

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 30/03/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LUÍS ALBERTO SCHWIND PEDROSO STUSSI DA SILVA PEREIRA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA EM CÉLULA COMBUSTÍVEL
MICROBIANA COM CULTURA AUXILIAR DE *LACTOBACILLUS CASEI***

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS ALBERTO SCHWIND PEDROSO STUSSI DA SILVA PEREIRA

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA EM CÉLULA COMBUSTÍVEL
MICROBIANA COM CULTURA AUXILIAR DE *LACTOBACILLUS CASEI***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Especialidade: Ciências Térmicas.

Ricardo Alan Verdú Ramos
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436a Pereira, Luís Alberto Schwind Pedroso Stussi da Silva.
Análise dos parâmetros de influência em célula combustível microbiana com cultura auxiliar de *Lactobacillus casei* / Luís Alberto Schwind Pedroso Stussi da Silva Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
186 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2022

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Inclui bibliografia

1. Célula combustível microbiana. 2. Célula combustível microbiana de respiração de ar. 3. *Lactobacillus casei*.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CIB/3 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA EM CÉLULA COMBUSTÍVEL MICROBIANA COM CULTURA AUXILIAR DE LACTOBACILLUS CASEI

AUTOR: LUIS ALBERTO SCHWIND PEDROSO STUSSI DA SILVA PEREIRA

ORIENTADOR: RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Ciências Térmicas pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA (Participação Virtual)
Departamento de Química e Energia / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

Prof. Dr. MAURO CONTI PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul - IFMS

Ilha Solteira, 30 de março de 2022.

**RICARDO ALAN
VERDU
RAMOS:07370573869**

Assinado de forma digital por
RICARDO ALAN VERDU
RAMOS:07370573869
Dados: 2022.03.30 12:02:11
-03'00'

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que de alguma forma me ajudaram ao longo da minha vida acadêmica e estimularam meu interesse na ciência, em especial ao meu avô Jano Pedroso Stussi (*in memoriam*), ao meu pai Luís Alberto da Silva Pereira e a minha mãe Jane Schwind Pedroso Stussi (*in memoriam*).

Dedico também aos meus orientadores na graduação (Prof. Dr. Mauro Conti Pereira) e na pós-graduação (Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos) que me auxiliaram na criação do meu estilo de trabalho, servindo muitas vezes como inspiração, outras vezes como protetores em situações conflituosas e, principalmente, me apoiando em alguns dos momentos mais difíceis da minha vida, no falecimento da minha mãe, e em minha crise depressiva.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço à minha irmã Verônica Schwind Pedroso Stussi da Silva Pereira e à minha esposa Bruna Viana Ito por sempre me apoiarem em meu doutorado, corrigindo minha tese, lendo com atenção minhas explicações e muitas vezes tendo paciência com meu mau humor e frustrações.

Ao meu pai Luis Alberto da Silva Pereira por me sustentar e me apoiar, mesmo em momentos de dificuldade financeira, se sacrificando ou se privando de conforto, para eu poder concluir o doutorado.

Aos meus amigos Igor Seicho Kiyomura, Raphael Ceni Gomes e Luis Henrique Corbelino, por me encorajarem a escrever meu trabalho e não desanimar com frustrações e dificuldades.

Aos meus professores Ricardo Alan Verdú Ramos, Mauro Conti Pereira, Emanuel da Rocha Woiski, Marnei Cereda e Edson dos Santos, pelos conselhos, dicas e ensinamentos que me foram úteis para a criação deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos que compartilharam conhecimento e técnicas úteis na criação do presente trabalho, Thais dos Santos de Almeida, Robinson Gerardo Trindade Portinha Erazo, Lucas Mendes Scarpin, Luis Henrique Godói e Ricardo Quiroz.

Aos meus demais colegas e amigos que de alguma forma me deram ou espaço, ou tempo, ou equipamentos ou recursos, para que eu pudesse terminar o doutorado. Fabiano Nagamatsu, Edvaldo Silva de Araújo (Quati), Diego Roque, Igor Seicho Kiyomura e Rafael Vanin.

RESUMO

As Células Combustíveis Microbianas têm mostrado versatilidade, simplicidade e boa eficiência de Coulomb na conversão bioeletroquímica da matéria orgânica, no entanto sua instabilidade biológica e sensibilidade ainda são problemas que restringem seu uso como fonte confiável de energia limpa e renovável. O presente trabalho apresenta vários estudos que visam a compreensão dos parâmetros que interferem no desempenho e estabilidade das Células Combustíveis Microbianas utilizando como cultura auxiliar *Lactobacillus Casei* com a finalidade de aumentar sua robustez e densidade de potência. Os resultados apontam para a melhora da extração de corrente, em relação aos encontrados nas literaturas pesquisadas, mostrando ser uma opção para o tratamento de resíduos de queijarias.

Palavras-chave: célula combustível microbiana; célula combustível microbiana de respiração de ar; *Lactobacillus Casei*.

ABSTRACT

Microbial Fuel Cell (MFC) has been shown a versatile, simplicity and good Columbic efficiency at the bioelectrochemical conversion of organic matter. However, its biological instability and sensibility restricts its use as a reliable clean energy source. The present work shows many studies that aim to better understand the parameters that influence the performance and the stability of MFC with auxiliar Lactobacillus Casei culture, aiming robustness and power density. The results point to an improvement of current extraction, compared to the reviewed literature, becoming an alternative to treating cheese mills waste water.

