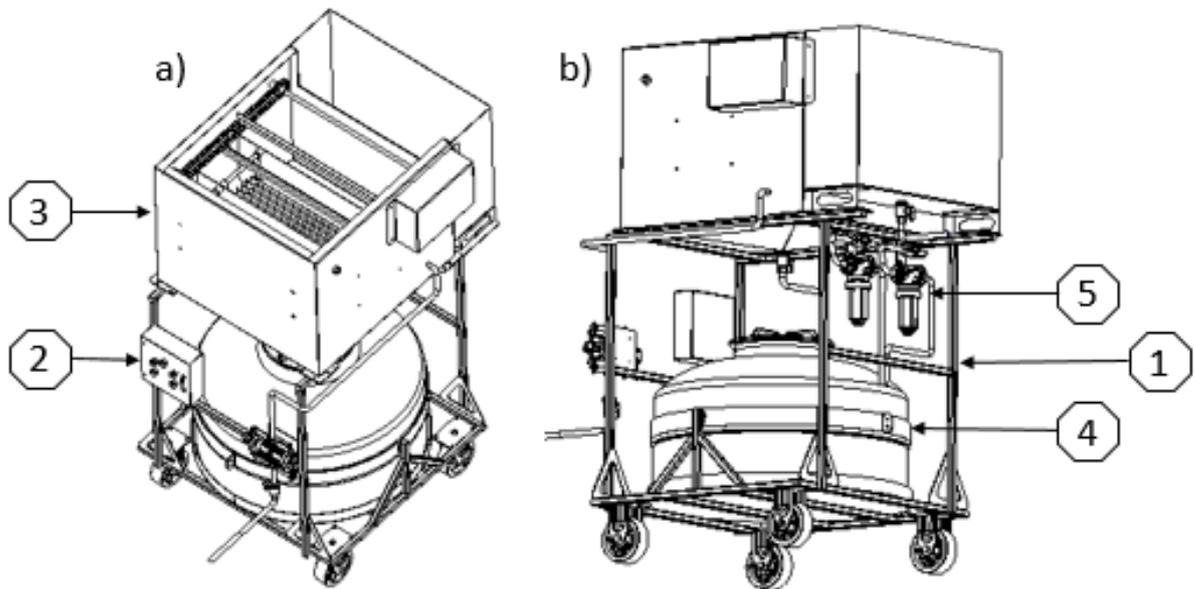
Figura 16 - Projeto conceitual



Fonte: Autor (2022)

O equipamento para tratamento de efluentes mostrado na Figura 16, será acionado quando o efluente bruto passar pela caixa separadora de água e óleo e encher o reservatório de efluente para tratamento com um volume de aproximadamente de 500L. Conforme a Figura 17, o equipamento para tratamento de efluentes foi subdividido em cinco partes sendo elas: Estrutura do equipamento, painel de controle, estação de tratamento, reservatório de efluente tratado e sistema de sucção e filtros.

Figura 17 - Principais partes de equipamento a) perspectiva frontal; b) perspectiva posterior

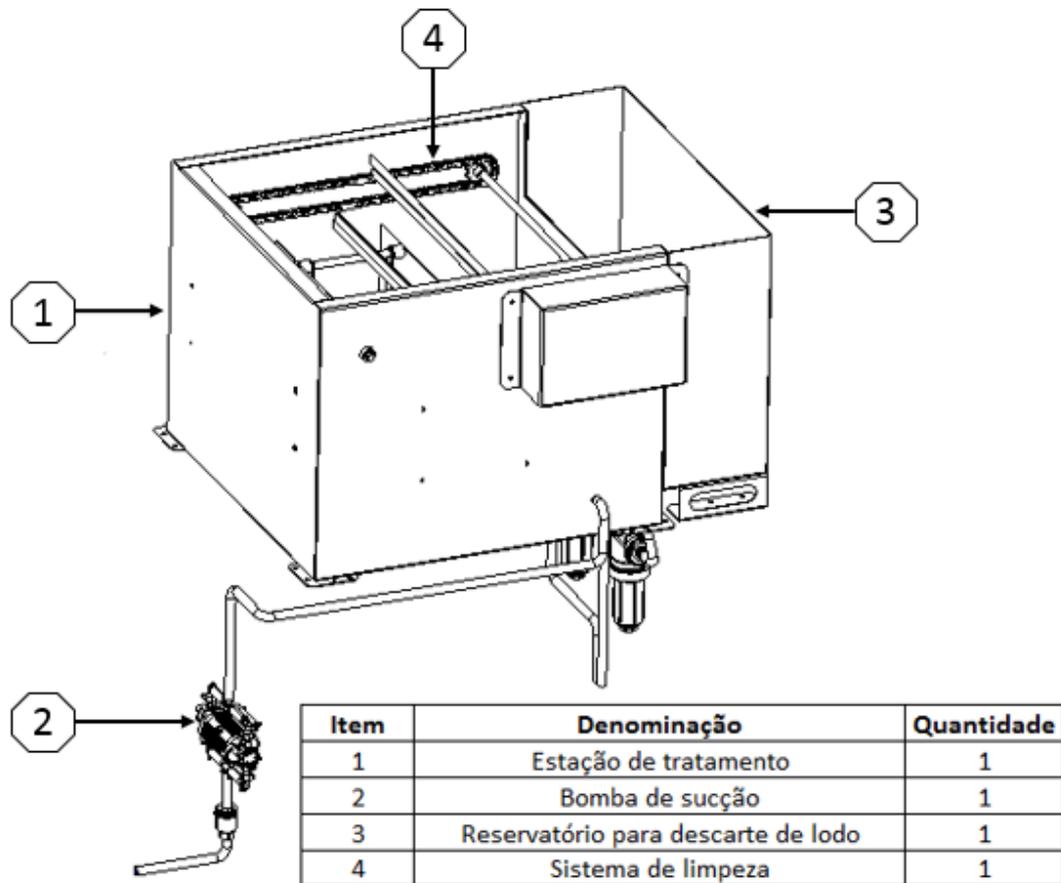


Item	Denominação	Quantidade
1	Estrutura do equipamento	1
2	Painel de controle	1
3	Estação de tratamento	1
4	Reservatório de efluente tratado	1
5	Sistema de sucção e filtro	1

