

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL –  
DOUTORADO  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

GUSTAVO STOLZENBERG COLARES

**INTEGRAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS E CÉLULAS DE  
COMBUSTÍVEL MICROBIANAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES  
URBANOS COM POTENCIAL GERAÇÃO DE BIOENERGIA**

Santa Cruz do Sul

2022

Gustavo Stolzenberg Colares

**INTEGRAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS E CÉLULAS DE  
COMBUSTÍVEL MICROBIANAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES  
URBANOS COM POTENCIAL GERAÇÃO DE BIOENERGIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado ou Doutorado, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para o título de Doutor em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Leandro Machado

Coorientadora: Profa. Dra. Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues

Santa Cruz do Sul  
2022

**Dedico à minha família e aos meus amigos.**

## RESUMO

Diante das necessidades e potencialidades de aplicar tecnologias sustentáveis e descentralizadas para o tratamento de efluentes urbanos, os *Wetlands* Construídos (WCs) têm sido amplamente implementados e avaliados ao redor do mundo. Apesar de ser uma tecnologia consolidada, com o avanço do monitoramento analítico e do conceito de economia circular aplicado ao saneamento, novas pesquisas e aperfeiçoamentos se tornam necessários para otimizar o desempenho de tratamento, promover a recuperação de recursos, integração paisagística e o aumento da vida útil dos sistemas. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar sistemas de tratamento em escala piloto combinando uma unidade anaeróbia composta por reator/biofiltro, diferentes configurações de WCs com células de combustível microbianas (CCM), e ainda unidades sequenciais preenchidas com material reativo adsorvente (argila expandida e tijolo picado). Os sistemas foram construídos e monitorados na estação de tratamento de efluentes (ETE) do campus da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), durante os anos de 2018 a 2021, quando foram alimentados com efluentes sanitários gerados no próprio campus universitário. O sistema de tratamento desenvolvido no presente trabalho foi composto por um biofiltro anaeróbio (1.450 L), 4 unidades de WCs de diferentes configurações (em tanques de 1000 L cada) e um filtro de areia com mídia reativa (200 L). A primeira unidade WC foi projetada como um *Wetland* Construído Flutuante (WCF), na qual um suporte mantinha as macrófitas em condições hidropônicas, e assim desempenhar a função semelhante a um decantador. As duas unidades WCs de fluxo vertical, preenchidas com brita (n. 0, n. 1 e n. 2) e seixos, foram vegetadas com diferentes espécies de macrófitas, porém uma das unidades não apresentava zona de saturação enquanto a outra unidade possuía cerca de 80% do seu substrato saturado. Já o WC de fluxo horizontal subsuperficial, também preenchido com brita e seixos e vegetado com diferentes espécies, possuía também um compartimento no material filtrante preenchido com tijolos picados, visado principalmente a adsorção de P. No primeiro ano de doutorado, foram realizados estudos de revisão abordando os sistemas WCFs, assim como a concepção, o projeto e a construção das unidades de tratamento experimentais. A operação dos sistemas pode ser dividida em duas fases de aproximadamente 1 ano cada: um primeiro período com operação de regime em batelada (2019), e um segundo período com alimentação por

pulsos (2021). Durante o ano de 2019, os sistemas de tratamento foram operados em fluxo de batelada com amostragem e alimentação semanal, por cerca de 12 meses e com aplicação aprox. de 13,6 L/m<sup>2</sup>dia. Nesse período, os sistemas integrados promoveram de forma eficiente a remoção de matéria orgânica (82% para DBO<sub>5</sub> e 81% para COT), carga eutrofizante (87, 68 e 93% respectivamente para fósforo total, nitrogênio total e nitrogênio amoniacal) e outros parâmetros monitorados, como turbidez (94,3%), coliformes totais (superiores a 4 unidades logarítmicas ou >99,99%) e sólidos suspensos (100%). Nos anos seguintes, a operação das unidades passou a ser automatizada e através de pulsos ao longo do dia (3 a 6 pulsos), dessa forma se aproximando da realidade de estações de tratamento em escala real. Durante 13 meses com o sistema operando através de pulsos, foram avaliadas 3 diferentes taxas de aplicação: 20,5 L/m<sup>2</sup>dia (durante 5 meses), 41 L/m<sup>2</sup>dia (durante 5 meses) e 61,6 L/ m<sup>2</sup>d (durante 3 meses), considerando a área superficial dos WCs (4 unidades com 1,84 m<sup>2</sup> cada). Nesse segundo período de monitoramento, as eficiências médias de desempenho de tratamento foram inferiores às verificadas previamente, principalmente devido ao aumento das cargas de aplicação de DBO<sub>5</sub>, DQO e nutrientes. Nas melhores condições de desempenho, para os sistemas WCF + WC-CCM (Sistema WC integrado a células de combustível microbianas) e WC fluxo vertical + WC fluxo horizontal, foram obtidas eficiências médias de remoção de 92% e 89% de DBO<sub>5</sub>, considerando taxas médias de aplicação de 4,1 e 2,1 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>dia, respectivamente. Em relação à geração de bioenergia, foram testados diferentes materiais como eletrodos (grafite, carvão ativado e aço inoxidável - aço inox AISI 304), além de diferentes espaçamentos entre os eletrodos em uma unidade de WC de fluxo vertical e uma WCF. Apesar de valores elevados de voltagem serem identificados (com picos de 687 mV com carvão ativado granular como eletrodo, e potências máximas de 0,003 mW/m<sup>2</sup> (área do WC) e 0,57 mW/m<sup>2</sup> considerando a área superficial anódica), a potência gerada pelos sistemas ainda é limitada. Verificou-se que fatores como a área superficial dos eletrodos, a altura da lâmina d'água e o comprimento das raízes influenciaram os valores de voltagem monitorados. Dessa forma, os resultados obtidos demonstraram que o sistema combinado desenvolvido apresentou eficiência no tratamento dos efluentes urbanos. Entretanto, no âmbito de geração e aproveitamento de bioeletricidade, a partir do tratamento de efluentes, por exemplo para alimentar biossensores ou acender lâmpadas LED (com potências necessárias na ordem de mW), pesquisas futuras devem ser

desenvolvidas visando melhor compreender e aperfeiçoar os mecanismos de geração de energia sem inviabilizar a aplicação da tecnologia em escala piloto e real.

**Palavras-chave:** *Wetlands* Construídos; tratamento descentralizado; saneamento sustentável; bioeletricidade; soluções baseadas na natureza; economia circular.

## ABSTRACT

### **INTEGRATION OF HYBRID CONSTRUCTED WETLANDS AND MICROBIAL FUEL CELLS FOR THE TREATMENT OF URBAN WASTEWATER AND POTENTIAL BIOENERGY GENERATION**

Given the necessity and potential application of sustainable and decentralized treatment technologies for urban wastewaters, the Constructed Wetland (CW) systems have been widely implemented and investigated around the world. Despite being an already consolidated technology, with the advances of analytical monitoring and of the concept of circular economy in sanitation, new research and improvements are necessary to optimize the treatment performance, promote the recovery of resources and landscape integration, as well as increase the treatment systems lifespan. In this context, the main objective of the present research was to develop pilot scale treatment systems combining an anaerobic reactor/biofilter unit, different configurations of CWs with microbial fuel cells and units filled with adsorbent reactive material (light expanded clay aggregate, or LECA, and broken bricks). The treatment system was constructed and operated in the University of Santa Cruz do Sul wastewater treatment plant (WWTP), from 2018 to 2021, with the units being fed with the wastewater generated in the university campus. The developed treatment system was composed of an anaerobic biofilter (1,450 L), 4 CW units with different configurations (each of 1000 L) and a filter unit (200 L) filled with reactive media. The first CW unit was designed as a Floating Treatment Wetland (FTW), in which a buoyant support kept the plant under hydroponic conditions, acting similar to a decanter. The two vertical flow CW units, filled with gravel n. 0, n. 1 and n. 2 and pebbles, were vegetated with different plant species, one of the units without substrate saturation and the other unit 80% saturated. The horizontal subsurface flow CW was also filled with gravel and pebbles and vegetated with different plant species, but this unit had a compartment filled with broken bricks aiming for P adsorption. In the first doctorate year, a review study was carried out regarding Floating treatment wetland (FTW) systems, as well as the conception, project and construction of the experimental treatment units. The system operation can be divided in two phases of approximately 1 year each: a first period of operation under batch flow (2019) and later with pulse feeding (2021). During 2019, the treatment systems were operated under batch flow, with weekly sampling and feeding with wastewater, with loading rates of 13,6 L/m<sup>2</sup>day. During this period, the integrated systems efficiently promoted the removals of organic matter (82% for BOD<sub>5</sub> and 81% for TOC), eutrophication potential (87%, 68% and 93% for total P, total N and ammonia nitrogen, respectively), and other monitored parameters, such as turbidity (94%) and total coliforms (4 log units or >99.99%) and suspended solids (100%). However, in the following years, the unit's operation was changed to automated (with 3 to 6 short pulses everyday), therefore approaching the operation conditions usually adopted in full-scale WWTPs. During 13 months of operation, three different application rates in the treatment systems were performed: 20.5 L/m<sup>2</sup>day (for 5 months), 41 L/m<sup>2</sup>day (for 5 months) and 61.6 L/m<sup>2</sup>d (for 3 months), considering the superficial

area of the CWs. In this second monitoring period, the obtained mean efficiencies concerning the treatment performance were lower than those previously verified, mainly due to the increase in BOD<sub>5</sub>, COD and nutrients loadings. Under the best performance conditions, for the FTW + CW-MFC and Vertical Flow CW + Horizontal Flow CW, average removal efficiencies of 92% and 89% were obtained for BOD<sub>5</sub>, considering mean areal application rates of 4.1 and 2.1 gBOD<sub>5</sub>/day, respectively. Regarding bioenergy generation, different electrode materials were tested (graphite, granular activated carbon and stainless steel – AISI 304), besides different electrode spacing in a vertical flow CW and in FTW systems. Although high voltage values between the electrodes were verified (with peaks of 687 mV with granular activated carbon as electrode and maximum of 0.003 mW/m<sup>2</sup> considering the WC superficial area and 0.57 mW/m<sup>2</sup>, based on the anode area) the current power output generated by the systems is still limited. It was observed that factors such as the electrode surface area, the water level (substrate saturation) and plant roots influenced the monitored voltage values. Therefore, the obtained results demonstrated that the developed combined systems were efficient in the treatment of urban wastewaters. However, concerning bioenergy generation, for examples to power biosensors or LED lights (with necessary powers of a few mWs), further studies must be carried in order to better understand and improve the mechanisms of bioelectricity generation, without compromising the application of the CW-MFC units in pilot and real-scale treating real wastewaters.