Keywords: *microbial fuel cell; air breathing microbial fuel cell; Lactobacillus Casei.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	- Esquema genérico de uma célula combustível microbiana.....	24
Figura 2	- Foto de uma célula combustível microbiana do tipo <i>air breathing</i>	25
Figura 3	- Esquema bioquímico simplificado da célula combustível microbiana.....	26
Figura 4	- Configuração de separadores de membrana.....	27
Figura 5	- Figura esquematizando os quatro tipos principais de MFCs	28
Figura 6	- Representação esquemática de uma MFC do tipo ABFC	29
Figura 7	- Esquema comparativo entre uma MFC com membrana e MLFC	30
Figura 8	- Esquema de uma PMFC	31
Figura 9	- Gráfico das publicações sobre MFC no tempo	32
Figura 10	- Sistema de conversão e filtros passivos ligados a MFC	34
Figura 11	- Esquema bioquímico de troca eletrônica com o anodo	35
Figura 12	- Esquema bioquímico de formação de íons	36
Figura 13	- Diagrama bioquímico da conversão do substrato em eletricidade.....	36
Figura 14	- Fluidos da câmara do cátodo com partículas oxidadas de eletrodo.....	38
Figura 15	- Diagrama de inibição do metabolismo celular.....	39
Figura 16	- Diagrama de povoamento do sistema pela temperatura.....	41
Figura 17	- Diagrama de um <i>Lab Chip</i>	44
Figura 18	- Imagens dos diferentes tipos de materiais para fabricação dos eletrodos....	47
Figura 19	- Foto e micrografia por MEV de eletrodos de malha de carbono.....	48
Figura 20	- Montagem de uma MFC em um <i>Lab Chip</i>	49
Figura 21	- Micrografia ótica mostrando o crescimento de células em uma MFC.....	50
Figura 22	- Diagrama de dopagem de um eletrodo com camada biocompatível.....	52
Figura 23	- Micrografia de eletrodo tratado para biocompatibilidade.....	53
Figura 24	- Esquema de tratamento para ser usado como bioeletrodo.....	54
Figura 25	- Esquema de pinos de um amplificador operacional de propósito geral.....	61
Figura 26	- Esquema elétrico de um OpAmps na configuração inversora.....	62
Figura 27	- Esquema elétrico de um OpAmps na configuração somadora.....	62
Figura 28	- Esquema elétrico de um OpAmps na configuração subtratora.....	63
Figura 29	- Comparação gráfica entre o sinal original, o sinal convertido para digital e o erro associado à conversão analógica/digital.....	64
Figura 30	- Fluxograma do sinal em um conversor analógico/digital do tipo aproximação sucessiva e simbologia.....	65
Figura 31	- Fluxograma do sinal em um conversor analógico/digital do tipo delta sigma e simbologia.....	65

Figura 32	- Exemplo de filtro ativo utilizando Amplificador operacional	66
Figura 33	- Gráfico dos sinais dos quatro tipos básicos de filtro.....	67
Figura 34	- Foto da MFC de membrana salina usada no experimento.....	72
Figura 35	- Tensão da MFC de membrana salina.....	73
Figura 36	- Foto da MFC de membrana salina após a degradação da membrana.....	74
Figura 37	- Foto da MFC <i>size selective separator</i> usada no experimento.....	74
Figura 38	- Foto da montagem de experimento com MFC de membrana porosa.....	75
Figura 39	- Geração de tensão pelo tempo da célula combustível de membrana porosa.....	76
Figura 40	- Relação luminosidade corrente da MFC <i>size selective separator</i>	77
Figura 41	- Relação corrente e luminosidade da MFC <i>size selective separator</i>	78
Figura 42	- Foto das colônias de células selvagens e microalgas clorela.....	78
Figura 43	- Diagrama esquemático do experimento.....	80
Figura 44	- Foto da ligação dos eletrodos e do resistor para consumo da corrente.....	81
Figura 45	- Geração média de corrente da MFC do tipo <i>size selective separator</i> usada no experimento.....	84
Figura 46	- Diagrama esquemático do circuito de acionamento de potência isolado por opto acopladores.....	86
Figura 47	- Diagrama esquemático do circuito de acionamento de potência isolado por opto acopladores, opto TRIAC e conexões externas.....	87
Figura 48	- Diagrama esquemático do circuito de condicionamento de sinal do experimento da tensão da célula Combustível, da temperatura e da luminosidade, circuito de conversão CA/CC e alimentação de sinal.....	87
Figura 49	- Diagrama esquemático do circuito condicionador do experimento.....	88
Figura 50	- Protótipo do circuito condicionador do experimento.....	88
Figura 51	- Diagrama esquemático do gerador de tensão negativa.....	89
Figura 52	- Foto da versão final da placa de comando da MFC.....	90
Figura 53	- Montagem e ligação do Variac relacionado ao transformador de alta tensão.	92
Figura 54	- Ponte de diodos e capacitor para reificação de tensão e redução de flutuação.....	93
Figura 55	- Foto da câmara de vácuo do dispositivo de metal <i>sputtering</i>	94
Figura 56	- Foto de placa inferior do dispositivo de metal <i>sputtering</i>	95
Figura 57	- Esquema da montagem do equipamento de metal <i>sputtering</i>	96
Figura 58	- Disposição dos componentes fixados em chapa de aço e devidamente aterrados.....	97
Figura 59	- Foto do dispositivo de deposição física de metal por <i>sputtering</i>	97

Figura 60	- Foto do corte da câmara de vidro utilizando material combustível.....	98
Figura 61	- Foto do corte da câmara de vidro utilizando disco de corte diamantado submerso em água.....	99
Figura 62	- Equipamento de corte de vidro submerso.....	100
Figura 63	- Placa de circuito impresso contendo o driver de potência do equipamento de corte de vidro submerso.....	100
Figura 64	- Peças da fixação e o carro do <i>driver</i> linear.....	101
Figura 65	- Dupla fixação da micro retífica no <i>driver</i> linear.....	102
Figura 66	- Cama de fixação do recipiente de vidro e o resultado do corte.....	103
Figura 67	- Defeitos ocasionados por contaminantes abrasivos na membrana.....	105
Figura 68	- Defeitos ocasionados no processo de deposição de material.....	106
Figura 69	- Filme bacteriano formado no meio de cultura.....	107
Figura 70	- Foto da impressão 3D da carcaça das MFCs.....	108
Figura 71	- Vista em perspectiva ortogonal da célula combustível confeccionada para experimento.....	108
Figura 72	- Célula combustível montada cm membrana de alumínio.....	110
Figura 73	- Foto do experimento da célula combustível montada com membrana de alumínio utilizando meio de cultura soro de leite bovino e <i>Lactobacillus Casei</i>	111
Figura 74	- Foto do experimento da impressão 3D da carcaça das MFC.....	112
Figura 75	- Foto da placa de suporte da membrana porosa com furos.....	114
Figura 76	- Foto dos constituintes do sanduiche de camadas que constituem a membrana porosa.....	115
Figura 77	- Foto da MFC montada com a placa de suporte e o conector de alumínio.....	115
Figura 78	- Foto da parte interna do recipiente de isopor e da disposição dos componentes.....	117
Figura 79	- Foto do compressor e seu sistema de resfriamento.....	118
Figura 80	- Foto das placas de comando e controle com suas respectivas ligações.....	118
Figura 81	- Foto do transformador e dos componentes de resfriamento das placas.....	119
Figura 82	- Foto do CY8CKIT-042 e sua respectiva ligação com o adaptador SD.....	119
Figura 83	- Foto do sistema para o experimento com a MFC de membrana porosa.....	120
Figura 84	- Foto do cultivo dos lactobacilos condicionados ao consumo de glicose.....	121
Figura 85	- Foto do aglomerado formado após 49 dias de cultivo das Geobactérias selvagens condicionados ao consumo da glicose.....	121