Fonte: Autor (2022)

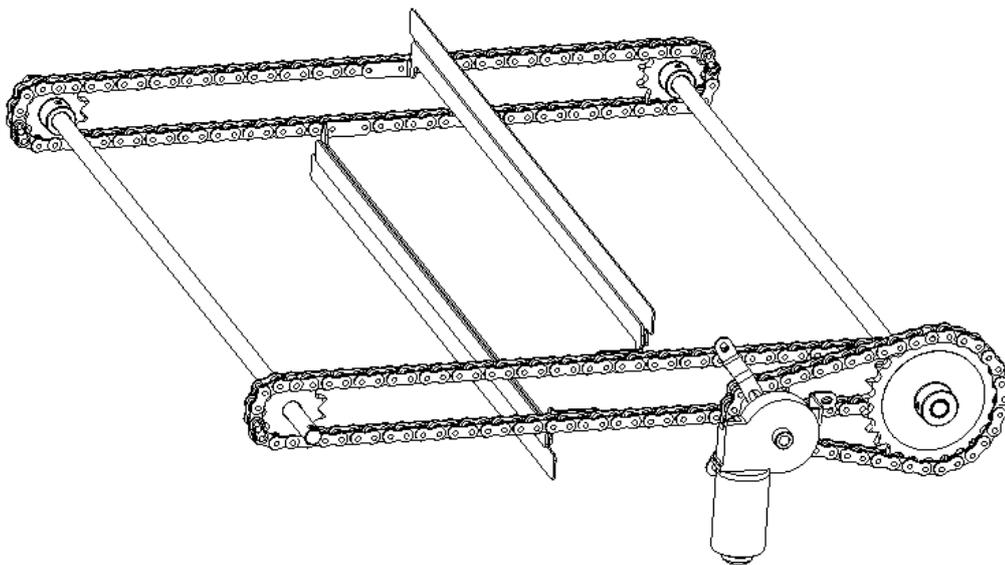
Quando o reservatório de efluente para tratamento estiver cheio, uma bomba de sucção será acionada fazendo a transferência do efluente que está no reservatório para a estação de tratamento, todo o processo de tratamento eletrolítico ocorrerá dentro da estação de tratamento (Figura 18). O lodo gerado pelo processo eletrolítico será removido através de um sistema mecânico de limpeza (Figura 19) para um outro reservatório onde-se destinará o resíduo para descarte (Figura 20).

Figura 18 - Estação de tratamento



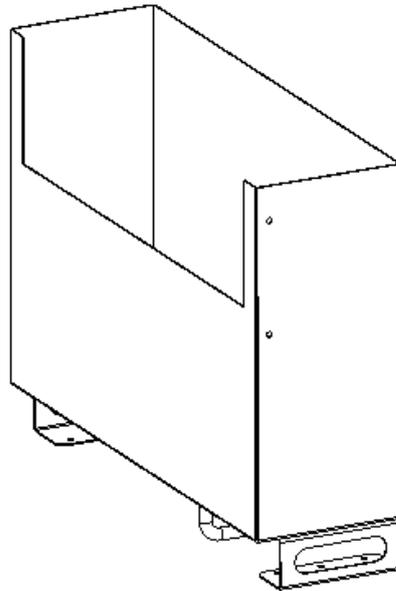
Fonte: Autor (2022)

Figura 19 - Sistema de limpeza



Fonte: Autor (2022)

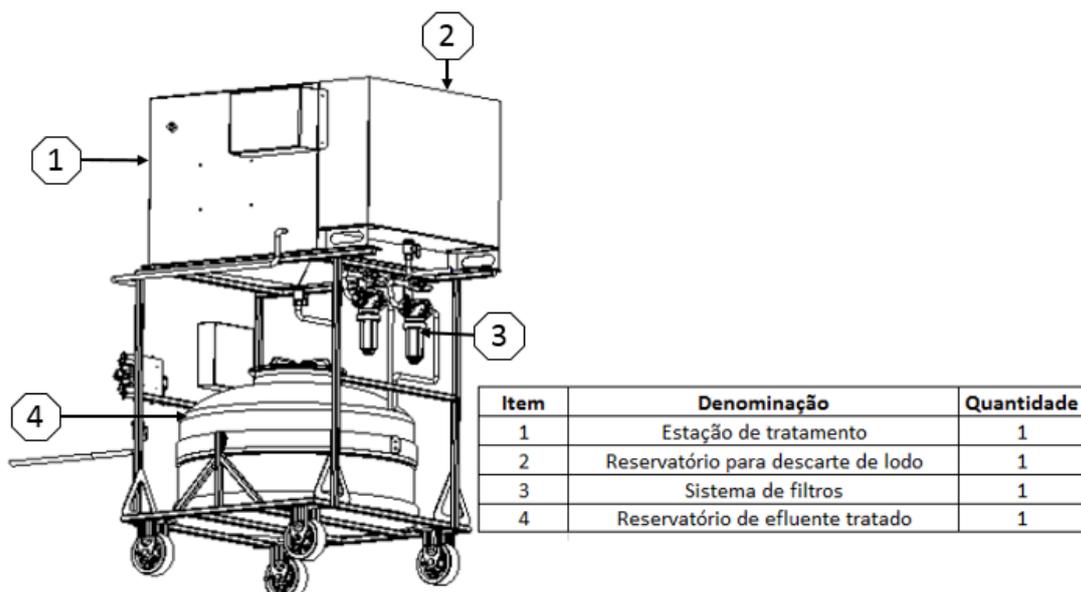
Figura 20 - Reservatório para descarte de lodo