**Keywords:** Constructed wetlands; decentralized treatment; sustainable sanitation, bioelectricity; nature-based solutions; circular economy.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de trabalhos publicados por ano referentes ao termo “ <i>Constructed Wetlands</i> ”.....	35
Figura 2 - Potenciais benefícios secundários da aplicação de <i>Wetlands</i> Construídos.....	36
Figura 3 - Principais integrações ou intensificações de sistemas <i>Wetlands</i> Construídos com outras tecnologias.....	39
Figura 4 - Representação de uma célula de combustível microbiana típica de dois compartimentos.....	42
Figura 5 - Desenhos comparando um modelo de CCM tradicional e um exemplo de integração WC-CCM.....	44
Figura 6 - Desenhos simplificados de algumas configurações de sistemas WC-CCM encontrados na literatura.....	47
Figura 7 - Desenho simplificado da Estação de Tratamento de Efluentes da UNISC – Campus Santa Cruz do Sul.....	52
Figura 8 - Fluxograma simplificado das principais etapas da presente pesquisa...	55
Figura 9 - Desenho simplificado das unidades de tratamento experimentais desenvolvidas e monitoradas na ETE - UNISC.....	58
Figura 10 - Registros fotográficos da primeira unidade de tratamento pós biofiltro anaeróbio: WCF, A e B antes das modificações e B e C após as modificações. A) vista frontal do sistema com decantador ao fundo. B) Sistema radicular das macrófitas. C) Vista frontal do sistema após alterações, com o decantador vegetado com <i>Eichhornia crassipes</i> .....	59
Figura 11 - Diferentes materiais empregados como eletrodos. A) Eletrodos com bastões de grafite. B) Eletrodos de carvão ativado granular. C) Eletrodos de grafite junto ao cabo inox dentro da mangueira. D) Eletrodos de carvão ativado junto ao cabo inoxidável no interior da mangueira PVC. E) Cilindro de grafite.....	66
Figura 12 - Resumo gráfico do artigo 1. ....	70
Figura 13 - <i>Publications related to the search terms “Floating treatment wetland” from the Web of Science database. (a): number of publications per year, (b): countries that most published studies, (c): researchers that most published studies</i> .....	75

<b>Figura 14 - Network view map generated in VOSviewer from Floating Treatment Wetlands material from Web of Science database. The colours represent clusters of extracted terms grouped by the software according to the items relations. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 15 - Bibliometric map based on density visualization from VOSViewer. Red areas represent hotspots. (A) Hotspot most related to root system and accumulation of pollutants in tissues. (B) FTW and sediment items. (C) Hotspot related to plant growth and biomass. (D) Macrophyte in the centre of the figure. (E) Flow, oxygen, wastewater treatment and total nitrogen. (F) Chemical oxygen demand and total phosphorous. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 16 - Selection of the “macrophyte” term in the bibliometric mapping and highlight of most connected items. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 17 - FTWs classification when considered as an intermediate technology (dashed line) between treatment ponds and surface flow CWs. ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 18 - Summary of processes related to water purification and benefits from FTW application.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 19 - Selection of terms in the bibliometric map: (a) harvesting; (b) aeration; (c) depth and (d) hydraulic retention time.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 20 - Creation of zones with different DO concentrations in FTW. ....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 21 - Different support systems and enhancements applied in FTW studies. ..</b>	<b>94</b>
<b>Figura 22 - DO Concentrations behaviour in water through FTW and influence of a FTW in water surface in continuous flow. ....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 23 - Bibliometric map after selecting the terms: root (a); biofilm (b); biomass (c) and plant uptake (d). ....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 24 - Resumo gráfico referente ao artigo 2. ....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 25 - Anaerobic biofilter (AF) with two sequential compartments. ....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 26 - FTW treatment system with a primary settler tank and integrated with MFCs. ....</b>	<b>115</b>

<b>Figura 27 - Graphite electrodes placed in a plastic hose deep in the box - anodes (A) and fixed in the plants rhizosphere - cathodes (B).....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 28 - Summary of mean efficiencies (<math>\pm</math>SD) regarding the treatment performance of the combined system without the MFC integration, under open circuit and under closed circuit. ....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 29 - Plant uptake estimation for each of the macrophyte species. A) Macronutrients, B) micronutrients and metal (Al). ....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 30 - Open circuit voltages over time for each of plant species. A) Circuit mean voltages B) total open circuit voltage monitoring over the 6 weeks monitoring for each of plant species.....</b>	<b>132</b>
<b>Figura 31 - Closed circuit voltages over time for each of plant species. A) Circuit mean voltages B) total open circuit voltage monitoring over the 3 weeks monitoring for each of plant species.....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 32 - Resumo gráfico referente ao artigo 3. ....</b>	<b>146</b>
<b>Figura 33 - Schematic representation of the combined treatment system. A: Anerobic biofilter (AF). B: Floating treatment wetland (FTW). C Constructed wetland with microbial fuel cells (CW-MFCs). D: Reactive bed filter - RBF. ....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 34 - Integrated CW and MFC systems. A: Anodic and cathodic chambers with different spacing (a: 40, b: 30, c: 20, and d: 10 cm) and connected with 1000 <math>\Omega</math> external resistors (R). B: Picture of the open circuit voltage monitoring in the first phase of the monitoring .....</b>	<b>153</b>
<b>Figura 35 - Summary of the treatment performance of the combined system and temporal variations. The “n” values present the number of samples analyzed from each sampling point during the monitoring and the overall treatment performance over the monitoring year, respectively. ....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 36 - Voltage monitoring between each of the 4 electrode spacing (10, 20, 30, and 40 cm). A: Open circuit voltages using GS as cathodes. B: Open circuit voltages using GAC cathodes and C: closed circuit operation with external circuits connected to 1000 <math>\Omega</math> resistors.....</b>	<b>163</b>
<b>Figura 37 - Polarization and power curves for all design conditions (10, 20, 30, and 40 cm electrode spacing). A: Polarization curves. B: Power density curves. ....</b>	<b>165</b>

**Figura 38 - Analytical characterization of the raw and treated wastewaters Abbreviations: RW: Raw Wastewater; AF: Anaerobic Filter; FTW: Floating Treatment Wetlands; CW-MBFC: Constructed Wetlands-Microbial Fuel Cell; RBF: Reactive Bed Filter. Data are presented as mean  $\pm$  standard deviation; Results of the different treatment units were compared against the “raw wastewaters results” by one-way ANOVA following Tukey’s Multiple Comparison Test. Significantly different means were represented by: \* =  $p < 0.05$ , \*\* =  $p < 0.01$ , \*\*\* =  $p < 0.001$ , \*\*\*\* =  $p < 0.0001$ ).170**

**Figura 39 - Diagram of the treatment units that composed the two treatment systems. .... 177**

**Figura 40 - Simplified representation of the treatment system design. A) FTW. B) VFCW-MFC. C) VFCW. D) HFCW. \* Gravel n. 2 (19–25 mm), gravel n. 1 (5 - 19 mm) and gravel n. 0 (4.8 - 9.5 mm). .... 179**

**Figura 41 - Mean removal efficiencies for the VF+HFCW and CW-MFC treatment lines considering the 3 different operation phases. A) Average efficiencies considering the AF + FTW + VFCW + HFCW system. B) Average efficiencies considering the AF + FTW + CW-MFC system. .... 187**

**Figura 42 - Voltages values obtained through daily measurements. A) CW-MFC unit. B) FTW unit. .... 189**

**Figura 43 - Polarization curves performed for the two treatment units, normalized to the anode’s superficial areas. A) Voltage x current density graph from the CW-MFC. B) Power density x current from the CW-MFC unit. C) Voltage x current density graph from the FTW unit. D) Power density x current from the FTW unit. The values of 10, 20, 30 and 40 cm are related to the electrode spacings in the CW-MFC unit.189**