Figura 86	- Foto da membrana no início dos experimentos e após dois meses de teste e uma contaminação de mofo no centro.....	122
Figura 87	- Micrografia óptica da superfície do eletrodo de grafite da MFC.....	122
Figura 88	- Foto dos acessórios <i>Skin Heater</i> , transdutor LDR e NTC.....	123
Figura 89	- Foto do teste de geração com substrato recém preparado	123
Figura 90	- Foto da MFC piloto no período de pico de geração de tensão.....	124
Figura 91	- Foto da MFC piloto no período de estabilização da tensão.....	125
Figura 92	- Foto da MFC piloto contaminada com micro-organismos com colônias escuras.....	126
Figura 93	- Tensão residual do teste piloto, 5 dias após inserir água (Grupo Controle 1).....	127
Figura 94	- Tensão gerada do teste piloto, após a inserção de leite fermentado (Grupo Controle 2).....	128
Figura 95	- Tensão residual do teste piloto, 14 dias após inserir o leite fermentado, após a agitação da célula (Grupo Controle 2).....	129
Figura 96	- Tensão das MFCs com lâminas de alumínio (Grupo Controle 1).....	130
Figura 97	- Tensão das MFCs, após a estabilização (Grupo Controle 1).....	131
Figura 98	- Gráfico comparativo da tensão das MFCs com lâminas de alumínio analisadas separadamente (Grupo Controle 1).....	132
Figura 99	- Gráfico comparativo da tensão das MFCs com lâmina de alumínio analisadas separadamente (Grupo Controle 2).....	133
Figura 100	- Gráfico comparativo da tensão das MFCs com lâmina de alumínio sem o aterramento (Grupo Controle 2).....	134
Figura 101	- Histograma da distribuição de tensão na MFC com 1 dia de testes (Grupo Controle 2).....	136
Figura 102	- Histograma de distribuição de tensão na MFC com 2 dias de testes (Grupo Controle 2).....	136
Figura 103	- Histograma da distribuição de tensão na MFC com 3 dias de testes (Grupo Controle 2).....	137
Figura 104	- Histograma da distribuição de tensão na MFC com 4 dias de testes (Grupo Controle 2).....	137
Figura 105	- Relação pressão-tensão na MFC com 1 dia de testes (Grupo Controle 2)...	138
Figura 106	- Relação pressão-tensão na MFC com 2 dias de testes (Grupo Controle 2).	138
Figura 107	- Relação de pressão-tensão na MFC com 3 dias de testes (Grupo Controle 2).....	139
Figura 108	- Relação pressão-tensão na MFC com 4 dias de testes (Grupo Controle 2).	140

Figura 109 - Relação temperatura-tensão na MFC com 4 dias de testes (Grupo Controle 2).....	140
Figura 110 - Histograma da distribuição de tensão na MFC porosa (Grupo Controle 3).....	141
Figura 111 - Relação temperatura-tensão na MFC porosa (Grupo Controle 3).....	142
Figura 112 - Relação pressão-tensão na MFC porosa (Grupo Controle 3).....	143
Figura 113 - Relação escuridão-tensão na MFC porosa (Grupo Controle 3).....	144
Figura 114 - Corrente gerada nas células combustíveis entre os diferentes tipos de experimentos (Grupo Experimental).....	145
Figura 115 - Potência gerada nas células combustíveis entre os diversos tipos de experimentos (Grupo Experimental).....	146
Figura 116 - Tensão gerada nas células combustíveis entre os diversos tipos de experimentos (Grupo Experimental).....	147
Figura 117 - Geração de corrente em relação a temperatura, pressão e tempo dos experimentos (Grupo Experimental).....	147
Figura 118 - Tendência de estabilização da tensão no tempo, sob a influência da pressão e luminosidade (Grupo Experimental).....	148
Figura 119 - Potência gerada com temperatura controlada de 30 °C (Grupo Experimental).....	149
Figura 120 - Corrente gerada com temperatura controlada de 30 °C (Grupo Experimental).....	150
Figura 121 - Luminosidade exposta na MFC nos experimentos com temperatura controlada de 30 °C (Grupo Experimental).....	151
Figura 122 - Pressão exposta na MFC nos experimentos com temperatura controlada de 30 °C (Grupo Experimental).....	152
Figura 123 - Tensão gerada com temperatura controlada de 30 °C (Grupo Experimental).	153
Figura 124 - Produção de corrente com a temperatura, luminosidade e pressão, desconsiderando o tempo (Grupo Experimental).....	154
Figura 125 - Geração de potência no tempo entre os experimentos com pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	155
Figura 126 - Geração potência no tempo entre as diferentes temperaturas com pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	156
Figura 127 - Geração corrente no tempo entre os experimentos com pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	157
Figura 128 - Geração corrente no tempo entre as diferentes temperaturas com pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	158

Figura 129 - Luminosidade exposta na MFC nos experimentos com pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	159
Figura 130 - Pressão exposta na MFC nos experimentos de pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	160
Figura 131 - Temperatura externa da MFC (Grupo Experimental).....	161
Figura 132 - Geração de tensão no tempo entre os experimentos de pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	162
Figura 133 - Geração corrente no tempo entre os experimentos com pressão controlada em 95.750 Pa (Grupo Experimental).....	163
Figura 134 - Corrente gerada com temperatura controlada de 35 °C (Grupo Experimental).....	164
Figura 135 - Tensão gerada com temperatura controlada de 35 °C (Grupo Experimental).....	165