Fonte: Autor (2022)

Após o término do processo eletrolítico na estação de tratamento e a remoção do lodo residual para descarte, o efluente tratado será filtrado e transferido para outro reservatório para que possa ser reutilizado em outra lavagem veicular. A Figura 21 exibe como o fluxo do efluente ocorre pelo equipamento.

Figura 21 -Fluxo do efluente pelo equipamento



Fonte: Autor (2022)

O desenvolvimento de um protótipo da fase preliminar do projeto, tem como propósito avaliar possíveis pontos de falhas e possíveis pontos de melhorias tanto para o produto, quanto para o processo de manufatura (BACK, 1993). Por este motivo, decidiu-se de criar um protótipo experimental mais econômico de tamanho reduzido para verificar o funcionamento e a eficiência do processo eletrolítico no tratamento do efluente.

Na versão simplificada do projeto para a realização dos testes, utilizou-se equipamentos e materiais disponíveis dentro da UPF para a construção do protótipo que segue as linhas gerais do projeto conceitual, trabalhando com um volume menor de efluente e vazões mais baixas. A Figura 22 mostra o protótipo construído em funcionamento.

Figura 22 - Protótipo experimental em funcionamento



Fonte: Autor (2021)

4.3 Ensaios com equipamento experimental em laboratório

Com o equipamento instalado no laboratório da engenharia de alimentos, realizou-se os testes práticos necessários para a validação do funcionamento do equipamento.

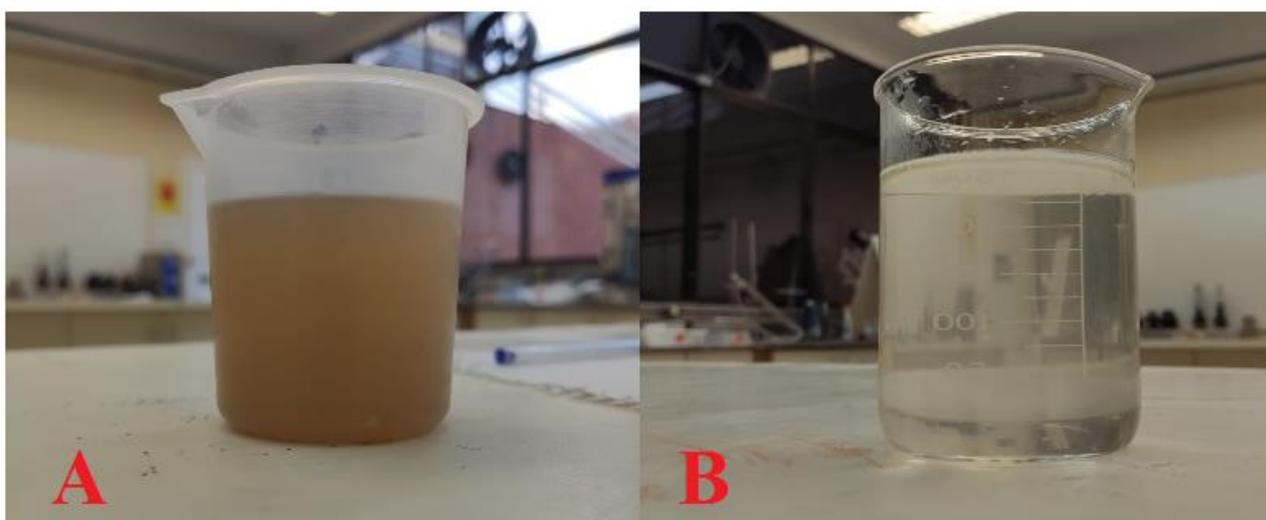
4.3.1 Condições gerais dos ensaios e caracterização do efluente bruto

Para a lavagem de veículo é utilizada água de abastecimento ou de cisternas que são alimentadas pela água da chuva. Após o processo de lavagem, o efluente passa por uma caixa

de areia seguida de caixa separadora de água e óleo onde é filtrado e descartado nas redes coletoras ou corpos d'água.

Se o efluente gerado pelo processo de lavagem de veículos for somente filtrado pela caixa separadora de água e óleo, ele não atenderá os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA número 357 (Brasil, 2005). O resultado visual alcançado nas avaliações do protótipo foi muito positivo. A Figura 23 apresenta o aspecto visual do efluente bruto e do efluente tratado.

Figura 23 - Aspecto visual dos efluentes a) efluente bruto; b) efluente tratado



Fonte: Autor (2021)

Para a caracterização das amostras de água bruta, foram coletadas várias amostras com qualidades diferentes, estas apresentaram um resultado médio conforme demonstra a Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização da água bruta

Item	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão
Turbidez (NTU)	176	588	312	±171,40
pH	5,64	8,01	6,8	±0,97
Condutividade elétrica (uS/cm)	106	267,7	204,2	±66,52
DQO (mg/L)	397,58	800	560,436	±165,28
Surfactantes	2,28	14,39	7,03	±4,98

Fonte: Autor (2022)

4.3.2 Eficiência de tratamento do equipamento piloto

Os fatores de maior relevância nesta etapa são DQO e surfactantes que são importantes para o descarte do efluente e a turbidez do efluente que é um fator visual importante para reuso.