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição de alguns exemplos de sistemas WCs intensificados / integrados com outras tecnologias verificados na literatura. ....	40
Tabela 2 – Características de estudos envolvendo unidades WC-CCM publicados na literatura. ....	50
Tabela 3 – Título, autores e situação dos artigos desenvolvidos durante o período de doutoramento. ....	54
Tabela 4 - Resumo das principais fases de operação dos sistemas de tratamento..	61
Tabela 5 - Resumo dos parâmetros determinados e as respectivas técnicas empregadas. ....	63
Tabela 6 - <i>Summary of design, operation and performance of FTW system from several studies.</i> ....	86
Tabela 7 - <i>Plant development and nutrient uptake from several FTW researches.</i> .	101
Tabela 8 - <i>Mean concentrations (<math>\pm</math>SD) of raw and treated wastewater pollutants in relation to wastewater standard emissions.</i> ....	121
Tabela 9 - <i>Mean pollutant loading rates applied in the FTW unit in relation to literature recommendations for FWS CW systems.</i> ....	122
Tabela 10- <i>Mean values found for deep (50 cm below water surface) and shallow (5 cm bellow water surface) zones in the FTW unit.</i> ....	127
Tabela 11 - <i>Summary of phenological aspects and plant species compositions.</i> .....	129
Tabela 12 - <i>Mean concentration (<math>\pm</math> SD) of the wastewater after each of the combined system treatment stages and emission standards from the Brazilian and international guidelines.</i> .....	157
Tabela 13 - <i>Summary of the electrode spacing potential bioenergy generation, where “max.” is the maximum voltage value obtained.</i> .....	166
Tabela 14 - <i>Summary of concentrations (<math>\pm</math> SD) obtained during Phase 1 (150 L/day).</i>	182
Tabela 15 - <i>Summary of concentrations (<math>\pm</math> SD) obtained during Phase 2 (300 L/day).</i>	184
Tabela 16 - <i>Summary of concentrations (<math>\pm</math> SD) obtained during Phase 3 (450 L/day).</i>	185
Tabela 17 - <i>Summary of the loading rates and other operation aspects for each of the treatment units.</i> .....	186

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV/LCA	Avaliação de Ciclo de Vida (do inglês <i>Life Cycle Assessment</i> )
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CAG	Carvão Ativado Granular
CCM/MFC	Célula de Combustível Microbiana (do inglês <i>Microbial Fuel Cell</i> ).
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total (do inglês <i>Total Organic Carbon</i> )
CV/HP	Cavalo-vapor (do inglês <i>Horse Power</i> )
DQO/COD	Demanda Química de Oxigênio ( <i>Chemical Oxygen Demand</i> )
DBO/BOD	Demanda Bioquímica de Oxigênio (do inglês <i>Biochemical Oxygen Demand</i> )
DDP	Diferença de Potencial
EP	Equivalente Populacional
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês <i>Environmental Protection Agency</i> )
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FMR	Filtro com Mídias Reativas
NBR	Norma Técnica Brasileira
NMP	Número Mais Provável
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial Hidrogeniônico

POA	Processo Oxidativo Avançado
PT	Fósforo Total
PVC	Policloreto de Vinila
RS	Rio Grande do Sul
SBN/NBS	Soluções Baseadas na Natureza (do inglês <i>Nature-based Solutions</i> )
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SS	Sólidos Suspensos
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
TDH/HRT	Tempo de Detenção Hidráulico (do inglês <i>Hydraulic Retention Time</i> )
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo, do inglês <i>Upflow Anerobic Sludge Blanket</i> .
UFC	Unidade Formadora de Colônias
UV	Ultravioleta
WC/CW	<i>Wetlands</i> Construído (do inglês <i>Constructed Wetland</i> )
WCFV/VFCW	<i>Wetland</i> Construído de Fluxo Vertical (do inglês <i>Vertical Flow Constructed Wetlands</i> )
WCFHSS/HFCW	<i>Wetland</i> Construído de Fluxo Horizontal Subsuperficial (do inglês <i>Horizontal Flow Constructed Wetlands</i> )
WCF/FTW	<i>Wetland</i> Construído Flutuante (do inglês <i>Floating Treatment Wetlands</i> ).
WC-CCM/CW-MFC	<i>Wetland</i> Construído integrado com Células de Combustível Microbianas (do inglês <i>Constructed Wetlands – Microbial Fuel Cell</i> )

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	20
2. HIPÓTESES .....	27
3. OBJETIVOS .....	28
Objetivo Geral.....	28
Objetivos específicos .....	28
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	29
4.1 Tecnologias de saneamento sustentável.....	29
4.2.1 Sistemas <i>Wetlands</i> Construídos .....	29
4.3 Sistemas <i>Wetlands</i> Construídos integrados com células de combustível microbianas.....	41
5. METODOLOGIA .....	52
5.1 Local de estudo .....	52
5.2 Delineamento da pesquisa.....	53
5.3 Construção e operação das unidades de tratamento experimentais .....	56
5.4 Monitoramento dos sistemas de tratamento.....	62
5.4.1 Caracterização analítica dos efluentes .....	62
5.4.2 Fenologia e monitoramento climático .....	64
5.4.3 Células de combustível microbianas e acompanhamento da bioenergia .....	65
6. RESULTADOS .....	67
6.1 ARTIGO 1 – <i>FLOATING TREATMENT WETLANDS: A REVIEW AND BIBLIOMETRIC ANALYSIS.</i> .....	69
6.2 ARTIGO 2 – <i>FLOATING TREATMENT WETLANDS INTEGRATED WITH MICROBIAL FUEL CELL FOR THE TREATMENT OF URBAN WASTEWATERS AND BIOENERGY GENERATION</i> .....	108
6.3 ARTIGO 3 – <i>HYBRID CONSTRUCTED WETLANDS INTEGRATED WITH MICROBIAL FUEL CELLS AND REACTIVE BED FILTER FOR WASTEWATER TREATMENT AND BIOELECTRICITY GENERATION.</i> .....	144
6.4 ARTIGO 4 – <i>INFLUENCE OF LOADING RATES AND FEEDING CONDITIONS ON HYBRID CONSTRUCTED WETLANDS INTEGRATED WITH MICROBIAL FUEL CELLS</i> .....	171
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	192
REFERÊNCIAS.....	197



# 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de saneamento em países emergentes tem fomentado o desenvolvimento de novas tecnologias visando o tratamento descentralizado de efluentes de forma eficiente e sustentável. Nesse contexto, além do desempenho de remoção de poluentes das unidades de tratamento, diferentes processos têm sido incorporados às tecnologias de saneamento na busca pela sua aproximação aos conceitos de economia circular, aprimorando a qualidade do efluente tratado ou ainda garantindo maior segurança em relação a remoção de poluentes prioritários. Dessa forma, o desenvolvimento de sistemas de engenharia integrando diferentes processos de tratamento pode promover não somente a otimização do desempenho de unidades descentralizadas, assim como, diversos benefícios secundários relacionados ao saneamento.

Apesar dos tanques sépticos serem uma tecnologia popularmente empregada no tratamento descentralizado de efluentes no mundo todo, poluentes como nutrientes e parte da matéria orgânica dissolvida podem passar pelo tratamento e permanecer no efluente (SAEED et al., 2021). Nesse contexto, torna-se necessário a integração de unidades de tratamento para o polimento. A Lei n. 14.026/2020, a qual atribui o marco legal de saneamento básico, já indica a possibilidade de tecnologias para o tratamento descentralizado de efluentes sanitários, principalmente em áreas rurais, remotas ou ainda núcleos urbanos informais já consolidados.

A universalização dos serviços de saneamento básico é ainda um desafio para a administração pública e outros setores da sociedade e iniciativa privada no Brasil. Infelizmente, os serviços de coleta e tratamento de efluentes sanitários ainda estão bastante aquém do que deveriam e em comparação com países tanto desenvolvidos como em desenvolvimento. A falta de saneamento adequado resulta em diversos prejuízos à saúde pública, aos ecossistemas, qualidade de vida, economia e ainda em relação aos objetivos do desenvolvimento sustentável - ODS (DIEP et al., 2021). Devido a elevada quantidade de municípios de pequeno e médio porte assim como de regiões com baixa densidade populacional, o tratamento descentralizado de efluentes se apresenta comumente como uma estratégia mais viável do que a coleta e encaminhamento através de longas redes de tubulações pra estações de tratamento centralizadas, além de promover a possibilidade de reuso local da água para fins não potáveis. Entretanto, a prática de tratamento e reuso de

efluentes ainda não está sendo adotada de forma ativa no Brasil, mesmo com cenários de escassez de água em anos recentes (VON SPERLING, 2016). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), as redes de esgoto abrangem cerca de 55% da população total brasileira (114,6 milhões de habitantes), enquanto que do total de esgotos gerados no país, cerca de 50% são tratados. Já no estado do Rio Grande do Sul, são coletados e tratados adequadamente apenas 38,6% do volume de esgotos sanitários gerados no estado (SNIS, 2020).

A busca pela redução de emissões de poluentes oriundas do tratamento de efluentes associada ainda pela incorporação do conceito de economia circular em estação de tratamento têm motivado o desenvolvimento de novas tecnologias para os setores de saneamento, tais como as Soluções Baseadas na Natureza (SBN). Além da diminuição das emissões atmosféricas e outros impactos ambientais, essas alternativas de tratamento podem possibilitar a integração paisagística de estações de tratamento, assim como a recuperação dos recursos presentes nos efluentes (LANGERGRABER et al., 2020). Dentre estes recursos, destacam-se principalmente a elevada presença de nutrientes, energia química, e ainda a água para reuso que normalmente são descartados.

No caso dos nutrientes presentes no esgoto, compostos principalmente por N e P nas formas de nitrogênio amoniacal e fosfatos, quando o tratamento for inadequado ou ineficiente, o descarte desses componentes em ambientes naturais pode acarretar o estado de eutrofização do corpo hídrico, resultando em diversos problemas ambientais, sociais e econômicos para a região, principalmente em corpos hídricos mais sensíveis. Entretanto, algumas tecnologias de tratamento podem possibilitar a remoção, assim como, a recuperação desses nutrientes e sua potencial reutilização, por exemplo, para adubação de solos. Essa recuperação pode ocorrer através da incorporação na biomassa vegetal ou ainda pela adsorção e remoção de materiais reativos empregados como filtros no tratamento (DELL'OSBEL et al. 2020).