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	- Tabela comportamental comparativa da MFC do Grupo Controle 2.....	141
-----------------	---	-----

NOMENCLATURA/ABREVIATÖES

AA – Algoritmo Adaptativo
ABFC – *Air Breathing Fuel Cell*
ABMFC – *Air Breathing Microbial Fuel Cell*
AEM – *Anion Exchange Membrane*
Al – Alumínio
BM – Bipolar Membrane
CEM – *Cation Exchange Membrane*
CFC – *Conventional Fuel Cell*
cm – Centímetros
CO₂ – Dióxido de Carbono
Cu – Cobre
DBO – Demanda Biológica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DSPs – *Digital Signal Processor*
FC – *Fuel Cell*
Fe – Ferro
FPGAs – *Field Programmable Gate Array*
GA – Algoritmos Genéticos
GF – *Glass Fiber*
HD – *Hard Driver*
Hz – Hertz
IEM – *Ions Exchange Membrane*
KCl – Cloreto de Potássio
kΩ – Kiloohms
LDR – Resistor Dependente de Luz
Lx – Lux
mA – Miliampere
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MFC – *Microbial Fuel Cell*
mg – Miligrama
MM – *Microfiltration Membrane*
Mn – Manganês

MOSFET – Transistor de Efeito de Campo Semicondutor Óxido Metálico

mV – Milivolt

MΩ – Megaohms

mΩ – Miliohms

O₂ – Dióxido

OpAmp – Amplificador Operacional

Pa – Pascal

PEM – *Proton Exchange Membrane*

PET – Poli Tereftalato de Etila

PF – *Porous Fiber*

pH – Potencial Hidrogeniônico

PMFC – *Porous Membrane Fuel Cell*

PSoC – *Programmable System on Chip*

RAM – *Randon Access Memory*

SB – *Salt Bridges*

SMFC – *Saline Membrane Fuel Cell*

Sn – Estanho

SoPC – *System on Programmable Chip*

SSS – *Size Selective Separators*

TRIAC – Triodo para Corrente Alternada

UM – *Ultrafiltration Membrane*

USB – *Universal Serial Bus*

MLFC – *Membraneless Fuel Cell*

μA – Microampere

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO-EXPERIMENTAL.....	23
2.1	CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA DAS CÉLULAS COMBUSTÍVEIS MICROBIANAS.....	23
2.2	EVOLUÇÃO DAS PESQUISAS SOBRE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS MICROBIANAS E DE SUAS APLICAÇÕES.....	31
2.3	PRINCÍPIOS BIOQUÍMICOS DA ELETROFERMENTAÇÃO.....	34
2.4	PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA E ESTABILIDADE DAS MFCs.....	37
2.5	BACTÉRIAS COMUMENTE USADAS EM MFC.....	41
2.6	SENSORIAMENTO E MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA.....	43
2.7	COMPOSIÇÃO DOS FLUIDOS, MATERIAIS DE FABRICAÇÃO E MORFOLOGIA DAS MFCs.....	45
2.8	MONTAGEM E PRODUÇÃO DAS MFCs.....	49
2.8.1	Componentes das MFCs.....	50
2.8.1.1	<i>Eletrodos.....</i>	<i>51</i>
2.8.1.2	<i>Membranas.....</i>	<i>54</i>
2.8.1.3	<i>Gases de ventilação.....</i>	<i>56</i>
2.8.2	Tipos de microrganismos.....	57
2.8.2.1	<i>Coleta in natura.....</i>	<i>57</i>
2.8.2.2	<i>Isolamento.....</i>	<i>58</i>
2.8.3	Início do funcionamento da MFC.....	58
2.8.4	Sistema de aquisição de dados e tratamento de sinal.....	59
2.8.4.1	<i>Amplificadores Operacionais.....</i>	<i>60</i>
2.8.4.2	<i>Conversores Analógicos/Digitais.....</i>	<i>63</i>
2.8.4.3	<i>Filtros.....</i>	<i>66</i>
2.8.4.4	<i>Microcontrolador.....</i>	<i>67</i>
2.8.4.5	<i>PSoC.....</i>	<i>68</i>
2.8.4.6	<i>Tempo de amostragem e aquisição.....</i>	<i>68</i>
2.8.4.7	<i>Precisão de aquisição e propagação de erros.....</i>	<i>70</i>
2.8.4.8	<i>Condicionamento e filtragem de sinal.....</i>	<i>70</i>

2.8.5	Modelagem.....	71
3	ESTUDOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS PRELIMINARES SOBRE O COMPORTAMENTOS DAS CÉLULAS COMBUSTÍVEIS MICROBIANAS.....	72
3.1	CÉLULA COMBUSTÍVEL DO TIPO BARREIRA SALINA.....	72
3.2	CÉLULA COMBUSTÍVEL DO TIPO <i>SIZE SELECTIVE SEPARATOR</i>	74
3.3	CÉLULA COMBUSTÍVEL DO TIPO <i>SIZE SELECTIVE SEPARATOR</i> , COM MICROALGAS.....	78
4	DESENVOLVIMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL E ACESSÓRIOS.....	85
4.1	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA AQUISITOR DE DADOS.....	85
4.2	MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE DEPOSIÇÃO FÍSICA DE METAL <i>SPUTTERING</i>	91
4.3	MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE CORTE DE VIDRO COM BROCA DIAMANTADA IMERSA EM ÁGUA.....	98
4.4	PREPARAÇÃO DA MEMBRANA.....	103
4.4.1	Deposição química.....	104
4.4.2	Lixamento.....	104
4.4.3	Deposição por <i>Magnetron Sputtering</i>.....	106
4.4.4	Criação do filme bacteriano.....	107
4.5	CONFECÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	107
4.5.1	Preparação do aparato para realização dos experimentos.....	109
4.5.2	Procedimentos de preparação para os experimentos.....	110
4.5.2.1	<i>Procedimento teste piloto.....</i>	<i>110</i>
4.5.2.2	<i>Procedimento teste com membrana de alumínio.....</i>	<i>111</i>
4.5.2.3	<i>Procedimento teste com membrana porosa.....</i>	<i>113</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	124
5.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO DO PROCEDIMENTO PILOTO.....	124