4.3.2.1 Turbidez

Ao considerar os resultados na Figura 24, notou-se que, com diferentes vazões e diferentes qualidade de efluente, tivemos um uma eficiência na produção de coagulante em um tempo muito baixo de residência

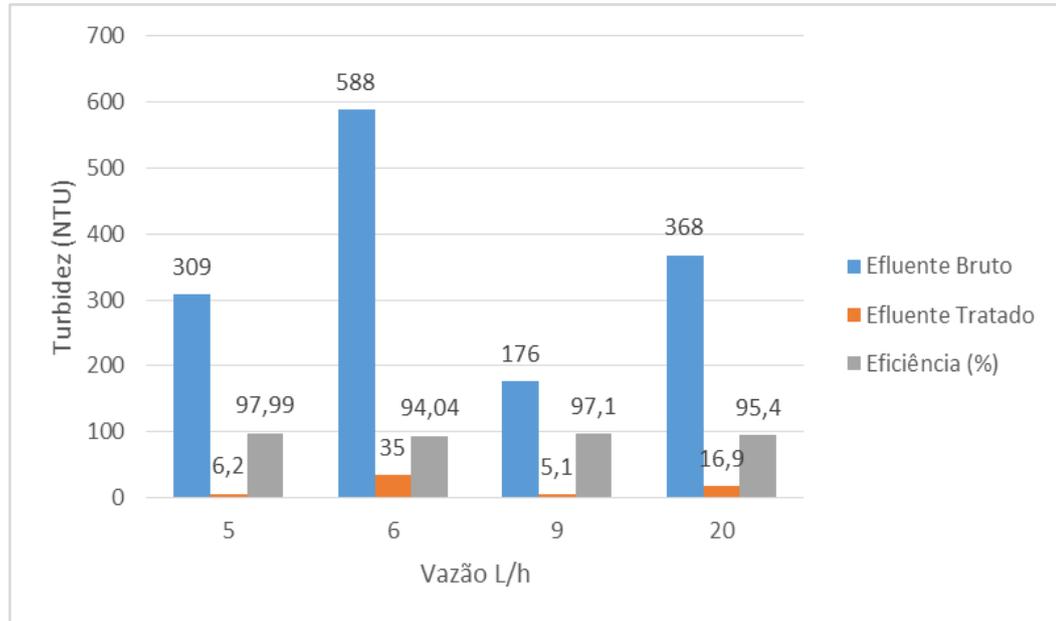
As características do efluente bruto variaram, mostrando que a eficiência do sistema de tratamento e/ou o efluente da lavagem de carros variam, influenciando na qualidade do efluente tratado pelo sistema existente O efluente tratado pela concessionária não tem condições visuais para serem reutilizadas na lavagem de veículos. Isto mais claramente está mostrado na Figura 23A.

A remoção de turbidez obtida pelo protótipo foi sempre superior a 94% e pode ser considerada satisfatória. A qualidade visual do efluente tratado comprovou isto (Figura 23B). Esta remoção de turbidez está associada a remoção de material suspenso e coloidal provocada pelos processos de coagulação e floculação através do desgaste dos eletrodos de alumínio

A variação de vazão não alterou significativamente a qualidade do efluente final, que atingiu turbidez próximas a qualidade potável e visualmente apto a ser reutilizado. A legislação não traz limites de turbidez para lançamento, caso seja esta a opção de destinação final do efluente

A eficiência no processo de remoção da turbidez do efluente chegou a atingir a um percentual de 97,99% com uma vazão de 5 L/h, 94,04% com uma vazão de 6 L/h, 97,10% com uma vazão de 9 L/h e 95,4% com uma vazão de 20 L/h.

Figura 24 - Eficiência do equipamento eletrolítico na remoção de turbidez



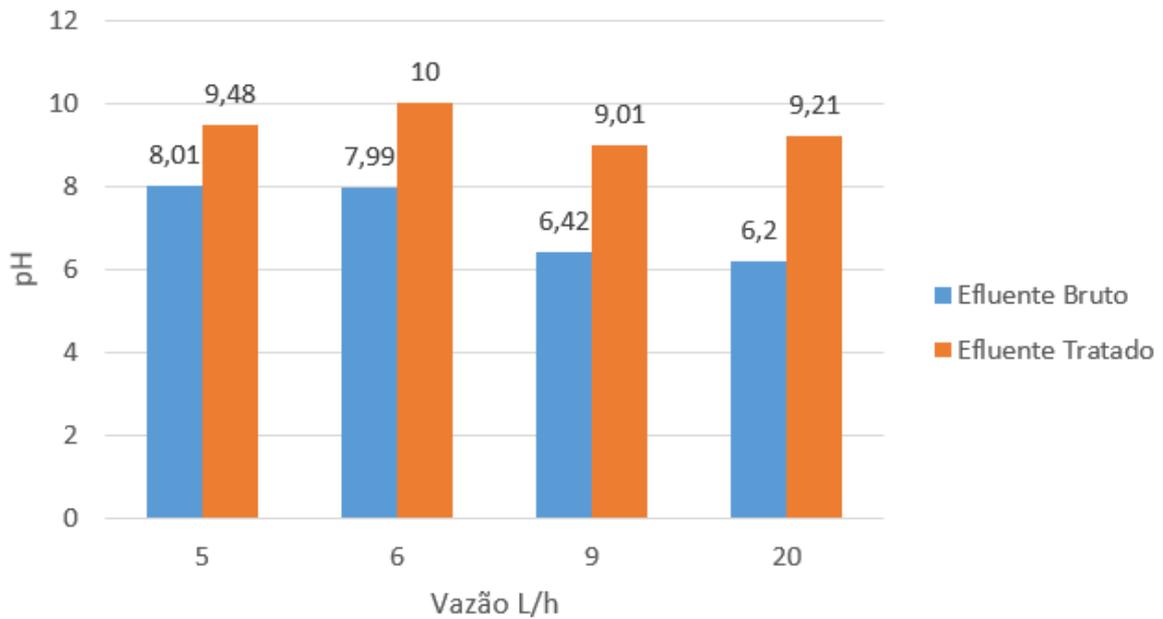
Fonte: Autor (2022)