Em relação a energia química dos compostos orgânicos dos efluentes, nas últimas décadas estão sendo desenvolvidas tecnologias que possam promover a conversão e aproveitamento dessa energia em eletricidade, através dos sistemas bioeletroquímicos. Dentre esses sistemas, tem-se destacado na literatura as células de combustível microbianas, as quais consistem basicamente na presença de um substrato orgânico, eletrodos localizados em pontos com diferentes potenciais redox e um circuito externo por onde serão transportados os elétrons gerados na oxidação desse substrato por bactérias específicas (DOHERTY et al., 2015). Essa movimentação de elétrons que pode caracterizar uma corrente elétrica, é

considerada uma fonte renovável de energia. Apesar desses sistemas ainda estarem em desenvolvimento, já estão sendo verificados estudos publicados que conseguiram reaproveitar essa bioenergia gerada para alguma finalidade, como abastecer biossensores (GUPTA et al., 2021), para iluminação com lâmpadas LED (BOLTON et al., 2019), ou ainda carregar *smartphones* (GUADARRAMA-PÉREZ et al., 2019).

Já o reuso local de efluentes tratados tem se mostrado uma importante estratégia para diminuir a demanda de água potável, frente a crise hídrica que ocorre em diversas regiões do mundo inteiro. Nesse contexto, um dos usos comumente empregados para o efluente tratado é o seu reaproveitamento para irrigação agrícola local (MILANI et al., 2020). No Brasil, dependendo do grau e da eficiência do sistema de tratamento, o efluente pode ainda ser reaproveitado para outras finalidades não potáveis e mais domésticas, tais como lavagem de pisos, irrigação de jardins, descargas de vasos sanitários e fins paisagísticos (lagos ou chafarizes), conforme descrito pela NBR 13969 (ABNT, 1997).

Mais recentemente, foi preconizada a Resolução CONSEMA 419/2020, a qual estabelece critérios e procedimentos para o reuso de águas residuárias no estado do Rio Grande do Sul. A Resolução define diferentes padrões de emissão dependendo da finalidade do reuso, sendo que, para fins urbanos, o efluente tratado deverá atender limites relacionados à presença de coliformes termotolerantes, ovos de helmintos, cloro residual e condutividade elétrica. Já para fins agrícolas e florestais, o efluente tratado deverá atender uma quantidade muito maior de padrões de emissão, os quais englobam por exemplo pH, coliformes termotolerantes e as concentrações de diversos metais (CONSEMA - 419, 2020). Entretanto, é importante destacar que nem todos os estados brasileiros possuem legislação própria para o reuso de efluentes líquidos, sendo nestes a NBR 13969 (ABNT, 1997) ainda a principal referência.

Nesse contexto, uma tecnologia de tratamento já consolidada e que tem potencialidade para promover a recuperação desses recursos presentes nos efluentes são os sistemas *Wetlands* Construídos (WCs). Os WCs consistem em sistemas de engenharia projetados para utilizar os processos naturais envolvendo plantas, substratos e a microbiota presente nos mesmos para o tratamento de águas residuárias (VYMAZAL, 2007). Esses sistemas apresentam diferentes classificações e configurações de acordo com a presença de lâmina d'água exposta (fluxo superficial ou subsuperficial), o sentido do fluxo no sistema (fluxo vertical ou horizontal) e ainda conforme o tipo de macrófita utilizada, que pode ser uma espécie emersa, flutuante ou ainda submersa (DOTRO et al., 2017).

Ademais, apesar de já estarem bastante difundidos em regiões rurais, os WCs têm se apresentado também como uma interessante alternativa para um gerenciamento mais sustentável das águas em centros urbanos. Não somente efluentes urbanos, estes sistemas têm sido utilizados para tratar/infiltrar esgotos pluviais e para a recuperação de corpos hídricos. O emprego dessa tecnologia proporciona uma aproximação ao conceito de economia circular e ao gerenciamento sustentável de águas, uma vez que podem promover a recuperação de diversos recursos e possibilidade de reuso da mesma. Além disso, os WCs, assim como outras tecnologias baseadas na natureza, podem promover diversos benefícios ambientais e serviços ecossistêmicos em centros urbanos, tais como bioprodutos a partir da biomassa, *habitat* para fauna local contribuir para o conceito de “cidades esponja” (MLIH et al., 2020).

Outro aspecto que tem despertado interesse na aplicação de sistemas WCs é o plantio simultâneo de diferentes espécies em uma unidade, denominado “policultivo”, promovendo um ambiente mais heterogêneo e menos susceptível a pragas (SEZERINO e PELISSARI, 2021). Além de potencialmente aprimorar aspectos paisagísticos através do emprego de plantas consideradas ornamentais e que produzam flores (SANDOVAL et al., 2020), é possível que a aplicação de espécies diversas possa melhorar também o desempenho de tratamento do sistema, devido a maior diversificação de microrganismos presentes no sistema radicular das macrófitas (NEMA et al., 2020). Entretanto, é importante destacar que, ao longo dos anos, espécies mais agressivas tendem a se desenvolver mais rápido e inibir o crescimento das espécies mais fracas, o que pode dificultar a manutenção de várias espécies em sistemas WCs considerando o longo prazo (VYMAZAL et al., 2022).

A integração das tecnologias *Wetlands* Construídos com Células de Combustível Microbianas (WC-CCM) tem despertado bastante interesse da comunidade acadêmica, e emergiu do fato de que os sistemas WCs geralmente já apresentam, de forma natural, um gradiente redox devido a presença de camadas com diferentes concentrações de oxigênio dissolvido. Por outro lado, o efluente em tratamento também deve possuir matéria orgânica a ser oxidada por microrganismos. Dessa forma, a inserção de eletrodos nestas diferentes camadas (óxicas e anóxicas ou anaeróbias), conectados a um circuito externo e a presença de bactérias eletrogênicas, são suficientes para começar a gerar bioenergia (CORBELLA e PUIGAGUT, 2015). Porém, mesmo os WCs já sendo uma tecnologia de tratamento bastante consolidada e que a décadas já vem sendo desenvolvida com unidades de tratamento em escala real, a integração desses sistemas com CCMs é ainda bastante recente na literatura (GUADARRAMA-PÉREZ et al., 2019).

Apesar do elevado potencial de geração de energia presente nos efluentes a serem tratados, a construção e operação dos sistemas integrando WCs-CCM em escala real e gerando quantidades aproveitáveis de bioenergia, por exemplo para alimentar dispositivos de monitoramento ou iluminação, ainda é um desafio. Diferente dos sistemas WCs desenvolvidos no mundo inteiro, a aplicação desses sistemas integrados ainda se encontra em um estágio de escala laboratorial ou piloto, com muitos dos estudos publicados avaliando a aplicação de efluentes sintéticos no tratamento (JI et al., 2021). A maioria desses estudos, visando maximizar a geração de energia, desenvolveu sistemas com configurações e operações muito distantes das condições empregadas em sistemas de tratamento reais, o que pode comprometer e até mesmo inviabilizar o aumento de escala dessas unidades devido aos problemas com a arquitetura ou com os custos de tratamento (XU et al., 2018).

Ao conduzir um estudo de revisão sobre sistemas WC-CCM, Samal et al. (2020) verificaram que as gerações máximas de bioeletricidade nos sistemas avaliados alcançaram algumas dezenas de  $\text{mW/m}^3$  quando tratando efluentes urbanos sintéticos, tais como  $11,67 \text{ mW/m}^3$  (SRIVASTAVA et al., 2020a), e  $2,8 \text{ mW/m}^3$  (considerando o volume do reator) tratando efluente urbano sintético (WANG et al., 2019). Entretanto, alguns trabalhos publicados apresentaram valores superiores de densidade de potência, tais como no estudo conduzido por Liu et al. (2020), que verificaram valores máximos de 361,4; 413,6 e 496,4  $\text{mW/m}^3$  para o tratamento de efluentes de suinocultura, e Oodally et al. (2019), que verificaram o valor máximo de  $229 \text{ mW/m}^3$  com a macrófita *Cyperus prolifer*. Entretanto, é importante destacar que esses dois últimos sistemas foram desenvolvidos e monitorados em escala laboratorial, com volume de 5 L, temperatura controlada, iluminação artificial e concentração de 730 mg DQO/L (OODALLY et al., 2019); e com volume total de 37,8 L e tratando com fluxo contínuo de 5,75 L/dia (com dois dias de tempo de detenção) efluentes reais de suinocultura com valores de DQO variando entre 912,64 e 1172,38 mg/L (LIU et al., 2020).

Atualmente, existem ainda diversos aspectos limitantes que dificultam aplicação em escala real de sistemas integrando WC-CCM. Alguns pontos de investigação que tem se destacado e alavancado pesquisas no mundo inteiro são por exemplo o desafio de aumentar o tamanho das unidades sem acarretar resistências internas imensas; o emprego de eletrodos com materiais que não inviabilizem economicamente o sistema em escalas maiores e que sejam duráveis; monitoramentos mais longos de unidades sendo alimentados com efluentes reais e operadas sob condições próximas da realidade, sem comprometer o desempenho de

tratamento e a geração de bioenergia; avaliação de novas espécies de macrófitas que possam promover maior liberação de oxigênio nas raízes e a inoculação de cepas microbianas para otimizar o desempenho (DOTRO et al., 2017; SAMAL et al., 2021; JI et al., 2021).