5.1.1	Resultados do teste piloto com água filtrada (Grupo Controle 1).....	126
5.1.2	Resultados do teste piloto com leite fermentado (Grupo Controle 2).....	127
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO DO PROCEDIMENTO COM MEMBRANA DE ALUMÍNIO.....	129
5.2.1	Resultados do teste com membrana de alumínio (Grupo Controle 1).....	129
5.2.2	Resultados do teste com membrana de alumínio com leite fermentado (Grupo Controle 2).....	133
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO DO PROCEDIMENTO COM MEMBRANAS POROSAS.....	141
6	CONCLUSÕES.....	167
	REFERÊNCIAS.....	169
	ANEXO A – CÓDIGO EM ARDUINO PARA O MONITORAMENTO DA MFC.....	176
	ANEXO B – CÓDIGO PARA JAVA DO CONTROLADOR DA MFC.....	180
	ANEXO C – CÓDIGO EM PYTHON PARA O MONITORAMENTO DA MFC.....	186

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

As células combustíveis microbianas (MFC) desde a década passada têm chamado atenção pela capacidade de degradar dejetos orgânicos e ao mesmo tempo produzindo energia elétrica de maneira direta (WANG *et al.*, 2017). Elas estão ganhando espaço atualmente pela eficiência na conversão de energia química em energia elétrica (PERRY MURRAY; TSAI; BARNETT, 1999), pois têm a vantagem de converter diretamente energia química em energia elétrica, reduzindo, assim, as perdas nas conversões eletromecânicas como é o caso dos motores a combustão.

Rahimnejad *et al.* (2015) explicam que as primeiras células combustíveis ou *Fuel Cell* (FC) utilizavam hidrogênio e oxigênio como fonte de elétrons, mas, com o passar dos anos, combustíveis alternativos foram pesquisados para o uso nessas células.

As pesquisas mais atuais têm como foco o uso de celulose (TAKEUCHI *et al.*, 2017), metano (LI *et al.*, 2017) e resíduos agrícolas (SONAWANE *et al.*, 2017), pela enorme disponibilidade na natureza e pela redução no potencial poluente e tóxico, os quais estão sendo utilizados na conversão direta de energia química em energia elétrica, aumentando a eficiência da conversão de energia pela redução de etapas na conversão.

Estas células combustíveis que convertem produtos mais complexos são confeccionadas de forma diferente das células a hidrogênio. Elas são chamadas de *Microbial Fuel Cell* (MFC), pois usam organismos microbiais que extraem para o cátodo elétrons livres das moléculas orgânicas (SABA *et al.*, 2017).

As diferenças principais da célula combustível convencional ou *Conventional Fuel Cell* (CFC) para uma MFC, de acordo com Santoro; Arbizzani; Erable (2017), são a catálise biológica feita pelas bactérias, a ordem de magnitude de temperatura, o pH não neutro, a utilização de moléculas complexas e a vida útil.

De acordo com He *et al.* (2017), a necessidade de um cátodo especial para degradação de produtos complexos como o metano se dá pela dificuldade de extrair elétrons e quebrar moléculas grandes com boa repetitividade (MEI *et al.*, 2017), por este motivo células combustíveis que degradam produtos complexos necessitam de membranas complexas que permitem a passagem dessas moléculas ionizadas para ligar com as moléculas da camada do ânodo (HINDATU; ANNUAR; GUMEL, 2017).

As MFC geram menos potência comparadas as CFC, isso se dá pela necessidade da quebra dos combustíveis complexos pelos microrganismos. Porém, apesar de ser menos potente, as MFC tendem a ser mais eficientes na conversão de energia química em energia elétrica do que as CFC (SANTORO; ARBIZZANI; ERABLE, 2017).

Outra vantagem das MFC em relação as CFC é que, de acordo com Serov *et al.* (2015), para aumentar o desempenho das CFC, é necessário aumentar a temperatura de trabalho (na ordem de 900°C, a qual ocorre fenômenos como a pirólise), já as MFC funcionam em temperatura ambiente (entre 15 e 45°C).

Apesar das MFC terem eficiência de Coulomb muito alta, sua vida útil é muito difícil de ser prevista, necessitando de manutenção constantemente (LI *et al.*, 2017). Além disso, o seu material biológico está sujeito a variações no desempenho durante o funcionamento o que dificulta a comercialização (PAITIER *et al.*, 2017).

As FC que degradam moléculas orgânicas podem ser tanto enzimáticas quanto de microrganismos, sendo as enzimáticas compostas por uma mistura de meio de cultura e enzimas, as quais no decorrer do tempo precisam ser repostas, sendo que as microbiais conseguem sustentar seu bioma, não necessitando repor os microrganismos. As MFC são as mais estudadas entre os sistemas bioeletroquímicos (MINTEER; LIAW; COONEY, 2007).

Diante deste contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar os parâmetros que influenciam a performance e a vida útil das células combustíveis do tipo *air-breathing* contendo cultura auxiliar *Lactobacillus Casei*.

Tem-se também como objetivos específicos os seguintes:

- a) Propor um modelo físico de MFC que tem a capacidade de estudar tanto aspectos construtivos quanto de operação de células combustíveis do tipo *air-breathing*;
- b) Verificar experimentalmente a magnitude e correlação entre os parâmetros que influenciam a geração de energia e vida útil das células combustíveis microbiana do tipo *air-breathing*;
- c) Testar a capacidade das bactérias do tipo *Lactobacillus Casei* de gerar energia elétrica em uma célula combustível microbiana do tipo *air-breathing*.

6 CONCLUSÕES

ABMFCs que utilizam como cultura auxiliar *Lactobacillus Casei* são capazes de produzir eletricidade utilizando como substrato soro de leite bovino e como membrana polipropileno aluminado. No entanto, não está clara a correlação entre as variáveis envolvidas no processo, sendo apenas observado que a temperatura tem maior relevância em relação à pressão e luminosidade.

Apesar da influência sutil (0,0016.P), apresentada nos resultados da maior parte dos testes, foi constatado que o aumento da pressão atmosférica está relacionado com o aumento da tensão quando substrato é acrescentado no meio de cultura das células.