4.3.2.2 pH

Nos seis experimentos realizados o pH apresentou uma elevação significativa, que é atribuído à geração dos íons OH^- durante a etapa de redução da água. Apesar destes íons serem usados na formação do agente coagulante, a quantidade remanescente conduz ao aumento do valor de pH. Este aspecto também é observado em outros trabalhos como de Chen et al. (2003) e Kobyta et al. (2015).

Observa-se na Figura 25, o comportamento do pH em experimentos com condições diferentes. Comparando o resultado do pH com a literatura, nota-se que ele se comporta de maneira prevista por ela, pois sempre há um aumento do pH final em comparação com o inicial quando este for até 8.

Figura 25 - Resultado do equipamento na manutenção do pH

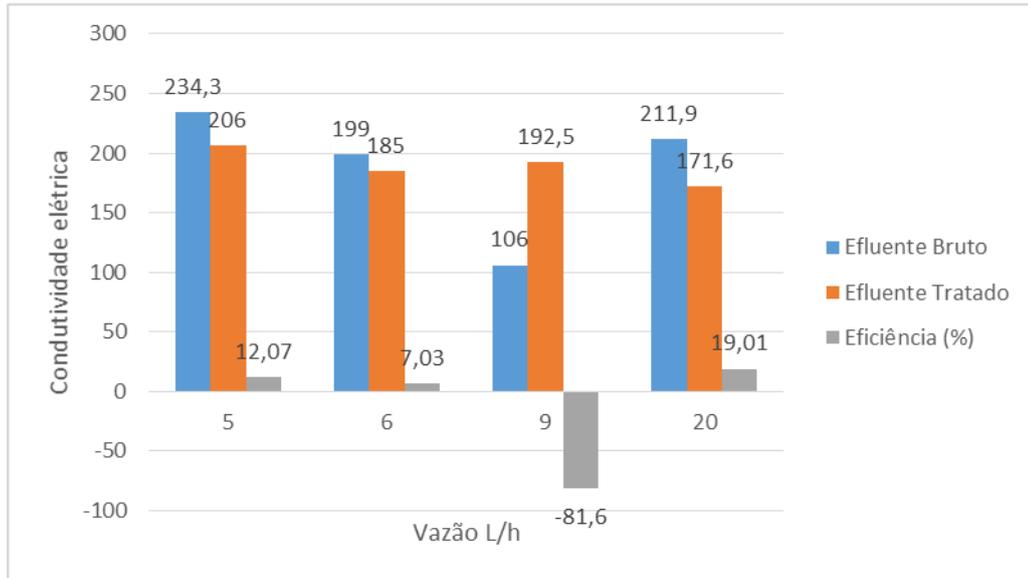


Fonte: Autor (2022)

4.3.2.3 Condutividade elétrica

A Figura 26 apresenta o comportamento da condutividade em função das diferentes condições experimentais. A condutividade não teve um comportamento padrão quando se compara apenas a condutividade inicial e final. Um comportamento padrão foi observado durante o processo eletrolítico, onde a condutividade diminui inicialmente e dependendo do tempo de eletrólise passa a subir novamente. Este comportamento pode ser explicado pelo processo de formação dos flocos durante a eletrólise. No início o desgaste dos eletrodos (anodos) fornece para o meio/reator íons alumínio que reagem com a matéria coloidal presente no efluente, formam os flocos e são separados no material sobrenadante. Com o decorrer da eletrólise, continua-se desgastando eletrodos, no entanto como tem menos matéria orgânica disponível para formar os flocos, estes íons alumínio começam a permanecer no meio, aumentando a condutividade. O aumento excessivo da condutividade indica um excesso de corrente elétrica e consequentemente de desgaste de eletrodos e aumento do custo de tratamento sem necessidade.

Figura 26 - Eficiência do equipamento na manutenção da condutividade elétrica



Fonte: Autor (2022)

4.3.2.4 DQO

A DQO indica a quantidade de oxigênio que seria consumida através de reações químicas de oxidação dos diversos compostos orgânicos, sem a intervenção de microrganismos. Desse modo, ela nos fornece uma ideia indireta da quantidade de matéria orgânica presente no efluente.

Os resultados da remoção de DQO (Figura 27) foram satisfatórios, diminuindo a DQO no efluente tratado pelo protótipo, independente da qualidade do efluente bruto.

A DQO do efluente bruto variou de uma coleta para a outra. Se admitirmos como limite de lançamento da legislação como 400mg/L, somente a coleta 1 atenderia este parâmetro para lançamento. Assim como na turbidez, esta variação pode indicar variações no sistema de tratamento existente e/ou na qualidade do efluente bruto da lavagem. As diferentes condições de sujidade nos carros lavados certamente têm influência nestas variações.