O grupo Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade de Santa Cruz do Sul já vem desenvolvendo pesquisas na temática de *Wetlands* Construídos para o tratamento de águas residuárias desde o ano de 2005 (MACHADO et al., 2009), inclusive com pesquisadores fazendo parte dos grupos *Wetlands* Brasil e da *Red Panamericana de Sistemas de Humedales* (HUPANAM). Entretanto, apesar de várias tecnologias já terem sido avaliadas quando combinadas a WCs (como reatores anaeróbios, ozônio, tanques de microalgas, lâmpadas UV), apenas mais recentemente (a partir de 2018), sistemas integrando unidades WCs com células de combustível microbianas começaram a ser conduzidas pelo grupo de pesquisa. Em um primeiro momento, unidades de aprox. 100 L com sistemas WC-CCM foram avaliadas na UNISC para o tratamento de efluentes de lavanderia hospitalar (LUTTERBECK et al., 2020), enquanto nos anos seguintes os sistemas evoluíram para unidades maiores (1000 L) e com condições de operação mais próximas a realidade (alimentação por pulsos, no lugar de bateladas).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho de doutoramento foi de avaliar sistemas de tratamento de efluentes urbanos integrando processos de anaerobiose e diferentes configurações de *Wetlands* Construídos, em escala piloto com células de combustível microbianas, visando o tratamento e o reuso não potável dos efluentes, assim como a geração de bioenergia, recuperação de recursos e a integração paisagística através de plantas ornamentais.

O sistema de tratamento foi composto por 4 unidades diferentes de WCs: um WC de fluxo vertical parcialmente saturado, um sistema WC Flutuante (estes dois integrados a células de combustível microbianas), um WC de fluxo vertical não saturado, e por último um WC de fluxo horizontal subsuperficial e com uma camada preenchida com tijolos picados visando a adsorção de fósforo. Além dos WCs, duas outras unidades fizeram parte do sistema combinado: um biofiltro anaeróbio, com dois compartimentos (um decantador e um compartimento com conduítes plásticos) e um filtro de areia preenchido com mídias reativas que pudessem ser substituídas após a sua saturação (esferas de argila expandida), recuperando a eficiência do sistema na remoção de fósforo após a saturação do material filtrante.

Durante o primeiro ano de monitoramento, os sistemas de tratamento eram operados em fluxo batelada, com alimentação através de ciclos enchimento e esvaziamento (*Tidal flow*

ou fluxo de marés), no qual as unidades eram esvaziadas e enchidas uma vez por semana. Posteriormente, durante aproximadamente 1 ano, as unidades de tratamento de tratamento foram alimentadas através da aplicação de pulsos de curta duração (de 2 a 3 minutos cada) ao longo do dia.

## REFERÊNCIAS

- ABED, S. N.; ALMUKTAR, S. A.; SCHOLZ, M. Remediation of synthetic greywater in mesocosm—Scale floating treatment wetlands. **Ecological Engineering**, v. 102, p. 303-319, 2017.
- AFZAL, M., ARSLAN, M., MÜLLER, J. A., SHABIR, G., ISLAM, E., TAHSEEN, R., ... & KHAN, Q. M. Floating treatment wetlands as a suitable option for large-scale wastewater treatment. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 9, p. 863-871, 2019.
- AFZAL, M., REHMAN, K., SHABIR, G., TAHSEEN, R., IJAZ, A., HASHMAT, A. J., & BRIX, H. Large-scale remediation of oil-contaminated water using floating treatment wetlands. **NPJ Clean Water**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2019.
- ANDRÉS, E., ARAYA, F., VERA, I., POZO, G., & VIDAL, G. Phosphate removal using zeolite in treatment wetlands under different oxidation-reduction potentials. **Ecological Engineering**, v. 117, p. 18-27, 2018.
- APHA/AWWA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2012.
- ARANEDA, I., TAPIA, N. F., LIZAMA ALLENDE, K., & VARGAS, I. T. Constructed wetland-microbial fuel cells for sustainable greywater treatment. **Water**, v. 10, n. 7, p. 940, 2018.
- BENVENUTI, T.; HAMERSKI, F.; GIACOBBO, A.; BERNARDES, A. M.; ZOPPAS-FERREIRA, J.; RODRIGUES, M. A. Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: a real-scale study. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 6, n. 5, p. 5706-5711, 2018.



- BOLTON, C. R.; RANDALL, D. G. Development of an integrated wetland microbial fuel cell and sand filtration system for greywater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 103249, 2019.
- BORATTO, D. C.; BARRETO, A. B.; SEZERINO, P. H.; DE SOUZA, C. L. Wetlands construídos empregados no tratamento de esgoto sob o contexto do saneamento de baixo carbono. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 7, p. 390-405, 2021.
- BORNE, K. E.; FASSMAN-BECK, E. A.; WINSTON, R. J.; HUNT, W. F., TANNER, C. C. Implementation and maintenance of floating treatment wetlands for urban stormwater management. **Journal of Environmental Engineering**, v. 141, n. 11, p. 04015030, 2015.
- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Publicado no DOU de 16.07.2020.
- CALHEIROS, C. S.; BESSA, V. S.; MESQUITA, R. B.; BRIX, H.; RANGEL, A. O.; CASTRO, P. M. Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. **Ecological Engineering**, v. 79, p. 1-7, 2015.
- CHANCE, L. M. G.; VAN BRUNT, S. C.; MAJSZTRIK, J. C.; WHITE, S. A. Short-and long-term dynamics of nutrient removal in floating treatment wetlands. **Water research**, v. 159, p. 153-163, 2019.
- CHANCE, L. M. Garcia; WHITE, S. A. Aeration and plant coverage influence floating treatment wetland remediation efficacy. **Ecological Engineering**, v. 122, p. 62-68, 2018.
- CHEN, Z.; CUERVO, D. P.; MÜLLER, J. A.; WIESSNER, A., KÖSER, H.; VYMAZAL, J.; KÄSTNER M.; KUSCHK, P. Hydroponic root mats for wastewater treatment—a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 16, p. 15911-15928, 2016.

CHIARAWATCHAI, N.; NUENGJAMNONG, C.; RACHDAWONG, P.; OTTERPOHL, R.  
Potential study of using earthworms as an enhancement to treat high strength wastewater.  
**The Thai Journal of Veterinary Medicine**, v. 37, n. 4, p. 25-32, 2007.

COLARES, G. S.; DELL'OSBEL, N.; WIESEL, P. G.; OLIVEIRA, G. A.; LEMOS, P. H. Z.;  
DA SILVA, F. P.; LUTTERBECK, C.A.; KIST, L.T.; MACHADO, Ê. L. Floating  
treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. **Science of the Total  
Environment**, v. 714, p. 136776, 2020.

COLARES, G. S.; DE SOUZA CELENTE, G.; DA SILVA, F. P.; DE LORETO, A. C.;  
LUTTERBECK, C. A.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Combined system for the  
treatment and reuse of urban wastewater: the efficiency of anaerobic reactors+ hybrid  
constructed wetlands+ ozonation. **Water Science and Technology**, v. 80, n. 2, p. 254-264,  
2019.

COLARES, G. S.; DELL'OSBEL, N.; BARBOSA, C. V.; LUTTERBECK, C.; OLIVEIRA,  
G. A.; RODRIGUES, L. R.; BERGMANN C. P.; LOPEZ D. R.; RODRIGUEZ A. L.;  
VYMAZAL, J.; MACHADO, E. L. Floating treatment wetlands integrated with microbial  
fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation. **Science of The  
Total Environment**, v. 766, p. 142474, 2021.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Environmental State Council) -  
CONSEMA - Resolution 355, 2017. Provides criteria and standards for the emission of  
liquid effluents for generating sources that discharge their effluents into surface waters in  
the State of Rio Grande do Sul.

CORBELLA, C.; PUIGAGUT, J. Improving domestic wastewater treatment efficiency with  
constructed wetland microbial fuel cells: Influence of anode material and external  
resistance. **Science of the total environment**, v. 631, p. 1406-1414, 2018.

CORBELLA, C.; PUIGAGUT, J. Microbial fuel cells implemented in constructed wetlands:  
Fundamentals, current research and future perspectives. **Contributions to science**, p. 113-  
120, 2016.

- CRITES, R. W. Design criteria and practice for constructed wetlands. **Water science and technology**, v. 29, n. 4, p. 1-6, 1994.
- DE MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; PEREIRA, O. G. Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*cynodon* spp) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 1, p. 43-53, 2008.
- DE OLIVEIRA SCHWAICKHARDT, R.; MACHADO, Ê. L.; LUTTERBECK, C. A.. Combined use of VUV and UVC photoreactors for the treatment of hospital laundry wastewaters: Reduction of load parameters, detoxification and life cycle assessment of different configurations. **Science of the Total Environment**, v. 590, p. 233-241, 2017.
- DE SOUZA CELENTE, G.; COLARES, G. S.; DA SILVA ARAÚJO, P.; MACHADO, Ê. L.; & LOBO, E. A. Acute ecotoxicity and genotoxicity assessment of two wastewater treatment units. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 10, p. 10520-10527, 2020.
- DE SOUZA, M. P.; HOELTZ, M.; BRITTES BENITEZ L.; MACHADO, Ê. L.; DE SOUZA SCHNEIDER, R. D. C. Microalgae and clean technologies: a review. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 47, n. 11, p. 1800380, 2019.
- DELL’OSBEL, N.; COLARES, G. S.; DE OLIVEIRA, G. A.; DE SOUZA, M. P.; BARBOSA, C. V.; MACHADO, Ê. L. Bibliometric analysis of phosphorous removal through constructed wetlands. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 3, p. 1-18, 2020.
- DELL’OSBEL, Naira. Tratamento de efluentes urbanos utilizando *wetlands* construídos híbridos para remoção de nutrientes com barreira adsorvente removível. 2020. 61 pp. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado). Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2020.