A geração fotovoltaica foi constatada em MFC do tipo *Selective Membrane* utilizando geobactérias, mas não foi constatada em ABMFC com membrana aluminada de polipropileno. No entanto, a fotossensibilidade foi constatada, associada a outros parâmetros, tais como pressão, temperatura, concentração do substrato e agitação.

A ABMFC com membrana porosa tem a curva de geração formada por um sinal com duas tendências diferentes, a primeira tendência é parecida com a descarga de um capacitor ou bateria, consumindo rapidamente a tensão e corrente e depois drenando vagarosamente a energia restante, sendo que a segunda tendência é a de uma gaussiana que aparenta estar relacionada com o consumo da matéria orgânica pelas bactérias, ou seja, inicialmente existe a abundância de substrato, no entanto não há células ativadas suficientemente para o consumo integral da matéria, o que começa a ocorrer até que todas as bactérias se ativem e consumam rapidamente todo o substrato, ocasionando os dois picos vistos nas Figuras 126, 128 e 133. Outro fator que confirmaria esta hipótese é a mudança comportamental do sistema em relação a temperatura vista nestas figuras, pois quanto mais frio o sistema está, mais demorada é a adaptação celular, devido à necessidade de um maior tempo de ativação e consumo da matéria orgânica disponível.

Foi constatado que a membrana porosa com deposição por *sputtering* tem menor ruído no grupo controle em relação à membrana aluminada, no entanto tem maior resistência elétrica e maior fragilidade ao contato mecânico.

MFCs são sistemas de baixa energia e baixa impedância, relativamente à tensão e corrente comuns em sistemas eletrônicos modernos, logo sistemas de

aquisição de dados necessitam isolar a impedância de entrada e amplificadores operacionais são capazes de prover o isolamento necessário para a aquisição.

PSoCs têm sensibilidade necessária para aquisição de corrente e tensão de MFC sem necessidade de amplificadores operacionais externos e são uma alternativa viável para o monitoramento e produção de energia utilizando MFC.

Por observar alguns dos fenômenos e não conseguir explicá-los com trabalhos disponíveis na literatura, é sugerido que alguns dos assuntos a seguir sejam abordados em trabalhos futuros:

- a) Utilizar os *Lactobacillus Casei* em células combustíveis microbianas híbridas com microalgas e em células combustíveis com câmaras duplas, talvez com a outra câmara contendo alga/bactéria que torne o meio alcalino, melhorando o desempenho.
- b) Misturar os *Lactobacillus Casei* com outra cultura que ajude na conversão de ácido láctico em hidrogênio livre, como uma fonte geradora de hidrogênio.

REFERÊNCIAS

- ADEKUNLE, A.; RAGHAVAN, V.; TARTAKOVSKY, B. Carbon source and energy harvesting optimization in solid anolyte microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 356, p. 324-330, 2017.
- ASUNIS, F.; DE GIOANNIS, G.; DESSÌ, P.; ISIPATO, M.; LENS, P. N. L.; MUNTONI, A.; POLETTINI, A.; POMI, R.; ROSSI, A.; SPIGA, D. The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorization. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 276, p. 1-15, 2020.
- BOROLE, A. P.; REGUERA, G.; RINGEISEN, B.; WANG, Z.; FENG, Y.; KIM, B. H. Electroactive biofilms: Current status and future research needs. **Energy & Environmental Science**, Cambridge, v. 4, p. 4813-4834, 2011.
- CARTER, B.; BROWN, T. R.; Handbook of operational amplifier applications, **Application Notes**. [S. l.]: Texas Instruments, 2016.
- CYPRESS. ADC Successive Approximation Register (ADC_SAR). **Datasheet**. [S. l.]: Cypress Semiconductor Corp., 2015. 28 p.
- CYPRESS. Delta Sigma Analog to Digital Converter (ADC_DelSig). **Datasheet**, [S. l.]: Cypress Semiconductor Corp., 2017. 52 p.
- EBADINEZHAD, B.; EBRAHIMI, S.; SHOKRKAR, H. Evaluation of microbial fuel cell performance utilizing sequential batch feeding of different substrates. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 836, p. 149-157, 2019.
- ELMEKAWY, A.; HEGAB, H. M.; LOSIC, D.; SAINT, C. P.; PANT, D. Applications of graphene in microbial fuel cells: The gap between promise and reality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 72, p. 1389-1403, 2017.
- GAL, I.; SCHLESINGER, O.; AMIR, L.; ALFONTA, L. Yeast surface display of dehydrogenases in microbial fuel-cells. **Bioelectrochemistry**, Amsterdam, v. 112, p. 53-60, 2016.
- GARG, A.; LAM, J. S. L. Design of explicit models for estimating efficiency characteristics of microbial fuel cells. **Energy**, London, v. 134, p. 136-156, 2017.
- GEORGE, D. M.; VINCENT, A. S.; MACKEY, H. R. An overview of anoxygenic phototrophic bacteria and their applications in environmental biotechnology for sustainable resource recovery. **Biotechnology Reports**, Amsterdam, v. 28, 2020.

GHASEMI, B.; YAGHMAEI, S.; GHADERI, S.; BAYAT, A.; MARDANPOUR, M. M. Effects of chemical, electrochemical, and electro spun deposition of polyaniline coatings on surface of anode electrodes for evaluation of MFCs' performance, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 8, p. 1-7, 2020.

GORBY, Y. A.; YANINA, S.; McLEAN, J. S.; ROSSO, K. M.; MOYLES, D.; DOHNALKOVA, A.; BEVERIDGE, T. J.; CHANG, I. S.; KIM, B. H.; KIM, K. S.; CULLEY, D. E.; REED, S. B.; ROMINE, M. F.; SAFFARINI, D. A.; HILL, E. A.; SHI, L.; ELIAS, D. A.; KENNEDY, D. W.; PINCHUK, G.; WATANABE, K.; ISHII, S. I.; LOGAN, B.; NEALSON, K. H.; FREDRICKSON, J. K. Electrically conductive bacterial Nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**, Washington, v. 103, n. 30, p. 11358-11363, 2006.