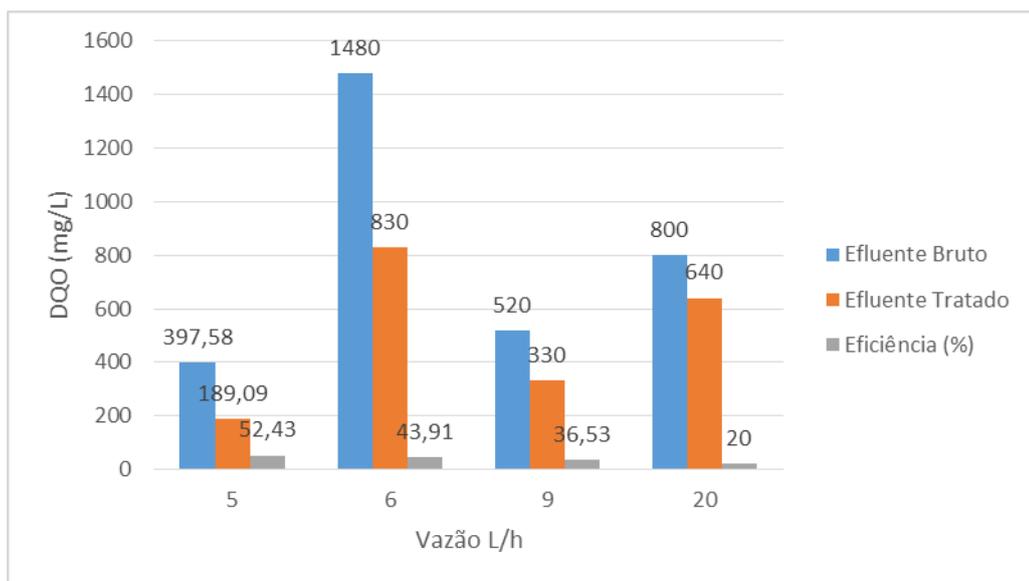
Diferente da turbidez, a remoção de DQO não atingiu os mesmos patamares de eficiência. Isto pode ser explicado pela presença de material solúvel no efluente bruto, que não consegue ser removido pelos processos de eletrocoagulação e eletroflotação. O material coloidal foi removido, uma vez que a turbidez foi satisfatoriamente removida. Mesmo após o tratamento, alguns experimentos não atenderiam a máximo permitido para o lançamento deste

efluente. O aumento da vazão do protótipo influenciou a remoção de DQO, que diminuiu conforme aumentou-se a vazão. Isto pode ser explicado pela diminuição do tempo de eletrólise, que diminui a quantidade de coagulante (alumínio) no meio.

Os experimentos 1 e 2 apresentam TDH ou vazões semelhantes, 5L/h e 6L/h, e DQO iniciais distantes, no entanto as remoções foram próximas, indicando que a presença de material solúvel não parece mudar com o aumento da DQO.

A DQO não representa, geralmente, um impedimento para o reuso de efluente na lavagem de carros, no entanto ainda não se tem literatura que dê embasamento para tal afirmação. Os resultados na remoção de DQO forma satisfatórios, sendo 52,43% para uma vazão de 5 L/h, 43,91% para uma vazão de 6 L/h, 36,53% para uma vazão de 9 L/h e de 20% para uma vazão de 20 L/h.

Figura 27 - Eficiência do equipamento eletrolítico na remoção de DQO



Fonte: Autor (2022)

4.3.2.5 Surfactantes

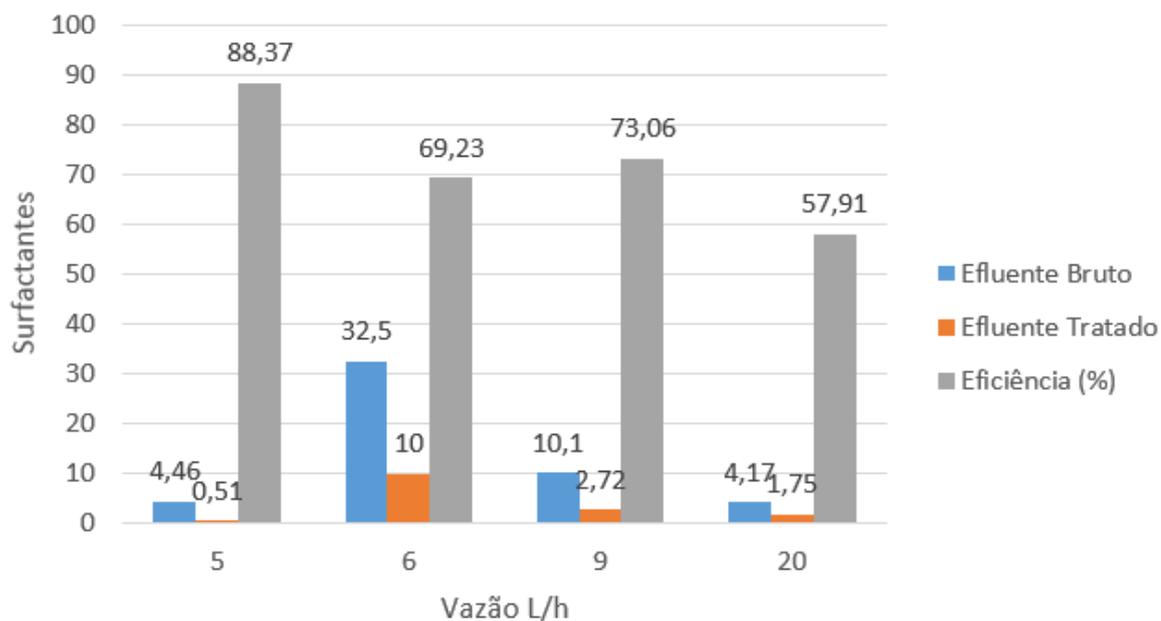
O efluente bruto apresentou uma variabilidade significativa na concentração de surfactantes (Figura 28). Nos surfactantes, mais do que na DQO ou turbidez, as condições de limpeza dos carros, considerando épocas chuvosas ou não, podem influenciar na concentração de surfactantes no efluente bruto e tratado pelo sistema da concessionária. O limite da

legislação para lançamento deste parâmetro é de 2 mg/L, mostrando que o sistema da concessionária não é capaz de remover este poluente.