- DELL'OSBEL, N.; COLARES, G. S.; OLIVEIRA, G. A.; RODRIGUES, L. R.; DA SILVA, F. P., RODRIGUEZ, A. L.; LÓPEZ, D. A. R.; LUTTERBECK, C.A.; SLVEIRA, E.O.; KIST, L.T.; MACHADO, Ê. L. Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: increased nutrient removal and landscape potential. **Ecological Engineering**, v. 158, p. 106072, 2020.
- DI LUCA, G. A.; MUFARREGE, M. M.; HADAD, H. R.; MAINE, M. A. Nitrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 233-240, 2019.
- DOHERTY, L.; ZHAO, Y.; ZHAO, X.; HU, Y.; HAO, X.; XU, L.; LIU, R. A review of a recently emerged technology: constructed wetland–microbial fuel cells. **Water research**, v. 85, p. 38-45, 2015.
- DOTRO, G., LANGERGRABER, G., MOLLE, P., NIVALA, J., PUIGAGUT, J., STEIN, O., & VON SPERLING, M., 2017. **Treatment wetlands**. IWA publishing.
- VAN ECK, N. Jan; WALTMAN, L. Manual for VOSviewer version 1.6. 8. **CWTS Meaningful Metrics**. Universiteit Leiden, 2018.
- EFFENDI, H.; MARGARETHA, J. A.; KRISANTI, M. Reducing ammonia and chromium concentration in batik wastewater by vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L.) grown in floating wetland. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 16, n. 3, p. 2947-2956, 2018.
- EFFENDI, H.; MUNAWAROH, A.; AYU, I. P. Crude oil spilled water treatment with *Vetiveria zizanioides* in floating wetland. **The Egyptian Journal of Aquatic Research**, v. 43, n. 3, p. 185-193, 2017.
- EPA (United States Environmental Protection Agency), 2000. Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment Factsheet.

FAHID, M., ARSLAN, M., SHABIR, G., YOUNUS, S., YASMEEN, T., RIZWAN, M., SIDDIQUE, K.; AHMAD, S. R.; TAHSEEN, R.; IQBAL, S.; ALI, S.; AFZAL, M. *Phragmites australis* in combination with hydrocarbons degrading bacteria is a suitable option for remediation of diesel-contaminated water in floating wetlands. **Chemosphere**, v. 240, p. 124890, 2020.

FANG, Z.; SONG, H. L.; CANG, N.; LI, X. N. Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. **Bioresource technology**, v. 144, p. 165-171, 2013.

FAULWETTER, J. L.; BURR, M. D.; CUNNINGHAM, A. B.; STEWART, F. M.; CAMPER, A. K.; STEIN, O. R. Floating treatment wetlands for domestic wastewater treatment. **Water science and technology**, v. 64, n. 10, p. 2089-2095, 2011.

FONDER, N.; HEADLEY, T. Systematic classification, nomenclature and reporting for constructed treatment wetlands. In: **Water and nutrient management in natural and constructed wetlands**. Springer, Dordrecht, 2010. p. 191-219.

GAO, L.; ZHOU, W.; HUANG, J.; HE, S.; YAN, Y.; ZHU, W.; WU, S. ZHANG, X. Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent. **Bioresource technology**, v. 234, p. 243-252, 2017.

GILL, L. W.; RING, P.; CASEY, B.; HIGGINS, N. M.; JOHNSTON, P. M. Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. **Science of the Total Environment**, v. 601, p. 32-44, 2017.

GOMES, A. C.; SILVA, L.; ALBUQUERQUE, A.; SIMÕES, R.; STEFANAKIS, A. I. Treatment of cork boiling wastewater using a horizontal subsurface flow constructed wetland combined with ozonation. **Chemosphere**, v. 260, p. 127598, 2020.

GUADARRAMA-PÉREZ, O.; GUTIÉRREZ-MACÍAS, T.; GARCÍA-SÁNCHEZ, L.; GUADARRAMA-PÉREZ, V. H.; ESTRADA-ARRIAGA, E. B. Recent advances in constructed wetland-microbial fuel cells for simultaneous bioelectricity production and

- wastewater treatment: a review. **International Journal of Energy Research**, v. 43, n. 10, p. 5106-5127, 2019.
- GUPTA, S.; SRIVASTAVA, P.; PATIL, S. A.; YADAV, A. K. A comprehensive review on emerging constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: potential applications and challenges. **Bioresource Technology**, v. 320, p. 124376, 2021.
- HADAD, H. R.; MUFARREGE, M. M.; DI LUCA, G. A.; MAINE, M. A. Salinity and pH effects on floating and emergent macrophytes in a constructed wetland. **Water Science and Technology**, v. 2017, n. 1, p. 270-275, 2018.
- HEADLEY, T. R.; TANNER, C. C. Floating treatment wetlands: an innovative option for stormwater quality applications. In: **11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Indore, India**. 2008.
- HEADLEY, T. R.; TANNER, C. C. Floating wetlands for stormwater treatment: Removal of copper, zinc and fine particulates. **Technical Publication, Auckland Regional Council, Auckland, New Zealand**, 2007.
- HEADLEY, T. R.; TANNER, Chris C. Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: an innovative stormwater treatment technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 21, p. 2261-2310, 2012.
- HORN, T. B.; ZERWES, F. V.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Constructed wetland and photocatalytic ozonation for university sewage treatment. **Ecological Engineering**, v. 63, p. 134-141, 2014.
- HUANG, X.; DUAN, C.; DUAN, W.; SUN, F.; CUI, H.; ZHANG, S.; CHEN, X. Role of electrode materials on performance and microbial characteristics in the constructed wetland coupled microbial fuel cell (CW-MFC): A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 301, p. 126951, 2021.

- IJAZ, A.; SHABIR, G.; KHAN, Q. M.; AFZAL, M. Enhanced remediation of sewage effluent by endophyte-assisted floating treatment wetlands. **Ecological engineering**, v. 84, p. 58-66, 2015.
- IJAZ, A.; IQBAL, Z.; AFZAL, M. Remediation of sewage and industrial effluent using bacterially assisted floating treatment wetlands vegetated with *Typha domingensis*. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 9, p. 2192-2201, 2016.
- ILYAS, H.; MASIH, I. Intensification of constructed wetlands for land area reduction: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 13, p. 12081-12091, 2017.
- INSALUD, N.; BELL, R. W.; COLMER, T. D.; RERKASEM, B. Morphological and physiological responses of rice (*Oryza sativa*) to limited phosphorus supply in aerated and stagnant solution culture. **Annals of Botany**, v. 98, n. 5, p. 995-1004, 2006.
- JAYASHREE, S.; RAMESH, S. T.; LAVANYA, A.; GANDHIMATHI, R.; NIDHEESH, P. V. Wastewater treatment by microbial fuel cell coupled with peroxicoagulation process. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 10, p. 2033-2045, 2019.
- Jl, B.; ZHAO, Y.; VYMAZAL, J.; MANDER, Ü.; LUST, R.; TANG, C. Mapping the field of constructed wetland-microbial fuel cell: A review and bibliometric analysis. **Chemosphere**, v. 262, p. 128366, 2021.
- KADAM, S. K.; WATHARKAR, A. D.; CHANDANSHIVE, V. V.; KHANDARE, R. V.; JEON, B. H.; JADHAV, J. P.; GOVINDWAR, S. P. Co-planted floating phyto-bed along with microbial fuel cell for enhanced textile effluent treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 788-798, 2018.
- KADLEC, Robert H.; WALLACE, Scott. **Treatment wetlands**. CRC press, 2008.
- KAMEL, M. S.; ABD-ALLA, M. H.; ABDUL-RAOUF, U. M.; KAMEL, M. S.; ABD-ALLA, M. H.; ABDUL-RAOUF, U. M. Characterization of anodic biofilm bacterial

- communities and performance evaluation of a mediator-free microbial fuel cell. **Environmental Engineering Research**, v. 25, n. 6, p. 862-870, 2019.
- KEIZER-VLEK, H. E.; VERDONSCHOT, P. F.; VERDONSCHOT, R. C.; DEKKERS, D. The contribution of plant uptake to nutrient removal by floating treatment wetlands. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 684-690, 2014.
- KUSIN, F. M.; HASAN, S. N. M. S.; NORDIN, N. A.; MOHAMAT-YUSUFF, F.; IBRAHIM, Z. Z. Floating Vetiver Island (fvi) and Implication for Treatment System design of polluted running water. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 17, n. 1, p. 497-510, 2019.
- LADISLAS, S.; GERENTE, C.; CHAZARENC, F.; BRISSON, J.; & ANDRES, Y. Floating treatment wetlands for heavy metal removal in highway stormwater ponds. **Ecological Engineering**, v. 80, p. 85-91, 2015.
- LANE, Sarah et al. Recommendations of the Expert Panel to Define Removal Rates for Floating Treatment Wetlands in Existing Wet Ponds. 2016.
- LEIVA, A. M.; NÚÑEZ, R.; GÓMEZ, G.; LÓPEZ, D.; & VIDAL, G. Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater. **Ecological engineering**, v. 120, p. 116-125, 2018.
- LI, X. N.; SONG, H. L.; LI, W.; LU, X. W.; NISHIMURA, O. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water. **Ecological engineering**, v. 36, n. 4, p. 382-390, 2010.
- LI, X.; GUO, R. Comparison of nitrogen removal in floating treatment wetlands constructed with *Phragmites australis* and *Acorus calamus* in a cold temperate zone. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 4, p. 1-8, 2017.