GAO, C.; LIU, L.; YANG, F. Development of a novel proton exchange membrane-free integrated MFC system with electric membrane bioreactor and air contact oxidation bed for efficient and energy-saving wastewater treatment. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 238, p. 472-483, 2017.

GREENMAN, J.; IEROPOULOS, I. A. Allometric scaling of microbial fuel cells and stacks: The lifeform case for scale-up. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 356, p. 365-370, 2017.

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Sinais e sistemas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

HE, L.; DU, P.; CHEN, Y.; LU, H.; CHENG, X.; CHANG, B.; WANG, Z. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 71, p. 388-403, 2017.

HINDATU, Y.; ANNUAR, M. S. M.; GUMEL, A. M. Mini-review: Anode modification for improved performance of microbial fuel cell. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 73, p. 236-248, 2017.

HU, Y.; REHNLUND, D.; KLEIN, E.; GESCHER, J.; NIEMEYER, C. M. Cultivation of exoelectrogenic bacteria in conductive DNA nanocomposite hydrogels yields a programmable biohybrid materials system. **ACS Applied Materials & Interfaces**, Washington, v. 13, p. 14806-14813, 2020.

HUANG, S.; ZHANG, J.; PI, J.; GONG, L.; ZHU, G. Long-term electricity generation and denitrification performance of MFCs with different exchange membranes and electrode materials. **Bioelectrochemistry**, Amsterdam, v. 140, p. 1-9, 2021.

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**, Amsterdam, v. 301, p. 126951, 2021.

JEMAI, M.; OUNI, B. Hardware software partitioning of control data flow graph on system on programmable chip. **Microprocessors and Microsystems**, Amsterdam, v. 39, p. 259-270, 2015.

KARIMI, M. B.; MOHAMMADI, F.; HOOSHYARI, K. Recent approaches to improve Nafion performance for fuel cell applications: a review. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 44, p. 28919-28938, 2019.

KIM, K.; ROSSI, R.; REGAN, J. M.; LOGAN, B. E. Enumeration of exoelectrogens in microbial fuel cell effluents fed acetate or wastewater substrates. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 165, p. 1-4, 2021.

KODALI, M; SANTORO, C.; SEROV, A.; KABIR, S.; ARTYUSHKOVA, K.; MATANOVIC, I.; ATANASSOV, P., Air breathing cathodes for microbial fuel cell using Mn-, Fe-, Co- and Ni- containing platinum group metal-free catalysts. **Electrochimica Acta**, Oxford, v. 231, p. 115-124, 2017.

KONDAVEETI, S.; LEE, S.; PARK, H.; MIN, B. Specific enrichment of different *Geobacter* sp. in anode biofilm by varying interspatial distance of electrodes in air-cathode microbial fuel cell (MFC). **Electrochimica Acta**, Oxford, v. 331, p. 1-11, 2020.

LI, D.; SHI, Y.; GAO, F.; YANG, L.; LI, S.; XIAO, L. Understanding the current plummeting phenomenon in microbial fuel cells (MFCs). **Journal of Water Process Engineering**, Annaba, v. 40, p. 1-7, 2021.

LI, J.; LI, H.; FU, Q.; LIAO, Q.; ZHU, X.; HAJIME, K.; DINGDING, Y. E. Voltage reversal causes bioanode corrosion in microbial fuel cell stacks. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 42, p. 1-8, 2017.

LI, W.; SHENG, G.; LIU, X.; YU, H. Recent advances in the separators for microbial fuel cells. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 102, p. 244-252, 2011.

LIU, L.; CHOI, S. Self-sustaining, solar-driven bioelectricity generation in micro-sized microbial fuel cell using co-culture of heterotrophic and photosynthetic bacteria, **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 348, p. 138-144, 2017.

LOBO, F. L.; WANG X.; REN, Z. J. Energy harvesting influences electrochemical performance of microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 356, p. 356-364, 2017.

LOPEZ-HINCAPI, J. D.; PICOS-BENÍTEZ, A. R.; CERCADO, B.; RODRÍGUEZ, F.; RODRÍGUEZ-GARCÍA, A. Improving the configuration and architecture of a small-scale air-cathode single chamber microbial fuel cell (MFC) for biosensing organic matter in wastewater samples. **Journal of Water Process Engineering**, Annaba, v. 38, p. 1-9, 2020.

MADDALWAR, S.; NAYAK, K. K.; KUMAR, M.; SINGH, L. Plant microbial fuel cell: Opportunities, challenges, and prospects. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 341, p. 125772, 2021.

MEI, X.; XING, D.; YANG, Y.; LIU, Q.; ZHOU, H.; GUO, C.; REN, N. Adaptation of microbial community of the anode biofilm in microbial fuel cells to temperature. **Bioelectrochemistry**, Amsterdam, v. 117, p. 29-33, 2017.

MINTEER, S. D.; LIAW, B. Y.; COONEY, M. J. Enzyme-based biofuel cells. **Current Opinion in Biotechnology**, Kidlington, v. 18, p. 228-234, 2007.

MIRZA, S. S.; AL-ANSARI, M. M.; ALI, M.; ASLAM, S.; AKMAL, M.; AL-HUMAIID, L.; HUSSAIN, A. Towards sustainable wastewater treatment: Influence of iron, zinc and aluminum as anode in combination with salt bridge on microbial fuel cell performance. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 209 p. 112781, 2022.

NICOLOSI, D. E. C.; SANTOS, R. C. B. **Microcontrolador PSoC: uma nova tecnologia, uma nova tendência**. [S. l.]: Ed. Érica, 2006.

NISE, N. S. **Control systems engineering**. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

O'BRIEN, J. P.; MALVANKAR, N. S. A simple and low-cost procedure for growing geobacter sulfurreducens cell cultures and biofilms in bioelectrochemical systems. **Current protocols in Microbiology**, Hoboken, v. 43, p. A.4K.1–A.4K.27, 2016.

OGATA, K. **Discrete-time control systems**. 2. ed. Minnesota: Prentice-Hall, 1995.

PAITIER, A.; GODAIN, A.; LYON, D.; HADDOUR, N.; VOGEL, T. M., MONIER, J. M. Microbial fuel cell anodic microbial population dynamics during MFC start-up, **Biosensors and Bioelectronics**, Amsterdam, v. 92, p. 357-363, 2017.