O processo eletrolítico foi capaz de reduzir a concentração de surfactantes para todas as condições testadas, sendo as remoções superiores a 57%. A concentração inicial e a vazão do efluente influenciaram na remoção. Pode-se observar que o limite para que o efluente tratado pelo protótipo atingisse os limites da legislação é um efluente bruto com 4,0 mg/L, no máximo. O aumento de vazão dificultou a remoção de surfactantes, assim como na DQO.

Uma das amostras analisadas apresentou uma concentração de 32,5 sendo está a pior condição encontrada nos testes. O equipamento chegou a fazer uma remoção expressiva de 88,37% (Figura 25) desta condição utilizando uma vazão de 5L/h. Os demais resultados obtidos foram os seguintes: 69,23% para uma vazão de 6L/h, 73,06 para uma vazão de 9L/h e 57,91% para 20L/h, isso refere-se muito ao eletrodo de alumínio que possibilita o tratamento de efluentes com elevada concentração de surfactantes.

Figura 28 - Eficiência do equipamento eletrolítico na remoção de surfactantes



Fonte: Autor (2022)

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados neste trabalho concluiu-se que apesar das características deste efluente variarem com o decorrer do dia, a eletrólise se mostrou realmente eficaz no tratamento do efluente, tanto em termos de eficiência na remoção da DQO, quanto na remoção do surfactante e da turbidez.

O equipamento experimental desenvolvido para o tratamento de efluentes gerados pela lavagem de veículos não atingiu valores suficientes para o lançamento do efluente, mas demonstrou ser capaz de tratar o efluente para a reutilização do processo, pois não há padrão específico para o reuso em lavagem de veículos. O protótipo apresentou um ótimo resultado na clarificação do efluente tratado. Os testes realizados com a vazão de 9L/h mostraram um melhor resultado, isso limita o tamanho do reservatório do equipamento. Outro ponto que limita o equipamento é a condição do efluente de entrada, pois ele influencia no resultado de saída, o efluente bruto não pode apresentar um surfactante maior que 10.

O desenvolvimento de um projeto com a utilização do procedimento metódico de Pahl et al. (2005), amparou no alcance de um projeto que atende as necessidades denominadas, os resultados obtidos demonstram a eficiência da metodologia para o desenvolvimento de projetos. O conjunto de ferramentas técnicas proposta pelo método de Pahl et al. (2005), se mostrou seguro no desenvolvimento do projeto a qual foi aplicada, possibilitando a organização de todas as informações necessárias para a criação do produto. O projeto experimental demonstrou a capacidade do tratamento de efluentes por meio da eletrólise, apesar da eletrólise ser estudada a muito tempo, ela ainda não chegou em um grau aceitável de desenvolvimento para o estímulo desta prática, contexto este que justifica uma intensificação das pesquisas acerca deste tema.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

- a) Desenvolver uma lógica para o controle do processo;
- b) Estudar a possibilidade de aplicação deste tipo de processos em outros efluentes;

6 REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13969: **Tanques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos**. Projeto, construção e operação. São Paulo, 1997.

ALMEIDA C.M.V.B.; BORJES Jr. D.; BONILLA S.H.; GIANETTI B.F. **Identifying improvements in the water management of bus-washing stations in Brazil**. Journal Resources, Conservation and Recycling. Science Direct, Elsevier, Brasil, 2010.

AN, C. et al. **Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review**. Journal homepage, Elsevier, Canada, 2016.

ASHA M.N.; CHANDAN H.P.; HARISH S.; NIKHILESWARREDDY S.; SHARATH K.S.; MINI LIZA G.; **Recycling of waste water collected from automobile service station**. Procedia Environmental Sciences, International Conference on Solid Waste Management. Science Direct, Elsevier, India, 2016.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. Tradução Maria Angeles, Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera. 2 ed. Porto Alegre, Bookman, 2002. 622 p

BAZRAFSHAN, E.; MOEIN, H.; MOSTAFAPOUR, F. K.; NAKHAIE, S. **Application of Electrocoagulation Process for Dairy Wastewater Treatment**. Journal of Chemistry: Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, p.1-8, 2013.

BERNER, S.; BULCA, Ö.; PALAS B.; TEKIN, G.; ATALAVA, S.; ERSOZE, G. **Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study**. Process Saf Environ Protect 2019, 129:47–54.

BOHN, F. P. **Tratamento do Efluente Gerado na Lavagem de Veículos**. Panambi (RS), 2014. Disponível em: Acesso em: 11 Nov. 2016

BOLUARTE I.A.R.; ENDERSON M.; PRAMANIK B.K.; CHANG C.; BAGSHAW S.; FARAGO L.; JEGATHEESA V.; SHU L. **Reuse of car wash wastewater by chemical coagulation and membrane bioreactor treatment processes**. Journal International Biodeterioration e Biodegradation. Science Direct, Elsevier, Australia, 2016.