- LIN, Y.; ZHAO, Y.; RUAN, X.; BARZEE, T. J.; ZHANG, Z.; KONG, H.; ZHANG, X. The potential of constructed wetland plants for bioethanol production. **BioEnergy Research**, v. 13, n. 1, p. 43-49, 2020.
- LIU, F.; SUN, L.; WAN, J.; SHEN, L.; YU, Y.; HU, L.; ZHOU, Y. Performance of different macrophytes in the decontamination of and electricity generation from swine wastewater via an integrated constructed wetland-microbial fuel cell process. **Journal of Environmental Sciences**, v. 89, p. 252-263, 2020.
- LIU, H.; HU, Z.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W.; LIANG, S.; FAN, J.; LU, S. WU, H. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: a review. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 797-805, 2016.
- LIU, S.; SONG, H.; WEI, S.; YANG, F.; & LI, X. Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow constructed wetland—Microbial fuel cell systems. **Bioresource technology**, v. 166, p. 575-583, 2014.
- LOGAN, B. E.; HAMELERS, B.; ROZENDAL, R.; SCHRÖDER, U.; KELLER, J.; FREGUIA, S.; AELTERMAN, P.; VERSTRAETE, W.; RABAEY, K. Microbial fuel cells: Methodology and technology. **Environmental Science & Technology**, v. 40, n. 17, p. 5181-5192.
- LOPARDO, C. R.; ZHANG, L.; MITSCH, W. J.; URAKAWA, H. Comparison of nutrient retention efficiency between vertical-flow and floating treatment wetland mesocosms with and without biodegradable plastic. **Ecological engineering**, v. 131, p. 120-130, 2019.
- LUCKE, T.; WALKER, C.; BEECHAM, S. Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: A review. **Science of the Total Environment**, v. 660, p. 199-208, 2019.
- LUTTERBECK, C. A.; COLARES, G. S.; DELL'OSBEL, N.; DA SILVA, F. P.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Hospital laundry wastewaters: a review on treatment alternatives,

- life cycle assessment and prognosis scenarios. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 122851, 2020.
- MACHADO, Ê. L.; LOBO, E. A.; LOURENÇO, Â. M.; KHUN FILHO, P.; LUTTERBECK, C. A.; KIST, L. T. Secondary wastewater disinfection of UASB+ Wetland system from domestic sewerage treatment plant of University of Santa Cruz do Sul (UNISC), RS, Brazil, by catalytic photozonization. **Caderno de Pesquisa Serie Biologia**, v. 21, n. 3, p. 49-60, 2009.
- MARÍN-MUÑIZ, J. L.; HERNÁNDEZ, M. E.; GALLEGOS-PÉREZ, M. P.; AMAYA-TEJEDA, S. I. Plant growth and pollutant removal from wastewater in domiciliary constructed wetland microcosms with monoculture and polyculture of tropical ornamental plants. **Ecological Engineering**, v. 147, p. 105658, 2020.
- MERINO-SOLÍS, M. L.; VILLEGAS, E.; DE ANDA, J.; & LÓPEZ-LÓPEZ, A. The effect of the hydraulic retention time on the performance of an ecological wastewater treatment system: an anaerobic filter with a constructed wetland. **Water**, v. 7, n. 3, p. 1149-1163, 2015.
- MILANI, M.; CONSOLI, S.; MARZO, A.; PINO, A.; RANDAZZO, C.; BARBAGALLO, S.; CIRELLI, G. L. Treatment of winery wastewater with a multistage constructed wetland system for irrigation reuse. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1260, 2020.
- MLIH, R.; BYDALEK, F.; KLUMPP, E.; YAGHI, N.; BOL, R.; WENK, J. Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands—A review. **Ecological engineering**, v. 148, p. 105783, 2020.
- MOREIRA, F. D.; DIAS, E. H. O. Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. **Environmental Research**, v. 190, p. 110016, 2020.
- NAN, X.; LAVRNIC, S.; TOSCANO, A. Potential of constructed wetland treatment systems for agricultural wastewater reuse under the EU framework. **Journal of Environmental Management**, v. 275, p. 111219, 2020.

- NICHOLS, P.; LUCKE, T.; DRAPPER, D.; WALKER, C. Performance evaluation of a floating treatment wetland in an urban catchment. **Water**, v. 8, n. 6, p. 244, 2016.
- NIVALA, J.; VAN AFFERDEN, M.; HASSELBACH, R.; LANGERGRABER, G.; MOLLE, P.; RUSTIGE, H.; NOWAK, J. The new German standard on constructed wetland systems for treatment of domestic and municipal wastewater. **Water Science and Technology**, v. 78, n. 11, p. 2414-2426, 2018.
- OLGUÍN, E. J.; SÁNCHEZ-GALVÁN, G.; MELO, F. J.; HERNÁNDEZ, V. J.; GONZÁLEZ-PORTELA, R. E. Long-term assessment at field scale of floating treatment wetlands for improvement of water quality and provision of ecosystem services in a eutrophic urban pond. **Science of the Total Environment**, v. 584, p. 561-571, 2017.
- OLIVEIRA, G. A.; COLARES, G. S.; LUTTERBECK, C. A.; DELL'OSBEL, N.; MACHADO, Ê. L.; RODRIGUES, L. R. Floating treatment wetlands in domestic wastewater treatment as a decentralized sanitation alternative. **Science of the Total Environment**, v. 773, p. 145609, 2021.
- OLIVEIRA, G. A.; MACHADO, Ê. L.; KNOLL, R. S., DELL'OSBEL, N.; COLARES, G. S.; RODRIGUES, L. R. Combined system for wastewater treatment: ozonation and coagulation via tannin-based agent for harvesting microalgae by dissolved air flotation. **Environmental Technology**, v. 43, n. 9, p. 1370-1380, 2022.
- OODALLY, A.; GULAMHUSSEIN, M.; RANDALL, D. G. Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African wetland plants. **Journal of Water Process Engineering**, v. 32, p. 100930, 2019.
- OON, Y. L.; ONG, S. A.; HO, L. N., WONG, Y. S.; DAHALAN, F. A.; OON, Y. S.; LEHL, H. K. THUNG, W. E. Synergistic effect of up-flow constructed wetland and microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. **Bioresource technology**, v. 203, p. 190-197, 2016.

- OUELLET-PLAMONDON, C.; CHAZARENC, F.; COMEAU, Y.; BRISSON, J. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate. **Ecological Engineering**, v. 27, n. 3, p. 258-264, 2006.
- PAVLINERI, N.; SKOULIKIDIS, N. T.; TSIHRINTZIS, V. A. Constructed floating wetlands: a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 308, p. 1120-1132, 2017.
- PELISSARI, C. Dinâmica microbiana nitrificante e desnitrificante em *wetland* construído vertical. 2017. 213 pp. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- PERDANA, Ma. P.; DEWANTO, R. H.; HARJANTO, M. I. Preliminary Design for Phytoremediation of Phosphate From Liquid Fertilizer Waste by Duckweed (*Spirodela* sp.) and Yellow Iris (*Iris pseudacorus* L.) Integrated with Biorefinery-based Processing System to Produce Value-added Bioproducts. **UI Proceedings on Science and Technology**, v. 2, 2020.
- REHMAN, K.; IMRAN, A.; AMIN, I.; AFZAL, M. Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater. **Journal of hazardous materials**, v. 349, p. 242-251, 2018.
- RESENDE, J. D.; NOLASCO, M. A.; PACCA, S. A. Life cycle assessment and costing of wastewater treatment systems coupled to constructed wetlands. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 170-177, 2019.
- RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, M. A.; KONNERUP, D.; BRIX, H.; ARIAS, C. A. Constructed wetlands in Latin America and the Caribbean: a review of experiences during the last decade. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1744, 2020.
- ROTH, J. J.; PASSIG, F. H.; ZANETTI, F. L.; PELISSARI, C.; SEZERINO, P. H.; NAGALLI, A.; DE CARVALHO, K. Q. Influence of the flooded time on the performance

- of a tidal flow constructed wetland treating urban stream water. **Science of The Total Environment**, v. 758, p. 143652, 2021.
- SALATI JR, E.; SALATI, E.; SALATI, E. Wetland projects developed in Brazil. **Water science and technology**, v. 40, n. 3, p. 19-25, 1999.
- SAMAL, K.; KAR, S.; TRIVEDI, S. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance. **Journal of environmental management**, v. 251, p. 109550, 2019.
- SCHIEVANO, A.; COLOMBO, A.; GRATTIERI, M.; TRASATTI, S. P.; LIBERALE, A.; TREMOLADA, P.; PINO, C. CRISTIANI, P. Floating microbial fuel cells as energy harvesters for signal transmission from natural water bodies. **Journal of Power Sources**, v. 340, p. 80-88, 2017.
- SCHWAMMBERGER, Peter F. et al. Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the construction phase of an urban residential development. **Science of the Total Environment**, v. 677, p. 390-403, 2019.
- SEZERINO, P. H., PELISSARI, C. Wetlands construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras. 1.ed. - Curitiba: Brazil Publishing, 2021.
- SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, S. T.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. (2015). Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 151-158, 2015.
- SHAHID, M. J.; ARSLAN, M.; ALI, S.; SIDDIQUE, M.; AFZAL, M. Floating wetlands: a sustainable tool for wastewater treatment. **Clean–Soil, Air, Water**, v. 46, n. 10, p. 1800120, 2018.

SILVEIRA, E. O.; LUTTERBECK, C. A.; MACHADO, E. L.; RODRIGUES, L. R.; RIEGER, A.; BECKENKAMP, F.; LOBO, E. A. Biomonitoring of urban wastewaters treated by an integrated system combining microalgae and constructed wetlands. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135864, 2020.

SILVEIRA, E. O.; MOURA, D., RIEGER, A.; MACHADO, Ê. L., LUTTERBECK, C. A. Performance of an integrated system combining microalgae and vertical flow constructed wetlands for urban wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 25, p. 20469-20478, 2017.