PENG, X.; CHEN, S.; LIU, L.; ZENG, S.; LI, M. Modified stainless steel for high performance and stable anode in microbial fuel cells. **Electrochimica Acta**, Oxford, v. 194, p. 246-252, 2016.

PERTENCE JÚNIOR, A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

PERRY MURRAY, E.; TSAI, T.; BARNETT, S. A., A direct-methane fuel cell with a ceria-based anode. **Nature**, London, v. 400, p. 649-651, 1999.

POTTER, M. C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. **Containing Papers of a Biological Character**, London, v. 84, n. 571, p. 260-276, 1911.

PU, Z.; ZHANG, G.; HASSANPOUR, A.; ZHENG, D.; WANG, S.; LIAO, S.; CHEN, Z.; SUN, S., Regenerative fuel cells: Recent progress, challenges, perspectives and their applications for space energy system. **Applied Energy**, Oxford, v. 283, p. 2, 2021.

RAHIMNEJAD, M.; ADHAMI, A.; DARVARI, S.; ZIREPOUR, A.; OH, S. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v. 54, p. 745-756, 2015.

REN, H.; LEE, H.; ZHANG, J.; GARDNER, C. L.; CHAE, J. A quantitative extracellular electron transfer (EET) kinetics study of *Geobacter sulfurreducens* enriched microbial community reveals the transition of EET limiting step during biofilm growth. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 46, p. 3124-3134, 2021.

RISMANI-YAZDI, H; CARVER, S. M.; CHRISTY, A. D.; TUOVINEN, O. H., Cathodic limitations in microbial fuel cells: an overview. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 180, p. 683-694, 2008.

SABA, B.; CHRISTY, A. D.; YU, Z.; CO, A. C., Sustainable power generation from bacterio-algal microbial fuel cells (MFCs): an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 73, p. 75-84, 2017.

SANTORO, C.; ARBIZZANI, C.; ERABLE, B., Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review, **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 356, p. 225-244, 2017.

SEROV, O.; ARTYUSHKOVA, K.; ANDERSEN, N. I.; STARIHA, S.; ATANASSOV, P. Original Mechanochemical Synthesis of Non-Platinum Group Metals Oxygen Reduction Reaction Catalysts Assisted by Sacrificial Support Method. **Electrochimica Acta**, Oxford, v. 179, p. 154-160, 2015.

SEGUINE, D. PSoC® 1 – Selecting the Right ADC. **Application notes**. [S. l.]: Cypress, 2017.

SHOJAEI, B.; KHAZAEI, I. 1-D transient microbial fuel cell simulation considering biofilm growth and temperature variation. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 162, p. 106801, 2021.

SONAWANE, J. M.; ADELOJU, S. B.; GHOSH, P. C. Landfill leachate: A promising substrate for microbial fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 42, p. 23794-23798, 2017.

TACAS, A. C. J.; TSAI, P.; TAYO, L. L.; HSUEH, C.; SUN, S.; CHEN, B. Degradation and biotoxicity of azo dyes using indigenous bacteria-acclimated microbial fuel cells (MFCs). **Process Biochemistry**, London, v. 102, p. 59-71, 2021.

TAKEUCHI, Y.; KHAWDAS, W.; ASO, Y.; OHARA, H. Microbial fuel cells using *Cellulomonas* spp. with cellulose as fuel, **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 123, n. 3, p. 358-363, 2017.

THEODOSIOU, P.; GREENMAN, J.; IEROPOULOS, I. Towards monolithically printed MFCs: Development of a 3d-printable membrane electrode assembly (MEA). **International Journal of Hydrogen Energy**, London, v. 44, p. 4450-4462, 2019.

TICE, R. C.; KIM, Y. Influence of substrate concentration and feed frequency on ammonia inhibition in microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 271, p. 360-365, 2014.

VIDHYESWARI, D.; SURENDHAR, A.; BHUVANESHWARI, S. Enhanced performance of novel carbon nanotubes - sulfonated poly ether ketone (speek) composite proton exchange membrane in MFC application. **Chemosphere**, Oxford, v. 293, p. 133560, 2022.

WANG, H.; REN, Z.; PARK, J. Power electronic converters for microbial fuel cell energy extraction: effects of inductance, duty ratio, and switching frequency. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 220, p. 89-94, 2012.

WANG, H.; WU, Z.; PLASEIED, A.; JENKINS, P.; SIMPSON, L.; ENGTRAKUL, C.; REN, Z. Carbon nanotube modified air-cathodes for electricity production in microbial fuel cells, **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 196, 2011.

WANG, Z.; MAHADEVAN, G. D.; WU, Y.; ZHAO, F. Progress of air-breathing cathode in microbial fuel cells. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 356, p. 245-255, 2017.

WINFIELD, J.; CHAMBERS, L. D.; STINCHCOMBE, A.; ROSSITER, J.; IEROPOULOS, I. The power of glove: Soft microbial fuel cell for low-power electronics. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 249, p. 327-332, 2014.

WEN-WEI, L.; GUO-PING, S.; XIAN-WEI, L.; HAN-QING, Y. Recent advances in the separators for microbial fuel cells. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 102, p. 244-252, 2011.

XUAN, J.; WANG, H.; LEUNG, D. Y. C.; LEUNG, M. K. H.; XU, H.; ZHANG, L.; SHEN, Y. Theoretical Graetz–Damköhler modeling of an air-breathing microfluidic fuel cell. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 231, p. 1-5, 2013.

YANG, Y.; YE, D.; LI, J.; ZHU, X.; LIAO, Q.; ZHANG, B. Microfluidic microbial fuel cells: from membrane to membrane free. **Journal of Power Sources**, Amsterdam, v. 324, p. 113-125, 2016.

ZAFAR, H.; ISHAQ, S.; PELEATO, N.; ROBERTS, D. Meta-analysis of operational performance and response metrics of microbial fuel cells (MFCs) fed with complex food waste. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 315, p. 115152, 2022.

ZHANG, X.; LIANG, P.; SHI, J.; WEI, J.; HUANG, X. Using a glass fiber separator in a single-chamber air-cathode microbial fuel cell shortens start-up time and improves anode performance at ambient and mesophilic temperatures. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 130, p. 529–535, 2013.