BOSSOU, K., KINDTS, C., VANDECASTEELE, C., VAN DER BRUGGEN, B. **Applicability of nanofiltration in the car wash industry**. Separ. Purif. Technol. 54 (2), 139–146, 2007.

BROWN, C. **Water conservation in the professional car wash industry**. First ed. Washington: International Car Wash Association; 2000.

CASQUEIRA, R. G., TOREM, M. L., KOHLER, H. M. **The removal of zinc from liquid streams by electro flotation**. Miner. Eng., v.19, n.13, p.1388-1392, November 2006.

CHEN, X.; CHEN, G., YUE, P. L. **Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation**. Sep. Purif. Technol., n. 19, p.65-76, 2000.

CHEN. G. **Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment**. Separation and Purification Technology, 2003.

CRISPILHO, F. N., REZENDE, M. O. **Eletroflotação: Princípios e Aplicações**. São Carlos: Ed. Rima, 2004, 85 p.

WEGENER, D. **Desenvolvimento experimental de um equipamento para manutenção e conservação da água do processamento de maçã**. Dissertação (Mestrado profissional em projeto e processos de fabricação) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Passo Fundo. 2019.

ESPÍNOLA, M. O. G., **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para a síntese de amônia**, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 129 p. Dissertação (Mestrado).

FUKASAWA B.N.; MIERZWA J. C. **Identification of water reuse potential in Metropolitan Regions using the Analytic Hierarchy Process**. Journal Environmental and Sustainability Indicators. Science Direct, Elsevier, Brasil, 2021.

GONDER, Z. B.; BALIOGLU, G.; VERGILI, I.; KAYA, Y. **Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization**. Journal Environmental Management, v. 200, 380-390, 2017.

HAKIZIMANA J.N.; GOURICH B.; CHAFI M.; STIRIBA Y.; VIAL C.; DROGUI P.; NAJA J. **Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches**. Journal of Desalination. Science Direct, Elsevier, Marrocos, 2017.

HEMKEMEIER, M. **Estudo do tratamento eletrolítico aplicado a efluente líquido de abatedouro avícola**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2001.

HOLT, P. **Electrocoagulation: Unravelling and synthesizing the mechanisms behind a water treatment process**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química. Universidade de Sidney. 2002.

HRISTOVA J.; BARREIRO-HURLE J.; SALPUTRA G.; BLANCO M.; WITZKE P. **Reuse of treated water in European agriculture: Potential to address water scarcity under climate change**. Journal Agricultural Water Management. Science Direct, Elsevier, Espanha, 2021.

KOBYA, M. DEMIRBAS, E; **Evaluations of operation parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation.** J. Hazard. Water Process Engineering. n.8, p.64-74, 2015

KUMAR, P. R., CHAUDHARI, S.; KHILAR, K. C.; MAHAJAN, S. P. **Removal of arsenic from water by electrocoagulation.** Chemosphere, n. 55, p.1245-1252, 2004.

LARUE, O. VOROBIEV, E.; VU, C.; DURAND, B. **Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions.** Sep. Purif. Technol. 31 , p.177-192 , 2003.

LEITÃO, S. A. M., **Bases para a estruturação das atividades de reuso de água no Brasil – Estágio atual,** Artigo apresentado no II Encontro das Águas, Montevidéu, 1999. 6p.

LEITE, J. C. A.; VILAR, E. O.; CAVALCANTI, E. B.; SALES FILHO, I. O. **Aplicação da Eletroflotação para Remoção de Óleo Emulsionado em Águas de produção de Campo de Petróleo.** 4ºPDPETRO, 2007.

MANSOUR, L. B., CHALBI, S. **Removal of oil from oil/water emulsions using electro flotation process.** J. Appl. Electrochem., v.36, n.5, may 2006

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L., **Electrocoagulation (EC); science and applications.** Journal of Hazardous Materials, v.84, p. 29-41, 2001.

MOLLAH, M. Y. A., MORKOVSKY, P., GOMES, J. A. G., KESMEZ, M., PARGA, J., COCKE, D. L. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation.** J. Hazard. Mater. v.114, p.199-210, outubro 2004.

NEMA, A.; SRINIVASAN B.; MAJOZI T.; SRINIVASAN R. **A simple strategy to maximize water-reuse in multistage, multiproduct batch processes.** Journal Chemical Engineering Research and Design. Science Direct, Elsevier, India, 2021.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, H. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, H.K. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

SHAHEDI A.; DARBAN A.K.; TAGHIPOUR F.; JAMSHIDI-ZANJANI A. **A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes**. Science Direct, Elsevier, Irã, 2020.

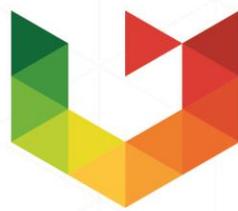
TAHREEN A.; JAMI M. S.; ALI F. **Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review**. Journal of Water Process Engineering. Science Direct, Elsevier, Malásia, 2020.

TAJUDDIN, M. et al. **Optimizing of heavy metals removal from car wash wastewater by chitosan-ceramic beads using response surface methodology**. Science Direct, Elsevier, Malásia, 2019.

WIENDL, W. G. **Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 1998, 367 p.

ZANETI, R. et al. **Car wash wastewater reclamation. Full-scale application and upcoming features**. Journal homepage Resources, Conservation and Recycling. Science Direct, Elsevier, Brasil 2011

ZENG, K.; ZHANG, D.; **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications**. Progress in Energy and Combustion Science, 36(2010) 307-326.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br