SIMPERLER, L.; ERTL, T.; MATZINGER, A. Spatial compatibility of implementing nature-based solutions for reducing urban heat islands and stormwater pollution. **Sustainability**, v. 12, n. 15, p. 5967, 2020.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2020. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnosticos/agua-e-esgotos>>. Acesso em 17/01/2022.

SONG, N., YAN, Z., XU, H., YAO, Z., WANG, C., CHEN, M., ZHAO, Z.; PENG, Z.; WANG, C.; JIANG, H. L. Development of a sediment microbial fuel cell-based biosensor for simultaneous online monitoring of dissolved oxygen concentrations along various depths in lake water. **Science of the total environment**, v. 673, p. 272-280, 2019.

SPANGLER, J. T.; SAMPLE, D. J.; FOX, L. J.; OWEN JR, J. S.; WHITE, S. A. Data on floating treatment wetland aided nutrient removal from agricultural runoff using two wetland species. **Data in brief**, v. 22, p. 756-761, 2019.

SRIVASTAVA, Pratiksha et al. Constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: development and potential applications. In: **Microbial Electrochemical Technology**. Elsevier, 2019. p. 1021-1036.

SRIVASTAVA, P.; YADAV, A. K.; GARANIYA, V.; LEWIS, T.; ABBASSI, R.; KHAN, S. J. Electrode dependent anaerobic ammonium oxidation in microbial fuel cell integrated

- hybrid constructed wetlands: a new process. **Science of the Total Environment**, v. 698, p. 134248, 2020.
- SUN, S.; GAO, L.; HE, S.; HUANG, J.; ZHOU, W. Nitrogen removal in response to plants harvesting in two kinds of enhanced hydroponic root mats treating secondary effluent. **Science of the total environment**, v. 670, p. 200-209, 2019.
- TANG, C.; ZHAO, Y.; KANG, C.; YANG, Y.; MORGAN, D.; XU, L. Towards concurrent pollutants removal and high energy harvesting in a pilot-scale CW-MFC: Insight into the cathode conditions and electrodes connection. **Chemical Engineering Journal**, v. 373, p. 150-160, 2019.
- TAO, M.; GUAN, L.; JING, Z.; TAO, Z.; WANG, Y.; LUO, H., WANG, Y. Enhanced denitrification and power generation of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) effluents with biomass in microbial fuel cell coupled with constructed wetland. **Science of The Total Environment**, v. 709, p. 136159, 2020.
- TARA, N.; ARSLAN, M.; HUSSAIN, Z.; IQBAL, M.; KHAN, Q. M.; AFZAL, M. On-site performance of floating treatment wetland macrocosms augmented with dye-degrading bacteria for the remediation of textile industry wastewater. **Journal of cleaner production**, v. 217, p. 541-548, 2019.
- TEOH, T. P.; ONG, S. A.; HO, L. N.; WONG, Y. S.; OON, Y. L.; OON, Y. S.; TAN, S.M.; THUNG, W. E. Up-flow constructed wetland-microbial fuel cell: Influence of floating plant, aeration and circuit connection on wastewater treatment performance and bioelectricity generation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 36, p. 101371, 2020.
- THARP, R.; WESTHELLE, K.; HURLEY, S. Macrophyte performance in floating treatment wetlands on a suburban stormwater pond: Implications for cold climate conditions. **Ecological Engineering**, v. 136, p. 152-159, 2019.
- TREIN, C.M. Avaliação da modificação das condições operacionais no comportamento do primeiro estágio do sistema francês de *wetlands* construídos. 188 pp. Tese (Programa de

Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Doutorado).  
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

VAN DE MOORTEL, A. M.; MEERS, E.; DE PAUW, N.; TACK, F. M. Effects of vegetation, season and temperature on the removal of pollutants in experimental floating treatment wetlands. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 212, n. 1, p. 281-297, 2010.

VASCONCELLOS, G. R.; VON SPERLING, M.; OCAMPOS, R. S. From start-up to heavy clogging: performance evaluation of horizontal subsurface flow constructed wetlands during 10 years of operation. **Water Science and Technology**, v. 79, n. 7, p. 1231-1240, 2019.

VERDEJO, A.; CURT, M. D.; FERNÁNDEZ, J. Effects of Supplemental Aeration on Total Nitrogen Removal in a Floating Helophytes Filter (FHF) for Wastewater Treatment. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 24, n. 1, 2015.

VON SPERLING, M. (2016). Urban wastewater treatment in Brazil. Washington (IWA): Inter-American Development Bank.

VON SPERLING, M.; Sezerino, P.H. (2018). Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. Boletim Wetlands Brasil, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359-0548. Disponível em: <http://gesad.ufsc.br/boletins/>

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. **Environmental science & technology**, v. 45, n. 1, p. 61-69, 2011.

VYMAZAL, Jan. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of the total environment**, v. 380, n. 1-3, p. 48-65, 2007.

VYMAZAL, J.; ZHAO, Y.; MANDER, Ü. Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. **Ecological Engineering**, v. 169, p. 106318, 2021.



- WALKER, C.; TONDERA, K.; LUCKE, T. Stormwater treatment evaluation of a constructed floating wetland after two years operation in an urban catchment. **Sustainability**, v. 9, n. 10, p. 1687, 2017.
- WALLACE, S., KNIGHT, R. L., 2006. Small Scale Constructed Wetland Treatment Systems: Feasibility, Design Criteria and O&M Requirements. 1st edn. WERF, London, UK.
- WANG, C. Y.; SAMPLE, D. J.; DAY, S. D.; GRIZZARD, T. J. Floating treatment wetland nutrient removal through vegetation harvest and observations from a field study. **Ecological Engineering**, v. 78, p. 15-26, 2015.
- WANG, C.-Y.; SAMPLE, D. J. Assessment of the nutrient removal effectiveness of floating treatment wetlands applied to urban retention ponds. **Journal of Environmental Management**, v. 137, p. 23-35, 2014.
- WANG, J.; SONG, X.; WANG, Y.; ZHAO, Z.; WANG, B.; YAN, D. Effects of electrode material and substrate concentration on the bioenergy output and wastewater treatment in air-cathode microbial fuel cell integrating with constructed wetland. **Ecological Engineering**, v. 99, p. 191-198, 2017.
- WEN, H.; ZHU, H.; YAN, B.; XU, Y.; SHUTES, B. Treatment of typical antibiotics in constructed wetlands integrated with microbial fuel cells: roles of plant and circuit operation mode. **Chemosphere**, v. 250, p. 126252, 2020.
- WITHERS, P. J.; JORDAN, P.; MAY, L.; JARVIE, H. P.; DEAL, N. E. Do septic tank systems pose a hidden threat to water quality?. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 12, n. 2, p. 123-130, 2014.
- XU, L.; ZHAO, Y.; FAN, C.; FAN, Z.; ZHAO, F. First study to explore the feasibility of applying microbial fuel cells into constructed wetlands for COD monitoring. **Bioresourcetechnology**, v. 243, p. 846-854, 2017.

- XU, L.; ZHAO, Y.; TANG, C.; DOHERTY, L. Influence of glass wool as separator on bioelectricity generation in a constructed wetland-microbial fuel cell. **Journal of environmental management**, v. 207, p. 116-123, 2018.
- XU, L.; ZHAO, Y.; DOHERTY, L.; HU, Y.; HAO, X. The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 60-91, 2016.
- YADAV, A. K.; DASH, P.; MOHANTY, A.; ABBASSI, R.; MISHRA, B. K. Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 126-131, 2012.
- YAKAR, Anil et al. Impacts of various filtration media on wastewater treatment and bioelectric production in up-flow constructed wetland combined with microbial fuel cell (UCW-MFC). **Ecological Engineering**, v. 117, p. 120-132, 2018.
- YANG, Y.; ZHAO, Y.; TANG, C.; XU, L.; MORGAN, D.; LIU, R. Role of macrophyte species in constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and bioenergy generation. **Chemical Engineering Journal**, v. 392, p. 123708, 2020.
- YANG, Y.; ZHAO, Y.; TANG, C.; MAO, Y.; SHEN, C. Significance of water level in affecting cathode potential in electro-wetland. **Bioresource technology**, v. 285, p. 121345, 2019.
- YEH, N.; YEH, P.; CHANG, Y-H. Artificial floating islands for environmental improvement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 616-622, 2015.
- ZAMORA-CASTRO, S. A.; MARÍN-MUÑIZ, J. L.; SANDOVAL, L.; VIDAL-ÁLVAREZ, M., CARRIÓN-DELGADO, J. M. Effect of ornamental plants, seasonality, and filter media material in fill-and-drain constructed wetlands treating rural community wastewater. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2350, 2019.

- ZHANG, L. Y.; ZHANG, L.; LIU, Y. D.; SHEN, Y. W.; LIU, H.; XIONG, Y. Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater. **Desalination**, v. 250, n. 3, p. 915-920, 2010.
- ZHANG, L.; SUN, Z., XIE, J.; WU, J.; CHENG, S. Nutrient removal, biomass accumulation and nitrogen-transformation functional gene response to different nitrogen forms in enhanced floating treatment wetlands. **Ecological engineering**, v. 112, p. 21-25, 2018.
- ZHAO, Q.; JI, M.; LI, R.; & REN, Z. J. Long-term performance of sediment microbial fuel cells with multiple anodes. **Bioresource technology**, v. 237, p. 178-185, 2017.
- ZHOU, X.; HE, Z.; JONES, K. D.; LI, L.; STOFFELLA, P. J. Dominating aquatic macrophytes for the removal of nutrients from waterways of the Indian River Lagoon basin, South Florida, USA. **Ecological engineering**, v. 101, p. 107-119, 2017.
- ZHU, L.; LI, Z.; KETOLA, T. Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 10, p. 1460-1466, 2011.